

*120-річчя КПІ ім. І. Сікорського*  
*25-річчя кафедри телекомунікацій*

# **ДОСЯГНЕННЯ В ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЯХ 2019**

ADVANCED IN  
THE TELECOMMUNICATIONS 2019

Національна академія наук України,  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

*Присвячено 25-річчю кафедри телекомунікацій*

Монографія

# **ДОСЯГНЕННЯ В ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЯХ 2019**

кафедри телекомунікацій  
Інституту телекомунікаційних систем  
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Колективна монографія

За науковою редакцією  
Ільченка М.Ю.,  
Кравчука С.О.

Київ – 2019

iii

## Авторський колектив

*Авдеєнко Гліб Леонідович*

*Афанасьєва Ліана Олександрівна*

*Баранов Олександр Андрійович*

*Бірюков Микола Леонідович*

*Бунін Сергій Георгійович*

*Валуйський Станіслав Вікторович*

*Живков Олександр Петрович*

*Іванов Сергій Вікторович*

*Ільченко Михайло Юхимович*

*Кайденко Микола Миколайович*

*Капитик Сергій Володимирович*

*Кравчук Ірина Михайлівна*

*Кравчук Сергій Олександрович*

*Лисенко Олександр Іванович*

*Міночкін Дмитро Анатолійович*

*Наритник Теодор Миколайович*

*Нестеренко Микола Миколайович*

*Прищепя Тетяна Олексіївна*

*Романов Олександр Іванович*

*Романюк Антон Валерійович*

*Роскошний Дмитро Васильович*

*Рисцова Катерина Ігорівна*

*Остапов Олексій Анатолійович*

*Тріска Наталія Романівна*

*Трубаров Ігор Володимирович*

*Чуб Михайло Миколайович*

*Шевченко Ігор Іванович*

*Явіся Валерій Сергійович*

*Якорнов Євгеній Аркадійович*

УДК 621.39

**Досягнення в телекомунікаціях 2019** / за наук. ред. Ільченка М.Ю., Кравчука С.О.: монографія. – К.: Інститут обдарованої дитини НАПН України, 2019. – 336 с.

У монографії розглядаються науково-технічні аспекти побудови сучасних телекомунікаційних систем і мереж, які ґрунтуються на використанні сучасних технологій і в цілому забезпечують створення інформаційної інфраструктури суспільства. Монографія структурована по напрямам: освіта (запровадження сучасних технологій викладання в телекомунікаціях), системні та технологічні підходи та напрями розвитку (Інтернет-речей, віртуалізація телекомунікаційних систем, програмно-визначувані радіозасоби, застосування просторової обробки сигналів, синхронізація та розповсюдження часу), системи та мережі (системи загоризонтного зв'язку, критичні телекомунікації, сенсорні мережі, надширокосмутові радіосигнали та системи, терагерцові технології), пристрої та елементна база (волоконно-оптичні та лазерні датчики, фільтри як комірки метаматеріалів). При викладенні матеріалу використано оригінальні праці авторів, що викладають на кафедрі телекомунікацій ІТС КПІ ім. І. Сікорського.

Для фахівців у галузі інфокомунікацій та телекомунікацій, викладачів, аспірантів і студентів старших курсів інфокомунікаційного і телекомунікаційного профілів.

*Рекомендовано до друку вченою радою НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»  
(протокол № 10 від 04.11.2019 р.)  
та науково-технічною радою*

*Рецензенти:*

**Крючин А.А.**, член-кор. НАН України,  
**Уривський Л.О.**, професор, д.т.н.

**ISBN 978-617-7734-12-2**

© М.Ю. Ільченко, С.О. Кравчук, 2019

# ЗМІСТ

25 років становлення та успішного розвитку кафедри телекомунікацій .....	15
<i>Льченко М.Ю.</i>	
<b>Освіта</b>	
<b>Розділ 1.</b> Формування системної структури підготовки кадрів телекомунікаційного профілю.....	38
<i>Кравчук С.О., Кравчук І.М., Явіся В.С.</i>	
<b>Розділ 2.</b> Впровадження сучасних технологій та методики викладання в телекомунікаціях.....	56
<i>Остапов О.А., Чуб М.М., Шевченко І.І., Рисица К.І.</i>	
<b>Системні підходи та напрями розвитку</b>	
<b>Розділ 3.</b> Телекомунікації Інтернет-речей .....	70
<i>Баранов О.А.</i>	
<b>Розділ 4.</b> Еволюція технологій телекомунікаційних мереж .....	88
<i>Романов О.І., Нестеренко М.М.</i>	
<b>Технологічні підходи та напрями розвитку</b>	
<b>Розділ 5.</b> Використання необробленої навігаційної інформації в операційній системі Android .....	108
<i>Міночкін Д.А., Кравчук С.О.</i>	
<b>Розділ 6.</b> Програмно-визначувані радіосистеми в телекомунікаціях.....	134
<i>Кайденко М.М., Розкошний Д.В.</i>	
<b>Розділ 7.</b> Застосування просторової обробки сигналів за формою фазового фронту електромагнітної хвилі.....	145
<i>Якорнов Є.А., Авдєєнко Г. Л.</i>	
<b>Розділ 8.</b> Синхронізація та розповсюдження часу в телекомунікаційних системах та мережах.....	163
<i>Бірюков М.Л., Тріска Н.Р.</i>	
<b>Системи та мережі</b>	
<b>Розділ 9.</b> Системи загоризонтного зв'язку .....	182
<i>Льченко М.Ю., Кравчук С.О., Кайденко М.М.</i>	

<b>Розділ 10.</b> Телекомунікаційні сервіси для віддалених поселень – критичні телекомунікації.....	200
<i>Кравчук С.О., Афанасьєва Л.О., Кравчук І.М., Міночкін Д.А.</i>	
<b>Розділ 11.</b> Безпроводові сенсорні мережі із мобільними сенсорами...	220
<i>Лисенко О.І., Явіся В.С., Валуйський С.В., Прищепя Т.О., Романюк А.В.</i>	
<b>Розділ 12.</b> Надширокосмугові імпульсні радіосигнали та системи....	238
<i>Бунін С.Г., Трубаров І.В.</i>	
<b>Розділ 13.</b> Особливості розвитку супутникового зв'язку.....	256
<i>Ільченко М.Ю., Наритник Т.М., Капитик С.В.</i>	
<b>Розділ 14.</b> Терагерцові технології в телекомунікаційних системах....	278
<i>Авдєєнко Г.Л., Бунін С.Г., Наритник Т.М.</i>	
 <b>Пристрої та елементна база</b>	
<b>Розділ 15.</b> Волоконно-оптичні та лазерні датчики – гоніометри.....	300
<i>Іванов С.В.</i>	
<b>Розділ 16.</b> Фільтри НВЧ на базі структур з резонаторами в паралельних каналах як комірки метаматеріалів .....	318
<i>Ільченко М.Ю., Живков О.П.</i>	

# ДОСЯГНЕННЯ В ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЯХ 2019

National Academy of Sciences of Ukraine,  
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kiev  
Polytechnic Institute"

*Dedicated to the 25th anniversary of the Department of  
Telecommunications*

Monograph

# **ADVANCED IN THE TELECOMMUNICATIONS 2019**

Department of Telecommunications  
Institute of telecommunication systems  
Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute

Collective monograph

According to scientific editorship  
Ilchenko M.Yu.,  
Kravchuk S.O.

Kyiv – 2019

## List of authors

*Avdieienko H. L.*

*Afanasieva L.O.*

*Baranov O. A.*

*Biriukov N.L.*

*Bunin S. G.*

*Valuisnyi S.V.*

*Zhivkov O.P.*

*Ivanov S.V.*

*Ilchenko M. Yu.*

*Kaydenko M.M.*

*Kapshtyk S.V.*

*Kravchuk I. M.*

*Kravchuk S. O.*

*Lysenko O. I.*

*Minochkin D.A.*

*Narytnik T.M.*

*Nesterenko M.M.*

*Pryshchepa T.O.*

*Romanov O. I.*

*Romaniuk A.V.*

*Roskoshnyi D.V.*

*Rystsova K.I.*

*Ostapov O.A.*

*Triska N.R.*

*Trubarov I.V.*

*Chub M. M.*

*Shevchenko I. I.*

*Yavisya V.S.*

*Yakornov Ye.A.*

УДК 621.39

**Advanced** in the telecommunications 2019 / M. Yu. Ilchenko, S. O. Kravchuk, editors: monograph. – Kyiv: Instityde of Gifted Child of NAPS of Ukraine, 2019. – 336 p.  
ISBN ISBN 978-617-7734-12-2

The monograph deals with science and technology issues of the state-of-the art design of telecommunications systems (Electronic Communications Systems) for informatization in various areas and the creation of the society information infrastructure. The authors presented key information on telecommunication systems, their basic properties and architectural components, classification and trends. Consider the perspective systems from Space System to submarine-based, which determine the level of development of modern telecommunications infrastructure of the state. The book features the original research by the authors as well as overviews literature on current telecommunications developments.

The book should be of interest to telecommunications professionals, educators, doctoral and graduate students in the field of telecommunications.

# CONTENTS

25 years of formation and successful development the department of telecommunications.....	15
<b>Education</b>	
<b>Chapter 1.</b> Formation of system structure for personnel training of telecommunication profile.....	41
<i>Kravchuk S.O., Kravchuk I.M., Yavisya V.S.</i>	
<b>Chapter 2.</b> Introduction of modern teaching methods and technologies into telecommunications .....	59
<i>Ostapov O.A., Chub M.M., Shevchenko I.I., Rystsova K.I</i>	
<b>System approaches and directions of development</b>	
<b>Chapter 3.</b> Telecommunication of Internet of things .....	73
<i>Baranov O.A.</i>	
<b>Chapter 4.</b> Telecommunication network technologies Evolution .....	91
<i>Romanov O.I, Nesterenko M.M.</i>	
<b>Technological approaches and directions of development</b>	
<b>Chapter 5.</b> Use of non-processed navigation information in the Android operating system .....	111
<i>Minochkin D.A., Kravchuk S.O.</i>	
<b>Chapter 6.</b> Software defined radio in telecommunication systems.....	137
<i>Kaidenko M.M., Roskoshnyi D.V.</i>	
<b>Chapter 7.</b> Application of spatial signal processing by the form of the electromagnetic wave phase front .....	149
<i>Yakornov Ye.A., Avdieienko H. L.</i>	
<b>Chapter 8.</b> Time synchronization and distribution in telecommunication systems and networks .....	167
<i>Biriukov N.L., Triska N.R.</i>	
<b>Systems and networks</b>	
<b>Chapter 9.</b> Over-horizon systems of communications .....	187
<i>Ilchenko M.Y., Kravchuk S.O., Kaydenko M.M.</i>	
<b>Chapter 10.</b> Telecommunication services to very remote villages - critical Communications .....	207

<i>Kravchuk S.O., Afanasieva L.O., Kravchuk I.M., Minochkin D.A.</i>	
<b>Chapter 11.</b> Wireless sensor networks with mobile sensors .....	227
<i>Lysenko O.I., Yavisya V.S., Valuiskyi S.V., Pryshchepa T.O., Romaniuk A.V.</i>	
<b>Chapter 12.</b> Ultra-wideband pulsed radio signals and systems .....	245
<i>Bunin S.G., Trubarov I.V.</i>	
<b>Chapter 13.</b> Features for the development of satellite communications .....	263
<i>Ilchenko M.Y., Narytnyk T.N., Kapshtyk S.V.</i>	
<b>Chapter 14.</b> Terahertz technologies in telecommunication systems .....	287
<i>Avdeyenko G.L., Bunin S.G., Narytnik T.M.</i>	
 <b>Devices and elemental base</b>	
<b>Chapter 15.</b> Fiber-optic and laser sensors .....	309
<i>Ivanov S.V.</i>	
<b>Chapter 16.</b> Microwave filters based on structures with resonator in parallel channels as metamaterial cells.....	327
<i>Ilchenko M.Y., Zhivkov O.P.</i>	

ADVANCED IN  
THE TELECOMMUNICATIONS 2019



---

**25 РОКІВ СТАНОВЛЕННЯ ТА  
УСПІШНОГО РОЗВИТКУ  
КАФЕДРИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ**

Ільченко М.Ю.

---

**25 YEARS OF FORMATION AND  
SUCCESSFUL DEVELOPMENT THE  
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS**

Ilchenko M.Yu.

### 1.1. Витоки та етапи розвитку

На початку 90-х років уже в умовах незалежності України особливо відчутною стала проблема значного відставання нашої держави в сучасних засобах телекомунікацій. Рівень забезпеченості засобами зв'язку в нас відповідав американському середини 50-х років, японському і європейському – середини 60-х років. Інженерів-розробників систем зв'язку в СРСР готували лише заклади вищої освіти Росії. Відтак для нашої держави ця проблема набула особливого значення.

Обґрунтовану засновником кафедри пропозицію про доцільність створення нової кафедри в КПІ, започаткування підготовки фахівців за новою спеціальністю "Проектування телекомунікаційних пристроїв, систем та мереж" підтримали Президія Академії наук України, Міністерство зв'язку України, Міністерство освіти України, Державний комітет України з питань науки і технологій, особисто ректор М.З. Згуровський. Тож створення кафедри засобів телекомунікацій згідно з наказом від 11 травня 1993 р. № 1-83 стало логічним відгуком на гостру потребу держави в спеціалістах-розробниках для галузі телекомунікацій.

До становлення нової кафедри на професорські посади були запрошені відомі фахівці у сфері телекомунікацій із Київського військового інституту зв'язку, Інституту кібернетики ім. В.М. Глушкова, інших наукових установ. Стартовий штатний розпис нової кафедри включав 13 професорсько-викладацьких посад.

Навчання здійснювалось у тісному взаємозв'язку з науковими дослідженнями. З самого початку створення кафедри телекомунікацій наука зосереджена в НДІ телекомунікацій і стала базисом високої якості підготовки

фахівців і успішного виконання затребуваних життям наукових та інноваційних проектів. Без перебільшення можна стверджувати, що успіх освітньо-наукового проекту створення і розвитку кафедри телекомунікацій визначила наукова школа засновника кафедри. Для вчених кількох поколінь цієї школи професійне зростання відбувалося у контексті розвитку кафедри, її успішної навчальної та наукової діяльності (рис. 1).

Кафедрою були започатковані нові спеціальності "Проектування телекомунікаційних пристроїв, систем та мереж", "Технології і засоби телекомунікацій".

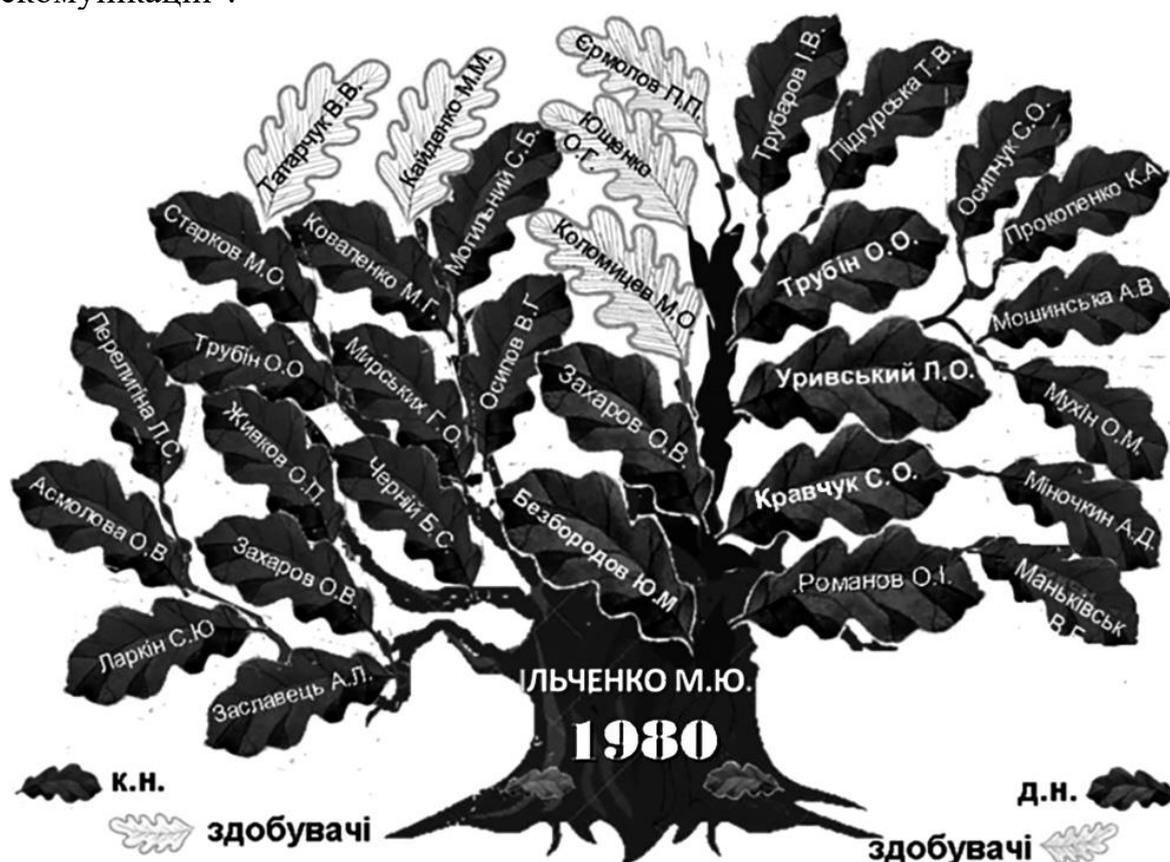


Рис. 1.

З 1998 р., коли Постановою Кабінету Міністрів України було затверджено новий перелік спеціальностей, кафедра засобів телекомунікацій, завершивши перший етап свого становлення та розвитку, перейшла до підготовки фахівців за двома спеціальностями: "Технології і засоби телекомунікацій" і "Телекомунікаційні системи та мережі". 10 березня 1999 р. відбулися урочистості за нагоди першого в Україні випуску фахівців – розробників засобів телекомунікацій.

Однією з передумов успішної діяльності як НДІ, так і кафедри засобів телекомунікацій стало вирішення проблем створення матеріально-технічної бази навчально-наукового комплексу. У 1995 р. завершено будівництво нинішнього навчального корпусу № 30. За кошти НДІ і кошти контрактної підготовки студентів у наступні роки цей корпус було укомплектовано необхідним

обладнанням для проведення навчального процесу, навчальні лабораторії отримали сучасні телекомунікаційні прилади.

На початок 2002 р. кафедра засобів телекомунікацій зросла кількісно та якісно, налічуючи в своїх рядах понад 40 викладачів, що забезпечували майже 60 навчальних дисциплін. Тому, враховуючи потреби держави в збільшенні кількості фахівців у галузі телекомунікацій, на пропозицію засновника кафедри Вчена рада університету і ректор М.З. Згуровський ухвалили рішення про організацію в НТУУ "КПІ" Навчально-наукового інституту телекомунікаційних систем (ІТС). Кафедра засобів телекомунікацій була виділена із факультету авіаційних і космічних систем, і з залученням її науково-педагогічного складу було створено нові кафедри телекомунікаційних систем (ТС) та інформаційно-телекомунікаційних мереж (ІТМ).

Науковою базою ІТС завжди був НДІ телекомунікацій, разом із яким дві зазначені кафедри утворили навчально-науковий комплекс "Інститут телекомунікаційних систем". Наказ ректора університету про створення з 1 лютого 2002 р. Інституту телекомунікаційних систем за № 1-6 було підписано 17 січня 2002 р. Презентація нового інституту відбулася 14 лютого 2002 р. у залі засідань Вченої ради університету за участі керівників університету, студентів і співробітників ІТС, почесних гостей від Національної комісії, що здійснює державне регулювання в сфері зв'язку та інформатизації, Державного комітету зв'язку та інформатизації, "Укрчастотнагляду", "Укртелекому", компанії "Укрсат" та інших організацій телекомунікаційного спрямування.

Викладачі кафедри ТК зробили значний внесок в організацію управління Інститутом телекомунікаційних систем. Заступниками директора ІТС успішно працювали доц. О.А. Вульпе, доц. А.С. Брагін, ст. викл. В.Я. Карнаух. Упродовж багатьох років навчально-виховний напрям ІТС очолює проф. Є.А. Якорнов. Кафедру ТС очолював спочатку проф. С.Г. Бунін, передавши пізніше керівництво нею проф. Л.О. Уривському. Кафедру ІТМ очолює проф. Л.С. Глоба.

## 1.2. Навчальна діяльність

За весь 25-річний період плідної діяльності кафедри телекомунікацій з 1993 р. та ІТС з 2002 р. підготовлено 1494 (658) бакалаври, 802 (493) спеціалісти і 508 (161) магістрів. Попит на випускників ІТС завжди перевищував пропозицію.

Після переходу до підготовки фахівців за новою спеціальністю 172 "Телекомунікації та радіотехніка" навчально-методична діяльність кафедр ІТС диференційована за відповідними спеціалізаціями кафедр:

- на кафедрі ТК: спочатку за двома: апаратно-програмні засоби електронних комунікацій та мобільні телекомунікації, а з 2019 року – за новою спеціалізацією Інженерія та програмування інфокомунікацій;
- на кафедрі ТС: –телекомунікаційні системи і мережі;
- на кафедрі ІТМ: –інформаційно-комунікаційні технології.

Переваги навчання на кафедрі телекомунікацій – це:

- багаторівнева підготовка фахівців (бакалавр, магістр, доктор філософії);

- широкий спектр курсів і напрямків;
- авторські курси кращих викладачів-практиків;
- тестування і сертифікація;
- більше 20 українських і закордонних компаній-партнерів;
- сучасне обладнання навчально-наукових аудиторій;

Кафедра телекомунікацій займає провідні позиції у рейтингу кафедр університету, зокрема, за рейтингами науково-педагогічних працівників, науково-інноваційної діяльності, індексом творчих досягнень студентів, активності міжнародної діяльності.

Після проходження навчання студенти успішно знаходять роботу в сфері інфотелекомунікацій. Наші випускники працюють на інженерних та управлінських посадах провідних підприємств, організацій та їх представництв: у сфері електроніки, телекомунікацій, програмного забезпечення і інформаційних технологій.

З 2017 р. розпочато підготовку докторів філософії в рамках 4-річних програм аспірантури. За попередні роки на спеціалізованій раді ІТС за спеціальностями телекомунікаційної галузі захищено 47 дисертацій, у тому числі 13 докторських і 34 кандидатські.

На кафедрі ТК створено 8 сучасних навчальних лабораторій. У 2011 р. кращою навчальною лабораторією КПП визнана лабораторія кафедри ТК 501 із супутникових телекомунікаційних технологій.

Протягом останніх років (починаючи з 2015 р.) кафедра ТК спільно з компанією "Інфопульс Україна" розпочали плідну співпрацю в сфері підготовки майбутніх спеціалістів у галузі інфокомунікацій. Доробками в цьому напрямку стали напрацювання матеріалів щодо: 1) тестування програмного забезпечення, а саме: оцінки якості програмного забезпечення, аналізу вимог до програмного забезпечення, тест дизайну; 2) сутності, ролі та методологічних основ бізнес аналізу, управління вимогами та командної роботи на кожному етапі життєвого циклу програмного забезпечення, віртуалізації телекомунікаційної сфери.

У результаті роботи між спеціалістами кафедри і представниками компанії було створено нові курси: "Програмна інженерія в телекомунікаціях", "Розробка та тестування програмного забезпечення в телекомунікаціях", "Основи бізнес-аналізу в телекомунікаціях", особливостями таких курсів стало визначення особливостей розробки програмного забезпечення в сфері телекомунікацій, а також необхідні навички роботи аналітика в телекомунікаційній сфері.

Крім того, між кафедрою ТК та "Інфопульс Україна" було закріплено в договорі про партнерство та співробітництво в напрямках участі студентів кафедри в розробленні проектів, пропозицій, ноу-хау в рамках науково-дослідних робіт компанії "Інфопульс Україна", а також забезпечення підтримкою студентів щодо участі студентів у практичній діяльності компанії.

Як приклад, на рис. 2 представлено проведення лабораторного заняття викладачами кафедри І. Шевченком та М. Чубом, які є провідними фахівцями "Інфопульс Україна", для студентів 2-го курсу кафедри ТК. Заняття відбувалося

на території Київського офісу компанії "Інфопульс Україна", де студенти повністю поринули у робочу атмосферу.

Важливу підтримку як навчального процесу, так і наукового супроводження кафедра має від співпраці з Українським державним центром радіочастот (УДЦР). Від досвідчених фахівців-практиків студенти кафедри мають можливість ознайомлення із роботою держпідприємства з впровадження в Україні новітніх технологій мобільного зв'язку, про структуру та можливості системи радіочастотного моніторингу, яка за рівнем оснащення сучасними комплексами відповідає кращим світовим зразкам. Під час перебування в УДЦР студенти переконуються, що робота фахівців відповідного напрямку є досить важливою в галузі та потребує глибоких теоретичних і практичних знань, професійних навичок (рис. 3).



**Рис. 2.** Лабораторне заняття в офісі компанії "Інфопульс"

За підтримки компаній lifecell та Ericsson в Україні на кафедрі створена сучасна лабораторія базової мережі оператора мобільного зв'язку, яка може використовуватись як для навчального процесу, так і для наукових досліджень. Обладнання лабораторії дає змогу студентам засвоювати навички роботи з сучасним телекомунікаційним обладнанням стільникових систем мобільного зв'язку, зокрема стандарту GSM, UMTS, LTE, а також з адміністрування операторського ІТ обладнання. В лабораторії є центр комутації мобільної мережі, контролер, базова станція та інше устаткування оператора мобільного зв'язку (рис. 4). За їх допомогою побудовано функціонуючий макет мережі мобільного оператора.



**Рис. 3.** Обладнання для мобільного моніторингу

**Рис. 4.** Комутаційне обладнання та проведення лабораторних досліджень студентів на ньому



Лабораторія мережних технологій кафедри ТК була створена на базі сучасного мережного обладнання, яке було поставлене компаніями IBM в Україні, "Астеліт" (LIFE) та випускниками кафедри телекомунікацій, що працюють у багатьох провідних компаніях телекомунікаційного профілю. Устаткування лабораторії використовується не тільки в процесі навчання студентів кафедри ТК, а й в ході проведення занять з підвищення кваліфікації фахівців телекомунікаційних компаній (рис. 5).



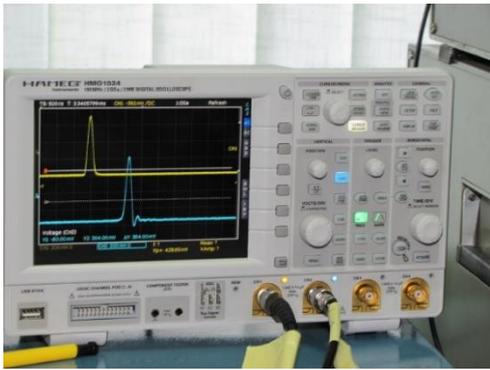
**Рис. 5.** Проведення занять зі студентами щодо управління корпоративною IP-мережею

**Рис. 6.** Магістр кафедри ТК О. Рибка (крайній зліва) та співробітники компанії IOT Ukraine на Cisco Forum Kyiv 2018



Спільно з компанією IOT Ukraine на кафедрі ТК створена лабораторія «Інтернет-речей», де студенти мають доступ до сучасних «хмарних» ІТ-технологій світового рівня. Також студенти можуть проектувати та виготовляти необхідні елементи для своїх розумних пристроїв, навчатися основам програмування, роботі з мікроконтролерами і сенсорами (рис. 6).

На кафедрі ТК працює науково-навчальна лабораторія Rohde&Schwarz (аудиторія 501 корпусу № 30), у складі якої наявні вимірювальних прилади серії HAMEG (рис. 7). Дана лабораторія була створена в результаті перемоги НТУУ "КПІ" у конкурсі на отримання сучасного вимірювального обладнання, проведеного українським представництвом Rohde & Schwarz для вищих навчальних закладів. Наразі вимірювальне обладнання HAMEG використовується фахівцями, аспірантами та студентами трьох підрозділів КПІ ім. Ігоря Сікорського: Інституту телекомунікаційних систем, радіотехнічного факультету та Фізико-технічного інституту.



**Рис. 7.** Деякі вимірювальні прилади серії HAMEG компанії Rohde&Schwarz

Спільно з компанією Vodafone на кафедрі ТК створена лабораторія стільникових систем мобільного зв'язку (рис. 8). Спеціалізовані системи телекомунікацій представляє ІТ бізнес аналітик компанії Netcracker С.В. Валуйський.

**Рис. 8.** Проведення занять зі студентами: керування обладнанням базової станції дистанційно з робочої комп'ютерної станції



### 1.3. Провідні викладачі кафедри

З огляду на ювілейний термін діяльності кафедри спочатку загадаємо видатних викладачів – ветеранів кафедри, які своєю працею впродовж багатьох років формували кращі засади та традиції високопрофесійної підготовки фахівців.

**Професор Щербина Леонід Петрович.** З самого початку створення кафедри у 1993–1999 роках брав активну участь в організації навчального процесу і цілком заслужено отримав вчене звання професора по кафедрі засобів телекомунікацій. Поставив ряд нових дисциплін, сам їх читав, а потім передав молодим викладачам. Одночасно проводив наукові дослідження в НДІ телекомунікацій. Займався організацією й спільним проведенням науково-дослідних робіт з науковими інститутами Міністерства оборони України. Ці роботи стосувалися створення сучасного комутаційного обладнання для відкритих і



закритих телекомунікаційних мереж. У ході цих робіт уперше в Україні були проведені дослідження основних інженерних аспектів морфологічних характеристик української мови.

**Професор Вінницький Владислав Петрович.** Видатна наукова постать, талановитий інженер, харизматичний та неординарний викладач з гарним почуттям гумору та суворими іспитами з неочікуваними поблажками – таким запам'ятався студентам і колегам по кафедрі Владислав Петрович Вінницький.



Хоча в доробку Владислава Петровича чимало праць, які успішно втілені в життя, його справжнім захопленням було викладання. На кафедрі засобів телекомунікацій Вінницький прийшов з часу її заснування, де на посаді професора сумлінно передавав свої знання молоді до кінця свого життя.

**Професор Зінченко Олександр Олексійович.** У 2008–2010 рр. уже як відомий український політик, заслужений журналіст України, академік Телевізійної академії України Олександр Олексійович Зінченко на посаді професора кафедри засобів телекомунікацій ІТС вів активну педагогічну роботу.



У стислі строки Олександр Олексійович підготував комплекс методичного та інформаційного забезпечення з дисципліни "Нормативна та правова база телекомунікацій". Багатий життєвий досвід, широкі знання, в тому числі й у сфері інформаційно-телекомунікаційних технологій, у поєднанні з педагогічною майстерністю дали йому змогу проводити навчальні заняття зі студентами телекомунікаційних спеціальностей на найвищому науковому та методичному рівні. На лекційних заняттях студенти змагалися за право сісти на перші ряди, що свідчить про велику повагу та любов до Вчителя з великої літери. Мудрість, тактовність, висока порядність та обов'язковість – ось далеко не повний перелік рис характеру, притаманних Олександрю Олексійовичу.

**Доцент Брагін Альберт Степанович.** Легендою за своїми морально-професіональними якостями був для студентів і випускників доцент кафедри телекомунікацій в 1994–2012 рр. Брагін Альберт Степанович. Особливістю методики викладання Альберта Степановича поряд з високою вимогливістю до студентів була можливість на контрольних заходах користуватися практично всіма навчальними матеріалами дисципліни. Але завдання були сформульовані так, що прямої відповіді в цих матеріалах не було й щоб здати, наприклад, іспит потрібно було добре знати предмет. Іншою важливою особливістю його роботи зі студентами був індивідуальний підхід і врахування особистих здібностей кожного студента. В цілому він прищеплював студентам навички самостійного мислення, що супроводжувалося іскрометним гумором і створювало атмосферу творчого розвитку особистості.



**Доцент Лебедєв Олег Миколайович.** У витоків кафедри засобів телекомунікацій також стояв к.т.н., доцент Лебедєв Олег Миколайович. Рівень викладання Олегом Миколайовичем цих дисциплін був настільки високим і одночасно простим, що студенти практично без підготовки йшли на контрольні випробування, а в деканаті завжди були впевнені – зі "Схемотехнікою" проблем у студентів не буде. В поставленому ним новому курсі для магістрів "Організація наукових досліджень та розробок у галузі телекомунікацій" Олег Миколайович застосував ефективну методичну новацію – тему курсової роботи для складання технічного завдання з НДР видавати такою, щоб вона збігалася з темою магістерської роботи студента. Його зауваження й побажання давали змогу магістрантам і їх керівникам напередодні захисту робіт більш чітко усвідомлювати їх суть і правильно формулювати основні положення, що виносилися на захист.



**Доцент Шонін Володимир Олександрович.** Інтелігентним, простим у спілкуванні і надзвичайно ерудованим у галузі інформатики та програмування запам'ятався колективу та студентам доцент кафедри телекомунікацій Володимир Олександрович Шонін. Його науковий рівень викладача та науковця завжди був на висоті. Прикладом для колег була його педантичність при складанні навчально-методичних матеріалів та обов'язковість самої роботи викладача як лектора та організатора навчального курсу чи дисципліни. Його таланти як ученого полягали в унікальній здатності творчо застосовувати свою всебічну підготовленість у сфері сучасного програмування до вирішення проблемних питань, що виникали в процесі виконання завдань науково-дослідних робіт.



**Професор Ліпатов Анатолій Олексійович.** Виховав плеяду талановитих учнів. Ерудований принциповий, людина великої працездатності і доброзичливості у поєднанні з високою вимогливістю до себе, колег і студентів, у яких він користувався заслуженою повагою і авторитетом. А.О. Ліпатов став дивовижним прикладом творчого довголіття.



**Професор Бунін Сергій Георгійович.** Долучився до викладацької діяльності вже маючи оригінальні науково-технічні розробки в Інституті кібернетики, очолюваному академіком В.М. Глушковим. Серед них високошвидкісні мережі передачі даних, системи множинного доступу до каналів зв'язку, супутникові інформаційно-обчислювальні мережі, а також унікальний досвід чемпіона світу та Європи з радіоспорту. Оригінальними були книги Сергія Георгійовича з питань пакетної комутації та радіомереж із надширококустовими сигналами. Все це сприяло якісній підготовці студентів і аспірантів, з якими він успішно працював, передаючи їм свої професійні знання.



Сьогодні високу якість навчання забезпечують професори, доценти і викладачі кафедри різних поколінь, у тому числі і молоді педагоги, які успішно здійснили своє навчання в ІТС, пройшли шлях від студентів до аспірантів, кандидатів наук, доцентів.

Серед них низка провідних лекторів кафедри, які професійно викладають навчальні дисципліни, що ґрунтуються на результатах наукових, у тому числі власних досліджень. Вивчення теоретико-правових та прикладних проблем розробки і впровадження новітніх інформаційно-телекомунікаційних технологій (Інтернет-речей, хмарних технологій, великих даних тощо), інформаційних продуктів і послуг, проблем гармонізації та імплементації провадиться на кафедрі ТК проф. О.А. Барановим, співробітником НДІ інформатики і права НАПрН України.

Професор, доктор технічних наук С.О. Кравчук викладає цілу низку дисциплін – "Основи теорії систем мобільного зв'язку", "Телекомунікаційні безпроводові мережі", "Інтернет речей та системи міжмашинної взаємодії", «Протидія хакерським атакам в інфокомунікаціях». Професор, доктор технічних наук О.І. Лисенко навчає студентів з дисципліни "Прикладні аспекти системного аналізу в телекомунікаціях та радіотехніці", "Математичні методи наукових досліджень" та ін. Випускник кафедри телекомунікацій, доцент, кандидат технічних наук Д.А. Міночкін читає "Імітаційне моделювання", "Програмування мобільних пристроїв і мережних застосувань" та ін. Провідний фахівець Національного центру управління та випробування космічних засобів кандидат технічних наук С.В. Капштик за сумісництвом викладає дисципліни "Радіорелейні та супутникові системи". Провідний фахівець компанії "Інфопульс Україна" І.І. Шевченко вдало використовує свій практичний досвід роботи при викладанні дисципліни "Програмна інженерія і інфокомунікаціях". Повний перелік викладачів кафедри і дисциплін, які вони викладають, наведені на сайті кафедри <https://tk-its.kpi.ua/>.

Співробітники компанії Vodafone Н.Р. Тріска та В.Б. Маньківський поглиблюють професійні знання студентів у напрямках проектування систем та мереж, особливостей побудови мереж мобільних операторів.

Цікавими є відгуки сьогоднішніх студентів щодо якості навчального процесу. Ось лише кілька прикладів таких відгуків: *"лекції крутецькі, подача матеріалу супер, відношення адекватне"*, *"сучасний підхід, вміння доносити складну інформацію на простих прикладах"*, *"те, що курс читають молоді прогресивні люди, це безсумнівний плюс"* та ін.

Провідними викладачами кафедри підготовлено та опубліковано понад 50 монографій, навчальних посібників і підручників, використання яких також сприяє високій якості підготовки фахівців (див. перелік далі).

## 1.4. Наукова діяльність

Упродовж понад 40 років безперервної особистої участі засновника кафедри у процесі підготовки та атестації наукових кадрів в якості голови спеціалізованих

вчених рад було підготовлено майже 100 вчених, половина з яких захищена на спеціалізованій вченій раді ІТС, у тому числі доктори наук Ю.М. Безбородов, О.В. Захаров, С.О. Кравчук, О.І. Романов, Л.О. Уривський, О.О. Трубін.

Основними напрямками і здобутками наукової школи є:

– фундаментальні наукові дослідження з виявлення, математичного моделювання та систематизації закономірностей взаємодії з електромагнітними полями надвисоких частот феритових і діелектричних елементів, які розміщені в різних хвилевідних системах і мають резонансний характер зазначеної взаємодії. В підсумку – десятки оригінальних математичних формул, які в термінах коефіцієнтів зв'язку систематизують виявлені закономірності і є базисом для проектування і створення нового класу твердотільних коливальних систем для радіоелектроніки і телекомунікацій;

– прикладні дослідження щодо створення нового покоління мініатюрних твердотільних пристроїв, до складу яких поряд з резонансними елементами також активні напівпровідникові прилади. В підсумку створені мікрохвильові інформаційні системи радіорозвідки та супутникового зв'язку, в тому числі в світі діють сотні мільйонів конверторів параболічних антен прийому супутникового телебачення, до складу яких входять діелектричні резонатори;

– системні розробки мікрохвильових інформаційно-телекомунікаційних систем широкосмугового безпроводового доступу, в тому числі терагерцового діапазону, засобів обчислювальної техніки, супутникових технологій, а також організація участі науковців школи у виконанні низки комплексних проектів загальнодержавного значення, що реалізуються іншими підрозділами університету, зокрема створення і впровадження безпілотних авіаційних комплексів, наносупутників, систем спеціального зв'язку тощо;

– дослідження з історії науки і техніки як необхідної складової формування світогляду фахівців технічних спеціальностей. У підсумку – вивчено діяльність понад 30 вітчизняних учених – першопрохідців у різних галузях науково-технічної творчості, життєвий та науковий шлях яких пов'язаний з Україною, що сприяє формуванню цілісної історичної картини розвитку науки і техніки, в тому числі дослідження історичного розвитку телекомунікацій.

Ключовими результатами за окремими науковими напрямками провідних учених кафедри телекомунікацій сьогодні є такі:

**Нові безпроводові телекомунікаційні системи (д.т.н., проф. С.О. Кравчук):**

- розроблено науково-технічні засади створення та функціонування безпроводових систем широкосмугового доступу (СШР) з підтримкою мобільності та їх інтеграції у високошвидкісні багаторівневі всепроникні інформаційно-телекомунікаційні мережі, створення нового покоління програмно-визначуваних телекомунікаційних радіосистем, які покликані створити технічну базу для реалізації і впровадження телекомунікаційних безпроводових систем 4 і 5-го поколінь;



- засновано вітчизняну теорію телекомунікаційних систем міліметрового діапазону, принципів створення наномереж, методів реалізації програмно-апаратних комплексів телекомунікацій, методів передачі обслуговування і архітектурних рішень у стільникових системах мобільного зв'язку, цифрових радіорелейних систем, включаючи трафік загоризонтного зв'язку, та комбінованих інфокомунікаційних систем на базі висотних самоорганізуючих аероплатформ (безпілотних апаратів та дронів);
- запропоновані методи підвищення пропускної здатності СШР базуються на математичних моделях, процедурних, структурних і системних рішеннях, отриманих з урахуванням впливу на характеристики системи змінного у часі радіоканалу із завмираннями та методів його покращення (просторово-часове мультиплексування, кооперативна ретрансляція, когнітивне радіо та ін.).

**Моделі і методи управління мережами SDN (д.т.н., проф. О.І. Романов).** Досліджуються особливості побудови мереж SDN (Software – Defined – Networking), зокрема:

- аналіз існуючих рекомендацій щодо побудови SDN;
- багаторівнева архітектура мережі;
- принципи побудови основних елементів мережі;
- умови функціонування і завдання управління в мережах SDN;
- віртуалізація ресурсів у мережах SDN;
- фізичні та програмні моделі мереж SDN.



**Безпроводові сенсорні мережі із самоорганізацією для моніторингу параметрів навколишнього середовища (д.т.н., проф. О.І. Лисенко).** Розвинуто метод енергоощадної агрегації даних у безпроводовій сенсорній мережі з мобільними сенсорами та телекомунікаційними аероплатформами завдяки ідентифікації та виключенню дублюючої інформації, що дає змогу на 5–20 % подовжити час активного функціонування мережі.



Розроблено інтелектуальний метод управління безпроводовою сенсорною мережею з мобільними сенсорами та телекомунікаційними аероплатформами, завдяки застосуванню методів слабкого штучного інтелекту для прогнозування властивостей мережі в нестабільних умовах функціонування, що дає можливість керувати динамічною топологією мережі в реальному часі.

**Терагерцові технології в телекомунікація (к.т.н., проф. Т.М. Наритник).** Сьогодні актуальною задачею є побудова високошвидкісних мереж мобільного зв'язку четвертого (4G) та п'ятого (5G) поколінь з використанням телекомунікаційних систем фіксованого радіозв'язку терагерцового діапазону та перехід на малі стільники (мікро-, піко- і фемтостільники), які являють собою базові станції з обмеженим радіусом дії (близько 10–100 м).

Маючи невелику дальність передачі, ці малі стільники дають змогу задіяти технологію багаторазового використання одних і тих самих частот для більш ефективного витрачання доступного радіочастотного ресурсу. Системи малих



стілників, які також називаються гетерогенними мережами, або HetNets, з часом можуть стати основою стільникового зв'язку п'ятого покоління. Означена проблема дала імпульс до розробки нового покоління малогабаритних безпроводових телекомунікаційних систем, що використовують неліцензовані терагерцові частотні діапазони ( $>100$  ГГц).

**Мікрохвильові фільтри для засобів телекомунікацій (д.т.н., с.н.с. О.В. Захаров).** Основні результати:

- відкриття ефекту електромагнітної взаємодії полоскових резонаторів у гребінчастих ( $\lambda/4$ ) і решітчастих ( $\lambda/2$ ) структурах, що започаткувало новий напрям побудови НВЧ-фільтрів;
- вивчено характер впливу форми полоскових резонаторів на коефіцієнти електромагнітного зв'язку на основній та вищих резонансних частотах, що дало змогу реалізувати новий метод придушення паразитних смуг пропускання;
- встановлено унікальну властивість несиметричних резонаторів. При цьому створені фільтри зі знаками коефіцієнтів зв'язку, що чергуються, та двома полюсами загасання;
- досліджено закономірності управління переміщенням полюсів загасання і обґрунтовано побудову полоскових фільтрів з еліптичними характеристиками;
- виявлено ефект переходу коефіцієнта зв'язку через нуль і започатковано новий клас немінимальнофазових фільтрів з дворівневим розміщенням резонаторів.



Упродовж багатьох років діяльності д.т.н., проф. С.Г. Буніна на кафедрі і в НДІ телекомунікацій було започатковано та результативно розвинуто напрям **Імпульсні надширокосмугові сигнали (I-UWB) для систем телекомунікацій.** Порівняно з традиційно використовуваними гармонічними сигналами I-UWB мають низку переваг:

- більша пропускна здатність каналів зв'язку;
- значно менша потужність для роботи терміналів;
- унікально висока проникна здатність;
- сигнали важко виявляти, що забезпечує несанкціонований доступ до інформації, що передається;
- можливість високоточного виявлення локалізації терміналів (сантиметри при відстанях у кілометри);
- прийомопередавачі можуть бути створені в мініатюрних розмірах.

З 2006 р. за ініціативи кафедри телекомунікацій в ІТС започатковано проведення щорічних науково-технічних конференцій "Проблеми телекомунікацій", присвячених Дню науки в Україні і Всесвітньому дню телекомунікацій.

Науковці кафедри з 1993 року активно брали участь у щорічній міжнародній конференції "НВЧ техніка і телекомунікаційні технології" – КриМіКо, праці якої

з 2004 р. індексувались у міжнародній наукометричній базі Scopus, що сприяло цитуванню наших публікацій іншими вченими.

Нова міжнародна науково-технічна конференція з інформаційно-телекомунікаційних технологій та радіоелектроніки "УкрМіКо" з 2016 року заповнила нішу на материковій частині України, яку до анексії Криму 25 років займала конференція "КриМіКо", співорганізатором якої понад 20 років був НДІ телекомунікацій. Проект "УкрМіКо" здійснено спільно з Відділенням інформатики НАН України під егідою IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). "УкрМіКо" отримала статус базової конференції Наукової ради МОН України, на якій розглядаються результати держбюджетних наукових тем університетів України.

## 1.5. Участь учених кафедри у системних практичних розробках

Державною премією України в галузі науки і техніки в 2004 р. відзначено чотирьох членів кафедри (С.Г. Бунін, М.Ю. Ільченко, С.О. Кравчук, В.О. Сизранов) за створення і практичне впровадження перших в Україні інформаційно-телекомунікаційних систем з використанням мікрохвильових технологій і засобів обчислювальної техніки (рис. 9).

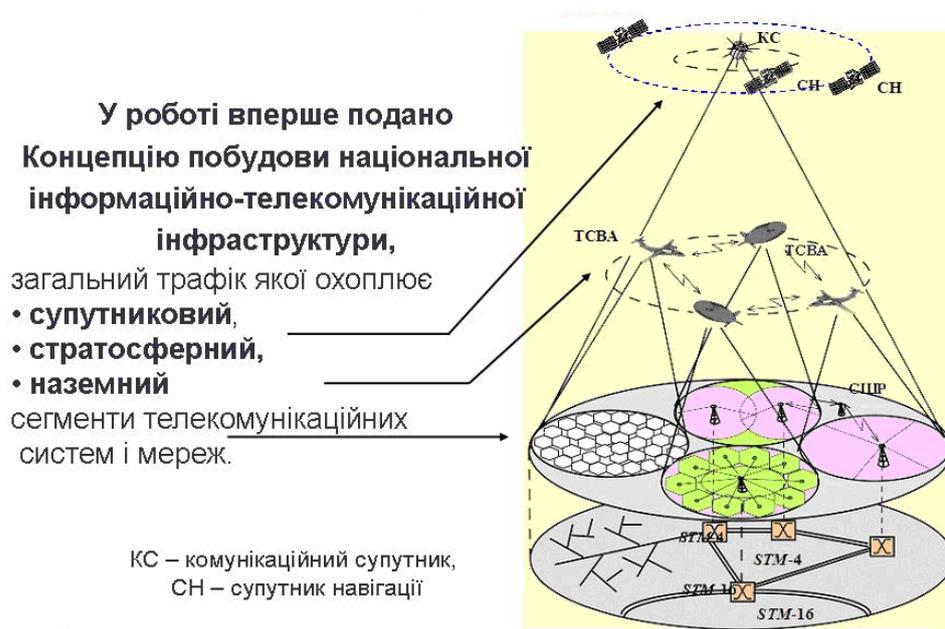


Рис. 9.

За участі викладачів кафедри М.М. Кайденка та Ю.В. Івлєва виконано відзначену в 2014 р. Державною премією України в галузі науки і техніки роботу "Технологічні організаційні та регуляторні засади побудови телекомунікаційних мереж наступних поколінь".

У відгуку на цю роботу Генеральний секретар Міжнародного союзу електрозв'язку доктор Хамадун Туре зокрема зазначив: "*...Основные положения работы, широко применённые на практике и получившие международное признание, позволяють решить важную научно-техническую проблему укрепления доверия и безопасности с использованием ИКТ. Учитывая вышеизложенное, считаю, что по своему уровню представленная работа заслуживает присуждения Государственной премии Украины в области науки и техники 2014 года*".



Доктор Хамадун Туре – Генеральний секретар МСЕ

Під керівництвом головного конструктора ДКР "Ситуація-1" М.Ю. Ільченка фахівцями університету було виконано і наказом міністра оборони України від 05.04.2011 р. № 185 було прийнято на озброєння Збройних Сил України та впроваджено програмно-технічні комплекси, комплекси засобів зв'язку стаціонарних телекомунікаційних вузлів та терміналів відеоконференцзв'язку автоматизованої системи управління повсякденною діяльністю Збройних Сил України "Дніпро" (рис. 10).



Рис. 10.

**Портативна тропосферна радіорелейна станція діапазону 4,4...5,0 ГГц. (С.О. Кравчук, М.М. Кайденко).** Використання технологій програмно-визначуваних радіосистем і системи на кристалі, вбудованої операційної системи на базі Linux дало змогу не тільки створити сучасне обладнання, а й забезпечити можливість модернізації станцій завдяки оперативному оновленню програмного забезпечення. Реалізовано принципово новий приймально-передавальний пристрій, виконаний у моноблочному варіанті з використанням транзисторних підсилювачів потужності. Розробка є затребуваною на ринку систем загоризонтного зв'язку.

**Термінал супутникового зв'язку для експлуатації у складних кліматичних та метеорологічних умовах (М.Ю. Ільченко, І.В. Трубаров, С.В. Капштик).** За результатами роботи здійснено аналітичні розрахунки енергетичного бюджету радіоліній "Земля–супутник" і "супутник–Земля"

системи супутникового зв'язку для випадку розміщення розроблюваного VSAT-терміналу супутникового зв'язку на границі зони обслуговування вибраного геостационарного супутника, насамперед для точок його географічного розташування, розміщених поблизу полюсів земної кулі. Сформовано технічні вимоги до компонентів розроблюваного VSAT-терміналу супутникового зв'язку (вимоги до антенно-фідерного пристрою, опорно-поворотного пристрою, опромінювача антени, кабельної лінії, термінального обладнання тощо).

Згідно з державним замовленням практично створено сучасну конкурентоспроможну систему зв'язку антарктичної станції України "Академік Вернадський" в Антарктиді (рис. 11).

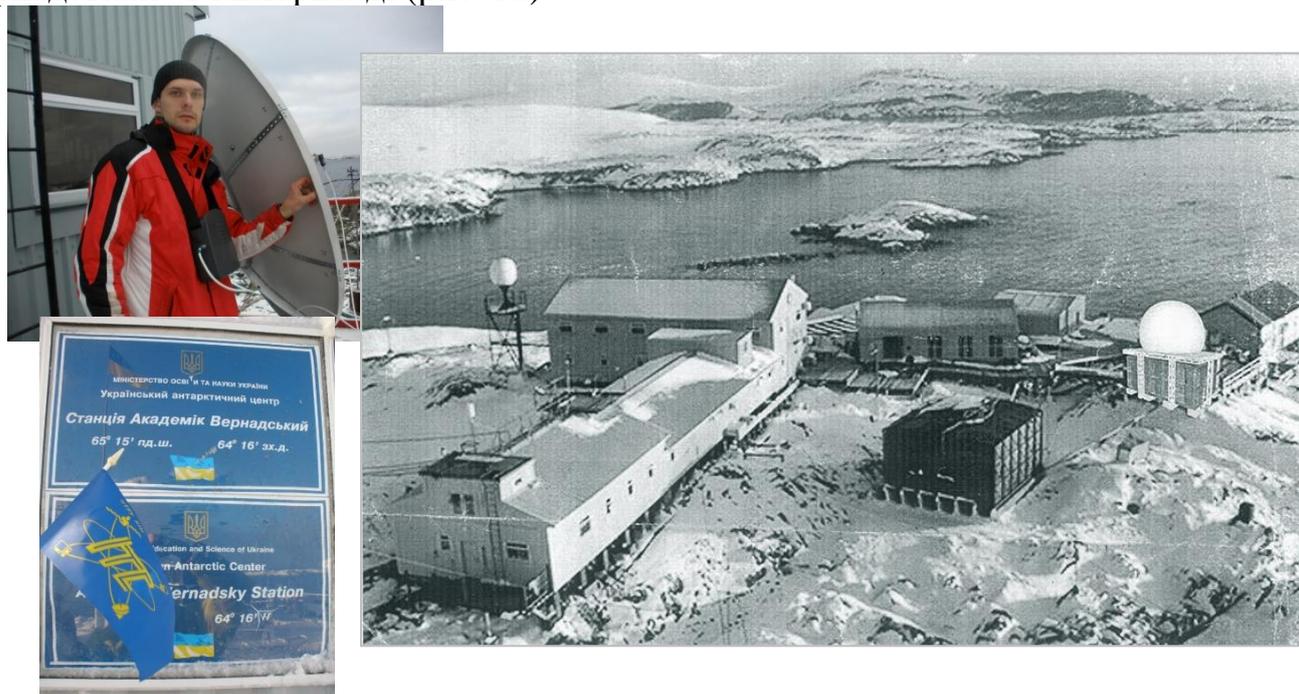


Рис. 11.



Рис. 12.

Аспірантом кафедри ТК Назаром Бендасюком згідно з реалізацією Космічної програми КПІ створено Центр управління наносупутником – UT4UZH, що є

розвитком університетського проекту створення та супровід наносупутників (рис. 12).

У 2012 р. в рамках наукової роботи "Науковий супровід створення та міжнародна координація системи зв'язку з використанням вітчизняного супутника на геостаціонарній орбіті", виконаної на замовлення ДП "Укркосмос" (М.О. Коломицев, С.В. Капштик), отримані науково-технічні результати, які:

- прискорили отримання частотно-орбітального ресурсу для супутника "Либідь";
- дали експертну оцінку технічним рішенням щодо бортового ретранслятора;
- дали змогу розрахувати оптимальні параметри супутникових мереж;
- оптимізували режими роботи ЛБХ кожного транспондера.

Здійснено науково-технічний супровід та експертизу національної системи супутникового зв'язку "ЛИБІДЬ" (рис. 13).

За програмою Європейського Союзу "Горизонт-2020" виконано проект "Ukraine" "Поширення в Україні супутникових технологій, які базуються на використанні європейської системи EGNOS" (І.В. Трубаров, Г.Л. Авдєєнко).

У рамках проекту важливими є пристрій приймачів "Ovinto SAT M2M" отримання інформації про стан вантажу, що перевозиться. «Ноу-хау» КІІ дало змогу зменшити енергоспоживання приймачів, підвищити точність визначення координат навігаційного модуля, збільшити тривалість сеансу зв'язку із супутником, отримання додаткової інформації про вантаж.



Рис. 13.

## 1.6. Партнери кафедри та НДІ телекомунікацій

Відомства, підприємства, установи – замовники наукових досліджень: Міністерство освіти і науки України, Міністерство оборони України, ДК "Укроборонпром", Державне космічне агентство України, Національний антарктичний центр, Відкрите акціонерне товариство "Меридіан" ім. С.П. Корольова та ін.

Установами НАН України, з якими здійснюється взаємодія у науковій сфері є:

- Інститут кібернетики імені В.М. Глушкова (напрями взаємодії: виконання роботи, відзначеної Державною премією України 2004 р., членство в редколегіях журналів "Кібернетика і системний аналіз" і "Information and Telecommunication Sciences", спільне проведення конференцій "УкрМіКо" та ін.);

- Інститут прикладного системного аналізу (спільні творчі колективи з виконання наукових тем);

- Інститут телекомунікацій та глобального інформаційного простору (спільні творчі колективи з виконання комплексних тем);

- Інститут космічних досліджень (спільні творчі колективи з виконання наукових проектів та ін.).

Кафедра ТК взаємодіє з низкою телекомунікаційних компаній:



Конкретні приклади взаємодії є такі.

**ТОВ "Астеліт" (lifecell).** У 2015 р. головний виконавчий директор ТОВ "Астеліт" Ердал Яйла запропонував допомогу в організації брендової лабораторії своєї компанії з сучасним телекомунікаційним обладнанням.

Відкриття брендової телеком-лабораторії, створеної за підтримки компанії "**Ericsson Україна**", відбулося у 2016 р. В наступні роки модернізація лабораторії стосувалася комплектації новітнім телекомунікаційним обладнанням.

На замовлення компаній **МТС** до 25 річчя мобільного зв'язку в Україні виконано проект "Карта історії розвитку технологій телекомунікацій". Завданням проекту було створення карти історії розвитку технологій телекомунікацій, яка представлена просто, яскраво, презентабельно і змістовно.

12 жовтня 2017 р. КПІ ім. Ігоря Сікорського уклав Меморандум про співпрацю з компанією "IoT Україна" (інтернет речей). Лабораторія кафедри телекомунікацій стала першою з низки лабораторій, що їх компанія планує створити в українських закладах вищої освіти.

## 1.7. Відзначення колективу кафедри

**13 викладачам** кафедри телекомунікацій і науковцям НДІ телекомунікацій присуджено Державні премії в галузі науки і техніки СРСР, УРСР та України.



Почесного звання "Заслужений діяч науки і техніки України" удостоєно М.Ю. Ільченка, професора О.І. Лисенка, премією НАН України ім. С.О. Лебедева нагороджено М.Ю. Ільченка і С.Г. Буніна, премією НАН України ім. В.М. Глушкова нагороджені М.Ю. Ільченко, С.О. Кравчук.

Звання "Почесний зв'язківець України" отримали М.Ю. Ільченко та С.О. Кравчук. Спеціальними відзнаками і Грамотами Держспецзв'язку нагороджені М.Ю. Ільченко, С.О. Кравчук, А.О. Ліпатов, Г.Т. Левченко. Почесними Грамотами Солом'янської РДА відзначені М.О. Коломицев, О.А. Вульпе, Є.А. Якорнов. Почесні звання "Заслужений професор НТУУ "КПІ" отримали М.Ю. Ільченко, А.О. Ліпатов, а "Заслужений науковець НТУУ "КПІ" – С.Г. Бунін і Т.М. Наритник, який став також "Заслуженим винахідником КПІ ім. Ігоря Сікорського". Почесними грамотами Вченої ради НТУУ "КПІ" та ІТС відзначені А.С. Брагін, О.М. Лебедев, В.С. Слюсар, Г.Л. Авдеєнко, О.І. Лисенко, Т.О. Прищеп, В.М. Петрова, О.В. Мазуренко, М.М. Кайденко, Ю.В. Івлєв та ін. Подяка за плідну діяльність з нагоди ювілею отримали понад 30 членів кафедри.

За прикладом викладачів студенти кафедри щорічно отримують відзнаки у загальнодержавних конкурсах і змаганнях. Так за підсумками Всеукраїнських олімпіад за напрямками "Телекомунікації" і "Радіотехніка" відзначено 7 студентів, серед яких Олег Кулик (гр. ТЗ-11) два роки поспіль займав перші місця. За підсумками Всеукраїнських конкурсів студентських наукових робіт відзначено 9 студентів кафедри. В 2015 р. сертифікат переможця конкурсу

інноваційних ідей у рамках проекту Європейського Союзу "UKRAINE" за програмою "Горизонт 2020" перемогу здобув наш студент Богдан Довгань. Він отримав також приз iPad Air Gold і право на участь у науковій конференції в Нідерландах.

За підсумками конкурсів проектів Всеукраїнської програми МТС "Професіонали майбутнього" відзначено 8 студентів кафедри.

Випускники кафедри Олександр Шелковников та Дмитро Бондар закінчили аспірантуру Лондонського університету і отримали дипломи докторів філософії з безпроводного зв'язку. Вчені ступені кандидатів наук отримали 6 випускників кафедр.

У своєму вітанні колективу кафедри з нагоди 25-річчя ректор КПІ ім. Ігоря Сікорського академік НАН України **М.З. Згуровський** зазначив:

"За роки плідної діяльності кафедри телекомунікацій та ІТС вийшли на лідерські позиції в університеті, зокрема, за рейтингами науково-педагогічних працівників, наукової та інноваційної діяльності, індексом творчих досягнень студентів, активності міжнародної співпраці та продовжує свій подальший розвиток на засадах дослідницького закладу.



Щиро вітаю всіх викладачів, працівників і студентів з ювілеєм. Натхнення Вам, щастя та подальших успіхів у Вашій благородній справі!"

З нагоди 25-річчя кафедри телекомунікацій отримані вітання від Державної служби спеціального зв'язку та захисту інформації України (О.М. Чаузов), Українського державного центру радіочастот (В.І. Корсун), Військового інституту телекомунікацій та інформатизації (Є.О. Степаненко), Інституту спецзв'язку та захисту інформації (О.В. Пучков). Ювілейному засіданні кафедри зі словами вдячності та з побажаннями подальших успіхів виступили наші колеги професори О.А. Баранов, А.В. Доровських, Л.О. Уривський, а також випускник кафедри телекомунікацій, керівник департаменту стратегії та розвитку нових напрямів бізнесу компанії lifecell Андрій Лебедєв, заступник директора Київської малої академії наук Євген Куліш, представник ПАТ "Укртелеком" Віктор Каток, представники компанії "Інфопульс України" Марина Тірту та Ганна Пірогова, випускники кафедри Ярослав Боцман, Олександр Краштан та Володимир Маньківський, представники органів студентського самоврядування, студентка кафедри телекомунікацій із В'єтнаму **Донг Тхі Тхо**, яка в своєму виступі, зокрема сказала: "В Україні я вже близько п'яти років – я вчуся на п'ятому курсі на цій кафедрі, і моє навчання скоро завершується. Я дякую усім викладачам, які завжди підтримували і допомагали. І бажаю друзям вдалої кар'єри. За цей час у нас було багато успішних звершень, тож я бажаю, щоб в ІТС було ще більше успішних студентів та викладачів, щоб Інститут далі розвивався і процвітав. Вітаю Вас і дякую Вам!"



## 1.8. Післямова

На підставі чвертьвікового періоду становлення і розвитку кафедри телекомунікацій успіх подальших досягнень і звитяг ґрунтуватиметься на динамічних змінах змісту професійної підготовки наших фахівців згідно з потребами ІТ-індустрії України. Саме синергія інформаційних та телекомунікаційних технологій надає сукупність нових можливостей зі створення та наповнення інформаційних ресурсів та якісного передавання інформації телекомунікаційними засобами в локальному та глобальному масштабах.

Орієнтація сучасної державної політики на цифрову трансформацію України ґрунтується на застосуванні інформаційних і телекомунікаційних технологій, сукупність яких формує нову галузь ІТ- та телекому. Неймовірно широкий перелік майбутніх реальних проєктів цієї галузі, розмаїття послуг інтернету речей визначатиме масштаби потреби підготовки фахівців нашою кафедрою.

Ми маємо йти на **зближення з компаніями ІТ-індустрії** України, які бачать свою перспективу в розширенні використання телекомунікаційних технологій. Серед них свою зацікавленість до співпраці з нами останнім часом проявимо такі компанії як "Інфопульс Україна", "Глобал Лоджик", "Інтернет-речей Україна", "Неткрекер" та ін. Наприклад, компанія "Глобал Лоджик" пропонує сучасний університетський проєкт з метою збільшення університетської програми з вимогами ІТ-індустрії, підтримки талановитих студентів і активних викладачів тобто здійснення реальних інвестицій у вищу технічну освіту України.

Зміст співпраці можуть визначати: спільні проєкти, спільно підготовлені навчальні курси, навчальні програми для викладачів, участь фахівців компанії в університетських заходах, конференціях, хакатонах, олімпіадах тощо. Важливою може бути інфраструктурна підтримка кафедр. В рамках спільних проєктів здійснюватиметься обопільний обмін знаннями, студенти отримуватимуть досвід роботи з виконанням проєктів, викладачі здобудуть досвід управління проєктними командами.

Масштаби і зміст нашої співпраці з компанією "Інфопульс Україна" мають перспективу до розширення і наповнення новими знаннями відповідно до тенденцій розвитку інфокомунікацій.

Важливим для нас є поширення здобутого в КПІ впродовж останніх років досвіду **за моделлю дуальної освіти**, коли робота і навчання здійснюються одночасно, а за якість освіти студента дбає не лише університет, а й підприємство-роботодавець. При цьому студенти отримують першу роботу, а українські підприємства – висококваліфікованих інженерних кадрів, знання яких гарантовано відповідають вимогам роботодавців. Останнє забезпечується тим, що студенти на фінішному етапі підготовки працюють на підприємстві в реальному середовищі підприємства-роботодавця, яке за якісну працю надає гідну оплату.

## 1.9. Перелік монографій і підручників кафедри телекомунікацій за період з 1993 по 2018 рік

		<b>1993</b>
1	Монографія	Ильченко М.Е., Трубин А.А. Теория диэлектрических резонаторов. – Киев: Либідь, 1993. – 216 с. : ил., табл. – ISBN 5-335-00237-6.
		<b>1995</b>
2	Навчальний посібник	Бунин С.Г., Винницкий В.П., Доровских А.В., Ильченко М.Ю., Лебедев О.М., Липатов А.А., Урывский Л.А., Шелковников Б.Н., Щербина Л.П. Проектирование телекоммуникационных устройств систем и сетей. Введение в специальность (Учебное пособие). – Киев, 1995.
		<b>1998</b>
3	Монографія	М.Ю. Ильченко, А.О. Липатов, М.О. Могильченко, Т.М. Наритник, О.В. Савельев, Ю.И. Якименко. Интегральные пристрої НВЧ телекомунікаційних систем. – К.: Техніка, 1998. – 110 с. ISBN 966-575-176-X
		<b>2000</b>
4	Монографія	Т.Н. Нарытник, В.П. Бабак, М.Е. Ильченко, С.А. Кравчук. Микроволновые технологии в телекоммуникационных системах. – Киев: Техніка, 2000. – 304 с.
		<b>2001</b>
5	Навчальний посібник	Липатов А.О., Могильченко М.О. Прилади і пристрої НВЧ. / Навчальний посібник. – Київ, ВІТІ НТУУ «КПІ», 2001.
		<b>2002</b>
6	Монографія	V.P. Babak, T.N. Narytnik, M.E. Ilchenko, S.A. Kravchuk. Microwave technologies in the communication systems – К.: Техніка, 2002. – 272 с. (ISBN 966-575-160-3)
7	Монографія	Винницкий В.П. Методы системного анализа и автоматизации проектирования телекоммуникационных сетей. – К.: Интерлинк, 2002. – 191 с.
8	Навчальний посібник	Цифрова техніка : навч. посіб. / О.М. Лебедев, О.І. Ладик ; за ред. М.Ю. Ильченка; НТУУ "КПІ", Ін-т телекомунікаційних систем. – К.: Політехніка, 2002. – 240 с.
		<b>2003</b>
9	Навчальний посібник	Лебедев О.М., Ладик О.І., за ред. М.Ю. Ильченка. Цифрова техніка. Посібник з курсу "Обчислювальна техніка та мікропроцесори". – Київ: "Політехніка", 2003.
10	Монографія	Ильченко М.Е., Бунин С.Г., Войтер А.П. Сотовые радиосети с коммутацией пакетов. – К.: Наукова думка, 2003. – 286 с.
11	Навчальний посібник	Липатов А.О. Пристрої НВЧ телекомунікаційних систем: Навч. посіб. – К.: ІВЦ "Видавництво "Політехніка", 2003. – 440 с.
12	Монографія	М.З. Згуровский, М.Е. Ильченко, С.А. Кравчук, Т.Н. Нарытник, Ю.И. Якименко. Микроволновые устройства телекоммуникационных систем. В 2-х т. Том 1: Распространение радиоволн. Антенные и частотно-избирательные устройства – К.: ІВЦ Видавництво "Політехніка", 2003. – 456 с.
13	Монографія	М.З. Згуровский, М.Е. Ильченко, С.А. Кравчук, Т.Н. Нарытник, Ю.И. Якименко. Микроволновые устройства телекоммуникационных систем. В 2-х т. Том 2: Устройства

		приемного и передающего трактов. Проектирование устройств и реализация систем – К.: ІВЦ “Видавництво “Політехніка”, 2003. – 616 с.
14	Навчальний посібник	Романов А.И. Телекоммуникационные сети и управление: Учеб. пособ. – К.: Изд.-полигр. центр "Киевский університет", 2003. – 247с
15	Навчальний посібник	Нарытник Т.Н. Радиорелейные и тропосферные системы передачи. Учеб. пособ. – К.: Концерн "Видавничий Дом "Ін Юре”, 2003. – 336 с.
		<b>2004</b>
16	Навчальний посібник	Ліпатов А.О., Могільченко М.О., Коломицев М.О. Основи супутникових телекомунікаційних систем: Навч. посіб./Під ред. А.О. Ліпатова – К.: ВІТІ НТУУ „КПІ”, 2004. – 220с.
17	Монографія	Ильченко М.Е., Трубин А.А. Электродинамика диэлектрических резонаторов. – К.: Наукова думка, 2004. - 266с.
18	Підручник	Вінницький В.П. Термінальне устаткування. – К.: ІВЦ "Видавництво "Політехніка", 2004. – 465 с.
19	Навчальний посібник	Брагін А.С., Петрова В.М., Шматко В.С. Основи поштового зв'язку та його технології: Навч. Посібник. / за ред. проф.. Ільченка М.Ю. – К.: ІВЦ "Видавництво "Політехніка", 2004. – 440с.
20	Підручник	Лебедев О.М., Ладик О.І. Цифрова техніка. – К.: ІВЦ "Видавництво "Політехніка", 2004. – 320с.
		<b>2005</b>
21	Підручник	Кравчук С.О., Шонін В.О. Основи комп'ютерної техніки. (Компоненти, системи, мережі). – Київ: Політехніка: Каравела, 2005. – 344 с.
22	Навчальний посібник	Баранов О.А. Інформаційне право України: стан, проблеми, перспективи / О.А. Баранов. – К. : Видавничий дім "СофтПрес", 2005. – 316 с.
23	Навчальний посібник	Нарытник Т.М., Бабак В.П., Казіміренко В.Я., Куц Ю.В. Обработка сигналов в радиоканалах цифровых систем передачи информации Навчальний посібник. – К: Книжкове видавництво НАУ, 2005. – 476 с.
		<b>2006</b>
24	Підручник	Кравчук С.О., Шонін В.О. Основи комп'ютерної техніки. Компоненти, системи, мережі. (Навчальний посібник). – К.: Каравела, 2006. – 344 с.
		<b>2007</b>
25	Підручник	Кравчук С.О., Шонин В.О. Основи программирования на языке JAVA. – К.: Норита плюс, 2007. – 280 с.
		<b>2008</b>
26	Монографія	Ильченко М.Ю., Кравчук С.О. Сучасні телекомунікаційні системи. – К.: НВП «Видавництво «Наукова думка» НАН України», 2008. – 328 с.,іл.
27	Монографія	Ильченко М.Е., Кравчук С.А. Телекоммуникационные системы на основе высотных аэроплатформ. – К.: НПП "Издательство "Наукова думка" НАН Украины", 2008. – 580 с.
28	Навчальний посібник	Нарытник Т.Н., Волков В.В., Уткин Ю.В. Радиорелейные и тропосферные системы передачи: Учебное пособие. – К.: Основа, 2008. – 696 с.
		<b>2009</b>

29	Монографія	Ільченко М.Ю., Кравчук С.О. Телекомунікаційні системи широкосмугового радіодоступу. – К.: Наукова думка, 2009. – 312 с.
30	Монографія	О.І. Лисенко, С.М. Чумаченко, І.С. Романченко. Математичні моделі та інформаційні технології оцінки і прогнозування стану природного середовища випробувальних полігонів. – К.: МО України. ЦНДІ ЗС України, 2009. ISBN 978-966-655-498-0
31	Навчальний посібник	Брагін А.С., Наритник Т.М. Основи управління використанням радіочастотного ресурсу. За редакцією Наритника Т.М. // К.: Видавництво „Основа”, 2009. – 679 с.
		<b>2010</b>
32	Монографія	Стан та перспективи розвитку інформатики в Україні. (Відділення інформатики НАН України). монографія / С. Г. Бунін [та ін.]; К.: Наукова думка, 2010. – 1008 с. ISBN 978-966-00-0972-0
33	Підручник	Ільченко М.Ю. (за заг. ред.), О.В. Корнійко, О.В. Кувшинов, О.П. Лежнюк, С.П. Лівенцев, Л.М. Сакович, Л.О. Уривський. Основи теорії телекомунікацій. – Київ: ІСЗЗІ НТУУ "КПІ", 2010. – 786 с.
34	Навчальний посібник	Могильченко М.О. Основи синтезу електричних фільтрів. Навчальний посібник з теорії та практики. – Київ, 2010.
35	Навчальний посібник	Бирюков Н.Л., Максимов В.В., Триска Н.Р. Цифрові системи передавання в електрозв'язку. Аналого-цифрове та цифро-аналогове перетворення сигналів Учеб. пособие /. – К. : НТУУ «КПІ», 2010. – 122 с.
36	Підручник	Основи теорії телекомунікацій /Підручник / За заг. ред. проф. Ільченка М.Ю. – К.: 2010. – ІСЗЗІ НТУУ «КПІ». – 786 с., іл.
		<b>2011</b>
37	Наукове видання	Вибране / М. Ю. Ільченко ; НАН України, НТУУ "КПІ". Київ : Наукова думка, 2011. – 728 с.
38	Підручник	Основи дискретної схемотехніки: підручник для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за галуззю "Радіотехніка, радіоелектронні апарати та зв'язок" / О.І. Ладик, О.М. Лебедев; за ред. М.Ю. Ільченка; Мін-во освіти і науки, молоді та спорту України, НТУУ "КПІ. – К.: НТУУ "КПІ", 2011. – 240 с.
		<b>2012</b>
39	Монографія	Бунін С.Г., Войтер А.П., Ільченко М.Е., Романюк В.А. Самоорганізуючіся радіосети со сверхширокополосными импульсными радиосигналами. – К.: Наукова Думка, 2012. – 600 с.
40	Монографія	Баранов А.А. Информационная инфраструктура: проблемы регулирования деятельности / А.А. Баранов. – К.: ТОВ «Видавничий дім Дмитра Бураго», 2012. – 352 с.
		<b>2013</b>
41	Монографія	Баранов А.А. Интернет: объект правоотношений и предмет регулирования. – К.: Ред. журн. «Право України»; Х.: Право, 2013. – 144 с. (Науч. сб. «Академічні правові дослідження». Прил. к юрид. журн. «Право України»: вып. 30)
		<b>2014</b>
42	Монографія	Івлєв Ю.В., Кайденко М.М., Каптур В.А., Васіліу Є.В., Гранатуров В.М., Гуляєв К.Д., Дейнека І.В., Ложковський А.Г., Тіхонов В.І. Технологічні, організаційні та регуляторні засади побудови телекомунікаційних мереж сучасних та наступних поколінь. Київ: Кафедра. 2014. – 288 с. ISBN 978-966-2705-86-7

43	Монографія	Баранов О.А. Правове забезпечення інформаційної сфери: теорія, методологія і практика: монографія – Київ: Едельвейс, 2014. – 434 с.
		<b>2015</b>
44	Монографія	Кравчук С.О., Наритник Т.М. Телекомунікаційні системи терагерцового діапазону. Житомир: ФОП «Євенок О.О.», 2015. – 208 с. ISBN 978-617-7265-09-1 УДК.621.396 ББК 32.84я73
45	Монографія	Информационно-коммуникационные технологии в управлении. Авт.кол.: Кравчук С.А., Миночкин Д.А. и др. / Одесса: КУПРИЕНКО СВ, 2015. – 245 с. : ил., табл. УДК 65.011.56 ББК 65.290-2 И 741 ISBN 978-966-2769-49-4
46	Монографія	До 80-річчя організації НДЧ Київської політехніки Наука національного технічного університету КПІ-2014 в дзеркалі преси. М.З. Згуровський, М.Ю. Ільченко, М.В. Стріха та інші; під загал, ред. М.Ю. Ільченка К.: НТУУ “КПІ” ВПІ ВПК “Політехніка”, 2015. – 297 с. ISBN 978-966-622-690-0
		<b>2016</b>
47	Монографія	Лисенко О.І., Романченко І.С., Чумаченко С.М., Данилюк С.Л., Новиков В.І., Тачинінв О.М., Кірчу П.І., Валуйський С.В. Моделі застосування інформаційно-телекомунікаційних технологій на основі безпілотних авіаційних комплексів у надзвичайних ситуаціях. К.: НАУ, 2016 – 397 с. ISBN 978-966-932-011-7 УДК 629.735.067(02) ББК 052-082
		<b>2017</b>
48	Монографія	Ільченко М.Ю., Кравчук С.О. Телекомунікаційні системи. – К.: Наукова думка, 2017. – 730 с
49	Підручник	Лисенко О.І., Тачиніна О.М., Алексєєва І.В. «Математичні методи моделювання та оптимізації. Частина 1. Математичне програмування та дослідження операцій: підручник» – К.: НАУ, 2017. – 212 с. ISBN 978-966-932-063-6
50	Монографія	Лисенко А.И., Чумаченко С.М., Шевченко В.Л. Математически модели и информационни технологии за оценка и прогнозиране състоянието на околната среда в изпитателни полигони. Издател: Про Лангс, език: Български, 2017. ISBN 978-954-2995-29-6
		<b>2018</b>
51	Монографія	Баранов О.А. Интернет речей: теоретико-методологічні основи правового регулювання. Т.1: Сфери застосування, ризики і бар'єри, проблеми правового регулювання: монографія / О.А. Баранов; НДПП НАПрН України – К.: Видавничий дім «АртЕк», 2018. – 344 с.
52	Підручник	М.З. Згуровський, М.Ю. Ільченко, Є.А. Якорнов. Організація наукових досліджень в галузі телекомунікацій. – К.: Хімджест, 2018. – 336 с.



**Освіта**

**Education**

---

**ФОРМУВАННЯ СИСТЕМОЇ СТРУКТУРИ  
ПІДГОТОВКИ КАДРІВ  
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОГО ПРОФІЛЮ**

Кравчук С.О., Кравчук І.М., Явісія В.С.

---

**FORMATION OF SYSTEM STRUCTURE FOR  
PERSONNEL TRAINING OF  
TELECOMMUNICATION PROFILE**

Kravchuk S.O., Kravchuk I.M., Yavisya V.S.

The directions, methods and structures of personnel training for the telecommunication profile are constantly evolving in accordance with the needs of society and the growing amount of information flow in society. Telecommunications as a reflection of means and methods of transmission of information have gone a long way from purely radio engineering systems, where radio technologies of signal formation and their transmission dominated, to heterogeneous systems with complex network infrastructure and intelligent methods of information processing. According changed and approaches to training telecommunication profile. If in the early 80's preference in training was given to radio technology, then at present - network and software technologies. Hence the main emphasis of training specialists - infocommunication systems and technologies. The training structure of the department of telecommunication fully corresponds to this task, and the proposed section represents the main directions of formation of the general structure of personnel training of telecommunication profile at the department.

Напрямки, методи та структури підготовки кадрів телекомунікаційного профілю постійно розвиваються у відповідності до потреб суспільства та зростаючого об'єму перебігу інформації в суспільстві. Телекомунікації як відображення засобів та методів передачі інформації пройшли довгий шлях від чисто радіотехнічних систем, де переважали радіотехнології формування сигналів та їх передачі, до гетерогенних систем із складною мережною інфраструктурою та інтелектуальними методами обробки інформації. Відповідно змінюються і підходи до підготовки кадрів телекомунікаційного профілю. Якщо на початку 80-х рр. перевага у підготовці віддавалась радіотехнологіям, то на даний час – мережним і програмним технологіям. Звідси і головні акценти підготовки спеціалістів – інфокомунікаційні системи та технології. Структура підготовки кадрів кафедри телекомунікацій повністю відповідає даному посилу, а пропонований розділ представляє головні напрямки становлення загальної структури підготовки кадрів телекомунікаційного профілю на кафедрі.

## 1.1. Загальні положення

Напрямки, методи та структури підготовки кадрів телекомунікаційного профілю постійно розвиваються у відповідності до потреб суспільства та зростаючого об'єму перебігу інформації в суспільстві. Весь час відбувається зміна парадигм інфраструктури інформаційного обміну та задіяння нових технологій передачі та накопичування інформації.

Телекомунікації як відображення засобів та методів передачі інформації пройшли довгий шлях від чисто радіотехнічних систем, де переважали радіотехнології формування сигналів та їх передачі, до гетерогенних систем із складною мережною інфраструктурою, що самоорганізується, та інтелектуальними методами обробки інформації, що передається [1-7]. Відповідно змінюються і підходи до підготовки кадрів телекомунікаційного профілю. Якщо на початку 80-х рр. перевага у підготовці віддавалась радіотехнологіям, то на даний час – мережним і програмним технологіям. Звідси і головні акценти підготовки спеціалістів – інфокомунікаційні системи та технології.

Динамічний розвиток інфокомунікаційних технологій потребує кадрів нового рівня, здатних швидко адаптуватись до бізнес-середовища. Необхідно підвищувати мобільність системи професійної підготовки, зважаючи на потреби ринку праці.

І роботодавці, і освітяни розуміють: ринки праці та освітніх послуг потребують гармонізації — за кількістю і якістю підготовки фахівців.

На перший план у здобутті ґрунтовних знань виходить саме бізнес-чинник. Професійна підготовка студентів — в ідеальному варіанті — має максимально повно гармонізувати навчальний процес, наукові досягнення з телекомунікаційних технологій і потреби ринку. Безумовно, зміст та якість вищої освіти залежать від рівня впровадження інформаційно-комунікаційних технологій. Українські бізнес-структури усвідомили необхідність поліпшення освіти. Але роботодавці даної сфери ще не готові взяти на себе відповідальність за участь у процесі підготовки спеціалістів.

Як засвідчує кадрова політика багатьох вітчизняних компаній, вакансії початкового рівня нерідко надаються саме випускникам. І переважно з можливістю фахового та кар'єрного зростання.

Зокрема, серед проблем — скасування застарілих професій, відсутність системного підходу до номенклатури професій і немає кваліфікаційних характеристик на значну кількість професій. Належить визначити і посадові обов'язки працівників нових професій.

Структура підготовки кадрів кафедри телекомунікацій повністю відповідає даному посилю, а запропонований розділ представляє головні напрямки становлення загальної структури підготовки кадрів телекомунікаційного профілю на кафедрі.

## 1.2. Щодо потреби введення курсу/напрямку програмного забезпечення в телекомунікаціях

Сучасний розвиток галузі телекомунікацій характеризується посиленням конвергенції даної галузі з комп'ютерними й інформаційними технологіями і, як наслідок, все більшим наповненням телекомунікаційних систем програмними засобами. На таке посилення і насичення програмними засобами повинна відреагувати й освітня сфера підготовки фахівців телекомунікаційного профілю.

Дотепер зберігалася незалежна вузькоспеціалізована підготовка програмістів і телекомунікаційників. Підготовка фахівців програмного напрямку зосереджена, головним чином, на двох напрямках підготовки: фундаментальної універсальної та прикладної. Найбільш затребуваним до теперішнього часу став саме прикладний напрямок, що отримав назва програмної інженерії. Вона здійснює розробку систематичних моделей і надійних методів виробництва високоякісного програмного забезпечення, і при цьому кожен програмний інженер має глибокі знання щодо всіх аспектів комп'ютеринга. Така підготовка дає програмному інженерові можливість працювати в суміжних із програмною інженерією областях діяльності - комп'ютерної інженерії, комп'ютерних науках, розробки й застосуванні інформаційних систем. Існує досить потужна освітня сфера підготовки кадрів в області Інформаційних технологій (ІТ) (спеціалізації: комп'ютерні системи й мережі, системна інженерія, спеціалізовані комп'ютерні системи спеціального призначення, комп'ютерні технології інформаційні керуючі системи й технології, програмна інженерія, спеціальна інформатика, інформаційні технології проектування й ін.) Програмні інженери на даний час й у найближчому майбутньому найбільш конкурентоздатні не тільки на ринку роботи України, але й будь-якої країни світу.

Однак робота програміста в галузях діяльності, що вимагають високого рівня спеціальної підготовки, до яких належать й телекомунікації, скрутна й часто перетворюється в другорядну роль виконавця, а не розроблювача телекомунікаційних систем. З іншого боку, недостатній рівень програмістської підготовки інженера напрямку телекомунікацій не дозволяє йому розробляти й супроводжувати функціонування сучасної телекомунікаційної системи, що усе більше будується на основі програмувальних засобів.

Таким чином, у цей час постає завдання формування фахівця, що володіє технологіями програмної інженерії й телекомунікацій, здатного створювати програмне забезпечення всіх рівнів моделі відкритих систем у їхньому взаємозв'язку для забезпечення функціонування й виробництва телекомунікаційних систем і мереж. Відповідно до наявних напрямків і спеціальностей підготовки кадрів програмної інженерії таку нову спеціалізацію, на думку авторів, доречно назвати «програмне забезпечення телекомунікаційних систем».

В чому ж особливість і потреба в такій спеціалізації?

Телекомунікації являють собою всі способи передачі й прийому різного виду інформації за допомогою проводової, радіо, оптичної або інших

електромагнітних систем. Реалізацію передачі й прийому інформації здійснюють телекомунікаційні системи (ТКС), які будуються відповідно до телекомунікаційних технологій, а ті у свою чергу забезпечують техніку реалізації принципів і способів такої передачі й прийому інформації, і на основі спеціалізованого програмного забезпечення, що дозволяє безпосередньо створювати програмовані цифрові апаратні модулі систем і реалізувати протоколи й процедури функціонування ТКС й їхніх підсистем.

Останнім часом при створенні ТКС все більша увага приділяється універсальності використовуваних рішень, підвищенню їхнього ступеня інтеграції й функціональної наповненості, що вилилося в появу концепції «радіо, що визначається програмно» SDR (Software Defined Radio). Концепція SDR передбачає заміну всього розмаїття існуючих і розроблювальних конструкцій приймально-передавального встаткування на обмежену кількість доступних апаратних блоків, які працюють під управлінням програмного забезпечення. Це приведе до спрощення й здешевлення кінцевого продукту, істотному поліпшенню характеристик, підтримці будь-яких видів модуляції, завадостійкого кодування, реалізації складних алгоритмів цифрової обробки, появі великої кількості додаткових сервісних функцій. Розробка кінцевого продукту істотно прискорюється, оскільки програмне забезпечення може вдосконалюватися одночасно різними групами розроблювачів у рамках єдиної апаратно-програмної платформи.

Крім цього, широке поширення одержала розробка спеціалізованого програмного забезпечення для створення протоколів реконфігурованих ТКС. При цьому здобувають рішення по створенню телекомунікаційних мереж наступного покоління NGN (концепція softswitch) і розподілених мереж із самоорганізацією.

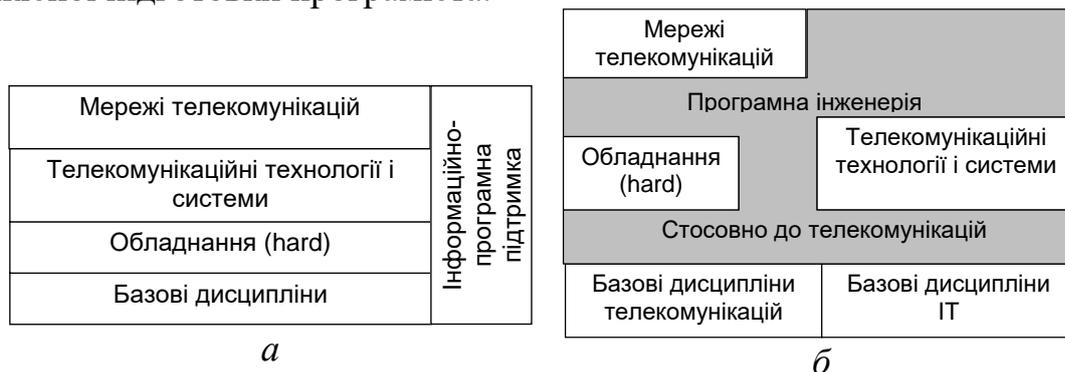
Таким чином, створення й функціонування сучасних телекомунікацій все більшою мірою опирається на спеціалізоване програмне забезпечення, що дозволяє поєднувати сучасні комп'ютерні засоби з вузлами й підсистемами ТКС, при цьому підвищуючи їхню продуктивність і надаючи можливість створення багатофункціональних, багатостандартних відкритих телекомунікаційних мультисервісних платформ.

У цьому зв'язку, на даний час у закордонних навчальних і наукових центрах телекомунікаційного й інформаційного профілю важливість здобуває напрямок так називаної «інженерії програмного забезпечення телекомунікацій» (Telecommunication Software Engineering) [4].

Реалізація спеціалізації «програмне забезпечення телекомунікаційних систем» пов'язано з рядом труднощів, основним з яких є визначення оптимального співвідношення між дисциплінами, призначеними для навчання інформаційним і телекомунікаційним технологіям. У сформованій системі навчання кадрів телекомунікаційного профілю, на прикладі бакалаврата кафедри телекомунікацій ІТС, дисципліни ІТ виділені в окремому блоці «інформаційно-програмної підтримки» (рис. 1.1, а), що вивчається паралельно курсам телекомунікаційного профілю й слугує необхідною підтримкою для реалізації

тих або інших практичних додатків, досліджуваних в основних курсах [8]. У блок «інформаційно-програмної підтримки» входять дисципліни: інформатика, прикладне програмування в телекомунікаційних системах (програмування мовою Java, програмування Інтернет-застосувань, серверні програмні засоби (Perl, PHP, платформа .NET, Python, Golang), програмні засоби телекомунікаційних систем (система інженерних і наукових обчислень MatLab, спеціалізовані програмні пакети аналізу систем, програмування апаратних засобів) і інформаційне забезпечення телекомунікаційних систем (бази даних, технології розподілених систем, мережні операційні системи), яких, однак, не досить для якісної підготовки програміста.

Рис. 1.1.



Нова спеціалізація будується на системному підході, що ґрунтується на взаємозв'язку між положеннями теорії, методами, алгоритмами й безпосередньо програмним продуктом. Інакше кажучи, весь процес навчання являє собою структуровану логічну схему, виражену за допомогою засобів управління програмними проектами, прозора доступна як викладачеві, так і студентові, обумовлену, наприклад, мовою універсального моделювання UML, всю структуру дисциплін й їхніх положень (рис. 1.1, б). Саме такий підхід повинен дозволити оптимально вибрати співвідношення між тією або іншою дисципліною по її змісту й обсягу. При цьому стрижнем навчання для всіх предметів стає практика прикладного програмування, що постійно розвивається в процесі вивчення як ІТ-дисциплін, так і дисциплін телекомунікаційного профілю, причому, останні повинні перетерпіти істотну доробку по своїй логіці викладу й практичного відпрацьовування теоретичних положень за допомогою різного програмного забезпечення. У цьому випадку, мало викласти теорію методу, її потрібно довести до алгоритму, кінцевого програмного продукту. Очевидно, такий підхід до вивчення дисциплін буде незабаром переважати у всіх освітніх програмах технічного профілю.

Нова спеціалізація підготовки кадрів основний акцент робить на наступних напрямках: низькорівневе програмування апаратних модулів і вузлів SDR; програмна реалізація вузлів апаратної частини систем стільникового мобільного зв'язку; моделювання й автоматизування проектування пристроїв і систем; реалізація мережних алгоритмів і протоколів; створення програмних модулів управління функціонуванням систем і мереж, включаючи процедури підтримки мобільності в бездротових мережах доступу й білінгових системах; засобу тестування й збору статистики про роботу телекомунікаційної мережі;

адміністрування й проектування мереж; засобів безпеки для доступу й передачі даних у телекомунікаційній мережі.

### 1.3. Особливості та перспективи підготовки кадрів в курсі стільникових систем мобільного зв'язку

Телекомунікації є однією з найбільш швидко розвивається областю сучасної науки і техніки, при цьому в останні роки яскравим індикатором цього розвитку служить становлення стільникових систем мобільного зв'язку (ССМС). Останні мали значний вплив на розвиток як сучасної соціальної сфери (як найбільш доступний повсюдний спосіб спілкування і доступу до інформаційних ресурсів), так і загальнодержавної економіки (значні прибутки в сфері послуг ССМС) [9-12]. При цьому ССМС зазнають постійні якісні зміни, ускладнюються їх обладнання, управління і контроль за функціонуванням таких систем. Звідси з кожним роком зростає потреба як в кількості персоналу для обслуговування ССМС, так і в зростанні рівня кваліфікації розробників, експлуатаційників і самого персоналу сфери ССМС. Тому завжди залишається актуальним розкриття особливостей і представлення перспектив підготовки кадрів в курсі стільникових систем мобільного зв'язку.

Розвиток сучасних ССМС можна охарактеризувати наступними тенденціями:

- збільшення пропускну здатності радіоканалу і швидкості руху мобільного терміналу;
- наявність руху, як терміналу користувача, так і точок доступу (базових станцій), які обслуговують термінал (міжавтомобільний зв'язок, супутникова служба, користувачі, що знаходяться в швидкісних поїздах та ін.);
- залучення нових технологій: частотного і просторового мультимплексування (OFDM, MIMO), інтелектуальних антен, розподілених антенних решіток і гібридного з'єднання оптоволоконно-радіоканал;
- зростання числа користувачів, необхідність тимчасового зростання трафіку в певних локаціях, динамічного перерозподілу трафіку між стільниками (секторами);
- розширення функціональності надання послуг мобільного зв'язку (інтернет-речей і M2M);
- посилення вимог підтримки якості обслуговування;
- залучення більш високочастотних діапазонів, аж до міліметрового діапазону;
- крос-функціональна інтеграція систем стільникового зв'язку, навігації, безпроводового доступу, цифрового телебачення і радіомовлення;
- ускладнення архітектури ССМС: багаторівневність, ретрансляція, кооперація, поєднання різних технологій радіодоступу (неоднорідні мережі) і функціонування системи мобільного зв'язку з супутниковим позиціонуванням, зменшення розмірів стільників (мікро, піко і нано).

Звідси, очевидно, що сучасний процес розвитку ССМС пов'язаний, перш за все, з їх ускладненням і збільшенням різноманітності реалізацій архітектур побудови, а це в свою чергу вимагає від фахівців ССМС більш високого рівня підготовки в області сучасних телекомунікацій.

Для підготовки фахівців за усталеними традиційним системам абонентського доступу було досить вивчення тільки дисциплін спеціалізації радіотехнічного профілю (фізичний і каналний рівні), але з ускладненням архітектури систем мобільного зв'язку все більше значення стали набувати дисципліни, пов'язані з мережними технологіями і системами управління та контролю мереж зв'язку, що робить значний ухил навчання в сторону підготовки фахівців саме телекомунікаційного профілю як більш інтегрального, ніж суто радіотехнічного.

У зв'язку з повною комп'ютеризацією обладнання зростає потреба в більш глибокому вивченні цифрових методів передачі сигналів, програмно визначуваного обладнання, програмних засобів управління і контролю. Також сучасному фахівцеві потрібне опанування навичок перекладу технічного тексту, головним чином опису функціонування обладнання. Тут особливість полягає в тому, що звичайна загальноосвітня система викладання англійської мови не може дати таких навичок - а тільки в спеціальних профільних дисциплінах.

З огляду на обмеженість навчальних годин, відведених на навчання студентів, необхідно переглянути виділення годин в сторону зменшення традиційних радіотехнічних дисциплін і за їх рахунок збільшення частки дисциплін, пов'язаних з сучасними мережевими і безпроводовими технологіями, програмуванням.

В межах спеціалізації мобільного зв'язку на кафедрі телекомунікацій розгорнуто три науково-учбових лабораторій.

**Рис. 1.2.** Загальний вигляд робочого місця у складі стойки базової станції та антенної системи із підсилювачами потужності, комп'ютерних робочих станцій управління та налагодження



**Лабораторія стільникових систем мобільного зв'язку.** Сучасне обладнання лабораторії (рис. 1.2, 1.3) дає змогу студентам засвоювати навички роботи з сучасним телекомунікаційним обладнанням стільникових систем мобільного зв'язку, зокрема стандарту GSM, CDMA та систем широкосмугового доступу (Wi-Fi, WiMax). В лабораторії є устаткування базових станцій і термінали GSM, Wi-Fi та WiMax, які було надано телекомунікаційними компаніями, зокрема "МТС-Україна" (Водофон).

**Лабораторія lifecell за підтримки компанії Ericsson.** Обладнання лабораторії дає змогу студентам засвоювати навички роботи з сучасним телекомунікаційним обладнанням стільникових систем мобільного зв'язку, зокрема стандарту GSM, UMTS, LTE, а також з адміністрування операторського ІТ-обладнання. В лабораторії є центр комутації мобільної мережі, контролер, базова станція та інше устаткування GSM, які було надано компанією lifecell за підтримки Ericsson в Україні. За їх допомогою побудовано функціонуючий макет мережі мобільного оператора (рис. 1.4 і 1.5).

**а)** підключення телефонних пар в стойці базової станції



**б)** управління обладнанням базової станції дистанційно з робочої комп'ютерної станції

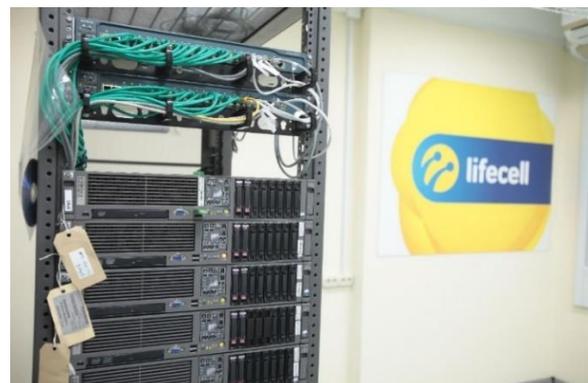


**Рис. 1.3.** Проведення занять зі студентами

В лабораторії студенти мають доступ до сучасних «хмарних» ІТ-технологій світового рівня, що використовуються для побудови ІТ інфраструктури операторів мобільного зв'язку та інших комерційних та наукових організацій, наприклад, Європейської організації з ядерних досліджень (CERN), Національного управління з повітроплавання і дослідженню космічного простору США (NASA).



**Рис. 1.4.** Центр комутації мобільної мережі



**Рис. 1.5.** ІТ обладнання лабораторії

**Лабораторія обладнання систем широкопasmового безпроводового доступу.** Основні напрямки діяльності лабораторії - дослідження та розробка

сучасних та перспективних безпроводових систем на базі новітніх технологій. Демонструються рішення по створенню новітніх систем на базі технологій програмно керованого радіо *SDR (Software-defined radio)* та систем на кристалі (*System on Chip, SoC*) з використанням програмно апаратної симуляції *HIL (Hardware-in-the-loop Simulation)* (рис. 1.6).

**Рис. 1.6.**  
Системи  
ширококу-  
сового  
доступу  
WiMAX, WiFi  
і 4G



#### 1.4. Сучасні інноваційні тенденції у викладанні дисциплін телекомунікаційного спрямування

Непередбачувана глибинна сутність й невизначеність інформаційного простору професій, до яких готує студентів сьогодні вища освіта призводить до змінення парадигми навчання. Так, викладач повинен бути партнером у процесі навчання, студент повинен вчитися на практиці та критично мислити, а система освіти використовувати відкриті освітні ресурси. Одним з таких нових підходів є так зване «змішане навчання» (*blended learning*) – це концепція трансформації структури та змісту навчання, що змінює традиційні ролі викладача та студента та навчального середовища. Особливостями підходу є те, що він поєднує самостійне вивчення матеріалу (онлайн) і очне (з викладачем). Основними елементами моделі змішаного навчання є лекційні заняття, семінари, практичні завдання, навчальні матеріали, онлайн спілкування (чат, форум, e-mail) тощо [2].

Цей підхід у навчанні дає можливість: розширити освітні можливості студентів за рахунок доступності та гнучкості, врахування їх індивідуальних освітніх потреб, а також темпу й ритму навчального матеріалу, зосередити основні зусилля викладача на обговоренні більше важких моментів курсу, відповідям на питання студентів, мотивації студентів, отримання знань через динамічну взаємодію, проведення тестування великої кількості студентів, отримання негайного зворотнього зв'язку, збільшення навчального часу та кількості матеріалів, економії матеріальних ресурсів. При цьому, модель не передбачає радикальної відмови від класичної моделі, оскільки очна освіта дає важливі соціокультурні навички і має емоційну складову.

Науковці з Клейтонського Крістенсенського інституту інновацій, які вже багато років займаються вивченням методів змішаного навчання, відзначають,

що змішане навчання представляє собою формальну освітню програму, в якій студент навчається: частково через онлайн-навчання, з деяким елементом власного контролю над часом, місцем, шляхом і темпом навчання; частково в аудиторії під час заняття, контрольованого викладачем; за умови, що усі етапи впродовж шляху навчання кожного студента в межах курсу або предмета підключені для того, щоб забезпечити досвід комбінованого навчання.

Змішане навчання складається з трьох основних етапів: дистанційного вивчення теоретичного матеріалу, освоєння практичних аспектів у формі денного навчання, завершальний етап – здача іспиту (заліку).

Сьогодні є безліч підходів до навчання на вибір, у тому числі синхронні й асинхронні формати в мережі. Ідея застосування елементів асинхронного й синхронного дистанційного навчання при змішаному навчанні полягає в тому, що певну частину дисципліни студенти освоюють у традиційних формах навчання (стаціонарній або заочній тощо), а іншу частину - за технологіями мережевого навчання. Співвідношення частин визначається готовністю освітньої установи в цілому до подібної побудови навчального процесу, а також бажанням і технічними можливостями студентів.

При створенні структури онлайн-курсу необхідно дотримуватися основних вимог: матеріал має бути цікавим і змістовним, не перевантажений відеоматеріалами, обов'язковість інтерактивних завдань, що будуть закріплювати знання.

В КПІ ім. І. Сікорського вже на протязі останніх років успішно використовується он-лайн викладання з технічних та гуманітарних дисциплін з використанням громадського проекту масових відкритих онлайн-курсів «Prometheus» на базі світових масових онлайн курсів, що включає в себе відеоматеріал, інтерактивні завдання для перевірки знань та форумів для спілкування з даної тематики.

В рамках викладання дисципліни «Інноваційна діяльність в телекомунікаціях» (кафедра телекомунікацій КПІ ім. І. Сікорського) в 2016...2017 навчального року використовуються методи змішаного навчання. На начальному етапі студенти готуються до спілкування з викладачем, щоб мати можливість обговорювати освоєний матеріал, а також задавати усі необхідні запитання. Кожного тижня студенти опрацьовують 2,5 години відео у зручний для себе час. На заняттях проводяться тестові завдання, дискусії та обговорення.

Виходячи з вищесказаного, можна констатувати, що при правильній організації освітнього процесу змішане навчання здатне підвищити якість освіти, зокрема в умовах скорочення годин «аудиторних занять» за рахунок переведення частини навчального процесу в онлайн середовище, вивільнивши тим самим аудиторний час для відпрацювання практичних навичок й умінь, а також виділити більше часу на наукову роботу, в тому числі зі студентами.

## 1.5. Нові спеціалізації

Нові спеціалізації спеціальності «телекомунікації та радіотехніка» базуються на багаторічному досвіді підготовки спеціалістів на кафедрі телекомунікацій і здобутках у проведенні науково-технічних досліджень та розробок, спрямованих на отримання нових знань, систем і технологій в сфері телекомунікацій [13]. Продукування нових наукових знань викладачами є постійним джерелом оновлення змісту освіти через формування нових навчальних спеціалізацій. А на цьому базисі – створення на інноваційних засадах нових технологій і техніки. Зазначені тенденції сприяють тому, що у формуванні змісту професійно-орієнтованих навчальних дисциплін усіх спеціалізацій використовуються оригінальні наукові результати науковців Інституту телекомунікаційних систем.

**Спеціалізація «Мобільні телекомунікації»/«Системна і програмна інженерія інфокомунікацій».** Головною тенденцією розвитку сучасних телекомунікацій є забезпечення якісних комунікацій обміну інформацією для будь-яких користувачів або інтелектуальних машинних об'єктів незалежно від місця їх розташування та швидкості руху. При цьому користувачі повинні мати повну незалежність і свободу переміщення, тобто – мобільність. Конвергенція технологій, систем та послуг дозволяє поширити підтримку мобільності на всю інфраструктуру телекомунікацій і таким чином вийти на новий сучасний рівень їх розвитку – мобільних телекомунікацій.

Спеціалізація «Мобільні телекомунікації» забезпечує фундаментальну, прикладну і практичну підготовку на трьох рівнях вищої освіти - бакалавр, магістр, доктор філософії у галузі знань «електроніки та телекомунікацій», спеціальності «Телекомунікації та радіотехніка», яка дозволяє опанувати основами цифрових комунікацій; програмної інженерії; побудови, телекомунікаційних систем і мереж з підтримкою мобільності.

Центральне місце в спеціалізації займає опанування методами підтримки мобільності в сучасних стільникових системах радіодоступу, в тому числі 5-го покоління, системах широкосмугового доступу, неоднорідних багаторівневих телекомунікаційних розподілених мережах на базі різних технологій та архітектур. Спеціалізація дає поглиблені знання щодо налагодження, функціонування і експлуатації телекомунікаційних систем та адміністрування ними. Надає можливість опанування сучасною доктриною розвитку телекомунікацій - розумних всепроникних мереж.

Рівень бакалавра забезпечений підготовкою наступними блоками дисциплін: Основи теорії цифрового зв'язку, Програмні інструменти телекомунікацій, Системи телекомунікацій та управління, Мобільні телекомунікації, Регулювання в телекомунікаціях. З досягненням даного рівня випускник матиме компетенцію зі створення систем та мереж телекомунікацій, їх використання та обслуговування.

Рівень магістр забезпечений підготовкою комплексним блоком дисциплін мобільних телекомунікацій, що дозволяє опанувати основи підтримки мобільності, системи широкосмугового доступу, теорію прийняття рішень та

системний аналіз, проектування та моделювання телекомунікаційних систем, організацію наукових досліджень та управління проектами в телекомунікаціях, адміністрування телекомунікаційних серверів та мереж, захист інформаційних ресурсів. Крім цього надаються знання із принципів побудови мереж оператора мобільного зв'язку як складової частини розумних всепроникних мереж. З досягненням даного рівня випускник матиме компетенцію з розробки, побудови і управління гетерогенними телекомунікаційними мережами та методами підтримки в них мобільності.

Рівень доктор філософії у напрямку електроніки та телекомунікацій забезпечений підготовкою комплексним блоком дисциплін докторської програми мобільних телекомунікацій, що дозволяє опанувати організацію наукової діяльності за докторською програмою, математичне моделювання систем та процесів, сучасні тенденції розвитку мобільних телекомунікацій, мистецтво побудови високошвидкісних телекомунікацій, тенденції розвитку розумних всепроникних мереж, створення інноваційно-наукових стартапів в сфері мобільних телекомунікацій.

**Спеціалізація «Апаратно-програмні засоби електронних комунікацій»/ «Інтернет речей та програмні платформи інфокомунікацій».** Практично всі аспекти людської діяльності пов'язані з обміном інформацією, що не можливо без сучасних засобів електронних комунікацій, які складають основу новітніх телекомунікаційних систем. Зростання попиту на комунікаційні послуги, розвиток систем і технологій телекомунікацій вимагає постійного удосконалення відповідних засобів: від простих електронних пристроїв - до складних апаратно-програмних комплексів, що вирішують не тільки задачі безпосереднього прийому, передачі, обробки і відтворення інформації, а також збільшення гнучкості, продуктивності та надійності при створенні різноманітних програмованих структур комунікацій. Крім цього сучасний розвиток галузі телекомунікацій характеризується зростанням її конвергенції з комп'ютерними та інформаційними технологіями і, як наслідок, все більшим наповненням телекомунікаційних систем програмними засобами. Дана тенденція та потреба в прискоренні процесів створення та реалізації таких засобів вказує на необхідність підготовки фахівців, що володітимуть не лише знаннями зі створення та експлуатації засобів електронних комунікацій, розповсюджених загальних засад програмування, а й знаннями з реалізації спеціалізованих програмних засобів обробки даних для телекомунікацій.

Спеціалізація «Апаратно-програмні засоби електронних комунікацій» забезпечує фундаментальну теоретичну, прикладну і практичну підготовку за загальною програмою галузі знань «Електроніка та телекомунікації», спеціальності «Телекомунікації та радіотехніка» на трьох рівнях вищої освіти: бакалавр, магістр, доктор філософії. Спеціалізація спрямована на опанування випускниками спеціальних знань із:

- проектування апаратів багатоканальних приймально-передавальних пристроїв, що працюють в середовищі з багатьма службами та технологіями одночасно;

- проектування програмно визначених засобів та систем телекомунікацій;
- розробки програмного забезпечення для пристроїв електронних комунікацій з урахуванням сучасних потреб у використанні функцій навігації, синтезу/аналізу сигналів, спеціалізованих методів обробки даних;
- розробки програмного забезпечення для вбудованих систем телекомунікацій (комутатори, мультиплексори, побутові приймачі цифрових сигналів, модеми і т.д.)
- розробки апаратно-програмних засобів розумних всепроникних мереж.

Рівень бакалавра забезпечує надбання випускниками компетенцій стосовно теоретичних основ побудови, монтажу та налагодження, контролю і діагностування стану, профілактики і відновлювального техобслуговування апаратно-програмних засобів електронних комунікацій.

Рівень магістра забезпечує надбання компетенцій по вдосконаленню, проектуванню та створенню апаратно-програмних комплексів електронних комунікацій.

Рівень доктора філософії забезпечує надбання компетенцій по здійсненню наукових досліджень, пошукових робіт та прогнозуванню напрямків розвитку апаратно-програмних телекомунікаційних засобів, проектуванню та впровадженню прототипів апаратно-програмних комплексів електронних комунікацій наступних поколінь.

## 1.6. Концептуальна модель базової підготовки напряму «телекомунікації»

План навчального процесу по підготовці бакалаврів на кафедрі телекомунікацій КПІ ім. І. Сікорського базується на шістьох основних принципах забезпечення високої якості підготовки студентів:

- опора на власні наукові дослідження;
- сполучення в доборі кадрів досвідчених і молодих викладачів;
- розробка власного методичного забезпечення, видання монографій, навчальних посібників та програмних пакетів;
- взаємодія з партнерами з інших країн;
- тісне співробітництво з телекомунікаційними та ІТ компаніями;
- створення, підтримка та відстоювання іміджу (престижу) серед студентів як провідного технічного навчального закладу з віковими традиціями формування досвідчених інженерних та наукових кадрів.

Сам план навчального процесу розділений на 5 циклів підготовки: гуманітарний та соціально-економічний; природничо-науковий; професійний та практичний; дисципліни за вибором кафедр; дисципліни вільного вибору студентів.

Перший цикл розподілений по усім семестрам, що дещо ускладнює розподіл предметів професійного спрямування (в перших семестрах доводиться ставити професійні предмети, котрі ще важко сприймають студенти, а в останніх

семестрах замість того, щоб зосередити студентів на професійній підготовці, учбові години віддаються гуманітарним дисциплінам). Нажаль, перший цикл призначається без можливості коректування з боку кафедри.

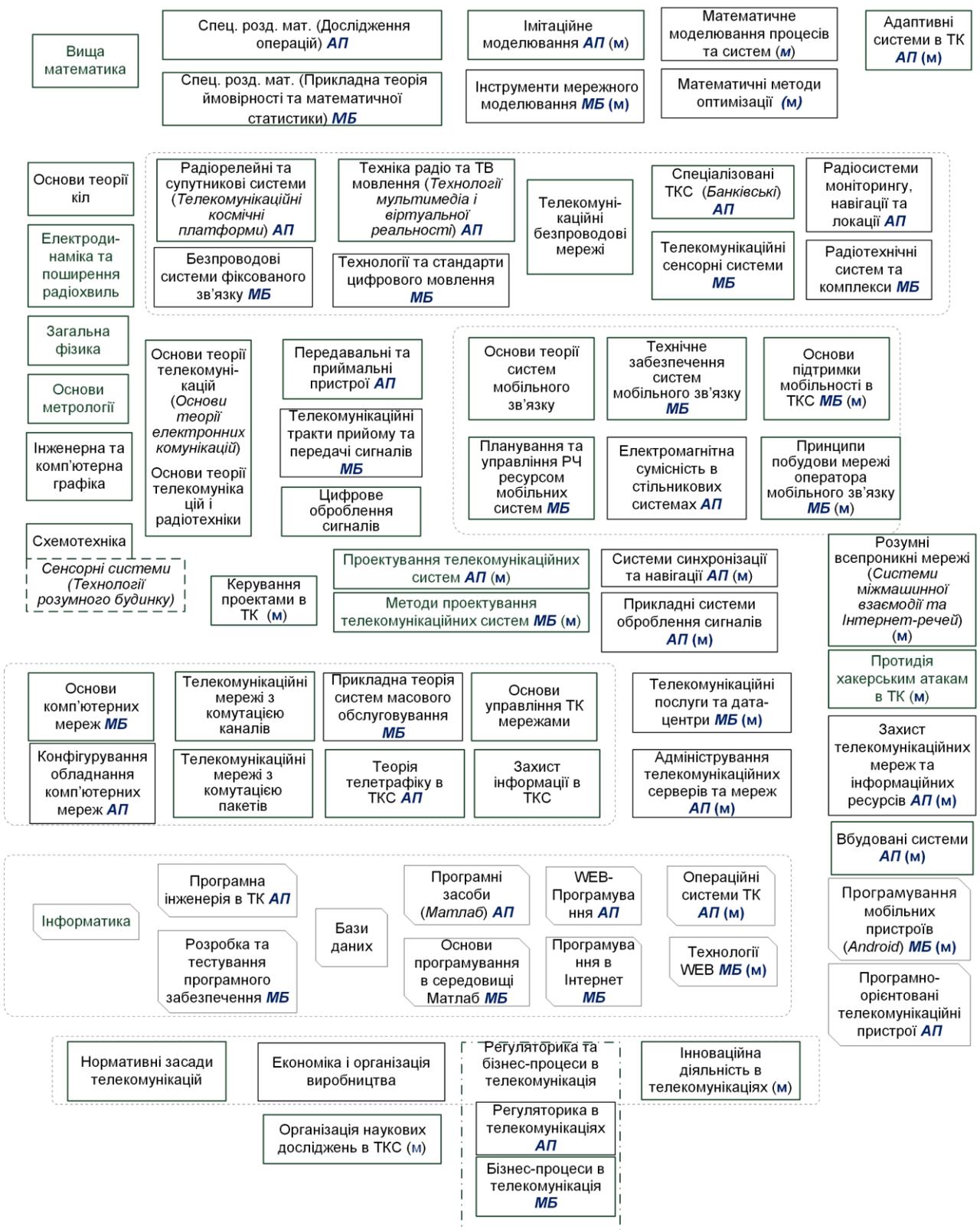
Другий цикл включає в себе базові загальноосвітні предмети, необхідні для початкової підготовки інженера. Це, перш за все, класична *вища та спеціальна математика* (теорія ймовірності та мат. статистика, основи математичного моделювання), *загальна фізика*, що розглядає тільки два необхідних розділи: електрики та магнетизму (електростатика, електродинаміка, напівпровідники та діелектрики) і хвильових процесів (оптика та квантова механіка), *інженерна та комп'ютерна графіка* в мінімальному обсязі, дисципліна майже професійного спрямування *основи метрології*, предмет *інформатика*, що являє собою базову дисципліну, що націлює студентів на використання в наступних професійних дисциплінах інформаційних технологій (комп'ютерна техніка, технології програмування, алгоритмічне програмування мовами C/C++, Java, Perl, PHP, Python, платформа .NET, Golang та асемблеру, основи об'єктного та системного програмування).

Наступні цикли складають хребет головної професійної підготовки спеціаліста в галузі телекомунікацій/інфокомунікацій. Зупинимось на них більш докладніше.

Потрібно відзначити закладену до навчального процесу кафедри наскрізну неперервну підготовку студентів по інформаційним технологіям. Потік інформаційних дисциплін, що започаткований *інформатикою* у другому циклі підготовки, послідовно розвивається і доповнює вузько спеціалізовані дисципліни програмним інструментарієм. Цей потік складається з наступних дисциплін: *програмна інженерія в телекомунікаціях, розробка та тестування програмного забезпечення, бази даних, програмні засоби, основи програмування в середовищі MatLab, WEB-програмування/WEB-технології, програмування в Інтернет, операційні системи телекомунікацій, програмування мобільних пристроїв.*

Наступний напрям визначає цикл мережних технологій: *основи комп'ютерних мереж, конфігурування обладнання комп'ютерних мереж, телекомунікаційні мережі з комутацією каналів, телекомунікаційні мережі з комутацією пакетів, прикладна теорія масового обслуговування, теорія телетрафіку в телекомунікаційних системах, основи управління в телекомунікаційних мережах, захист інформації в телекомунікаційних системах, телекомунікаційні послуги та дата-центри, адміністрування телекомунікаційних серверів і мереж, захист телекомунікаційних мереж і інформаційних ресурсів.*

Цикл обладнання телекомунікацій визначає цикл із наступних дисциплін: *Основи теорії телекомунікацій/Основи теорії електронних комунікацій* (теорія інформації, канали зв'язку, багатоканальні системи, модуляція і демодуляція, характеристики сигналів та систем зв'язку, оптимальні приймачі, синхронізація несучої і тактова синхронізація, пропускна спроможність каналу та кодування, системи зв'язку з багатьма користувачами), *теорія електричних кіл та сигналів,*



**Рис. 1.7.** Структура предметів і циклів підготовки спеціалістів телекомунікаційного профілю на кафедрі телекомунікацій КПІ ім. І. Сікорського (м – магістратура, АП – апаратно-програмні засоби телекомунікацій; МБ – мобільні телекомунікації)

*електродинаміка та поширення радіохвиль, схемотехніка (цифрова схемотехніка, мікроелектроніка, мікропроцесори), цифрова обробка сигналів (основи аналізу сигналів, дискретні системи, спектральний аналіз, дискретні фільтри), передавальні та приймальні пристрої, телекомунікаційні тракти передачі та прийому, програмно-орієнтовані телекомунікаційні пристрої, вбудовані системи.*

Цикл сучасних телекомунікаційних систем і мереж: *радіорелейні та супутникові системи, безпроводові системи фіксованого зв'язку, техніка радіо та телевізійного мовлення/технології мультимедіа та віртуальної реальності, технології та стандарти цифрового мовлення, телекомунікаційні безпроводові мережі, банківські телекомунікаційні мережі, сенсорні телекомунікаційні мережі, радіосистеми моніторингу, навігації і локації, радіотехнічні системи та комплекси, системи синхронізації і навігації, прикладні системи оброблення сигналів.* Окремо виділений цикл щодо стільникових систем мобільного зв'язку, які на даний час є безумовно лідерами телекомунікаційної області: *основи теорії систем мобільного зв'язку, технічне забезпечення систем мобільного зв'язку, планування та управління радіоресурсом мобільних систем, електромагнітна сумісність в стільникових системах, основи підтримки мобільності в телекомунікаціях, принципи побудови мережі оператора мобільного зв'язку.*

Магістерська підготовка включає в себе цикл суто професійних дисциплін: *проекування телекомунікаційних мереж, керування проектами в телекомунікаціях, розумні всепроникні мережі/Інтернет речей та міжмашинна взаємодія м2м, протидія хакерським атакам в телекомунікаціях.*

Особливої віддачі ми чекаємо від дисципліни *нормативні засади в телекомунікаціях*, що повинна надати майбутнім спеціалістам знання із загально правових дій щодо створення і ведення свого бізнесу у сфері телекомунікацій, а також навчити як і де проводити сертифікацію телекомунікаційного обладнання, отримати ліцензії на частоти чи рід діяльності (виробник, оператор) та ін. Ця дисципліна повинна підготувати випускника кафедри до створення ним своєї власної справи, чи безпосереднього включення в роботу будь якої телекомунікаційної компанії як знаючого спеціаліста у своїй сфері діяльності. Розширенням цієї дисципліною є: *регуляторика та бізнес-процеси в телекомунікаціях, інноваційна діяльність в телекомунікаціях.*

Усе вище викладене можна згрупувати у вигляді схеми основних напрямків підготовки як представлено на рис. 1.7. На даній схемі представлені пов'язані між собою структурно-логічні блоки зі своєю окремою специфікою.

## 1.7. Деякі аргументи на користь магістратури

Щодо навчання в магістратурі серед сучасних бакалаврів виникає багато різнополярних думок. В даному підрозділі викладена спроба сформулювати ряд аргументів на користь необхідності подальшого навчання в магістратурі.

**Професійне зростання ґрунтується на підтверджених компетенціях.** Традиційний аргумент проти подальшого навчання в магістратурі базується на

тезі, що звучить приблизно так: «вже працюю в хорошій компанії, вже нормально заробляю і мене все влаштовує». Тобто на перший погляд людина вже всім задоволена. Але пройде короткий проміжок часу - всього кілька років, і якщо не зростати інтелектуально, кар'єрний ріст теж опиниться під питанням. Що більший бізнес, тим більше значення надається наявності різних дипломів, сертифікатів, ступенів і інших знаків відмінності, які нагадують кадровим службам про те, що співробітник гідний подальшого підвищення. У середніх і великих організаціях, де серед співробітників є хоча б найменша конкуренція, при виникненні вакансії на підвищення вибір буде зроблений на користь більш «освіченого», а точніше того, що має більш підтверджень компетенцій.

**Професійне «вигорання».** Навіть дуже творча і натхненна праця з плином часу перетворюється на рутину, і через кілька років кураж і завзяття змінюються творчим вигоранням. Можна було б і перевчитися, але до цього моменту, як правило, у людини вже сім'я, яку треба утримувати та й сама робота забирає весь час, не залишаючи можливість вчитися. Магістратура дає більш широкий погляд, підвищує ерудицію, орієнтує на аналіз і рефлексію, формує критичне мислення та креативні навички. Маючи більше компетенцій і більш широке поле зору набагато легше змінити роботу і переключитися на нові напрямки професійної діяльності, уникаючи того самого «творчого вигорання».

**Державні формальності.** На даний час в нашій країні починають застосовуватися стандарти професійної діяльності, в яких прописується не тільки те, що повинен знати і вміти співробітник у своїй області, які функції виконувати і за що нести відповідальність - в них також прописаний рівень освіти, який дозволяє йому займати навіть невеликі управлінські посади.

Через кілька років можливість рухатися по службових сходах у великому бізнесі без диплома магістра може стати проблематичним. Але навіть і для малого бізнесу відсутність фахівців з магістерськими дипломами може стати перешкодою для виграшу державного тендера на розробку або реалізацію проекту.

**Навчатись, щоб вчитися.** Магістратура, в основному, вчить вчитися, а значить - випускник магістратури буде більш успішно сприймати нове, володіти навичками самонавчання. У магістратуру приходять викладачі з бізнесу, щоб не тільки поділитися своїм досвідом, а й навчити випускника «під себе», формуючи актуальні компетенції.

Крім того, головним завданням сучасної магістратури - на все життя сформувати стійку «залежність» від навчання, від отримання нових знань. І тоді можна бути впевненим, що кар'єра обов'язково складеться вдало.

## Список літератури

1. Ільченко М.Ю., Кравчук С.О. Телекомунікаційні системи. – К.: Наукова думка, 2017.
2. Кравчук І.М., Кравчук С.О. Сучасні підходи та інноваційні тенденції у викладанні дисциплін телекомунікаційного спрямування // Матер. 11-ї міжнар. наук.-техн. конф. “Проблеми телекомунікацій”, 18–21 квітня, 2017 р. – К.: Хімджест, 2017. – С. 191–192.
3. Ільченко М.Ю., Кравчук С.О. Телекомунікаційні системи ширококутового радіодоступу. – К.: Наукова думка, 2009. – 312 с.
4. Информационно-коммуникационные технологии в управлении: монография / авт. кол. Косолапов А.А., Кувшинов А.В., Кравчук С.А. и др. – Одесса: Куприенко СВ, 2015. – 245 с.
5. Kravchuk S., Afanassieva L. Development of telecommunication technologies as a factor of modern economic system // Materials of International scientific and practical conf. “Economics, science, education: integration and synergy”, Bratislava, Slovak Republic, 18–21 January, 2016: in 3 vol. – Vol. 3. – Bratislava, 2016. – P. 97–98.
6. Ільченко М.Ю., Кравчук С.О. Основні тенденції розвитку сучасних ТС // Стан та перспективи розвитку інформатики в Україні (Відділення інформатики НАН України). – К.: Наукова думка, 2010. – С. 757–761. (1008 с.)
7. Кравчук С.О. Еволюційний розвиток концепцій транспортних телекомунікаційних систем // Цифрові технології. – 2015. - № 17. – С. 35-43.
8. Pchenko M., Bunin S., Kravchuk S. A General Modular Construction of Educational Disciplines for Preparation of Bachelors in „Telecommunication“ Discipline // Proceeding of the International Conference TCSET’2008 „Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science”, February 19-23, 2008. Lviv-Slavsko, Ukraine.- Lviv: Publishing House of Lviv Polytechnic, 2008. – P. 645.
9. Кравчук С.А. Особенности и перспективы подготовки кадров в курсе сотовых систем мобильной связи // Матер. 8-ї міжнар. наук.-техн. конф. “Проблеми телекомунікацій”, 22–25 квітня, 2014 р. – К.: НТУУ «КПІ», 2014. – С. 31–32.
10. Кравчук С.О. Особливості підготовки фахівців у курсі стільникових систем мобільного зв’язку // Мат. Всеукраїнської науково-практичної конф. «Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій» СПТЕЛ-2014, Львів, 30 жовтня – 2 листопада 2014 р. – Львів, 2014. – С. 265-266.
11. Системи зв’язку з рухомими об’єктами / С.О. Кравчук, О.Г. Голубничий, А.Г. Тараненко, В.Г. Потапов, О.П. Ткаліч: підручник. – К.: Спринт-Сервіс, 2012. – 452 с.
12. Ільченко М.Ю., Кравчук С.О. Конвергенція фіксованих і мобільних інформаційно-телекомунікаційних платформ та мереж // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2013. - № 5. – С. 7-13.
13. Спеціальність телекомунікації та радіотехніка: нові спеціалізації / М.Ю. Ільченко, С.О. Кравчук, Д.А. Міночкін, В.С. Явіся // Матер. 10-ї міжнар. наук.-техн. конф. “Проблеми телекомунікацій”, 19–22 квітня, 2016 р. – К.: Хімджест, 2016. – С. 31–33.

---

**ВПРОВАДЖЕННЯ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ  
ТА МЕТОДИКИ ВИКЛАДАННЯ В  
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЯХ**

Остапов О.А., Чуб М.М., Шевченко І.І., Рисцова К.І.

---

**INTRODUCTION OF MODERN TEACHING  
METHODS AND TECHNOLOGIES INTO  
TELECOMMUNICATIONS**

Ostapov O.A., Chub M.M., Shevchenko I.I., Rystsova K.I.

Authors of the section, as practicing experts in the testing of telecommunication systems, experiment with the latest tools and approaches to increase the efficiency of the teacher's work, and share the experience and results of their implementation.

Corresponding experience gained during the teaching of the discipline "Development and testing of software" for students of the second year of the "Electronic communications hardware and software" direction of the Department of Telecommunications of the Institute of Telecommunication Systems of Igor Sikorsky NTUU KPI.

The section describes Google's integrated cloud environment for communication with students, planning and collaboration on cloud-based documents, providing and verifying homework assignments, and results evaluation.

Additionally, approaches to teaching that were used, are listed along with conclusions about their expediency and success.

Автори монографії, практикуючи спеціалісти з тестування телекомунікаційних систем, експериментують із новітніми інструментами та методиками викладання для збільшення ефективності праці викладача, і діляться досвідом та результатами їх впровадження.

Відповідний досвід отриманий під час викладання дисципліни "Розробка та тестування програмного забезпечення" для студентів напрямку "Апаратно-програмні засоби електронних комунікацій" другого курсу кафедри телекомунікацій Інституту Телекомунікаційних Систем НТУУ КПІ імені Ігоря Сікорського.

У розділі представлений опис інтегрованого хмарного середовища компанії Google для комунікації зі студентами, планування та проведення спільної роботи над документами в хмарному сховищі, надання та перевірки домашніх завдань і оцінювання.

Додатково перелічені підходи до викладання, що було використано, із висновками щодо їх доцільності та успішності.

## 2.1. Словник термінів

Термін	Визначення
Google Classroom	Сервіс для керування процесом навчання - <a href="https://classroom.google.com">https://classroom.google.com</a>
Календар	Електронний календар Google - <a href="https://calendar.google.com">https://calendar.google.com</a>
Пошта	Електронна пошта Google - <a href="https://mail.google.com">https://mail.google.com</a>
Хмарне сховище	Сервіс для зберігання та обміну файлів Google - <a href="https://drive.google.com">https://drive.google.com</a>

## 2.2. Загальні положення

Викладацький склад курсу «Розробка та тестування програмного забезпечення» вже на протязі 5 років оптимізує супутні процеси викладання матеріалу з метою зробити його ресурсно-ефективним та цікавим для студентів [1, 2]. За цей час ми визначили для себе 6 найважливіших вимог до «ідеального» інструментарію, який має допомагати викладачеві менше займатись виснажливою «паперовою» роботою і більше часу приділяти актуальним способам подання інформації, а студентам – збільшувати рівень зацікавленості в курсі. Такими вимогами є наступні:

- *легкість доступу* до матеріалів (в будь якому місці, з будь якого пристрою);
- *шаблони налаштування* навчальної групи для повторного використання (теми лекцій та лабораторних зазвичай ідентичні для всіх навчальних груп однієї спеціальності);
- *жодних паперів!* (всі контрольні, домашні, курсові і т.д. – виключно online);
- *жодних втрачених робіт!* (всі роботи зберігаються online);
- *автоматизація рутинних процесів* (планування, розклад, облікові записи, перевірка, призначення відповідальних, контроль, нотифікації);
- і нарешті – *задоволення!* (задоволення від роботи з якісними сучасними інструментами, і викладача, і особливо студентів).

За час викладання курсів за вказаною тематикою еволюція інструментарію, який використовувався для інфраструктурного забезпечення курсу, виглядала приблизно наступним чином (рис. 2.1.):



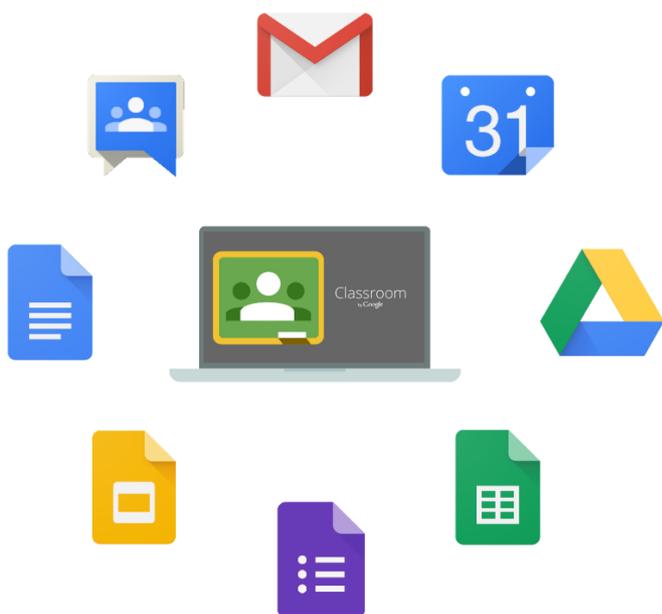
**Рис. 2.1.** Еволюція інструментарію для забезпечення учбового процесу курсу «Тестування програмного забезпечення»: Папери -> Excel -> Moodle -> Google Sites -> Google Classroom

На даний момент ми можемо стверджувати, що лише останній інструмент в цьому ланцюжку відповідає всім зазначеним вище вимогам. Тому в цьому розділі розглянемо детально саме Google Classroom, який може стати допоміжним інструментарієм для «Електронного кампусу» КПІ ім. І. Сікорського.

А також, оскільки жоден інструмент не є гарантією якісного та цікавого учбового процесу, то додатково розглянемо в цьому розділі деякі підходи до викладання, які допомагають робити процес цікавим та ефективнішим незалежно від інструментів.

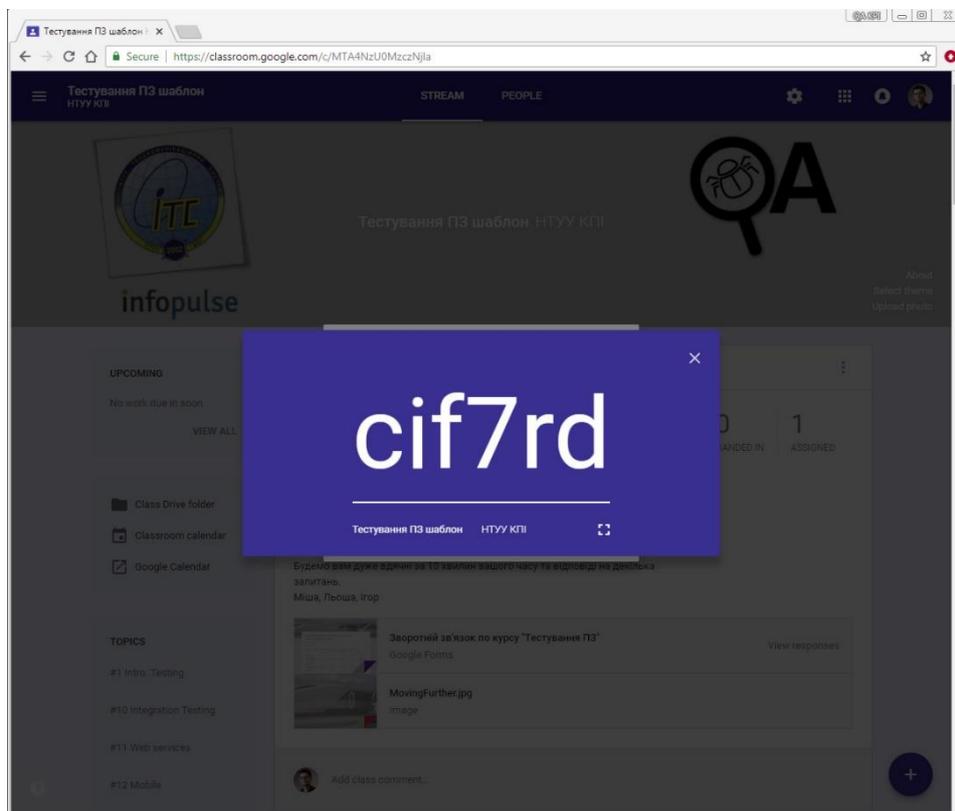
### 2.3. Сервіси для навчання

В якості ключової системи для керування процесом навчання ми вирішили використовувати **Google Classroom**. Цей сервіс інтегрується з іншими продуктами компанії Google (рис. 2.2.), такими як календар, пошта, хмарне сховище, дозволяє створювати групи студентів, призначати та отримувати домашні завдання, ділитися матеріалами курсу та новинами, виставляти оцінки, спілкуватися студентам та викладачам - у вигляді стрічки новин та коментарів.



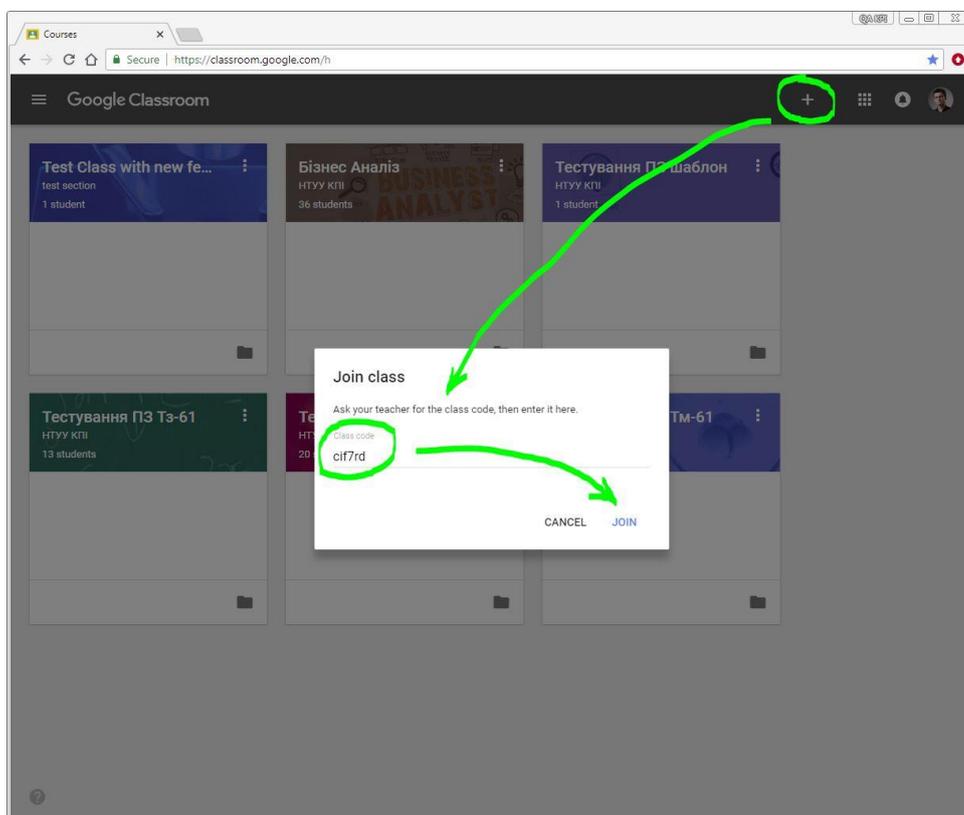
**Рис. 2.2.** Інтегроване хмарне середовище для навчання від компанії Google

На першому занятті студентам і старостам груп видаються коди (рис. 2.3.), з якими можна підключитись до своєї групи (рис. 2.4.). Такий підхід позбавляє викладача необхідності створення облікових записів для всіх студентів власноруч.

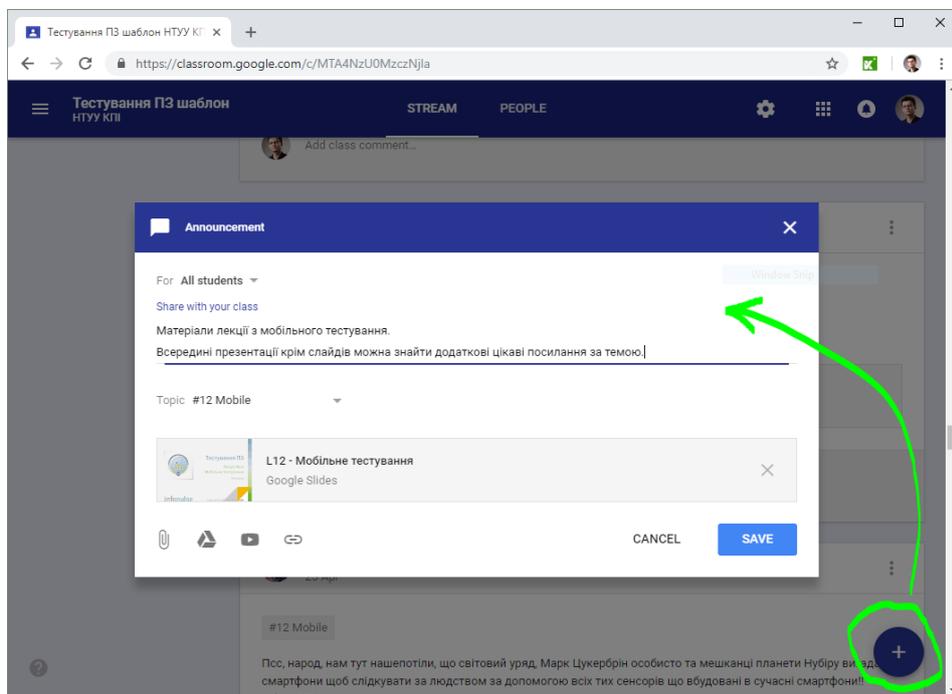


**Рис. 2.3.**  
Викладач надає студентам код для доступу в клас

**Рис. 2.4.**  
Студенти приєднуються до класу за вказаним кодом

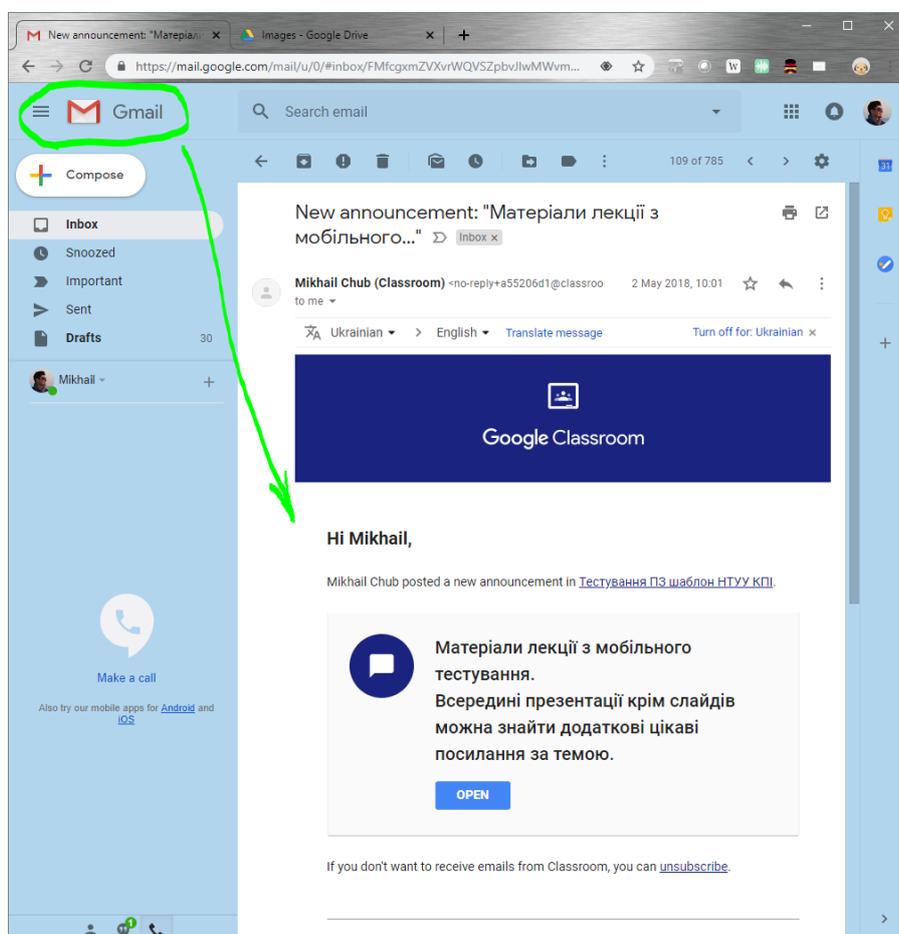


До або після кожної лекції у стрічку новин викладач додає матеріали лекції, методичну та рекомендовану літературу (рис. 2.5.) - кожен студент автоматично отримує копію повідомлення на свою електронну пошту (рис. 2.6.). Такий підхід гарантує особисту відповідальність кожного студента за отриманий матеріал.

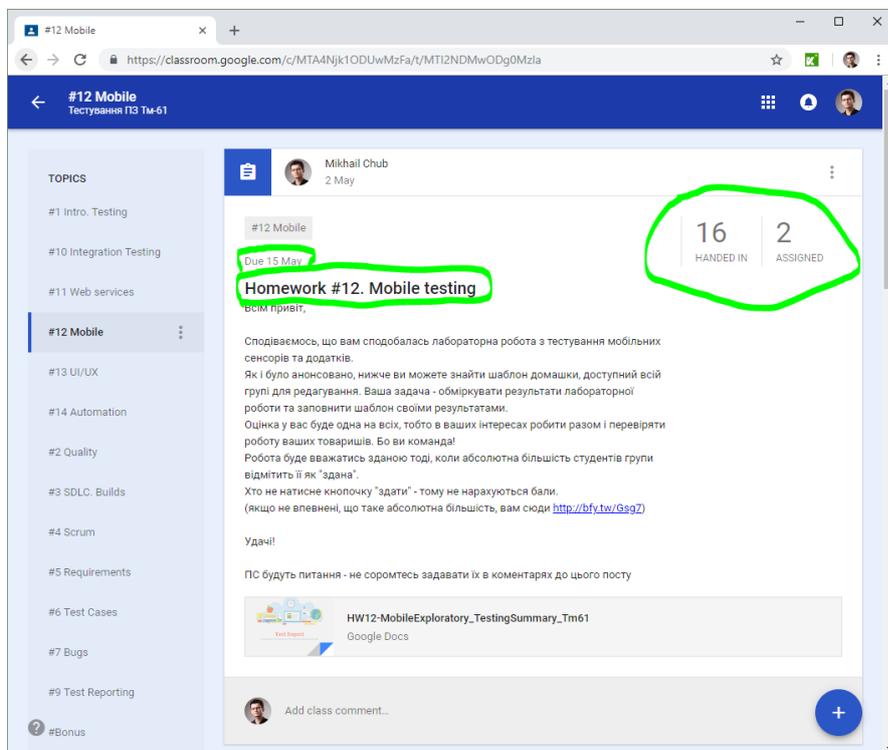


**Рис. 2.5.**  
Публікація  
методичних  
матеріалів в  
Google Classroom

**Рис. 2.6.**  
Нотифікація в пошті  
студента про нові  
публікації зроблені в  
Google Classroom

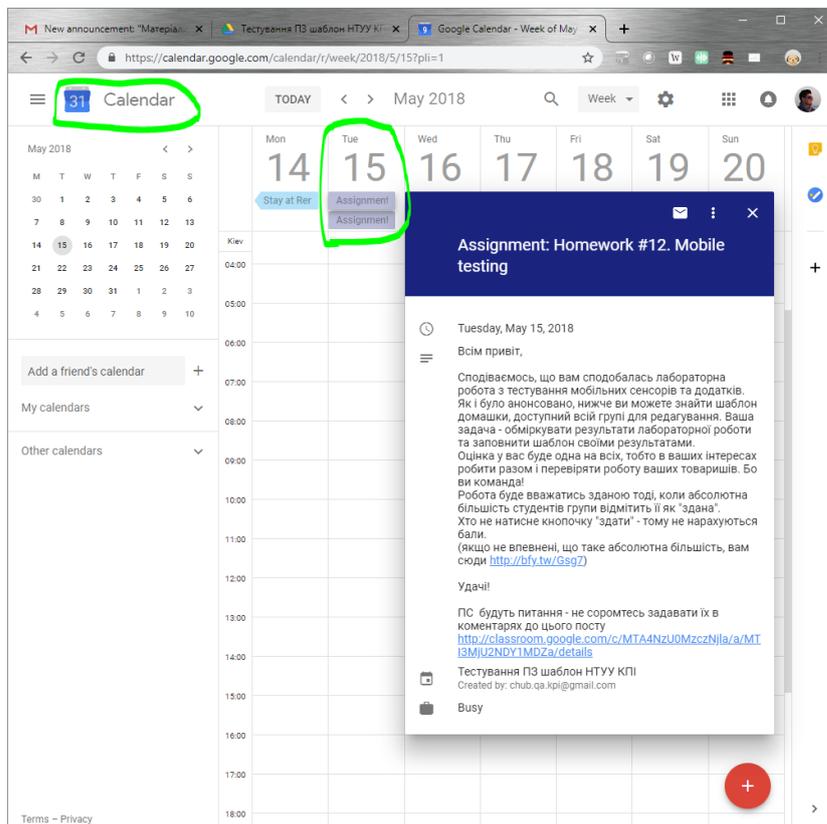


Після кожного практичного заняття в цій же стрічці публікується домашнє завдання (рис. 2.7.), яке може мати термін виконання - в такому випадку студенти отримують в календар нагадування зробити домашню роботу вчасно (рис. 2.8.). Якщо домашнє завдання містить файл із шаблоном для виконання, то Google Classroom автоматично зробить копію шаблона в персональнє хмарнє сховище кожному студенту (рис. 2.9.).

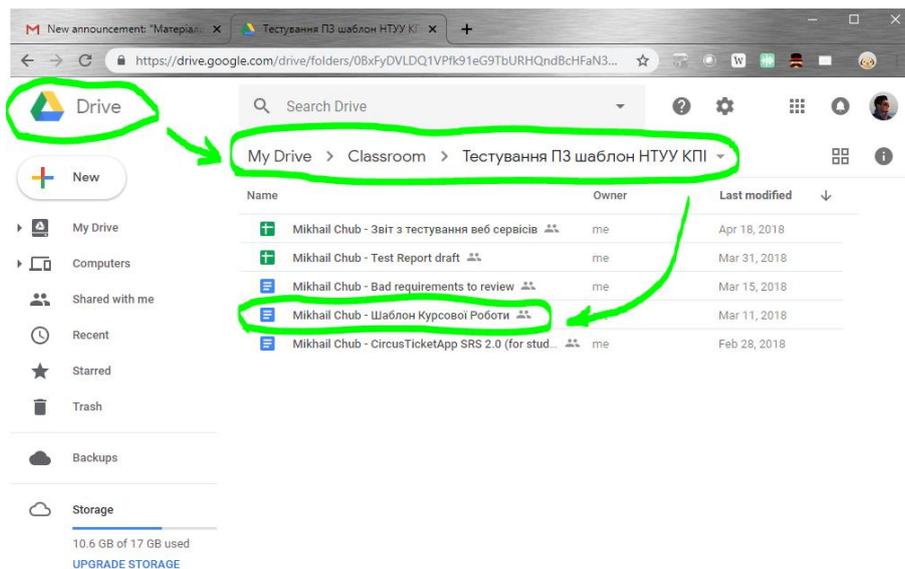


**Рис. 2.7.**  
Завдання на домашню роботу, опубліковане в Google Classroom

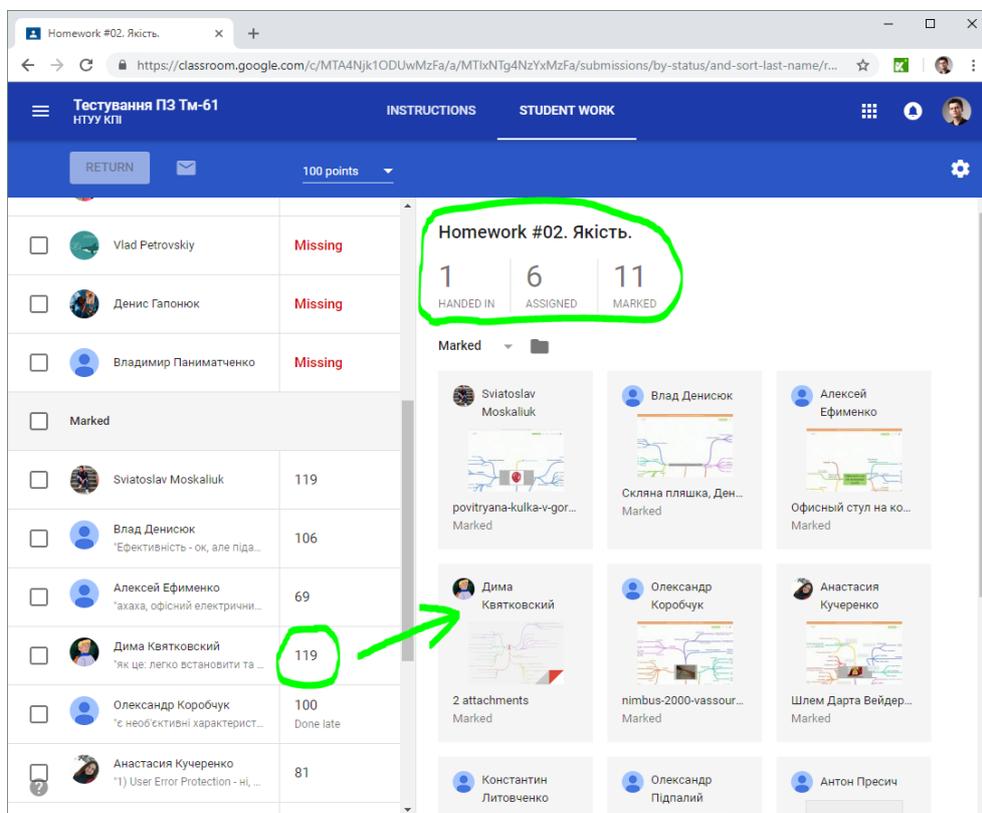
**Рис. 2.8.**  
Нагадування в календарі студента про кінцеву дату здачі домашньої роботи в Google Classroom



**Рис. 2.9.**  
Персональна копія шаблону документу для виконання домашнього завдання, автоматично створена в хмарному сховищі студента



Студенти здають домашню роботу у вигляді відповіді на публікацію із домашнім завданням. Відповідь містить посилання на файл із домашньою роботою. Всі файли зберігаються в хмарному сховищі. Викладач, в свою чергу, має всі здані домашні роботи консолідованими в одному місці, може перевіряти, повертати на доопрацювання, коментувати та виставляти оцінки - результати цих дій будуть одразу відомі студенту (рис. 2.10.).



**Рис. 2.10.**  
Перевірка домашніх робіт в Google Classroom

Оскільки вся активність з домашніми роботами відбувається в електронному вигляді, студентам немає необхідності друкувати свою роботу, шукати

викладача та витратити час на захист роботи. Час на практичних та лабораторних роботах може бути використаний на засвоєння та закріплення знань та навичок.

Додатково ми використовуємо календар, в якому заздалегідь створюємо розклад всіх лекцій та практичних занять, і надаємо доступ до нього студентам. Це дозволяє всім бути поінформованими: де, коли і яке саме заняття відбудеться. Також, у разі переносу будь-якої пари, всі підписані на календар одразу ж отримують сповіщення про це.

Оцінки студентів ми вносимо в загальний таблицю, створений на базі електронних таблиць Google Sheets (рис. 2.11.). Будь-хто в будь-який час може зайти і побачити успішність студентів групи та спрогнозувати фінальну оцінку за курс.

Name	Quality		Lifecycle		Scrum		SRS #1		SRS #2		TC #1		TC #2		Bugs #1		Bugs #2	
	HW 1	Q 1	HW 2	Q 2	HW 3	Q 3	HW 4.1	Q 4	HW 4.2	HW 5.1	Q 5	HW 5.2	HW 6.1	Q 6	HW 6.2	Q	HW	
Student 01	60%	13%	40%	74%	100%	50%	75%	75%	30%	80%	50%	75%	90%	60%	80%	54%	68%	
Student 02	100%	33%	95%	50%	100%	73%	90%	50%	100%	80%	64%	85%	100%	55%	90%	54%	93%	
Student 03	60%	30%	80%	71%	80%	82%	100%	42%	90%	100%	100%	100%	70%	80%	90%	67%	86%	
Student 04	85%	40%	40%	66%	80%	77%	75%	83%	80%	75%	79%	30%	40%	55%	0%	67%	56%	
Student 05	100%	100%	70%	100%	80%	100%	80%	92%	0%	95%	79%	90%	100%	80%	70%	92%	76%	
Student 06	65%	33%	85%	92%	80%	55%	80%	92%	65%	80%	71%	55%	80%	65%	50%	68%	71%	
Student 07	50%	20%	75%	58%	40%	45%	95%	50%	30%	0%	29%	0%	0%	35%	0%	39%	32%	

**Рис. 2.11.** Табелю з поточними балами за теми курсу в Google Sheets

Окремо варто зазначити, що всі вищевказані сервіси та інструменти доступні як для викладача так і для студентів у вигляді веб сторінки у будь-якому браузері, на будь-якому комп'ютері, а також у вигляді мобільного додатку для смартфонів на Android або iOS. Подібна гнучкість платформи (рис. 2.12.) робить можливою спільну віддалену працю студента та викладача маючи лише смартфон у руках.



**Рис. 2.12.** Освітні сервіси Google доступні на різноманітних пристроях

## 2.4. Програми для навчання

Для практичних занять було створено низку веб сервісів, розміщених в мережі Інтернет та веб магазин для придбання квитків на вистави. Вищевказані додатки поєднані між собою важливими для процесу навчання рисами:

- Добре опрацьованими спільними функціональними вимогами (всі додатки розроблялись як комплексне інтегроване рішення з метою демонстрації на практиці типових задач тестувальника ПЗ)
- Найбільш типовими та поширеними сценаріями використання (що полегшує подальше сприйняття аналогічного ПЗ поза межами навчального закладу)
- Найбільш типовими та поширеними сценаріями тестування (що полегшує в подальшому застосування отриманих знань на практиці шляхом їх перевикористання)
- Можливістю додавати або прибирати заздалегідь сконфігуровані помилки в ПЗ (зادля практики пошуку дефектів ПЗ та демонстрації ітераційного підходу до розробки ПЗ)

Це надає можливість застосування цих додатків на практичних заняттях із поступовим зануренням в задачі тестувальника ПЗ протягом всього життєвого циклу розробки ПЗ. На прикладі вищевказаних додатків студенти мали можливість практикувати знання та навички, отримані на парах (рис. 2.13.).

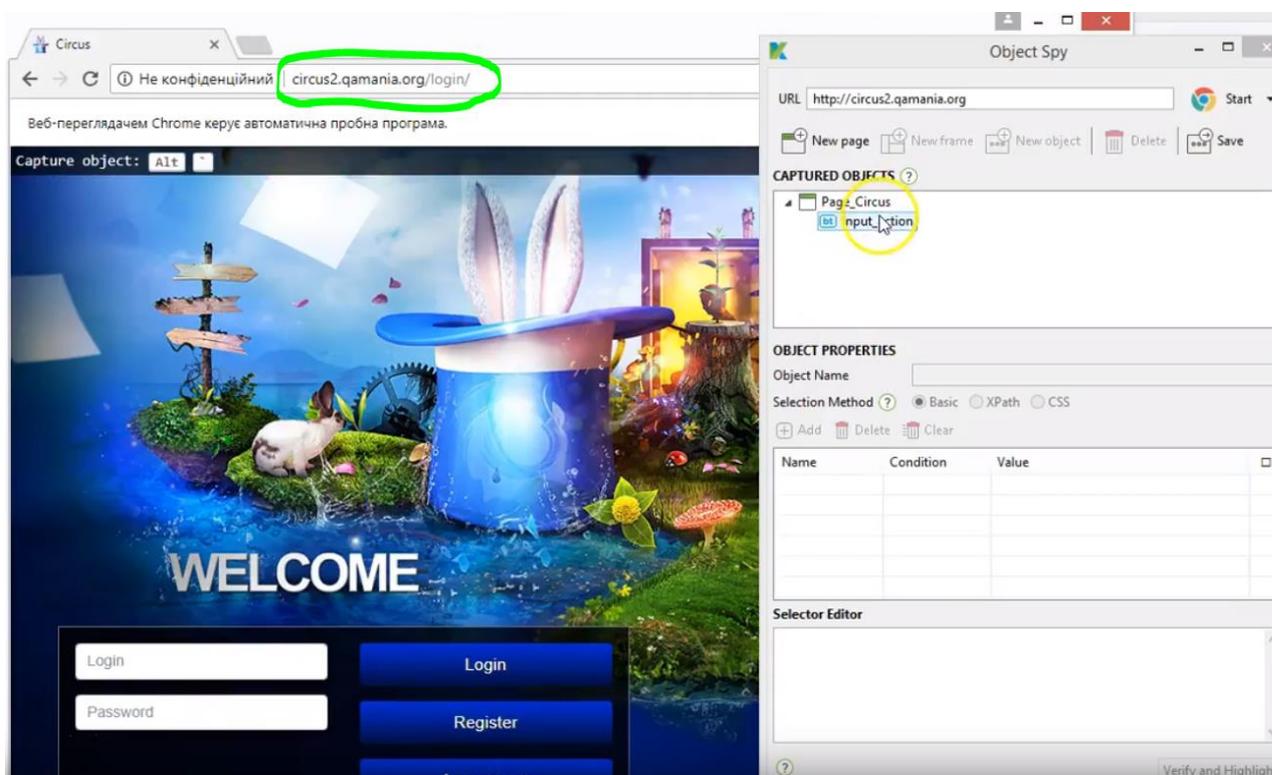


Рис. 2.13. Власне ПЗ для відпрацювання практичних навичок із студентами

## 2.5. Методології викладання, плюси та мінуси

### **Самостійність та відповідальність**

Мотивуємо студентів відвідувати заняття цікавим матеріалом та практичними прикладами.

На першій лекції було оголошено, що викладачі не віднімають бали за пропуск лекцій - проте на кожному практичному занятті буде контрольна робота по матеріалам минулої лекції.

В результаті лекції та практичні заняття наприкінці курсу відвідувало дуже мало студентів, низькі бали за контрольні нікого не лякали.

Висновок: не можна ставитись до всіх студентів як до дорослих мотивованих людей.

Вдосконалення на майбутнє: дозволити не відвідувати лекції лише тим, в кого немає боргів за домашніми роботами та середній бал за домашні та контрольні роботи не менше 80%.

### **Шаблони домашніх робіт**

Пропонуючи студентам домашні завдання, ми використали різні підходи до їх оформлення. Найбільш результативними та зручними для перевірки стали шаблони домашніх робіт. Кожен студент окрім завдання отримує документ, в який має вписати результати своєї роботи. Також шаблон може мати приклад заповнення з правильними даними. такий підхід потребує більше часу на етапі підготовки до занять, але економить час при їх перевірці та підвищує вірогідність того, що роботу буде зроблено, та матеріал засвоєно.

Висновок: для всіх домашніх робіт найкраще підготувати шаблони. При цьому треба враховувати, що шаблон може бути прямолінійним, на кшталт “ $2+2=?$ ”, так і варіативним: *“напишіть, які висновки можна зробити з першого закону термодинаміки”*.

### **Групові домашні роботи**

Часто буває, що вся група на практичному чи лабораторному занятті працює разом (за одним стендом, кресленням, інше). В такому випадку, щоб не перевіряти однакові домашні роботи, можна дати групове завдання. Тобто один єдиний документ, розроблений суспільними зусиллями всієї групи (за допомоги систем контролю версій типу Git чи Google Drive). В такому випадку оцінка за роботу ставиться однакова всій групі за умови, що в Google Classroom роботу здасть абсолютна більшість студентів групи (50% + 1).

Висновок: Не зважаючи на мотивування всіх студентів написати хоч щось, лише 1-2 людини в групі працюють над роботою.

Вдосконалення на майбутнє: допрацювати методологію таким чином, щоб повну оцінку отримували ті, хто вніс вклад в роботу не менше  $1/N$  частки, де  $N$  - кількість студентів в групі. Інші ж отримують лише 30% від оцінки за умови, якщо хоча б відмітили роботу як здану.

## **Змагання**

На практичному занятті пропонується розділити групу на декілька підгруп, кожна з яких буде виконувати схоже або однакове завдання. Після закінчення роботи влаштувати дебати, за успішну участь в яких давати додаткові бали. Важливо: для змагань треба мати чіткий регламент, щоб дебати не перетворилися на сварку між студентами.

Висновок: Методика зарекомендувала себе як вдала і доречна. Змагання підвищують зацікавленість студентів, залучають до роботи навіть тих хто зазвичай не виявляє ініціативи. Студенти вчаться навичкам командної роботи.

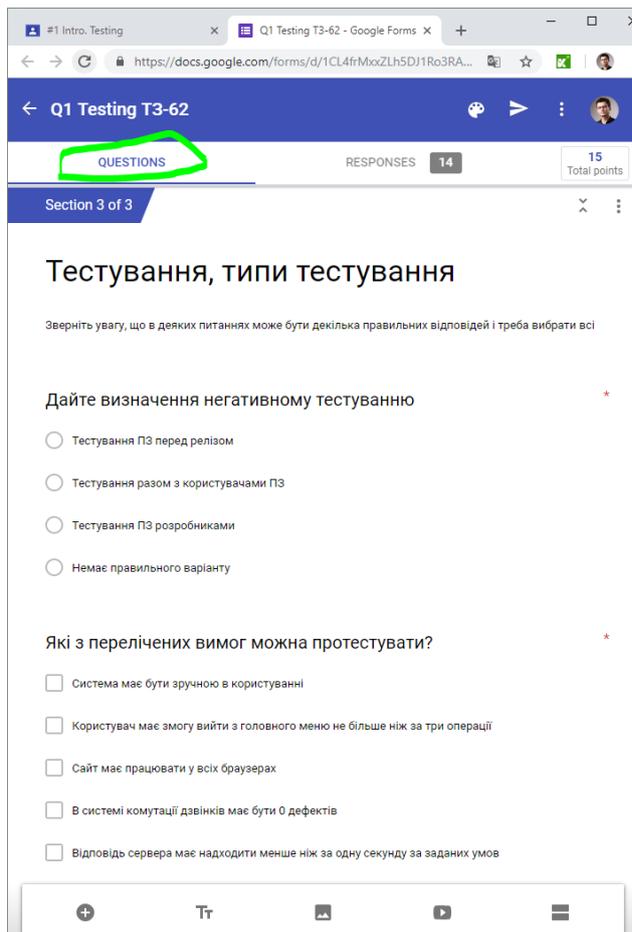
Вдосконалення на майбутнє: Умови змагань та критерії оцінювання мають бути продумані та оголошені заздалегідь. За контрпродуктивну дискусію на дебатах має бути правило нарахування штрафних балів, які відніматимуться від фінальної оцінки.

## **Автоматичні контрольні роботи**

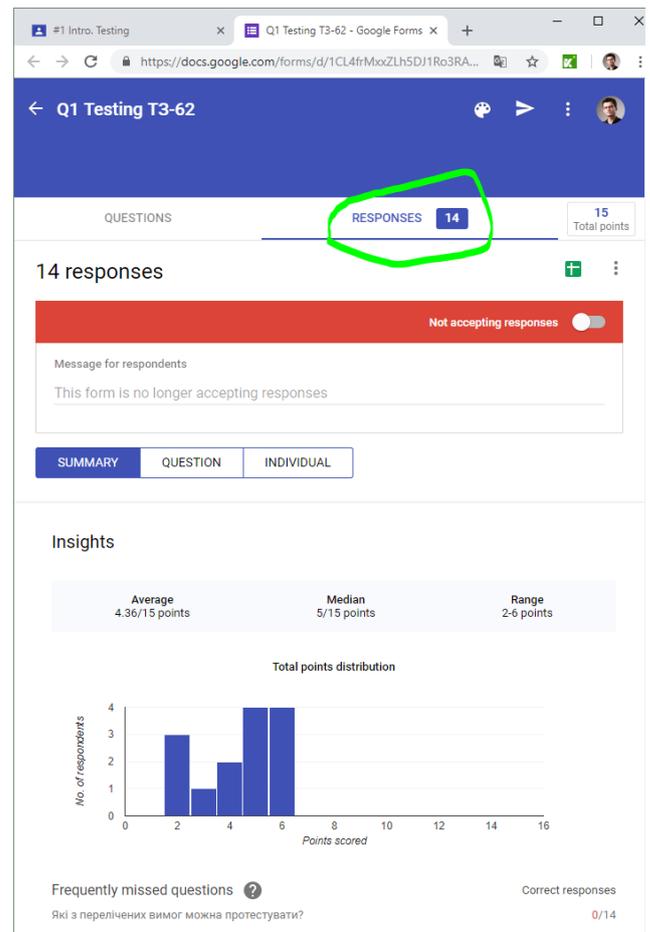
Для того, щоб перевірити, як засвоївся матеріал попереднього заняття чи лекції, на початку кожного наступного заняття ми проводимо контрольну роботу з допомогою сервісу опитувань Google Forms (рис. 2.14., 2.15.). Всі питання - закритого типу та однакові для всіх студентів однієї групи. Для того, щоб уникнути списування, використовуються наступні підходи:

- Контрольна робота лімітована за часом (10-15 хв). Після того, як час вийшов, посилання стає не дійсним і задача контрольної фізично унеможлиблюється.
- Всі питання та відповіді змішані випадковим чином для кожного студента.
- Всі питання мають декілька правильних відповідей, і для того, щоб отримати за відповідь бали, треба вибрати усі - але кількість правильних відповідей не озвучена заздалегідь.
- Питання не містять теоретичних визначень, щоб відповідь неможливо було знайти в пошуку. Замість цього питання практичні, на кшталт задач, які треба вирішити. Це гарантує, що не знаючи теорії, студент не відповість на питання.

Висновок: Тести - ефективний показник рівня знань студентів. Для того, щоб підвищити середній бал, тести рекомендовано проводити не на початку, а наприкінці практичного заняття - після повторення на практиці - більше шансів для студентів віднайти вірні відповіді, а також немає необхідності чекати на тих, хто запізнюється.



**Рис. 2.14.** Запитання в «Автоматичних» контрольних сервісу опитування Google Forms



**Рис. 2.15.** Статистика відповідей в «Автоматичних» контрольних сервісу опитування Google Forms

## Квести

Для того, щоб зробити навчання цікавішим та захопливим, ми анонсуємо, що протягом курсу в презентаціях, домашніх завданнях і матеріалах для самоопрацювання можуть міститись “пасхальні яйця”. Хто перший їх знайде та повідомить про це викладача - отримає додаткові бали.

Інший вид квесту - архів з паролем, в середині якого підказка і ще один архів, і так далі. На кожному рівні завдання мають ставати все складнішими та містити специфічні завдання з галузі предмету. Щоб вирішити їх, треба шукати рішення і використовувати знання своєї спеціальності, що мотивує до самостійного навчання.

**Висновок:** Квести мотивують лише тих, хто і так добре вчиться та має високий бал.

**Вдосконалення на майбутнє:** розробити завдання, які будуть цікаві тим, хто вчиться гірше, щоб зацікавити вчитись краще.

## 2.6. Висновки

По перше, використання для викладання сучасних платформ та інструментів, таких як Google Classroom, значно спрощує “паперову” роботу для викладача, залишає йому більше часу на створення цікавих та актуальних матеріалів, впровадження нових методик викладання.

По друге, нові методики викладання збільшують зацікавленість студентів у предметі, їх мотивованість, рівень залученості у практичну роботу.

Третьою ж запорукою успішного цікавого курсу є зворотній зв’язок, який дозволяє отримати викладачу об’єктивну картину сприйняття курсу студентами, розробити й вжити необхідні заходи для подальшого покращення курсу й як наслідок - рівня обізнаності студентів як майбутніх спеціалістів в тій чи іншій сфері.

## Список літератури

1. Ільченко М.Ю., Кравчук С.О. Телекомунікаційні системи. – К.: Наукова думка, 2017.
2. Кравчук І.М., Кравчук С.О. Сучасні підходи та інноваційні тенденції у викладанні дисциплін телекомунікаційного спрямування // Матер. 11-ї міжнар. наук.-техн. конф. “Проблеми телекомунікацій”, 18–21 квітня, 2017 р. – К., 2017. – С. 191–192.

# **Системні підходи та напрями розвитку**

---

**ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ ІНТЕРНЕТ-РЕЧЕЙ**

---

Баранов О. А.

---

**TELECOMMUNICATION OF INTERNET OF THINGS**

---

Baranov O.

The section discusses possible changes in the social model of providing telecommunications services under the influence of the widespread use of the Internet of Things technology, in particular, changes in the social model of telecommunications operators and the model of user requirements of entities receiving telecommunications services. Analyzes the direction of transformation of the business model of a telecommunications operator. Considered are legal models for increasing the efficiency of the use of the radio frequency resource of Ukraine.

У розділі розглядаються можливі зміни соціальної моделі надання послуг телекомунікацій під впливом широкого застосування технологій Інтернету речей, зокрема, соціальної моделі операторів телекомунікацій та моделі користувацьких вимог суб'єктів отримання телекомунікаційних послуг. Аналізуються напрями трансформації бізнес моделі оператора телекомунікацій. Розглядаються правові моделі підвищення ефективності користування радіочастотним ресурсом України.

### 3.1. Загальні положення

Інтернет речей може стати і, з великою вірогідністю, стане найбільш масштабним інноваційним проектом всього людства за всю історію земної цивілізації [1]. В умовах широкого поширення технологій Інтернету речей IoT (IP, Internet of Things), на думку експертів, кількість об'єктів, підключених до мережі інтернет, до 2025 р. може досягти 100 млрд., значна частина з яких буде генерувати великий обсяг даних, що будуть передаватись за допомогою бездротових телекомунікацій. При цьому прогнозується, що трафік передачі даних мобільних операторів зросте на три порядки (в 1000 разів) [2], отже відбудеться значне збільшення навантаження на різні діапазони радіочастотного ресурсу (РЧР), що призведе до різкого зростання актуальності вирішення проблеми ефективного користування обмеженим РЧР.

Завдяки появі та застосуванню технологій IP відбувається кардинальна зміна користувацьких вимог та очікувань до обсягу, переліку та якості послуг

електронних комунікацій, що базуються на радіотехнологіях. Це в свою чергу потребує трансформації бізнес моделей діяльності операторів електронних комунікацій (телекомунікацій), що власне обумовлює актуальність дослідження соціальних моделей діяльності операторів електронних комунікацій, зокрема і в частині користування радіочастотним ресурсом (РЧР).

З проблемою неефективності використання РЧР першими зіткнулися окремі держави, які проводили лібералізацію ринку надання послуг комунікацій, заснованих на використанні радіотехнологій. Причини неефективності були закладені практично з самого початку винаходу і використання радіотехнологій та зводяться до наступних [2]: хаотичний і необґрунтований розподіл окремих діапазонів РЧР для різних радіослужб і радіотехнологій; задіяння «витратних», з точки зору використання спектру, радіотехнологій (недосконалість технічних засобів передачі і прийому радіосигналів, значні позасмугові випромінювання; неоптимальні методи і способи обробки та модуляції сигналів тощо); недосконалість правового регулювання користуванням РЧР.

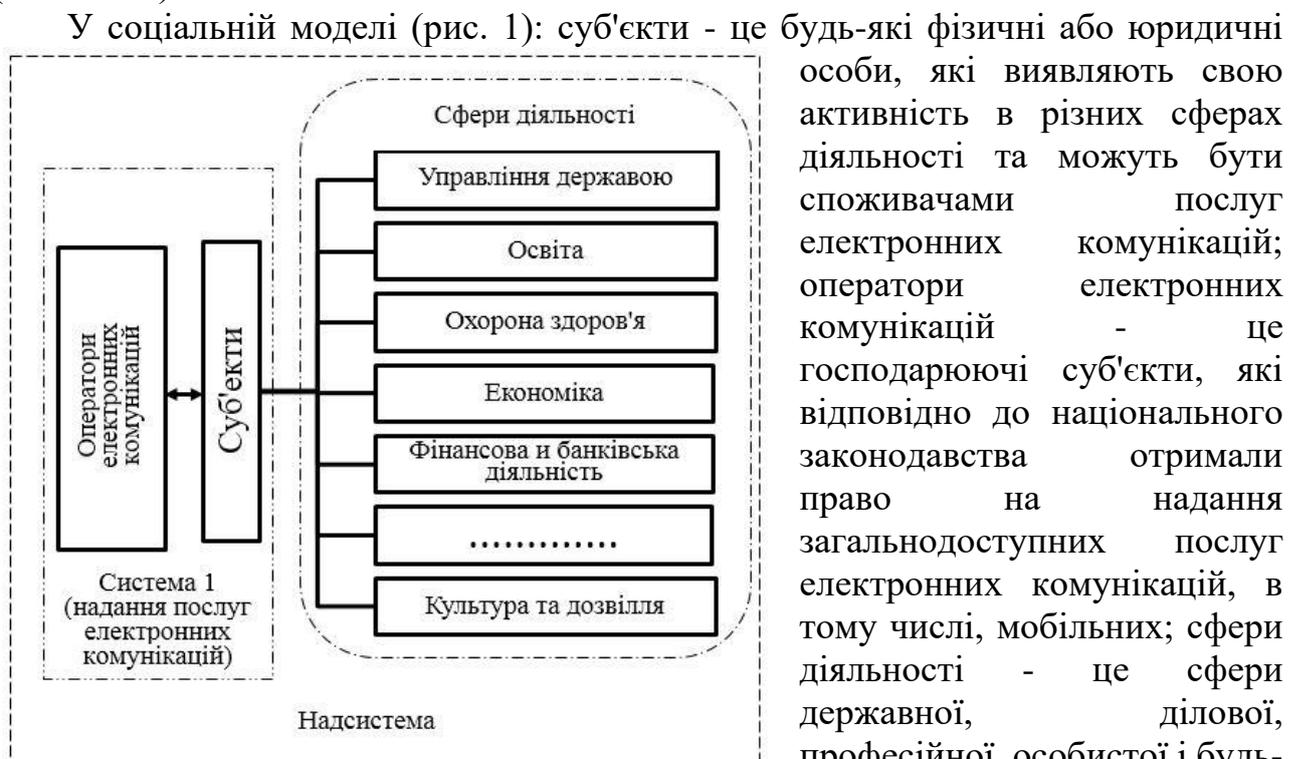
Міжнародний союз телекомунікацій (ITU), Європейський Союз, національні Адміністрації зв'язку та Національні регуляторні органи в сфері телекомунікацій (електронних комунікацій) докладають значних зусиль з пошуку шляхів вирішення проблеми забезпечення гармонізованого ефективного користування окремими діапазонами РЧР. Як правило, раніше ці зусилля зводилися до проведення регуляторних (правових), організаційних, інженерних та інженерно-технічних заходів. Звичайно, перш за все пошук підвищення ефективності користування радіочастотним ресурсом спрямовується в технічному напрямі. Операторами електронних комунікацій стали інтенсивно впроваджуватися нові радіотехнології, які мали кращі характеристики радіосигналів, що дозволяло передавати значні обсяги даних на одиницю спектра та надало потенційні можливості для обслуговування більшої кількості користувачів. Але задіяння технічного потенціалу не дозволило в повній мірі вирішити проблему підвищення використання РЧР.

З іншого боку зростання протягом трьох останніх десятиліть споживчих очікувань і вимог до обсягу, переліку та якості послуг електронних комунікацій, що базуються на радіотехнологіях, стимулювало появу прогресивних бізнес моделей діяльності операторів електронних комунікацій (далі - оператор) в частині користування окремими діапазонами РЧР. Вочевидь кардинальна зміна користувацьких вимог до послуг електронних комунікацій, яка обумовлена появою і функціонуванням технологій IP, буде мати наслідком необхідність створення нових бізнес моделей діяльності операторів електронних комунікацій, що власне обумовлює актуальність дослідження правових моделей користування діапазонами РЧР з метою їх удосконалення як одного з основних механізмів підвищення ефективності цього користування.

### 3.2. Соціальна модель сфер діяльності суб'єктів

Проблеми правового регулювання, які виникли внаслідок змін користувацьких вимог та очікувань до обсягу, переліку та якості послуг електронних комунікацій методологічно доцільно досліджувати, як і будь-які інші правові проблеми, вивчаючи соціальні моделі предметної сфери і правові моделі, які є надбудовою для цих соціальних моделей. При цьому, будемо вважати, що визначення і локалізація проблем, в тому числі правових, пошук причин їх виникнення та шляхів вирішення є більш ефективним, якщо виконувати дослідження не тільки в рамках соціальної системи деякої предметної сфери (сфери телекомунікацій), але в межах соціальної системи вищого порядку ієрархії. Це відповідає основному принципу системного підходу: аналіз проблеми слід проводити з урахуванням системи більш високого рівня, ніж та, в якій ця проблема має місце.

В нашому випадку соціальна модель яка потребує вивчення це соціальна модель системи надання послуг електронних комунікацій, а надсистемою – це соціальна система сфер діяльності суб'єктів з використанням послуг електронних комунікацій як сукупність операторів електронних комунікацій, суб'єктів і сфер діяльності цих суб'єктів. На рис. 1 зображена соціальна модель сфер діяльності суб'єктів з використанням послуг електронних комунікацій (надсистема) та її складова – соціальна модель системи надання послуг електронних комунікацій (система 1).



Малюнок 1. Соціальна модель надсистеми та її складова – соціальна модель системи надання послуг електронних комунікацій

використанням послуг електронних комунікацій, в тому числі, мобільних.

Істотний вплив на зміст і ефективність суспільних процесів, що відображаються соціальною моделлю діяльності суб'єктів з використанням послуг електронних комунікацій, здійснюють закономірності розвитку і особливості діяльності її трьох складових: система управління, регулювання та використання РЧР; оператори електронних комунікацій; суб'єкти.

Кожна з цих трьох складових може бути відображена відповідною соціальною моделлю.

Соціальна модель системи управління, регулювання та використання РЧР повинна описувати суспільні процеси у сукупності міжнародних і національних інституцій, що мають повноваження у сфері використання РЧР, операторів електронних комунікацій, які користуються окремими діапазонами або номіналами частот РЧР, та суб'єктів.

Зміст суспільних процесів в системі управління, регулювання та використання РЧР детермінується положеннями міжнародного права і національного законодавства. Останнє, в свою чергу формується з метою задоволення суспільного інтересу в наявності системи електронних комунікацій як технологічної складової інформаційної сфери України, основи функціонування та розвитку всіх сфер життєдіяльності особистості, суспільства і держави на базі використання інформаційно-комп'ютерних технологій.

Соціальна модель операторів електронних комунікацій може бути представлена у вигляді опису бізнес моделі їх діяльності як суб'єктів ринку електронних комунікацій, що користуються частиною РЧР. При цьому зміст суспільних процесів детермінується в основному положеннями національного законодавства, а також, в деяких випадках, положеннями міжнародного права. Крім того, зміст суспільних процесів детермінується цілями і інтересами як в цілому ринку електронних комунікацій, так і окремих операторів або груп операторів.

Соціальна модель суб'єктів як користувачів послугами електронних комунікацій практично зводиться до опису користувацьких вимог (очікувань) до номенклатури, змісту та якості цих послуг, які формуються під впливом особливостей їх діяльності в різних сферах соціального життя.

### 3.3. Бізнес-моделі

Набагато більш динамічні зміни відбуваються з бізнес моделями діяльності операторів електронних комунікацій як відповідь на виклики, пов'язані зі змінами користувацьких вимог, іноді, дуже кардинальними, суб'єктів (споживачів послуг).

Протягом близько 40 останніх років в рамках соціальної моделі (рис. 1) діяльність операторів мобільних електронних комунікацій, які користуються РЧР, в основному була зорієнтована на надання послуг суб'єктам, які використовують поодинокі кінцеві пристрої (мобільні термінали).

До кінця 90-х років минулого століття світовий ринок загальнодоступних послуг електронних комунікацій, в тому числі, мобільних електронних комунікацій (МЕК), розвивався в основному як ринок надання послуг голосової телефонії. Основною відмінною рисою соціальної моделі системи 1 (рис. 1) в ці роки була орієнтованість кожного оператора МЕК на власну самостійність (автономність) при наданні послуг своїм абонентам. З урахуванням останнього, бізнес модель діяльності операторів МЕК відповідну соціальну модель системи 1 умовно назвемо «автономна».

Виходячи з загальнодоступності послуг МЕК система 1 є системою масового обслуговування, тобто системою з однаковими номенклатурою, змістом і показниками якості послуг для всіх користувачів або їх окремих груп. При цьому особливості змісту активності суб'єктів в самих різних сферах діяльності не впливають на вимоги до показників якості надання послуг МЕК. Справедливості заради, слід зауважити, що виконання певних функцій в деяких сферах діяльності обумовлювало формування особливих вимог до показників якості послуг голосової телефонії. Але для цих випадків створювалися окремі, спеціальні мережі МЕК, які не належали до мереж загального користування.

Під впливом широкого поширення комп'ютерних та інтернет технологій з 2000-го р. став впроваджуватися розроблений Міжнародним союзом телекомунікацій (ITU) стандарт мобільного зв'язку 3G (3 покоління), який дозволив надавати користувачам набір послуг МЕК, що об'єднують як високошвидкісний мобільний доступ до мережі Інтернет, так і технологію радіозв'язку, яка формує канал передачі даних.

Для бізнес моделі «автономна», в переважній більшості випадків, показники надійності і стійкості роботи мережі мобільних електронних комунікацій не є критичними, як не є критичними випадки тимчасового припинення надання послуг для конкретного користувача або навіть груп користувачів. Також для оператора не є критичною проблема надійного забезпечення географічно суцільного покриття по всій території країни для забезпечення можливості надання послуг.

Таким чином, для формального опису бізнес моделі «автономна», яка домінувала в світі на ринку послуг МЕК до кінця 90-х років, характерно наступне.

*А. В частині використання РЧР:*

- 1) ліцензування – наявність ліцензії, виданої регулятором, – єдина підстава для користування виділеним діапазоном РЧР;
- 2) дві ліцензії – одна послуга: ліцензія на право користування РЧР видається тільки оператору, який має відповідну ліцензію на право надання послуг МЕК;
- 3) ексклюзивність – діапазоном РЧР користується тільки той оператор, якому видано ліцензію на нього;
- 4) суцільне покриття – вимога забезпечення надання послуг МЕК на всій території на яку видано ліцензію на користування РЧР;
- 5) національне покриття – прагнення мати ліцензію на право користування РЧР на всій території країни;

б) нераціональність – еkleктичні показники ефективності користування РЧР оператором.

У більшості країн, що входять до ІТУ, під ліцензією розуміють спеціальний документ, що засвідчує юридичне право суб'єкта на користування частиною РЧР. Так в Регламенті радіозв'язку є імперативна норма - «жодна передавальна станція не може встановлюватися або експлуатуватися приватною особою або будь-яким підприємством без ліцензії, виданої у відповідній формі та відповідно до положень цього Регламенту урядом або від імені уряду країни, в якій знаходиться дана станція» [8]. При цьому уряд, котрий видає ліцензію на мобільну станцію або мобільну земну станцію повинен вказувати в ній в ясній формі дані про станцію, включаючи її назву, позивний і, при необхідності, категорію публічної кореспонденції, а також загальні характеристики установки. А для наземних мобільних станцій ліцензія повинна містити пункт про заборону роботи цих станцій за межами кордонів країни, що видала ліцензію.

*Б. В частині мережі мобільних електронних комунікацій:*

- 1) ексклюзивність – конкретна мережа МЕК, як комплекс технічних засобів електронних комунікацій і споруд, експлуатується лише одним оператором;
- 2) національне покриття – мережа мобільних електронних комунікацій для надання послуг МЕК будується по всій території країни;
- 3) невимогливість – невисокі вимоги до стабільності, надійності і стійкості функціонування мережі.

*В. В частині послуг, що надаються:*

- 1) однорідність – однакові вимоги до якості послуг, що надаються будь-яким оператором будь-якому користувачеві;
- 2) інваріантність – вимоги до показників якості надання послуг не залежать від особливостей сфери діяльності суб'єктів (користувачів послуг);
- 3) невимогливість – невисокі вимоги до безперервності, надійності та стійкості надання послуг;
- 4) одноманітність – потенційно однакова номенклатура послуг, що надаються всіма операторами для будь-якого з користувачів;
- 5) рівність – відносно однакова собівартість надання конкретної послуги при інших рівних умовах (ємності мережі, зони покриття, радіотехнологіях).

Однак, нові вимоги суб'єктів до послуг, що надаються, особливо, в частині мобільності, привели до необхідності вирішення проблеми можливого використання операторами ресурсів МЕК іншого оператора.

Першим прикладом такого «запозичення» ресурсів може служити використання можливостей мереж МЕК інших операторів в інтересах забезпечення роумінгу, який з'явився після 1991 р. з введенням в експлуатацію нового стандарту мобільного зв'язку - 2G (друге покоління). Роумінг – це надання послуг мобільного (стільникового зв'язку) користувачеві поза зоною обслуговування «домашньої» мережі МЕК його оператора за рахунок використання ресурсів іншої (гостьовий) мережі МЕК. При цьому, бізнес модель діяльності операторів як і раніше залишалася «автономна».

З початком процесу лібералізації в галузі телекомунікацій (початок 90-х років), особливо, після прийняття Директиви 95/62 / ЄС Європейського парламенту 13 грудня 1995, відкрилися правові можливості доступу для будь-якого оператора до інфраструктури оператора домінуючого на ринку послуг на прозорій, розумної цінової і недискримінаційній основі. Така ситуація стимулювала появу нової бізнес моделі діяльності операторів – мобільний віртуальний мережевий оператор MVNO (Mobile Virtual Network Operator). На сьогодні ні практика, ні наука поки не виробили єдиного і узгодженого визначення MVNO.

Одне з найбільш ранніх визначень дав регулятор Великобританії Ofcom: MVNO - підприємство, яке купує оптові мобільні послуги, але не володіє або не керує мережею МЕК [1]. Фактично мова йде про провайдинг-послуг мобільного зв'язку. У матеріалах ІТУ дано таке визначення: MVNO - оператор, що надає послуги мобільного зв'язку для кінцевих користувачів, але не має державної ліцензії на використання своєї власної радіочастоти [2].

Отже, можна констатувати, що сутність бізнес моделі MVNO полягає в використанні ресурсів мережі іншого оператора: мережевих або частотних, або тих і інших разом для надання послуг МЕК.

На розвиток бізнес моделі MVNO вплинули дві тенденції: ринкова і регуляторна.

Ринкова пояснюється з одного боку бажанням оператора отримати хоча-б якийсь дохід від своїх незавантажених мережевих і частотних ресурсів надаючи їх в користування (оренду) іншому оператору, а з іншого - бажанням задовольнити такі вимоги суб'єктів, які не можуть бути задоволені в рамках надання масових загальнодоступних послуг МЕК або, іншими словами, мова йде про адаптацію показників якості послуг МЕК для конкретного функціонально і/або географічно обмеженого сегмента діяльності споживача послуг.

Регуляторна пояснюється прагненням Національного регулятора підвищити ефективність користування РЧР за рахунок пошуку нових бізнес моделей діяльності операторів, шляхом формування для домінуючих операторів можливих додаткових зобов'язання щодо підключення до власних МЕК сторонніх MVNO.

Починаючи з 2000 р. бізнес модель MVNO стала застосовуватися в різних країнах з різною інтенсивністю. На сьогодні відомі 4 базових моделі MVNO: Branded Reseller MVNO, Light MVNO, Full MVNO, MVNE (Mobile Virtual Network Enabler). Крім того, завдяки новим комп'ютерним технологіям, зокрема, технологіям хмарних обчислень, недавно з'явилася інноваційна п'ята модель віртуального MVNO (vMVNO), в якій компоненти мережевої операторської інфраструктури реалізовані на стандартному ІТ-обладнанні (дата-центри, сервера, системи зберігання даних, локальні мережі, мережі передачі даних тощо) [1]. Кожна з названих бізнес моделей має свою специфіку, але всіх їх об'єднує те, що вони орієнтовані на використання операторами MVNO мережевих ресурсів радіодоступу та частотних ресурсів іншого оператора.

Таким чином, з початку 2000-х років почався етап розвитку нового підходу до використання РЧР – спільне використання частини РЧР декількома операторами. Таку бізнес модель діяльності операторів і віртуальних мобільних операторів (MVNO) назвемо «автономно-спільна», що означає збереження основних характеристик бізнес моделі «автономна» зі створенням правових умов для спільного використання певних частотних ресурсів, наданих в користування одному оператору іншим оператором.

Для бізнес моделі «автономно-спільна» у порівнянні з бізнес моделлю «автономна» є відмінності тільки в наступних пунктах.

*А. В частині використання РЧР:*

3) спільність – діапазоном РЧР користується не тільки той оператор, якому видано ліцензію на нього, а й інший, який не має ліцензії;

4) суцільне покриття або локальне покриття – вимога забезпечення надання послуг МЕК на всій території на яку видано ліцензію на користування РЧР та можливість надання послуг МЕК іншим оператором на частини території першого оператора;

6) відносна раціональність – збільшення показників ефективності користування РЧР оператором за рахунок більшої інтенсивності його використання.

*Б. У частині мережі мобільних електронних комунікацій:*

1) спільність – конкретна мережа МЕК оператора, як комплекс технічних засобів електронних комунікацій і споруд, може експлуатуватися ще й іншими операторами.

*В. В частині послуг, що надаються:*

5) варіативність – різна собівартість надання конкретної послуги для оператора, що має мережу МЕК і право на користування РЧР, і для оператора, що використовує ресурси першого.

Одночасно, практично з початку 2000 років під впливом зростання попиту на послуги МЕК як в частині їх наявності, так і в частині їх якості та різноманітності, на міжнародному та національному рівнях став інтенсивно проводиться пошук інших результативних напрямків підвищення ефективності використання РЧР.

Першим сигналом про розуміння наступаючого обмеження можливостей жорсткого регулювання використання РЧР та інженерно-технічних рішень була поява концепції WAPECS (Wireless Access Policy for Electronic Communications Services) - політики бездротового доступу для надання електронних комунікаційних послуг, яка стала реалізовуватися в ЄС з 2005 р. [9]. Вважають, що реалізація концепції WAPECS стала центром зусиль Комісії Євросоюзу з координації регіонального (європейського - авт.) руху в спектральній політиці в бік нейтральності технологій та послуг, а також «гнучкого користування» розподіленими діапазонами частот [2]. Одночасно, стверджується, що реалізація WAPECS досі не дала доказів тези про те, що жорстка регуляторна політика призвела до неефективного використання спектра.

Звичайно, не жорстке регулювання використання РЧР спричинило малоефективний розподіл і виділення РЧР як в світовому масштабі, так і в національному. Особливо, в національному. Але саме, в умовах жорсткого регулювання використання РЧР стало можливим хаотичне (волютаристичне) розподілення та виділення радіочастот. Причини неефективності такого розподілу при цьому могли бути найрізноманітнішими: починаючи від історичних і технічних і закінчуючи банальними – корупційними, але результат виявився такий, що стає одним із серйозних бар'єрів на шляху широкого впровадження технологій ІР.

Отже, протягом кількох десятків років користувацькі вимоги до номенклатури, змісту та якості послуг електронних комунікацій істотно не змінювалися, за винятком, вимоги до можливості передачі цифрових даних. Більш того, користувацькі вимоги до цих послуг формувалися в основному під впливом змісту пропозицій операторів електронних комунікацій.

### 3.4. Користувацькі очікування

Однак, все кардинально змінюється в умовах використання технологій ІР, які по суті забезпечують і забезпечуватимуть реальну діяльність фізичних і юридичних осіб як з надання найрізноманітніших послуг, так і по проведенню робіт різного змісту практично у всіх сферах людської активності. Для споживача, чия діяльність базується на технологіях ІР, вимоги до надійності і стійкості роботи мережі мобільних електронних комунікацій, які забезпечують функціонування технологій ІР, стають критичними, а вимоги до якості надання послуг, в тому числі і до географічного покриття такими послугами досить суворі. Кількість можливого кінцевого обладнання (мобільних пристроїв), задіяного в технологіях ІР у одного споживача, може обчислюватися сотнями і десятками тисяч. Переривання надання послуг мобільних електронних комунікацій практично повністю виключається тому, що може призвести до зупинки діяльності, наприклад, руху автономного автомобільного транспорту.

Сучасна соціальна модель суб'єктів-користувачів послугами електронних комунікацій може бути представлена шляхом опису основних користувацьких вимог (очікувань) до номенклатури, змісту та якості цих послуг, які будуть формуватися під впливом особливостей діяльності цих суб'єктів за умови використання технологій Інтернету речей.

А. В частині загальносистемних користувацьких вимог.

1. Адаптивна (гнучка) зміна змісту і показників якості послуг електронних комунікацій з метою оптимізації витрат на їх отримання.

Фактори впливу: мігруюча за географічною локалізацією концентрація пристроїв, підключених до мережі Інтернет; добова нерівномірність як за обсягом, так і за швидкістю трафіку даних; добова нерівномірність змісту та якості послуг електронних комунікацій.

Приклади видів діяльності: пересування транспортних засобів; логістичні завдання; проведення робіт, що вимагають сонячного освітлення (аграрні,

ландшафтні тощо роботи); технології, які мають режим очікування (служби порятунку, надання екстреної допомоги і т. п.).

2. Необхідність наявності на певній обмеженій території різних радіотехнологій для різних цілей комунікації.

Фактори впливу: різні завдання, наприклад, забезпечення хмарних або туманних обчислень, внутрішньосистемний або міжсистемний інформаційний обмін і т. п.; режим енергозбереження; різні вимоги до показників якості послуг для різних пристроїв, підключених до мережі Інтернет.

Приклади видів діяльності: аграрна сфера – збір даних від стаціонарних датчиків з малою періодичністю (параметри вологості ґрунту, зрілість врожаю і т. п.), збір даних від мобільних датчиків з високою періодичністю (трактора, тварини, транспорт і т.п.); медична сфера – передача даних під час дистанційного проведення операцій або передача даних віддаленого моніторингу показників здоров'я людини і т. п.

3. Доступність в будь-якій точці локальної території (території, межі якої визначаються територіальними інтересами суб'єкта або групи суб'єктів).

Фактори впливу: динамічні переміщення у просторі виконавчих і вимірювальних пристроїв; мобільність складових виробничого або іншого процесу в діяльності суб'єктів; динамічні переміщення у просторі об'єкту інтересу діяльності суб'єктів.

Приклади видів діяльності: логістична діяльність по переміщенню замовлених товарів покупцеві як в умовах міста, так і в умовах малозаселених місцевості; дистанційне зондування Землі за допомогою дронів або інших літальних апаратів; моніторинг дорожнього трафіку.

Б. В частині спеціальних вимог.

1. Великі швидкості та обсяги передачі даних.

Фактори впливу: велика кількість пристроїв, підключених до мережі Інтернет; велика кількість пристроїв, одночасно генеруючих великі обсяги даних; використання додатків, що вимагають великої кількості даних за одиницю часу.

Приклади видів діяльності: перевезення за допомогою автономно керованих автомобілів; реалізація різних видів діяльності в міських умовах; моніторинг пересування автомобілів в умовах мегаполісів.

2. Висока надійність надання послуг електронних комунікацій.

Фактори впливу: велика кількість пристроїв, підключених до мережі Інтернет; велика кількість пристроїв, одночасно генеруючих великі обсяги даних; використання додатків, що вимагають великої кількості даних в одиницю часу.

Приклади видів діяльності: організація промислового виробництва; перевезення за допомогою автономно керованих автомобілів; управління літаючими об'єктами (дрони, легкі літаки, аеротаксі); управління дорожнім рухом в умовах мегаполісів; управління інфраструктурним об'єктом (міське господарство, енергетика, розумний будинок і т. п.).

3. Малий час затримки переданих даних.

Фактори впливу: використання додатків, що вимагають високої швидкості реакції на події; велика кількість пристроїв, підключених до мережі Інтернет; наявність великої кількості взаємоз'єднаних мереж мобільних електронних комунікацій (МЕК).

Приклади видів діяльності: дистанційне проведення хірургічних операцій, автономно керовані автомобілі; управління дорожнім рухом в умовах мегаполісів і т. д.

Особливо слід враховувати те, що всі ці вимоги або частина з них мають бути задоволені не для всієї множини суб'єктів-користувачів послугами МЕК, а тільки для окремих їх груп і, як правило, на обмеженій території (поля землеробства або скотарства, території заводів, торгових і розважальних комплексів, території населених пунктів, транскордонні автомобільні магістралі тощо).

### 3.5. Локальні екосистеми електронних комунікацій

Аналіз сучасного ринку електронних комунікацій дає підстави для наступного висновку: вирішення проблеми задоволення кардинальної зміни користувацьких вимог до номенклатури, змісту та якості цих послуг стане можливим тільки за умови переходу від системи масового обслуговування «невимогливих» користувачів до спеціально створених «локальних» екосистем електронних комунікацій для окремих суб'єктів або їх груп. Саме спеціально побудовані *локальні екосистеми електронних комунікацій* (ЛЕЕК) дозволять формувати гнучкий ексклюзивний набір послуг для кожного окремого суб'єкта чи кожної групи суб'єктів, які використовують технології IP для реалізації найрізноманітнішої діяльності.

Передбачається, що ЛЕЕК повинні будуть відповідати найвищим вимогам до надійності та сталості функціонування, особливо в частині недопущення переривань в наданні послуг і забезпечення гарантовано високого (потрібного) рівня якості. Саме ЛЕЕК на відмінність від загальнодоступних телекомунікаційних мереж мають змогу бути географічно як локальними, так і транскордонними, орієнтованими на одного користувача або на групу користувачів та забезпечувати функціонування комплексів і систем IP, що включають сотні та десятки тисяч кінцевих пристроїв, в якості яких можуть використовуватися сенсори, виконавчі пристрої, програмно-технічні системи і комплекси, системи дата-центрів і хмарних обчислень і багато іншого.

При цьому Інтернет, який стає доступним за допомогою ЛЕЕК, повинен мати властивості «індустріального» Інтернету, оскільки ого призначення – це забезпечення безперервного функціонування технологій IP як технології, на яких базується та чи інша діяльність суб'єктів. Звичайно, індустріальний Інтернет може бути використано і в інтересах окремих фізичних осіб, наприклад, для забезпечення роботи технологій «розумний будинок» або для системи безперервного моніторингу показників здоров'я пацієнтів з груп високого ризику.

Під індустріальним Інтернетом будемо розуміти мережу Інтернет, що має в якості основних властивостей: гарантовано високу (необхідну для конкретних видів діяльності) якість послуг передачі даних, високу надійність цього процесу, що забезпечується як надійністю роботи мереж МЕК, так і оптимальною побудовою топології мережі з необхідним резервуванням, адаптивність до змін інтенсивності трафіку даних і пікових навантажень.

В умовах широкого впровадження і використання технологій ІР перед операторами постає завдання забезпечення послуг так званого індустріального Інтернету шляхом побудови ЛЕЕК, що призводить до необхідності докорінної зміни бізнес моделі діяльності.

Зазначені користувацькі вимоги в умовах ЛЕЕК з більшою ефективністю можна задовольнити за рахунок побудови гібридних мереж електронних комунікацій на основі гармонійного об'єднання фіксованих і мобільних мереж за умови використання сукупності різних радіотехнологій. При цьому технологія 5G крім задоволення ексклюзивних користувацьких вимог щодо послуг електронних комунікацій, обумовлених застосуванням технологій ІР, дозволить також задовольнити такі специфічні вимоги як низька вартість, низьке енергоспоживання кінцевими пристроями і можливість підтримки дуже великої кількості пристроїв, підключених до однієї і тієї ж базової станції.

Можна констатувати той факт, що бізнес у сфері надання послуг електронних комунікацій, в тому числі і мобільних, довгі десятиліття розвивався за моделлю бізнес споживач В2С (business-to-consumer). При цьому споживач був масовим – фізичні та юридичні особи. Але, з часом, «монолітна», з точки зору споживчих вимог, масовість стала піддаватися ерозії. Інтереси бізнесу мотивували операторів помічати і враховувати різні вимоги окремих груп користувачів: молоді, студентів, локальних бізнесів, етнічних груп, груп суб'єктів, об'єднаних спільними інтересами або орієнтованих на лояльність до якогось бізнесу тощо.

Найкращою бізнес моделлю діяльності операторів МЕК, що дозволяє врахувати різні інтереси різних груп користувачів і в подальшому трансформувати це в якісні показники послуг, є бізнес модель MVNO (Mobile Virtual Network Operator, MVNO, мобільний віртуальний мережевий оператор). В останні роки бізнес модель MVNO стала користуватись популярністю оскільки створила можливості для певної групи користувачів в умовах загальнодоступної мережі мобільних електронних комунікацій ексклюзивно надавати послуги МЕК з підвищеними показниками якості, додатковими функціями, маркетинговими послугами тощо. Свідченням актуальності інтересу до цієї бізнес моделі є прогноз, що переповнений європейський ринок MVNO до 2020 року виросте на 5% і досягне 110,7 млн. користувачів [2].

Таким чином, ми спостерігаємо становлення і розвиток нової бізнес моделі: бізнес-груповий споживач В2gС (business to group consumer), яка отримує ще більший імпульс розвитку в умовах впровадження технологій ІР. Саме бізнес моделі В2gС дають змогу забезпечити дуже швидкий відгук на зміни користувацьких вимог суб'єктів, шляхом побудови нових ЛЕЕК. В сучасних

умовах бізнес моделі В2gС найбільш ефективно реалізується за допомогою MVNO, оскільки це створює можливість для певної групи користувачів ексклюзивно надавати послуги ЛЕЕК з підвищеними показниками якості, додатковими функціями, маркетинговими послугами тощо.

### 3.6. Колективне та спільне використання радіочастотного спектру

Однак, при цьому виникають серйозні проблеми, пов'язані з дефіцитом частотного ресурсу, необхідного для забезпечення прийнятної якості послуг в умовах триваючого експоненціального зростання трафіку, особливо в умовах ери Інтернету речей [5]. Причини неефективності сучасного стану користування РЧР могли бути різними: починаючи від історичних і технічних і закінчуючи банальними – корупційними, але результат виявився таким, що стає одним із серйозних бар'єрів на шляху широкого впровадження технологій IP.

Одним з напрямків підвищення ефективності – це гнучке спільне і гнучке колективне використання РЧР. Чому важливо забезпечити гнучкість у спільному або колективному використанні РЧР? Перш за все, це пов'язано з необхідністю забезпечення максимально можливої економії часу, необхідного на введення інновацій в ринковий оборот, в тому числі, і в частині послуг електронних комунікацій. Другий фактор – це надання можливості для маленьких або молодих компаній використовувати інновації в умовах конкуренції з великими гравцями ринку. Інакше, вони завжди будуть поступатися їм в конкурентній боротьбі.

Відомі різні підходи до колективного і спільного використання радіочастотного спектру. Частина цих підходів базується на технічних рішеннях, інші ж ґрунтуються на правових моделях.

*Колективне використання спектра (КВС) (CUS, Collective Use of Spectrum)* дозволяє необмеженій кількості незалежних користувачів і/або пристроїв одночасно отримувати доступ до спектру в одному і тому же діапазоні частот в певній географічній області за умови чітко визначеного набору вимог [1].

Розрізняють 3 режими КВС для певних діапазонів РЧР, відмінність між якими полягає в обмежувальних умовах користування радіочастотами [1].

1. Режим загального користування – діапазон радіочастот виділяється для будь-яких додатків на без ліцензійній або без реєстраційній основі з мінімальними обмеженнями на використання (тільки щоб уникнути шкідливих перешкод).

2. Режим конкретних програм – діапазон виділяється для конкретних додатків або технологій на без ліцензійній або без реєстраційній основі з обмеженнями, обумовленими вимогами захищеності від перешкод або вимогами мати більш високу потужність (у випадках, коли це пов'язано з безпекою або безпекою життя).

3. Режим обмеження – у випадках значного ризику появи шкідливих перешкод діапазон радіочастот виділяється для конкретних додатків або

технологій на полегшеній ліцензійній або реєстраційній основі з можливістю передачі спектра іншим ліцензованим користувачам.

При цьому концепція КВС полягає в тому, щоб дозволити всім операторам користуватись спектром з будь-якими додатками, службами та технологіями в рамках деяких обмежень, що підвищує ефективність використання спектра

Переваги такого підходу: зниження адміністративного бар'єру для використання РЧР; зниження витрат на адміністрування; створення умов для інновацій і стимулювання попиту. Основний недолік КІС – незворотність виділення діапазону РЧР [1].

Перші два режими колективного користування РЧР добре описані в національному законодавстві. Третій режим КВС практично відповідає відомому в національному законодавстві режиму виділення радіочастот на вторинній основі, але без права передачі права користування спектром іншим ліцензованим користувачам. При цьому визначення варіацій використання РЧР на вторинній основі вимагає більш гнучкого підходу, а в національному законодавстві доцільно передбачити розширення правових підстав для такого режиму за умови проведення відповідних досліджень щодо електромагнітної сумісності як для існуючих первинних радіотехнологій, так і для майбутніх.

Перспективний напрям, що має значний потенціал для колективного користування РЧР та якому в Європейському Союзі приділяють особливу увагу, – це освоєння так званих «білих діапазонів» (прогалін, White Space), під якими розуміють діапазон РЧР, доступний для радіотехнологій (служб, систем) в певний момент часу в даній географічній області на без завадової / незахищеної основі по відношенню до первинних служб або по відношенню до інших служб з більш високим пріоритетом на національній основі [6]. Однією з перших ділянок спектра найкращої для досліджень проблем «білих діапазонів» є діапазон 470-790 МГц. При цьому необхідно враховувати вимоги до показників якості послуг (QoS) для деяких користувачів РЧР, що в межах смуг РЧР, віднесених до «білого діапазону», може бути достатньою підставою для встановлення обмежень на кількість операторів, які працюють в режимі колективного користування РЧР. Іншими словами, «білий діапазон» РЧР – це діапазон радіочастот для якого існує потенційна можливість спільного користування на вторинній основі в конкретних часових та географічних параметрах за умови відсутності перешкод первинним службам і негативного впливу на їх показники якості.

При цьому, для будь-яких режимів КВС як в даний час, так і в майбутньому абсолютно пріоритетними для будь-яких учасників колективного використання РЧР мають бути прохання (вимоги) про сприяння у забезпеченні кращих показників якості або у забезпеченні більшого захисту від завад, незважаючи на наявність режиму невтручання відповідно до режимом загального користування.

Основний акцент при введенні режимів КВС повинен робитися на вирішенні технічних і технологічних проблем (технічні параметри і характеристики, що забезпечують електромагнітну сумісність, адаптивні (когнітивні) методи використання РЧР тощо), а також на врахуванні

довгострокової технологічної стратегії розвитку використання конкретних діапазонів радіочастот і РЧР в цілому.

Таким чином, ґрунтуючись на концепції загального дозволу, модель КВС (CUS) дозволяє знизити юридичні регуляторні обмеження, але з іншого боку це передбачає значну відповідальність користувачів спектра за ефективне використання спектра і ефективне управління перешкодами. Правова модель КВС повинна органічно вписуватися в національну правову систему в частині інформаційної інфраструктури.

*Спільне користування спектром* передбачає участь різних користувачів, які мають право користуватися певною смугою радіочастот, що фактично створює потенційні умови для кожного з них в частині доступу до додаткових ресурсів спектра і знижує бар'єри доступу до спектра для нових користувачів [3].

За європейською концепцією ліцензованого спільного доступу (Licensed Shared Access, LSA) це регуляторний підхід, спрямований на сприяння впровадженню систем радіозв'язку обмеженим числом ліцензіатів в рамках індивідуального режиму ліцензування у смузі частот, вже призначеної або очікуваної для призначення одному або декільком користувачам. Відповідно до такого підходу додаткові користувачі мають право використовувати спектр (або частину спектра) відповідно до правил спільного використання, включеними в їх ліцензії (їх право використання спектра), що дозволяє всім авторизованим користувачам забезпечити певну якість обслуговування (QoS) [1].

Експерти вважають, що для спільного користування, в першу чергу, необхідно розглядати діапазони радіочастот, виділені для спеціальних користувачів таких як поліція, пожежники, прикордонний контроль, військові та інші, діяльність яких має життєво важливе значення для суспільства. Але для запровадження режиму спільного користування спектром необхідна наявність політичного рішення, визначення загальних принципів спільного користування спектра виділеного для цілей забезпечення громадської безпеки.

В деяких державах досліджується цікавий варіант режиму спільного користування спектром, який полягає у наступному. В діапазоні частот, виділеного для спеціальних користувачів, виділяється невелика смуга радіочастот для послуг голосового зв'язку в інтересах цих користувачів, а вся інша частина спектра, що залишилася, на умовах ліцензованого спільного доступу (LSA) передається для побудови комерційних мобільних мереж з умовою, що вони зобов'язані звільнити спектр, коли це необхідно для спеціальних користувачів. Попутно в мережі комерційних мобільних операторів може бути організований роумінг для спеціальних користувачів [2].

З огляду на те, що LSA підхід до регулювання може стати потужною альтернативою процесу реорганізації радіочастотного спектра (рефармінгу), у 2014 році був організований перший в світі пілотний проект по спільному використанню радіочастотного спектра у діапазоні 2,3 ГГц під егідою Італійського Міністерства економічного розвитку і Об'єднаного дослідницького центру Європейській комісії. Остаточні результати італійського пілота на LSA були представлені в Римі 23 вересня 2016 р. [2]. Одним з основних висновків за

результатами цього проекту є те, що ухвалення підходу LSA дозволить операторам мобільного зв'язку використовувати нові, цінні частини спектра, захищаючи при цьому послуги, що надаються діючими операторами, від шкідливих перешкод [2].

Подібні випробування також були організовані та проведені на початку 2016 р. в Парижі під керівництвом підприємств Ericsson, RED Technologies та Qualcomm, основна мета яких полягала в тому, щоб дослідити, використовуючи новітній комерційний радіозв'язок LTE та користувацьке устаткування, можливості щодо звільнення спектру за запитом від діючих користувачів при збереженні для власників ліцензій LSA безперервного широкосмугового зв'язку [1]. Цей пілотний проект продемонстрував позитивні результати і дозволив запропонувати ряд вкладів в стандарти ETSI (European Telecommunications Standards Institute, Європейський інститут по стандартизації в галузі телекомунікацій).

У США в останні роки планується близько 500 МГц, які були задіяні для федеральних цілей, звільнити до 2020 р. повністю або для майбутнього спільного користування в інтересах мобільного зв'язку цивільного призначення [2].

*Авторизоване спільне користування* (Authorized Shared Access, ASA) і ліцензоване спільне користування (LSA) поєднують в собі елементи традиційного «управління і контролю» спектра з ринковим підходом та інноваційною когнітивною радіотехнікою. Такий підхід є сумішшю старих і нових ідей щодо неексклюзивних прав на користування частотами, який дозволяє вводити адаптивний обмін, що явно прогресивніше принципу ексклюзивності і статичного (постійного) призначення радіочастотних каналів.

Серйозним бар'єром на шляху широкого впровадження методів спільного використання спектра стає проблема бізнес моделей діяльності операторів МЕК. В разі спільного використання спектра оператори МЕК стикаються з необхідністю зміни логіки їх бізнес моделей в сторону співпраці, оскільки одночасна конкуренція і співробітництво в формі використання загального спектра стають реальністю. Проте, ні література по кооперації, ні література по бізнес моделям не мають чіткого пояснення того, як традиційна бізнес модель «автономна», що базується на конкуренції, і концепція співпраці можуть бути пов'язані один з одним, а це перешкоджає процесу зміни бізнес моделі у кооперативному бізнес середовищі, яке формується [1].

Цілком очевидною є проблема гарантування повернення інвестицій при розгортанні мереж МЕК додатковими операторами, які користуються радіочастотами в смузі частот, вже призначеної або очікуваної для призначення одному або декільком первинним користувачам. Ця проблема обумовлена невпевненістю вторинних операторів в можливості забезпечення для користувачів послуг електронних комунікацій необхідної якості (QoS), що створює серйозні системні ризики для інвестицій. Вирішення цієї проблеми вбачається в синхронізації часу, місця і умов використання діапазону частот первинними і додатковими операторами. Така синхронізація могла б бути закріплена у відповідному договорі співробітництва між цими операторами.

Експерти вважають, що найбільш перспективним такий підхід буде у разі, якщо в якості первинного оператора може виступити урядова організація з огляду на те, що державі легше визначити для державної організації умови користування радіочастотним ресурсом, які б сприяли ефективному інвестуванню вторинними операторами. При цьому припускається, що може існувати певний набір бізнес сценаріїв, в яких будуть використовуватися ліцензії LSA, виданих на різних умовах.

В цілому можна зробити висновок про те, що конкретна бізнес модель спільного користування радіочастотним ресурсом на основі LSA може бути визначена тільки за умови наявності знань про особливості конкретного діапазону частот, особливостей користування цим діапазоном первинними користувачами. Або іншими словами, введення регуляторного режиму спільного користування окремими діапазонами РЧР зажадає досить серйозних і ретельних наукових і практичних досліджень як принципової можливості задіяння такого режиму, так і визначення особливостей його введення.

Але, в будь-якому випадку, оскільки мова може йти про укладення угод між операторами з метою спільного користування РЧР з різними правами на його користування, то в законодавстві необхідно передбачити юридичну можливість здійснення регуляторного впливу на цю ситуацію Національним регулятором, який повинен бути мінімальним і тільки необхідним з тим, щоб не обмежувати інвестиційну активність операторів МЕК.

Розуміння закономірностей формування і функціонування бізнес моделей операторів МЕК в умовах спільного використання спектра (LSA) є вирішальним фактором для побудови правових моделей регулювання їх ринкової діяльності.

Дуже важливим для формування правових моделей використання обмеженого радіочастотного ресурсу є запобігання конфлікту застосування LSA разом з ексклюзивними моделями використання спектра. Тому LSA повинен стати додатковим рішенням для доступу до спектру в певних діапазонах, а не заміною звичайного ексклюзивного доступу. Саме тому потрібні надзвичайно гнучкі та адаптовані правові моделі реалізації LSA підходу до розподілу спектра, оскільки це може в кінцевому підсумку змінити правила конкуренції.

Необхідність побудови гнучких і адаптованих правових моделей розподілу і користування РЧР також обумовлюється значними змінами в бізнес моделі надання послуг МЕК.

У найближчому майбутньому з масовим приходом технологій Інтернету речей в якості суб'єктів, що надають послуги МЕК, будуть виступати не тільки традиційні оператори електронних комунікацій, які ексклюзивно володіють правом користування окремими діапазонами РЧР, але й абсолютно несподівані актори ринку послуг електронних комунікацій. Наприклад, це можуть бути: компанії, які володіють виробничою інфраструктурою в промисловості, сільському господарстві, медицині тощо; сервісні компанії (ритейлери, комунальні служби, логістичні компанії тощо); інфраструктурні організації, які обслуговують залізниці, продуктопроводи великої протяжності, автомобільні дороги тощо; компанії, які організовують навчання, тренінги, дозвілля, особливо

з масштабним залученням технологій віртуальної та доповненої реальності. Все це буде причиною появи і застосування гібридних бізнес моделей, які дозволять об'єднувати сервіси з різних сегментів діяльності [3], що, в свою чергу, ще в більшій мірі загострить проблему підвищення ефективності використання РЧР за рахунок колективного та спільного використання спектра, а також його торгівлі на вторинному ринку.

Таким чином, впровадження та використання технологій IP (IoT) як потужного чинника різкого підвищення ефективності будь-якої діяльності у всіх сферах соціальної активності потребує змін існуючої парадигми галузі телекомунікацій. Насамперед, це стосується трансформації бізнес-моделі операторів електронних комунікацій з метою забезпечення задоволення будь-яких користувацьких вимог суб'єктів отримання телекомунікаційних послуг, введення правових моделей гнучкого сумісного і колективного користування РЧР. Саме проведення відповідної трансформації бізнес-моделі операторів електронних комунікацій дозволить ефективно використовувати інвестиції в процесі динамічного створення ЛЕЕК, які потенційно мають сприятливі умови для реалізації концепції індустріального Інтернету вкрай необхідного для забезпечення безперервного та якісного функціонування технологій IoT.

## Список літератури

1. Baranov A. Internet of Things: Future Telecommunication. Processing and Control in Information and Communication Systems. UKRMICO 2018. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 560. Springer, Cham, 2019 - P. 3-13.
2. Баранов О.А. Інтернет речей: теоретико-методологічні основи правового регулювання. Т.1: Сфери застосування, ризики і бар'єри, проблеми правового регулювання: монографія / О.А. Баранов; НДПП НАПрН України – К.: Видавничий дім «АртЕк». – 2018. – 344 с.
3. Баранов О.А. Інтернет речей (IoT): правові моделі використання обмеженого радіочастотного ресурсу (частина II) / О.А. Баранов // Інформація і право. – 2017. – № 3. – С. 73-84.
4. Virgin Mobile an example of an MVNO. – Режим доступу: <http://www.itu.int/itu-news/issue/2001/08/mvno.html#top>
5. Update on 5G spectrum in the UK. Ofcom. Statement Publication date: 8 February 2017. – Режим доступу: <https://www.boards.ie/b/thread/2057703920>
6. Report on Collective Use of Spectrum (CUS) and other spectrum sharing approaches. RSPG11-392/ Final. Radio spectrum policy group. November 2011. – Режим доступу: [http://itlaw.wikia.com/wiki/Report\\_on\\_Collective\\_Use\\_of\\_Spectrum\\_\(CUS\)\\_and\\_Other\\_Spectrum\\_Sharing\\_Approaches](http://itlaw.wikia.com/wiki/Report_on_Collective_Use_of_Spectrum_(CUS)_and_Other_Spectrum_Sharing_Approaches)
7. Communication from the commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and social committee and the Committee of the regions. Promoting the shared use of radio spectrum resources in the internal market. – Режим доступу: <https://ec.europa.eu/digital-single-market/sites/digital-agenda/files/com-ssa.pdf>
8. Radio Regulations Articles. Edition of 2012. ITU 2012.
9. Radio spectrum policy group opinion on. Wireless Access Policy for Electronic Communications Services (WAPECS) (A more flexible spectrum management approach). Final – November 23, 2005. – Режим доступу: [http://rspg-spectrum.eu/wp-content/uploads/2013/05/rspg05\\_102\\_op\\_wapecs.pdf](http://rspg-spectrum.eu/wp-content/uploads/2013/05/rspg05_102_op_wapecs.pdf)

---

## ЕВОЛЮЦІЯ ТЕХНОЛОГІЙ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ

Романов О.І., Нестеренко М.М.

---

## TELECOMMUNICATION NETWORK TECHNOLOGIES EVOLUTION

Romanov O.I, Nesterenko M.M.

The section deals with the theory and practice of telecommunication network technology development. The requirements for modern telecommunication networks and ways of their solution on the basis of concepts of NGN (Next Generation Network) and IMS (IP Multimedia Subsystem) are analyzed.

The ways of creation of the general telecommunication space, which will provide interaction of different technologies are considered. As well as the directions of harmonious telecommunications development, in all networks using effective technologies, capturing larger segment of the market, and networks that use outdated technologies gradually died out.

Also the evolution of telecommunication networks technologies is considered. The historical conditions of the emersion of one or another technology, the problems that they have solved, the directions of development of the telecommunication market, the relevance of a particular technology at the present stage have been analyzed.

Materials can be useful to researchers, graduate students, students, and postgraduate students.

У розділі розглядаються питання теорії і практики розвитку технологій телекомунікаційних мереж. Проаналізовано вимоги до сучасних телекомунікаційних мереж і шляхи їх вирішення на базі концепцій NGN (Next Generation Network) і IMS (IP Multimedia Subsystem).

Розглянуто шляхи створення загального телекомунікаційного простору, яке б забезпечило взаємодію мереж різних технологій. А також напрямки гармонійного розвитку телекомунікацій, при якому мережі, що використовують ефективні технології, захоплювали б все більший сегмент ринку, а мережі, що використовують застарілі технології, поступово відмирили.

Розглянуто еволюцію технологій телекомунікаційних мереж. Проаналізовано історичні умови появи тієї чи іншої технології, проблеми, які вони дозволили вирішити, напрямки розвитку телекомунікаційного ринку, актуальність тієї чи іншої технології на сучасному етапі. Матеріали можуть бути корисні науковцям, аспірантам, студентам, слухачам післядипломної освіти.

## 4.1. Концепції побудови телекомунікаційних мереж

На сучасному етапі розвитку до телекомунікаційних мереж висуваються наступні основні вимоги:

- *прозорість* телекомунікаційного середовища, під якою розуміється забезпечення взаємодії мереж, побудованих на базі різнорідного обладнання;
- *мультисервісність*, під якою розуміється незалежність виду послуг, що надаються, від транспортних технологій;
- *мультимедійність*, під якою розуміється здатність передавати дані, відео та аудіо інформацію із синхронізацією в реальному масштабі часу;
- *інтелектуальність*, під якою розуміється можливість управління послугою або викликом, як з боку користувача, так і постачальника послуг;
- *багатооператорність*, під якою розуміється можливість участі кількох операторів в процесі надання послуги і поділ їх відповідальності відповідно до області діяльності;
- *масштабованість* технічних рішень, що використовуються при побудові телекомунікаційних мереж та інш.

Для забезпечення виконання цих вимог Міжнародним Союзом Електрозв'язку ІТУ розроблені дві концепції:

1. Концепція побудови мереж зв'язку наступного покоління NGN (Next Generation Network).
2. Концепція побудови IMS (IP Multimedia Subsystem).

Історично першою з'явилася *концепція NGN*. Вона розроблялася в умовах наявності великої кількості різнорідних мереж, побудованих на різних технологіях. Тому в рамках концепції NGN вирішувалися такі основні завдання [1]:

- створення спільного телекомунікаційного простору, яке б забезпечило взаємодію мереж незалежно від технологій, які в них використовуються;
- виділення рівнів, в рамках яких розвиток технологій мог би вестись фахівцями різних галузей знань незалежно один від одного;
- гармонійний розвиток телекомунікацій, при якому мережі, що використовують ефективні технології, захоплювали б все більший сегмент ринку, а мережі, що використовують застарілі технології, поступово відмирили;
- швидке впровадження нових сервісів із мінімальними витратами;
- підтримка мобільності абонентів та інш.

Дослідження в області NGN показали, що в перспективних мережах повинно бути реалізовано чітке функціональне розмежування рівнів:

1. Рівень послуг та застосувань.
2. Рівень управління.
3. Рівень базової транспортної мережі.
4. Рівень мереж доступу.

Спрощено модель архітектури мережі NGN можна представити в наступному вигляді (рис. 4.1).



Рис. 4.1. Модель архітектури мережі NGN

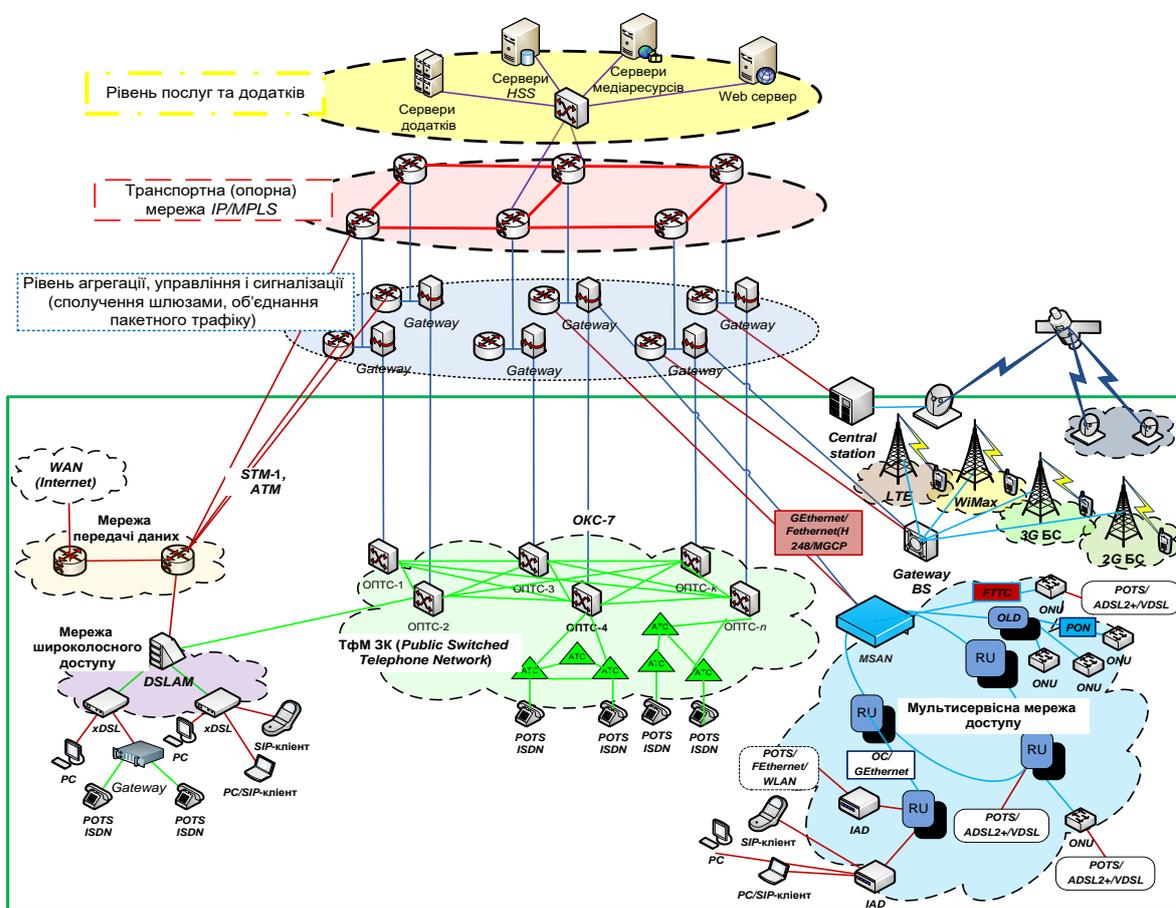


Рис. 4.2. Розгорнута архітектура мережі NGN

Розгорнута архітектура мережі NGN, на якій показані компоненти мереж, побудованих на різних технологіях, представлена на рис. 4.2.

**Рівень послуг** забезпечує:

1. Доступність послуг всім користувачам, незалежно від місця їх підключення, способу доступ і типу транспортної мережі, яка їх обслуговує.
2. Взаємодію з транспортною мережею через відкриті інтерфейси.

3. Можливість розробки програмного забезпечення послуг і застосувань, без втручання у функціонування інших рівнів.

В якості механізму, що дозволяє швидко і гнучко розгортати послуги, була використана концепція OSA (Open Services Access). Одним із варіантів реалізації концепції OSA, було створення консорціумом Parlay Group відкритого інтерфейсу API (Application Programming Interface). На рис 4.3. представлена архітектура Parlay, де показано, що різні мережі зв'язку мають різні мережеві елементи, які забезпечують виконання необхідних функцій. Кожен з цих елементів виходить на шлюз (Gateway) за своїм протоколом, а завдання шлюзу OSA / Parlay полягає в тому, щоб звести всі протоколи до єдиних інтерфейсів API.

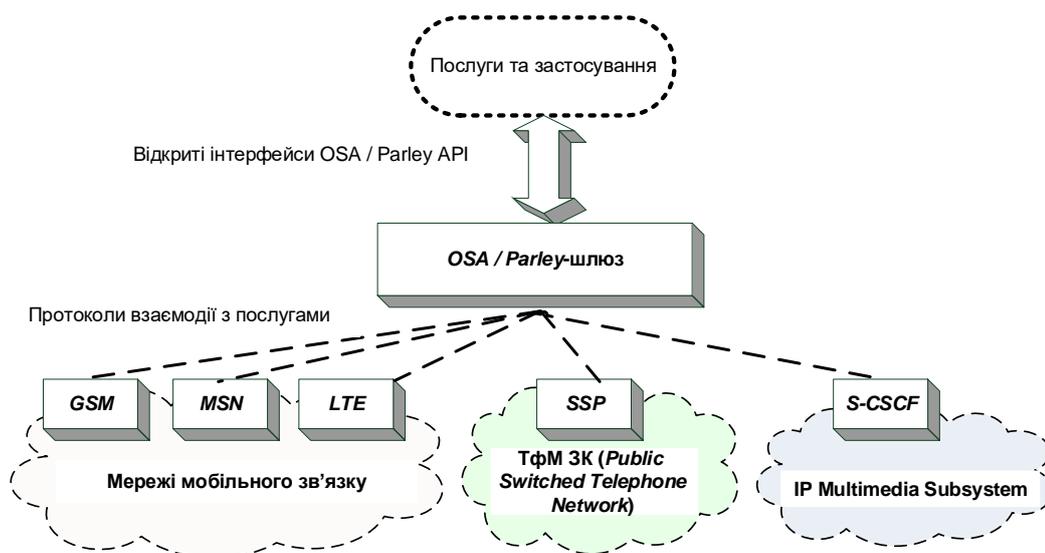


Рис. 4.3. Архітектура OSA / Parlay

На **рівні управління** вирішуються такі завдання:

1. Забезпечення взаємодії мереж.
2. Приведення транспортних потоків мереж з різними технологіями до єдиного вигляду.
3. Забезпечення взаємодії різних систем сигналізації.
4. Управління викликами і маршрутизація потоків.
5. Перетворення і забезпечення взаємодії різних систем сигналізації та ін.

Основним елементом рівня управління в мережі NGN є програмний комутатор - Softswitch. Крім того, можуть використовуватися Media Gateway (медіашлюзи), які перетворюють потоки інформації в формат мережі доступу і направляють їх в потрібні канали. Слід зазначити, що SoftSwitch різних виробників, виявилися несумісними між собою.

Завданням **транспортного рівня** є комутація і прозора передача інформації користувачів. Транспортний рівень NGN розглядається як рівень, складовими частинами якого є мережа доступу і базова мережа. Під мережею доступу розуміється мережева інфраструктура, що складається з абонентських ліній,

вузлів доступу і систем передачі, що забезпечують підключення користувачів до точки агрегації трафіку.

Особливістю NGN є використання універсальної базової мережі, що базується на технологіях пакетної комутації. Базова мережа – це універсальна мережа, яка реалізує функції транспортування і комутації. Базова мережа може бути представлена у вигляді трьох рівнів (рис. 4.4):

- технології комутації пакетів (IP, ATM, MPLS);
- технології формування тракту (наприклад, SDH, Carrier Ethernet);
- середовища передачі сигналів (наприклад, оптичний кабель і використання технології xWDM [2]).

При виборі технологічної основи комутації найбільш перспективною вважається IP/MPLS.

Таким чином, концепція NGN забезпечує вирішення наступних завдань:

1. Впровадження нових послуг не залежить від транспортної структури.
2. Можливість інтеграції послуг різних провайдерів.
3. Використання уніфікованих відкритих інтерфейсів.

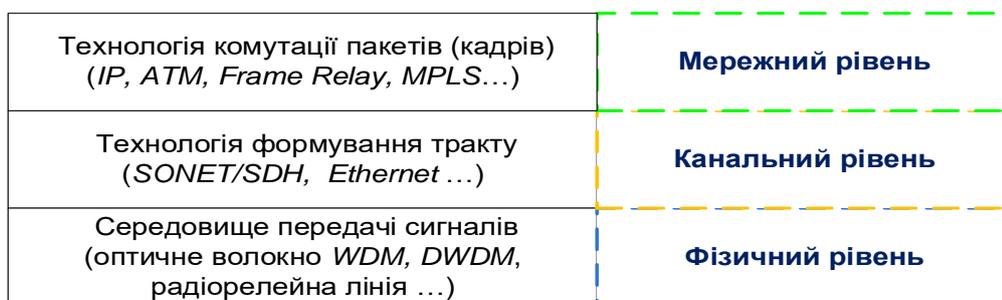


Рис. 4.4. Модель базової мережі

4. Інтеграція мереж фіксованого і мобільного доступу.

5. Ідентифікація абонентів у всіх сегментах доступу і єдиний абонентський профіль та інш.

У зв'язку з несумісністю обладнання SoftSwitch різних виробників, з'явилася концепція **IMS** (IP Multimedia Subsystem), в якій розроблені регламентуючі документи по трансформації NGN з мереж з пакетною передачею голосу в реальні мультисервісні мережі [3,4]. Сутність переходу від концепції мереж NGN до концепції мереж IMS представлено на рис. 4.5. Архітектури NGN і IMS мають схожий розподіл за рівнями. Рівень послуг і застосувань однаковий як в NGN, так і в IMS. Транспортний рівень теж має багато загального. У IMS транспортний рівень і рівень доступу мережі NGN об'єднані під назвою транспортний рівень IMS.

Основні відмінності NGN і IMS в реалізації рівня управління. В системі IMS класичний SoftSwitch, керуючий всім трафіком, заміщається мультисервісної платформою із набором проксі-серверів. Кожен сервер керує отриманням послуг певного типу, має власний інтерфейс для взаємодії із транспортною мережею і всі сервери підключені до єдиної бази даних, в яку заноситься вся інформація про трафік і отримані послуги. У базі є зовнішній інтерфейс, що дозволяє

стороннім провайдерам отримувати інформацію, необхідну для взаєморозрахунків.

Згідно з концепцією IMS відділяється три головні рівні (рис. 4.6):

- транспортний рівень;
- рівень управління;
- рівень послуг.

Архітектура IMS определена в стандартах 3GPP (3rd Generation Partnership Project), Європейського інституту стандартів зв'язку. Розглянемо основне призначення і функції елементів IMS.

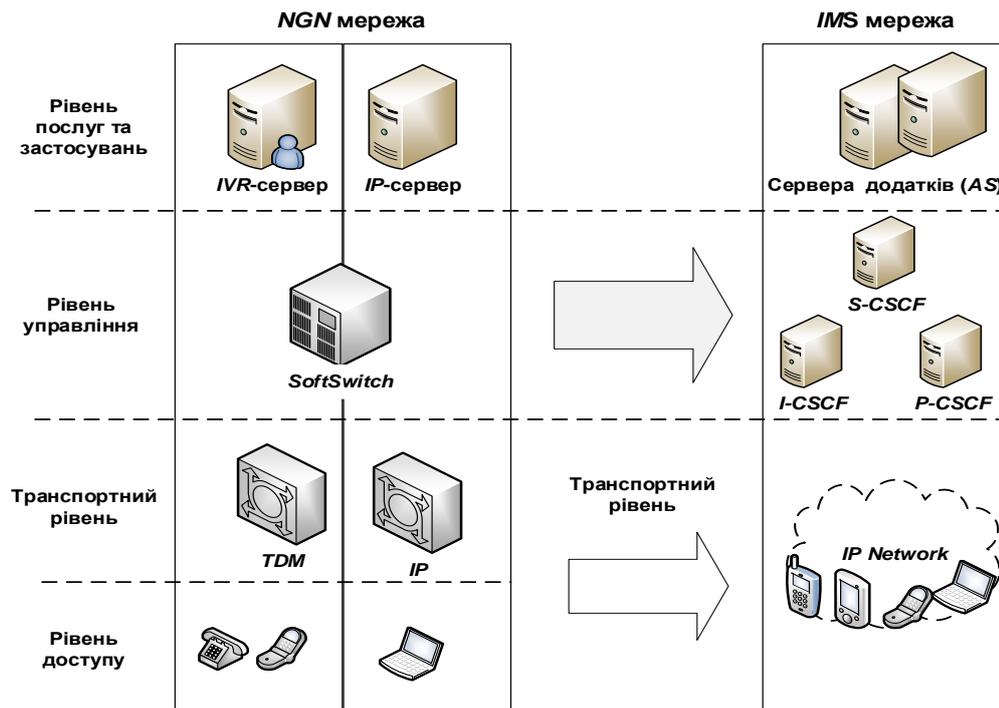


Рис. 4.5. Перехід мереж NGN до мереж IMS

На транспортному рівні відбувається перетворення мови з аналогової або цифрової форми в IP-пакети з використанням протоколу RTP (Realtime Transport Protocol). На даному рівні функціонують медіа шлюзи, що перетворюють базові потоки VoIP в телефонний формат TDM. Медіа сервер надає різні медіа сервіси, в тому числі конференц-зв'язок, відтворення оповіщень, збір тонових сигналів, розпізнавання мови, синтез мови та інші.

Ресурси медіа сервера доступні всім застосуванням. Тобто, будь-який додаток (голосова пошта, безкоштовний номер 800, інтерактивні VXML-сервіси), якому потрібно відтворити сповіщення або отримати цифри номера, може використовувати загальний сервер. Медіа сервери підтримують і нетелефонні функції, наприклад, тиражування голосових потоків для надання сервісу миттєвого багатоточкового зв'язку. При використанні загального пулу медіа серверів відпадає необхідність у плануванні та інжинірингу медіа ресурсів для кожного окремого застосування.

На транспортному рівні вирішуються такі основні завдання:

1. Забезпечення доступу користувачів до транспортної мережі.
2. Створення середовища передачі сигналів.
3. Формування каналів і трактів для передавання інформації.
4. Комутація і розподіл інформації.

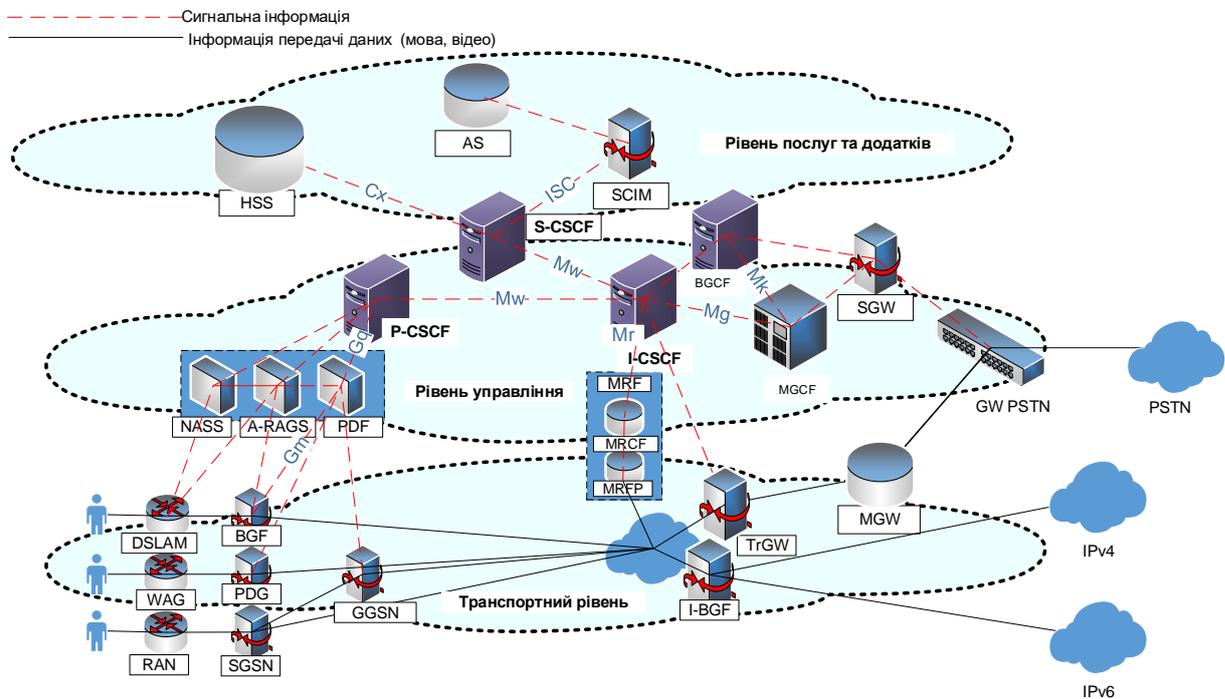


Рис. 4.6. Елементи архітектури IMS

Для вирішення завдань на транспортному рівні використовуються наступні елементи: MGW (Media Gate Way), I-BGF (Interconnect Border Gateway Function), GGSN (Gateway GPRS Support Node), RAN (Radio Access Network), PDG (Packet Data Gateway), WAG (Wireless Access Gateway), A-BGF / BAS, DSLAM (Digital Subscriber Line Access Multiplexer).

На **рівні управління** вирішуються завдання сигналізації, розподілу інформації і організації взаємодії телекомунікаційних мереж із різними технологіями. Він забезпечує вирішення таких завдань:

1. Приведення мереж різних технологій до використання в якості основного протоколу сигналізації протоколу SIP.
2. Приведення мереж різних технологій до використання в якості основного транспортного протоколу IP.
3. Використання єдиного сценарію обслуговування користувачів, як в стаціонарних, так і мобільних мережах.
4. Створення профілю користувачів в домашній базі даних HSS.
5. Створення єдиних принципів авторизації, ідентифікації та тарифікації для мереж різних технологій.

Для вирішення завдань на рівні управління є наступні елементи: CSCF (Call Session Control Function), P-CSCF (Proxy Call Session Control Function), I-CSCF (Interrogating CSCF), S-CSCF (Serving-CSCF), BGCF (Breakout Gateway Control

Function), MGCF (Media Gateways Control Function), SGW (Signaling Gateway), RACS (The Resource and Access Control), PDF (Policy Decision Function), NASS (Network Attachment Subsystem).

Центральним елементом архітектури IMS є блок функцій CSCF, який здійснює виконання всіх завдань управління. Ці завдання розподіляються між трьома функціональними блоками:

1. P-CSCF, який призначений забезпечити взаємодію всіх видів терміналів, запису профілю користувачів в домашній бази даних HSS.

2. I-CSCF, який призначений для взаємодії з іншими доменами IMS. Наприклад, однією з його основних завдань є визначення місця розташування абонента, якщо його HSS знаходиться в іншому домені IMS.

3. S-CSCF, який призначений для обробки всіх сигнальних SIP-повідомлень, а також для забезпечення доступу абонентів до серверів застосувань відповідно до профілю обслуговування, який міститься в домашньому сервері абонента HSS.

Ці три типу функціональних блоки P-CSCF, I-CSCF, S-CSCF працюють спільно при обслуговуванні кожної заявки. Їх кількість залежить від кількості завдань, об'єму і типу навантаження в мережі IMS [5]. Інші елементи вирішують часткові задачі:

**Рівень послуг і застосувань** забезпечує надання різних послуг користувачам мережі. Послуги розгорнуті на базі серверів. Суть процесу надання послуги полягає в отриманні запиту від користувача на послугу і підключення його до необхідного сервера, який реалізує дану послугу.

Верхній рівень еталонної архітектури IMS містить набір серверів застосувань, які, в принципі, не є елементами IMS. Ці елементи верхньої площини включають в свій склад як мультимедійні IP-застосування, що базуються на протоколі SIP, так і застосування, які реалізуються в мобільних мережах на базі віртуального домашнього середовища.

## 4.2. Еволюція технологій мереж з комутацією каналів

На початковому етапі розвитку телекомунікацій будувалися аналогові мережі окремо для кожного виду інформації: телефонні, телеграфні, передачі даних, факсимільні та інші мережі. Недоліками цих мереж були: низька якість трактів, висока ймовірність помилки в каналах зв'язку, високі витрати на побудову і обслуговування, низький рівень уніфікації обладнання та стандартизації мереж. Перша технологія, яка дозволила зробити великий крок вперед у вирішенні цих проблем була технологія ISDN.

**Мережа ISDN** (Integrated Services Digital Network) забезпечила інтеграцію телефонної мережі і мережі передачі даних. Мережі ISDN забезпечили швидкість передачі даних 64 Кбіт/с при використанні одного і 128 Кбіт/с при використанні двох цифрових каналів зв'язку. Доступ в мережах ISDN забезпечувався ISDN-модемом, який працював по протоколу BRI (Basic Rate Interface – базовий доступ). Лінія ISDN містить 2 В-канали по 64 кбіт/с. Один канал може

використовуватися для телефонної розмови, інший – для передачі даних (наприклад для доступу в Internet). Якщо в даний момент ніхто не говорить по телефону, швидкість доступу в Internet може становити 128 кбіт/с. Крім того, в BRI-доступі є D-канал сигналізації потужністю 16 кбіт/с.

На рис 4.7 показано, що в мережу ISDN підключено три пристрої: телефон, факс і комп'ютер. А в загальному випадку їх число може доходити до 7 і при цьому кожен пристрій може мати свою адресу. В аналогових мережах на одну абонентську лінію можна було підключити тільки один телефонний апарат з одним мережевим номером.

Крім того, було передбачено виконання функцій ISDN-модему комп'ютером, який забезпечував підключення звичайного аналогового телефону, факсу та іншого обладнання по BRI-лінії. З появою мереж ISDN вперше з'явилася можливість організації аудіо та відео конференц-зв'язку між віддаленими абонентами. На рис. 4.8 показана схема організації відеоконференції. По лініях BRI в найпростішому випадку можлива організація відеозв'язку між двома учасниками. Для більшої кількості учасників вимагається сервер відеоконференцій, що підключається через спеціальний мультиплексор.

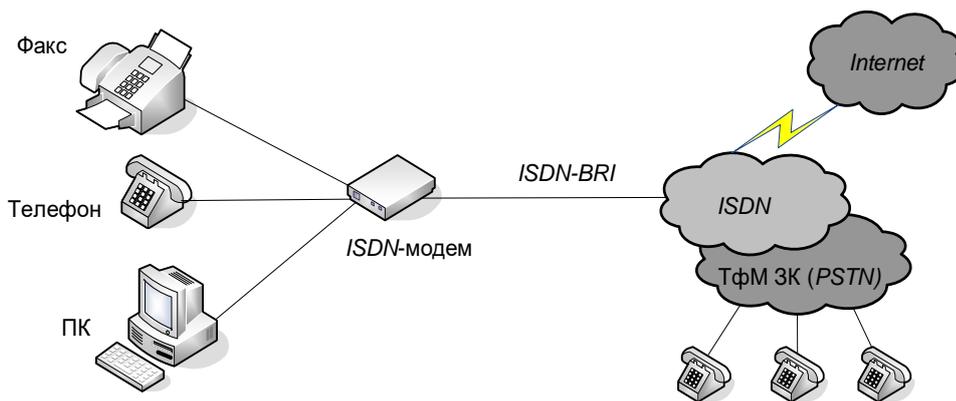


Рис. 4.7. Принцип підключення пристроїв користувача ISDN

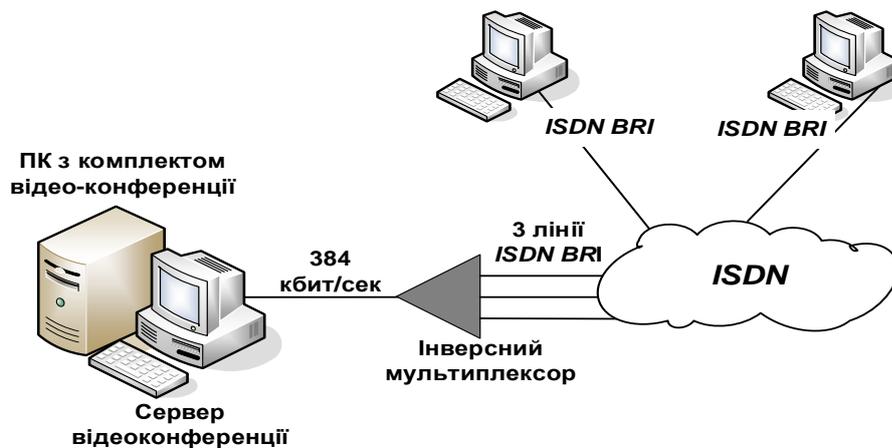


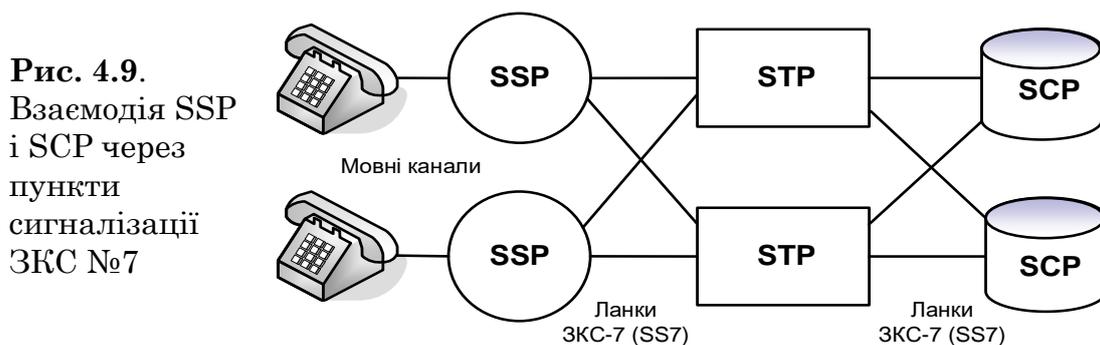
Рис. 4.8. Відеоконференція в ISDN-мережі

У стандартах ISDN, крім BRI-доступу, передбачений PRI доступ (Primary Rate Interface – первинний доступ), який служить підключенню, наприклад,

відомчих АТС. Він містить 30 В-каналів по 64 кбіт/с і канал сигналізації 64 кбіт/с. Сумарна пропускна здатність такої лінії 2,048 Мбіт/с.

Великим досягненням розвитку технології ISDN було проведення стандартизації обладнання. Раніше кожен виробник випускав обладнання самостійно, не використовуючи загальноприйняті рекомендації. Тому часто однакові типи обладнання не взаємодіяли один з одним.

Сьогодні доля мережі ISDN виглядає мало перспективною. Але ще на довгі роки збережеться **мережа загальноканальної сигналізації (ЗКС) №7 (Signalling System №7)**, яка створювалася як мережа сигналізації між віддаленими ISDN-абонентами (рис. 4.9). Причому, даний тип сигналізації використовується, як в стаціонарній мережі загального користування, так і в мережах операторів мобільного зв'язку 2G і 3G. На той час стався цікавий парадокс. Для цифрової мережі із комутацією каналів була створена мережа сигналізації з комутацією пакетів. Повідомлення в мережі ЗКС №7 (SS7) передаються між її елементами зі швидкістю 64 Кбіт/с. А на напрямках з великим завантаженням 2048 кбіт/с по двонаправленим каналах. Кожен пункт сигналізації STP в мережі ЗКС №7 однозначно розпізнається числовим кодом.



Коди STP передаються в сигнальних повідомленнях. Кожен пункт сигналізації використовує таблицю маршрутизації, щоб вибрати відповідний маршрут сигналізації для кожного повідомлення.

На рис. 4.9 показані два елементи, які важливі як для мережі ISDN, так і для інтелектуальної мережі:

- комутатор послуг (SSP – service switching point);
- контролер послуг (SCP – service control point).

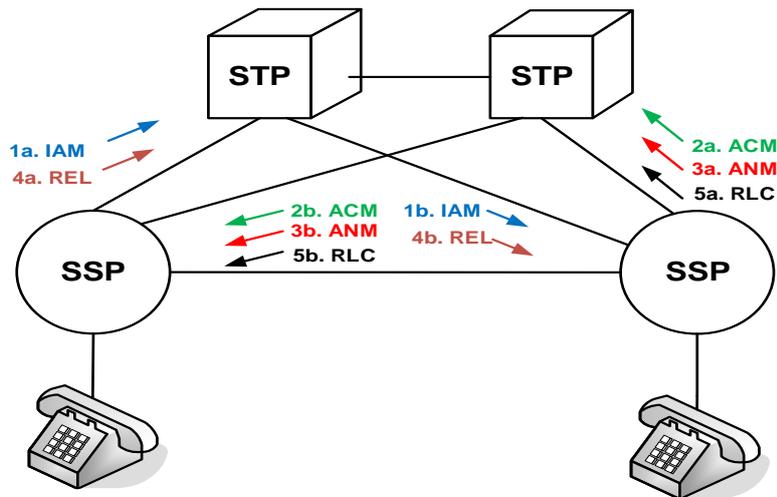
На рис. 4.10 наведено алгоритм встановлення з'єднання по протоколу ISUP.

Мережа ЗКС №7 критична до швидкості обробки виклику. Тому SCP і STP зазвичай об'єднуються в пари. Це дозволяє гарантувати виконання мережевої послуги в разі відмови на будь-якому елементі. Ланки між пунктами сигналізації також дублюються.

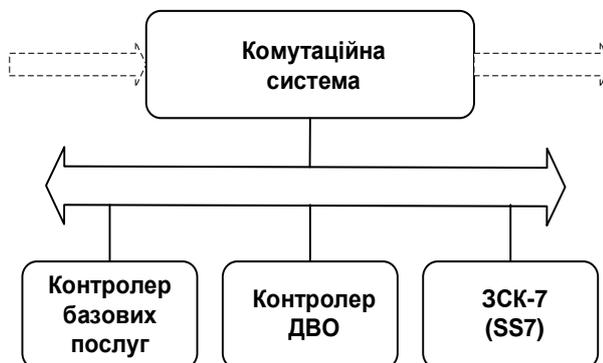
На що хотілося б звернути особливу увагу. На рис. 4.10 показано, що процес взаємодії двох абонентів йде по двох незалежних гілках. Верхня частина – це обмін сигнальними повідомленнями і визначення шляху передачі інформації. Нижня частина – це шлях проходження інформації між абонентами. Сигнальна інформація займає малий об'єм, але вимагає високої швидкості обробки.

Інформація абонентів займає великий обсяг. За неї оператор отримує абонентську плату. Але вона не вимагає великої оперативності при обробці.

**Рис. 4.10.**  
Алгоритм встановлення з'єднання по протоколу ISUP



Суть процесу еволюції від ISDN-мережі до інтелектуальної мережі представлено на рис. 4.11 і рис. 4.12. На ранніх етапах розвитку телекомунікацій, пристрій управління АТС включало до свого складу контролер базових послуг, контролер додаткових видів обслуговування (ДВО) і блок управління системою сигналізації ЗСК-7. Як бачимо, надання базових послуг і ДВО забезпечували різні контролери (рис. 4.11).



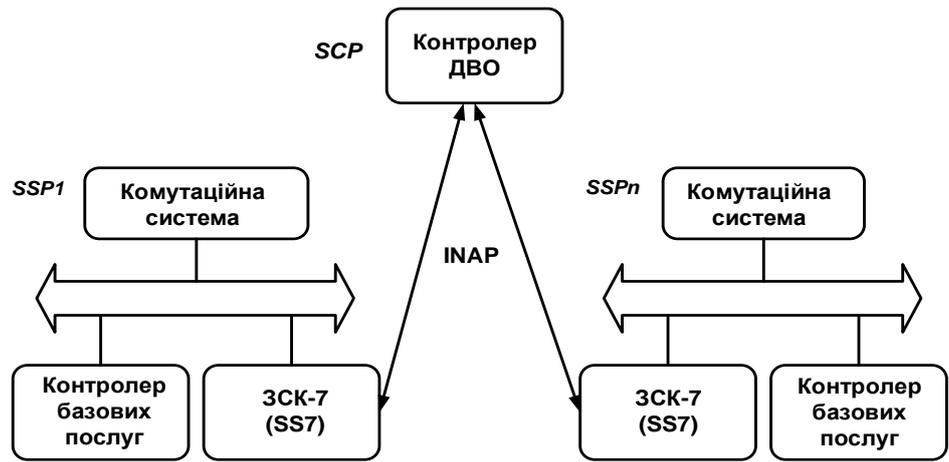
**Рис. 4.11.** Принцип надання базових послуг і ДВО в мережі ISDN

Такий принцип надання послуг виявився дуже витратним. Послугами могли користуватися тільки ті абоненти, які включені в дану АТС. Обмежена доступність робило послугу дуже дорогою.

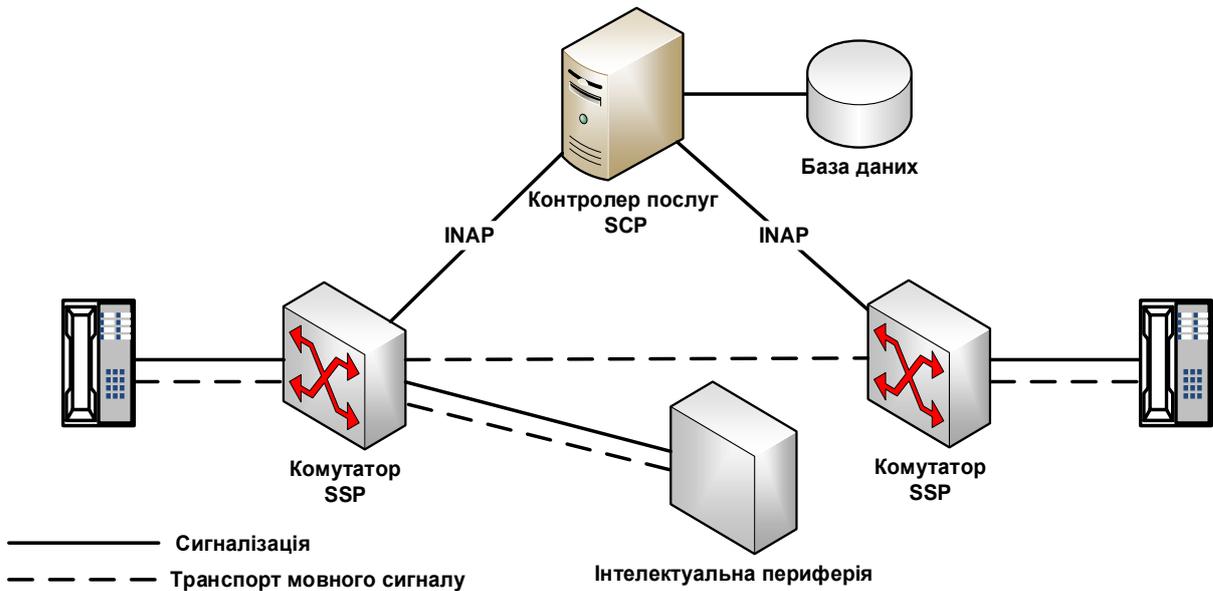
В інтелектуальній мережі був змінений принцип надання послуг. Контролер ДВО був винесений зі складу АТС і став окремим елементом мережі. Доступ до контролера ДВО став здійснюватися по мережі ЗСК-7. Тепер послугами ДВО міг скористатися будь-який користувач мережі.

На рис. 4.12 показана концепція надання послуг в інтелектуальних мережах. Основним елементом надання послуг (ДВО) став загальномережевий контролер SCP, який доступний всім АТС (вони зветься: SSP1, ..., SSPn). Об'єкти – SSP і SCP взаємодіють по протоколу INAP, використовуючи мережу сигналізації ЗСК-7.

**Рис. 4.12.**  
Структура інтелектуальної мережі



Надалі структура і склад інтелектуальної мережі були доопрацьовані і вона прийняла вигляд, представлений на рис. 4.13. Основним елементом інтелектуальної мережі є сервер (контролер послуг) з базою даних, в якій зберігаються дані про послуги. Контролер послуг містить програми надання додаткових послуг, наприклад: „передплатена телефонна карта”, „безкоштовний виклик”, „телеголосування” та інші. Цей контролер називається SCP контролером послуг. SCP, через мережу сигналізації ЗСК-7 по протоколу INAP, доступний всім АТС із властивостями SSP.



**Рис. 4.13.** Спрощена структура інтелектуальної мережі

Важливу роль відіграє інтелектуальна периферія – аналог пристроїв механічного голосу в „старих” АТС. У мережі NGN цей вузол називається медіасервером. Інтелектуальна периферія за командами контролера SCP „спілкується” із абонентом. Наприклад, просить ввести PIN-код, розпізнає його і повідомляє контролеру SCP. Контролер SCP черпає також інформацію із бази даних і управляє наданням інтелектуальних (додаткових) послуг.

### 4.3. Еволюція технологій мереж з комутацією пакетів

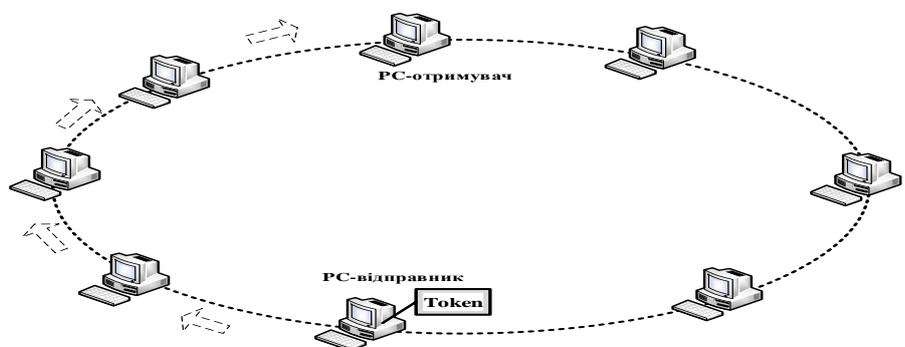
Мережі з комутацією пакетів почали розроблятися в 60-і роки. Основною метою таких розробок було створення комп'ютерної мережі, здатної вціліти в умовах ядерної війни. Американське агентство ARPA профінансувало розробку в області мереж з пакетною комутацією і в 1969 р. була створена мережа ARPANET, попередник Internet. До початку 80-х років був розроблений стек протоколів TCP/IP і мережа Internet об'єднала ряд університетів.

Перші мережі з комутацією пакетів охоплювали невеликі території і містили в своєму складі невелику кількість кінцевих пристроїв. Тому такі мережі отримали назву локальних мереж. По способу доступу до середовища передачі, технології локальних мереж можна розділити на детерміновані і випадкові. У разі використання детермінованих алгоритмів, доступ здійснюється в порядку черговості. У разі використання випадкового алгоритму, доступ здійснюється в випадкові моменти часу.

При використанні випадкового алгоритму є висока ймовірність колізії. Тобто ситуації, коли два або більше пристроїв, підключених до загального середовища, починають одночасно передавати дані. В результаті накладання сигналів при колізії дані губляться, і пристрої змушені повторювати передачу спочатку. Через наявність колізій корисна смуга пропускання становить не більше 60-70% смуги пропускання середовища передачі.

Технологія детермінованого доступу до середовища використовується в мережах Token Ring і FDDI.

**Рис. 4.14.**  
Структура  
мережі Token  
Ring



**Token Ring** будується на основі кільцевої топології (рис. 4.14). Передача даних здійснюється послідовно по кільцю від 1-го вузла до 2-го, від 2-го до 3-му і так далі. У тому випадку, якщо передача даних відсутній, в мережі циркулює кадр спеціального формату – маркер (token). Якщо вузол повинен передати кадр даних, він очікує отримання маркера. Отримавши маркер, вузол замість маркера відправляє кадр даних по кільцю, який передається до одержувача, і далі від одержувача до відправника. Отримавши свій фрейм, відправник порівнює передану інформацію і прийняту, і в разі відсутності помилок, відправляє маркер в мережу. Після цього право на передачу даних може бути отримано іншим вузлом. Таким чином, право на передачу даних по черзі переходить від одного

вузла до іншого. Як правило, смуга пропускання мереж Token Ring – 4 і 16 Мбіт / с, а кількість вузлів в одному логічному кільці – до 240.

Мережі FDDI також побудовані на основі маркерного доступу. З метою підвищення надійності, у мережах FDDI використовується два кільця – основне і резервне (рис. 4.15, а) довжиною 100 км. У разі розриву основного кільця відбувається об'єднання двох кілець в одне. При наступних розривах мережі, вона розпадається на ізольовані сегменти.

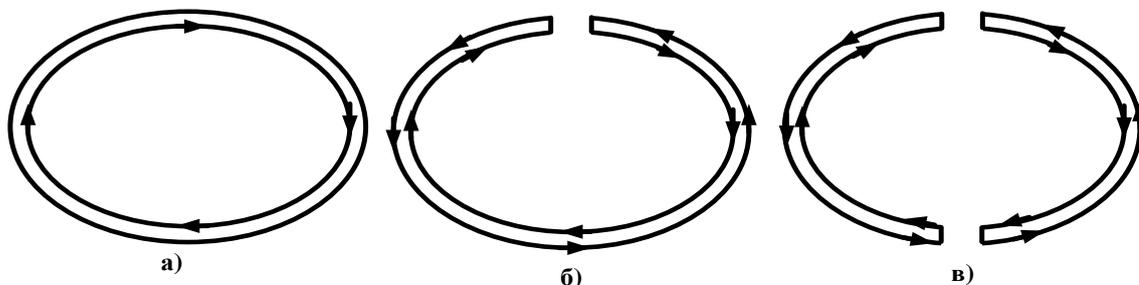


Рис. 4.15. а) Технологія FDDI; б) Порядок використання кільця після першого розриву; в) Порядок використання кільця після другого розриву

Відсутність колізій зумовило популярність Token Ring свого часу. Але в процесі розвитку Ethernet став домінуючою технологією локальних мереж.

**Технологія Ethernet** передбачає використання методу множинного доступу до середовища передачі із розпізнаванням несучої і виявленням колізій CSMA / CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection). Всі вузли в мережі мають доступ до середовища передачі (кабель або радіоканал), які працюють в режимі колективного доступу. Безпосередньо перед відправкою фрейма станція, яка хоче здійснити передачу, прослуховує канал і якщо канал вільний, передає свій кадр. Кожен вузол приймає всі фрейми і порівнює свою MAC-адресу із MAC-адресою одержувача. Якщо MAC-адреса вузла збігається з MAC-адресою одержувача, то фрейм записується у внутрішній буфер.

Спроба одночасної передачі фрейму більш ніж одним комп'ютером призводить до стану колізії і спотворення фрейма. Після виявлення колізії вузол-відправник зобов'язаний припинити передачу фрейма і очікувати протягом короткого випадкового інтервалу часу, після закінчення якого знову здійснити повторну передачу фрейму.

Технологія Ethernet набула масштабного розповсюдження спочатку в локальних мережах, а після модифікації стала широко використовуватися і на магістральних сегментах телекомунікаційних мереж.

В базових телекомунікаційних мережах із комутацією пакетів можуть використовуватися технології X.25, Frame Relay, ATM, MPLS та інші.

**Технологія X.25** для передачі даних використовує стандартний протокол ITU-T для зв'язку WAN мереж з комутацією пакетів. Він отримав розвиток в 1970 роках, для аналогових телефонних ліній низької якості із високим рівнем перешкод. Забезпечує передачу даних зі швидкістю до 64 Кбіт/с.

У мережі X.25 є 4 види пристроїв (рис. 4.16): кінцеве обладнання користувачів (DTE); кінцеве обладнання лінії передачі даних (DCE); пакетний асемблер-деасемблер (PAD); комутатор пакетів (PSE). DTE -це термінали,

персональні комп'ютери або мережеві хости. PSE – це комутатори, що становлять основу мережі. Вони забезпечують обмін даними між DTE через X.25 PSN. DCE являють собою пристрої типу модемів і комутаторів. Їх основним завданням є забезпечення інтерфейсу між пристроями DTE и PSE. Пакетний асемблер-деасемблер (PAD) використовується в тому випадку, коли термінал простий і не забезпечує реалізацію повного складу функцій мережі X.25. Пакетний асемблер-деасемблер реалізує три основні функції: буферизацію і зберігання даних, формування із них пакетів і відправка їх в мережу, а деасемблер розбирає прийняті пакети перед відправкою їх в DTE (видалення X.25 заголовка).

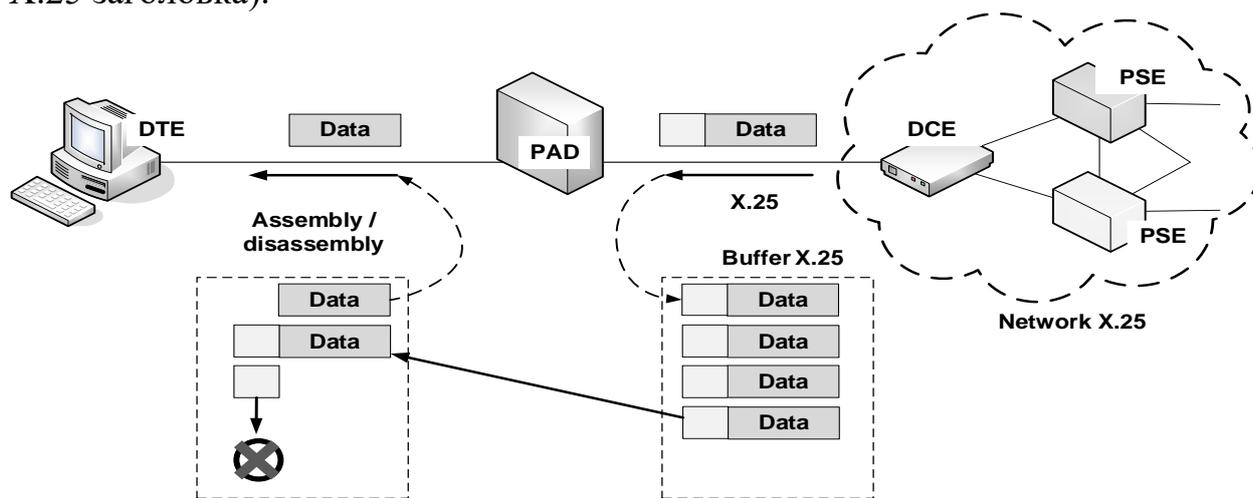


Рис. 4.16. Типи пристроїв мережі X.25

Обмін інформацією в мережі здійснюється по віртуальних каналах. Існує два види віртуальних каналів: комутовані і постійні. Комутовані віртуальні канали (SVC) є тимчасовими з'єднаннями, які використовуються для передачі даних одного повідомлення. Постійні віртуальні канали (PVC) – це кросове з'єднання.

**Технологія Frame Relay (FR)**, як і технологія X.25 призначена для створення WAN мереж передачі даних з комутацією пакетів. Історично поява цієї технології пов'язана із появою мереж з високоякісними високошвидкісними каналами з малою вірогідністю помилки –  $10^{-8}$  -  $10^{-10}$ . У мережах з такою якістю каналів технологія X.25 ставала неефективною. Принцип побудови і порядок обслуговування в мережах FR багато в чому нагадує мережу X.25. Дана технологія великого поширення не отримала, так як погано була пристосована для обслуговування навантаження реального часу, зокрема мови.

**Технологія ATM (Asynchronous Transfer Mode)** – це технологія асинхронного режиму передачі трафіку. Вона призначена для магістральних мереж. Технологія ATM об'єднала переваги мереж із комутацією каналів (гарантована смуга пропускання) і мереж із комутацією пакетів (гнучкість і ефективність для при обслуговуванні пульсуючого трафіку). Вона дозволяє масштабувати смугу пропускання від одиниць Мбіт/с до десятків ГГбіт/с.

Мережі ATM орієнтовані на попереднє встановлення з'єднання. У мережах ATM є три види обслуговування: постійні віртуальні канали PVC (Permanent

Virtual Circuit), комутовані віртуальні канали SVC (Switched Virtual Circuit) і служба передачі даних без підтвердження з'єднання.

У мережі АТМ перед встановленням з'єднання необхідно замовити клас сервісу. Є 4 класу сервісу: CBR, VBR, UBR і ABR. Якість сервісу визначає величину доступної смуги пропускання, значення величини затримки і ймовірності втрат.

Технологія АТМ забезпечила рішення майже всіх проблем на мережах із комутацією пакетів. Їй пророкували велике майбутнє. Однак зі збільшенням пропускної спроможності мережі Internet, що використовує протокол IP, мережі АТМ стали все більше програвати за вартістю реалізації. Якийсь час мережі АТМ ще трималися за рахунок того, що забезпечували задані показники якості обслуговування, особливо відео і мови. Але з появою технології **MPLS (Multiprotocol Label Switching)**, ця перевага була ліквідована. Сьогодні технологія MPLS дозволяє забезпечити всі вимоги до передачі трафіку без необхідності введення інших транспортних механізмів, протоколів маршрутизації і планів адресації. Тому вона займає провідні позиції при побудові телекомунікаційних мереж.

Технологія MPLS – це технологія багатопроTOCOLьної комутації по мітках. Частина MP в скороченні MPLS означає, що протокол може транспортувати безліч інших протоколів. Частина LS в аббревіатурі означає, що транспортні протоколи інкапсулюються за допомогою мітки.

Розглянемо принцип побудови мережі MPLS (рис. 4.17). Всю мережу можна умовно розбити на дві функціональні частини. Мережі клієнтів (споживачів), які розташовані по краях. І центральна (магістральна) мережа MPLS провайдера, яка об'єднує мережі клієнтів. Мережі споживачів працюють на основі IP-протоколу і складаються з робочих станцій і крайового маршрутизатора CE.

Мережа MPLS складається із маршрутизаторів із комутацією по мітках (Label Switch Router, LSR). Вони передають трафік по попередньо прокладених шляхах (Label Switching Path, LSP) відповідно до значень міток.

З точки зору завдань, що вирішуються, маршрутизатори в мережі MPLS можна розділити на два типи:

1. Маршрутизатор *P* (LSR), що розташовуються усередині домену MPLS.
2. Маршрутизатор *PE*, що розташовуються на кордоні домену MPLS. Вони отримали назву *LER* (Label Edge Router) прикордонних маршрутизаторів.

Пристрій LSR є гібридом маршрутизатора IP і комутатора. При цьому від маршрутизатора IP береться здатність визначати топологію мережі за допомогою протоколів маршрутизації і вибирати раціональні шляхи проходження трафіку. А від комутатора – техніка просування пакетів із використанням міток і локальних таблиць комутації.

До прикордонних маршрутизаторів *PE* (Provider Edge router), через маршрутизатори *CE*, з одного боку підключаються сайти клієнтів. З іншого боку – внутрішні маршрутизатори магістральної мережі провайдера *P* (Provider router).

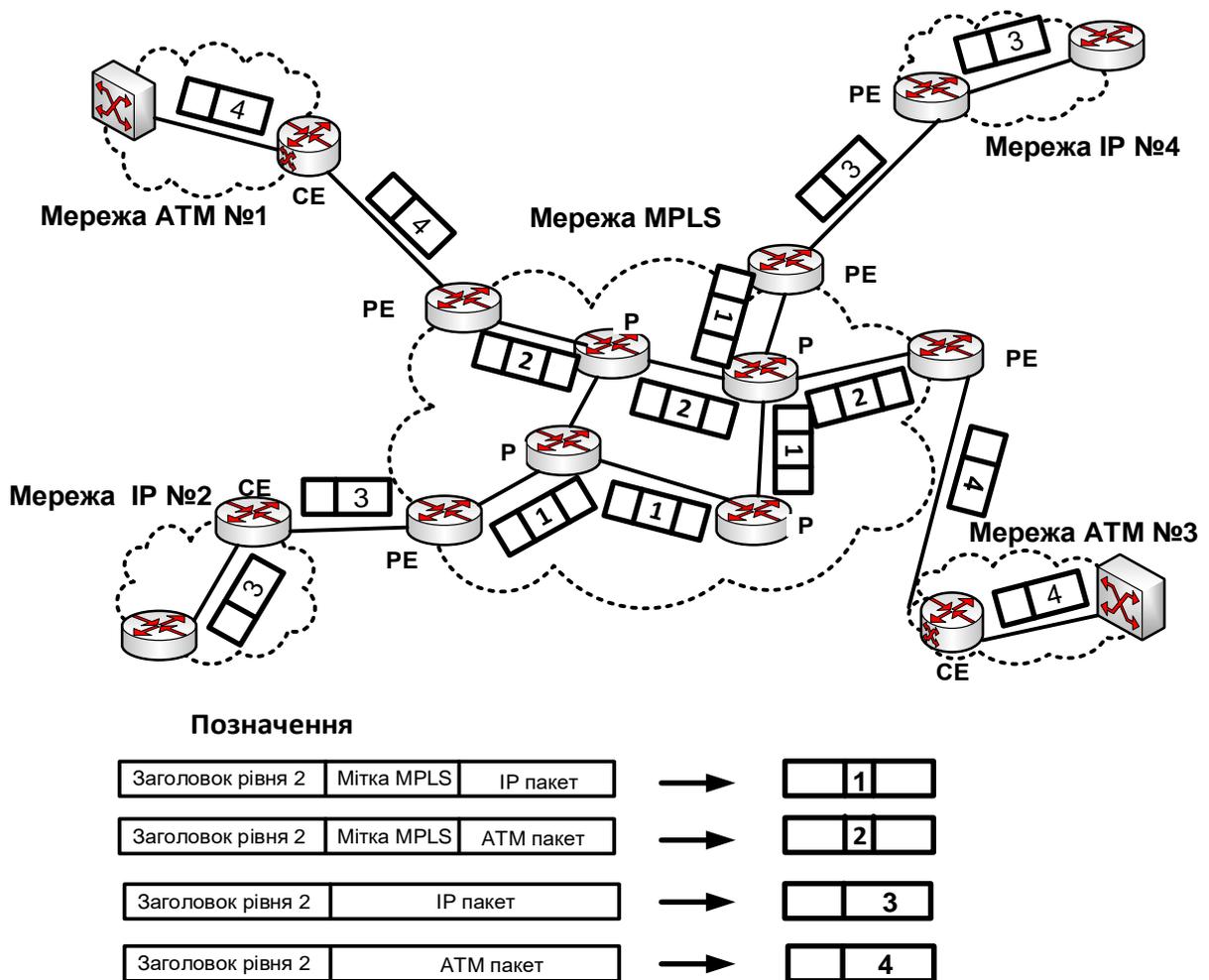


Рис. 4.17. Мережа MPLS

Взаємодія між мережами споживачів та провайдера забезпечується по лінії взаємодії маршрутизаторів PE і CE. Вони зазвичай пов'язані безпосередньо фізичним каналом, на якому працює будь-який протокол каналного рівня – наприклад, PPP, FR, ATM або Ethernet. Спількування між CE і PE йде на основі стандартних протоколів стека TCP / IP, підтримка MPLS потрібна тільки для внутрішніх інтерфейсів PE (і всіх інтерфейсів P).

Умовно можна уявити, що через маршрутизатори PE проходить межа між зоною клієнтських сайтів і зоною ядра мережі провайдера. По один бік розташовуються інтерфейси, через які PE взаємодіє з маршрутизаторами P. По інший – інтерфейси, до яких підключаються мережі клієнтів. З одного боку, на PE надходять оголошення про маршрути магістральної мережі, з іншого боку – оголошення про маршрути в мережах клієнтів.

Під кожен новий сайт клієнта PE створює окрему таблицю маршрутизації. Перевагою такого рішення є те, що адресація вузлів кожного сайту може здійснюватися незалежним чином. Це можливо тому, що безліч вузлів одного сайту не має маршрутної інформації про інше сайту.

Обмін маршрутної інформацією між сайтами кожної окремої VPN виконується під управлінням протоколу MP-BGP (Multiprotocol BGP).

Таким чином, весь трафік, який передається до граничних маршрутизаторів PE (LER), являє собою IP-пакети. У точці входу в мережу MPLS маршрутизатори PE додають в IP-пакет мітки. І всередині домену MPLS всі IP-пакети мають мітку у вигляді заголовка MPLS.

У межах ядра мережі маршрутизатори Р комутують трафік, ґрунтуючись на інформації в мітках. Маршрутизатор Р повинен вміти приймати пакет зі вставленою міткою на будь-якому своєму інтерфейсі, відшукувати її в таблиці комутації, вставляти нову мітку у відповідному форматі і потім відправляти пакет через відповідний інтерфейс. Іншими словами, Р може комутувати пакет з міткою із будь-якого інтерфейсу на будь-який інший інтерфейс із заміною мітки. Цей підхід набагато гнучкіше, ніж в разі АТМ, так як він не обмежений виключно каналами передачі комірок.

У точці виходу із мережі MPLS маршрутизатори PE видаляють мітки. І в подальшому маршрут проходження пакетів визначається по IP заголовку. На рис. 4.17 пакети 1 та 2 мають MPLS-мітки, а IP-пакети з номером 3 не мають мітки і обслуговуються по IP-заголовку.

Різниця між MPLS і IP полягає в способі маршрутизації при передачі даних по мережі. В технології MPLS IP-пакети комутуються, а не маршрутизуються. Це значно збільшує швидкість передачі. Тому MPLS в порівнянні з іншими технологіями, на базі якої також будуються VPN, є найбільш ефективною для передачі мультимедійного трафіку та оптимальнішою для роботи IP-орієнтованих застосувань.

## Список літератури

1. Шнепс-Шнеппе М.А. Лекции по сетям связи нового поколения NGN – М.:МАКС ПРЕСС, 2005. 230с.
2. Romanov O.I., Oryschuk M.V., Hordashnyk Y.S. Computing of influence of stimulated Raman scattering in DWDM telecommunication systems // Proceedings of the 2016 IEEE International Scientific Conference "RadioElectronics & InfoCommunications" (UkrMiCo'2016), 11-16 September 2016, Kyiv, Ukraine. IEEE Conference Publications, (IEEE Xplore Digital Library, DOI: 10.1109/UkrMiCo.2016.7739622), 2016. – P. 1-4.
3. Романов О.І., Нестеренко М.М., Маньківський В.Б. Застосування регресійної моделі коефіцієнта використання каналів для формування плану розподілу навантаження в мережі // Вісник НТУУ "КПІ". Сер. Радіотехніка, Радіоапаратобудування.- 2016. - № 67.- с. 34-42.
4. Romanov O.I., Nesterenko M.M., Veres L.A. IMS: Model and calculation method of telecommunication network's capacity // Proceedings of the 2017 International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo) 11-15 Sept. 2017, Odessa, Ukraine. - IEEE Conference Publications (IEEE Xplore Digital Library, DOI: 10.1109/UkrMiCo.2017.8095412), 2017. – P. 1-4.
5. Skulysh M., Romanov O. The structure of a mobile provider network with network functions virtualization // Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), 2018 14th International Conference on. IEEE, 2018 – P. 1032 – 1034, DOI: 10.1109/TCSET.2018.8336370



# **Технологічні підходи та напрямки розвитку**

---

# ВИКОРИСТАННЯ НЕОБРОБЛЕНОЇ НАВІГАЦІЙНОЇ ІНФОРМАЦІЇ В ОПЕРАЦІЙНІЙ СИСТЕМІ ANDROID

Міночкін Д.А., Кравчук С.О.

---

## USE OF NON-PROCESSED NAVIGATION INFORMATION IN THE ANDROID OPERATING SYSTEM

Minochkin D.A., Kravchuk S.O.

To explore the possibility of using differential corrections in Android OS, the section analyzes what data is used to calculate the location of the GNSS user and have them available in the Android application. Well-known academic sources were used for analysis.

Для дослідження можливості використання диференційних поправок в ОС Android в розділі проаналізовано які дані використовуються під час розрахунку місцезнаходження користувача GNSS і наявність можливості їх отримання в додатку Android. Для аналізу були використані відомі академічні джерела.

### Вступ

На сьогодні в світі використовується більше 5 мільярдів пристроїв з підтримкою GNSS, 80% з яких це смартфони. Більш ніж 50% додатків на Google Play та App Store використовують інформацію про місцезнаходження користувача. Більша точність місцезнаходження, що може бути отримана на масовому ринку, буде лише підвищувати використання смартфонів та портативних пристроїв в напів-професійних застосуваннях для місцевизначення різноманітних об'єктів.

Типова точність мобільних пристроїв на масовому ринку знаходиться в діапазоні від декількох метрів до десятків метрів при складних умовах, таких як висока щільність забудови. Однак, одночасне використання декількох GNSS систем, двочастотних чипсетів та використання зовнішньої інформації може підвищити точність до рівня менше метру.

Одним із способів отримання зовнішньої інформації є використання систем диференціальної корекції - методів поліпшення характеристик роботи навігаційної системи, такі, як точність, надійність і доступність, через інтеграцію

зовнішніх даних в процесі розрахунку. Суть більшості методів диференціальної корекції полягає в обліку навігаційною апаратурою різного роду поправок, що одержані з альтернативних джерел. Джерелами корегувальної інформації є контрольні-коригуючі станції (ККС), опорні координати яких відомі з високою точністю. Як правило методи диференціальної корекції забезпечують поправками обмежену територію Землі. Каналами доставки даних диференціальної корекції можуть бути різними, традиційно це УКВ, стільниковий і супутниковий зв'язок.

Необхідною умовою використання диференційних поправок є доступ до «сирої» (необробленої) навігаційної інформації від GNSS-супутників. До 2016 року виробники GNSS чипсетів для мобільних пристроїв не надавали доступ операційній системі Android та клієнтським додаткам до необробленої навігаційної інформації, що унеможливлювало використання різного роду диференційних поправок. Однак, у травні 2016 року компанія Google оголосила, що починаючи з Android версії 7 мобільні додатки отримують доступ до «сирих» GNSS вимірювань.

Незважаючи на переваги та можливості, що надає застосування «сирих» GNSS вимірювань, воно не набуло широкого розповсюдження. Для цього є дві причини: по-перше, стандартні формати, такі як RINEX або NMEA, недоступні на платформі Android, тому неможливо використати вже напрацьовані алгоритми для обробки «сирих» даних; по-друге, через новизну даного функціоналу в ОС Android не має готових рішень, які вже адаптовані під відповідні нові формати.

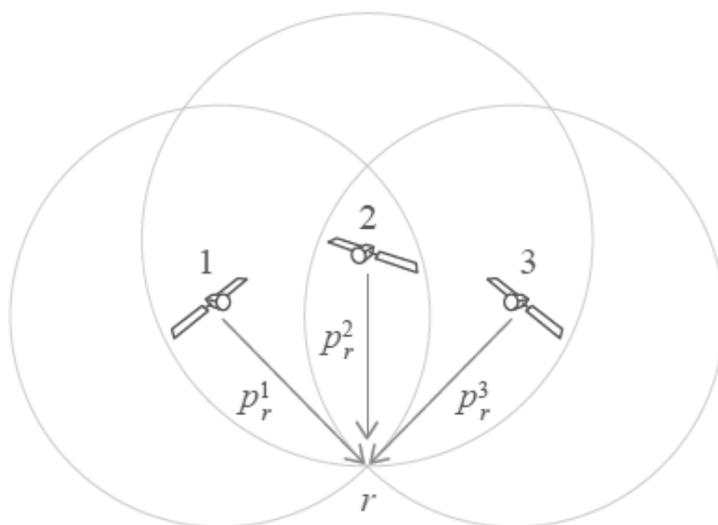
## 5.1. Глобальна навігаційна супутникова система

Космічний сегмент GNSS складається з різних супутників, що знаходяться на середній навколосемній орбіті на висоті приблизно 20 000 км, що призводить до затримки передачі приблизно 65 мс. В даний час існує чотири сукупності GNSS в експлуатації або на етапі розгортання: GPS (США), ГЛОНАСС (Росія), BeiDou (Китай) і Галілео (Європа) [1]. Вони доповнюються кількома регіональними системами GNSS та різними додатковими системами.

Позиція користувача оцінюється, використовуючи вимірювання відстані (псевдовідстані) між антеною приймача користувача та позицією щонайменше чотирьох супутників. Обидва параметри визначаються приймачем, який оцінює сигнал супутника та навігаційне повідомлення, відповідно. Ця інформація вимагається рішенням PVT (Position Velocity Time), яке визначає розташування та час користувача в будь-якій точці земної кулі.

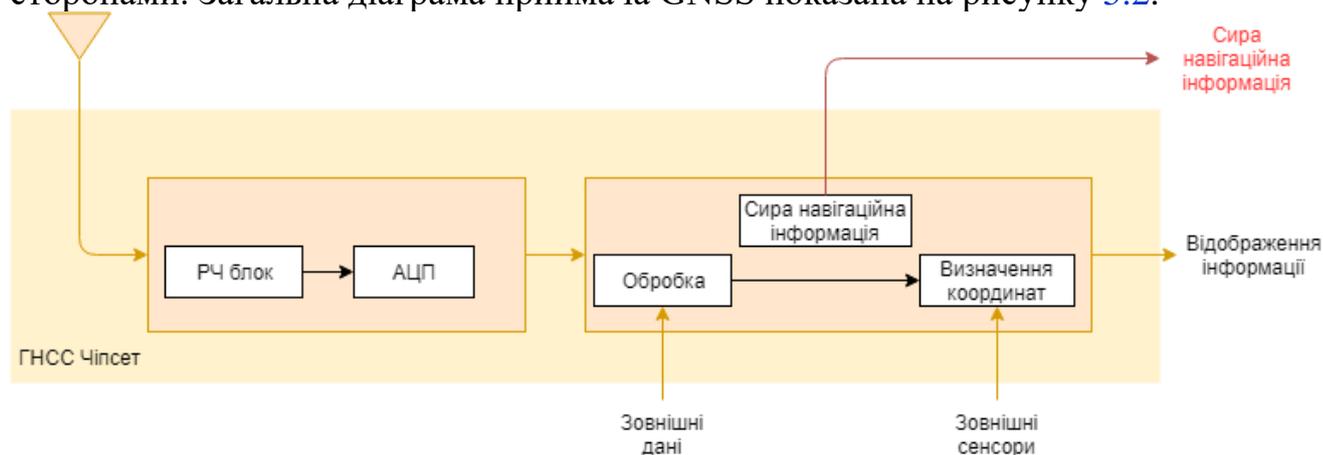
Для визначення геометричної відстані всі сигнали GNSS модулюються за допомогою спеціального коду з псевдовипадковим шумом (Pseudo Random Noise, PRN), що містить кілька мс, що однозначно ідентифікує супутник. Приймач постійно порівнює та вирівнює місцеву копію коду PRN із отриманим супутниковим сигналом. Виміряна затримка отриманого PRN-коду дорівнює часу передачі, якщо годинник передавача та приймача ідеально

синхронізований. Код PRN накладається бітами даних навігації, що містять положення передавального супутника. Знаючи одну позицію супутника, позиція приймача лежить десь на сферах навколо супутника з радіусом, рівним відстані. Якщо вимірювання відстані доступні для трьох супутників, то три сфери перетинаються в двох точках. Оскільки одна точка не розташована поблизу поверхні Землі, друга точка - справжня позиція приймача. Іншими словами, одночасне вимірювання відстані до трьох супутників дозволяє визначити фіксоване тривимірне положення, як це показано на рис. 5.1. Через неточність годинника приймача три сфери не перетинаються в загальній точці. Це визначається як четвертий невідомий параметр позиціонування, тому для цього потрібні щонайменше чотири видимих супутників GNSS [2, 3, 4].



**Рис. 5.1.** Пересічні сфери [2]

GNSS приймач сигналізує та надає користувачеві орієнтовне рішення PVT, що базується на визначених псевдо-відстанях, інформації, що подається через навігаційне повідомлення, а також додатковій інформації, наданій третіми сторонами. Загальна діаграма приймача GNSS показана на рисунку 5.2.



**Рис. 5.2.** Загальна блок-схема приймача GNSS

Блок РЧ (ліва частина діаграми) містить антену та елементи, які необхідні для обробки аналогового сигналу. Він може також включати малошумливий підсилювач, фільтри та блоки перетворення частоти. Останнім елементом у блоці є аналогово-цифровий перетворювач.

У смартфоні блоки обробки базового діапазону та PVT (правій частині діаграми) - це програмні блоки обробки сигналів, призначені для роботи на апаратному засобі загального призначення. Блок обробки основної смуги відповідає за отримання і відстеження сигналів GNSS та декодування навігаційних повідомлень. Допоміжні дані (зовнішня інформація) можуть бути надані, щоб скоротити час для розрахунків.

Звичайний смартфон/навігаційний чіп GNSS виступає у ролі чорного ящика і виводить лише PVT та обмежену інформацію з видимих супутників. Деякі високо інтегровані чипсети використовують тісну інтеграцію зі стільниковими мережами, WiFi та Bluetooth. Деякі навіть використовують датчики руху / орієнтації для взаємодопомоги при розрахунках, що підвищує точність та доступність кінцевої позиції.

## 5.2. Час

Хоча GNSS найкраще відома своїми можливостями позиціонування, вона також є одним з найбільш доступних та надійних джерел точного часу.

Час повинен бути визначений узгоджено та уніфіковано. Отже, необхідні перетворення між відліками часу, що використовуються різними сукупностями GNSS. Якщо не врахувати це на смартфоні, це призведе до зменшення точності розрахунку в багатоцільовому сузір'ї. Крім визначення еталонного часу сукупності GNSS, також визначається універсальна система відліку часу.

Тривалість секунди Temps Atomique International (TAI) була визначена в 1967 р. як тривалість 9 192 631 770 періодів випромінювання, що відповідає переходу між двома надтонкими рівнями основного стану атома цезію 133.

Універсальний час (UT) - це стандарт сонячного часу, що відображає середню швидкість обертання Землі, її найбільш часто використовуване визначення позначається UT1. Координований універсальний час (UTC) - це компроміс між TAI та UT1. Фактично, як атомний час, UTC є таким же рівномірним, як може бути шкала TAI. Проте, для того, щоб слідувати варіаціям обертання Землі, він завжди знаходиться в межах 0,9 с відносно UT1. Це досягається шляхом додавання або віднімання певної кількості стрибкових секунд до/від TAI.

Основні поняття позиціонування GNSS базуються на термінах - час прибуття та час передачі сигналів. Кожна система GNSS використовує власний час відліку, як зазначено в табл 5.1.

Система GNSS	Еталонний час
GPS	GPS Time (GPST)
Galileo	Galileo System Time (GST)
GLONASS	GLONASS Time (GLONASST)
Beidou	Beidou Time (BDT)

Час GPS (GPST) безперервний без стрибків секунд. Він починається з опівночі (0 ч UTC) з 5 на 6 січня 1980 року. У цю епоху різниця між TAI та UTC становила 19 с.

GPST передається за допомогою двох параметрів: номер тижня (WN) та час тижня (TOW). Перший розраховує тижні, що пройшли з початку часу GPS до поточного тижня. Тижні починаються опівночі в суботу. TOW підраховує секунди, що пройшли протягом поточного тижня.

Система часу "Галілео" - це безперервна шкала часу, починаючи з 13 секунд до опівночі з 21 серпня по 22 серпня 1999 року, тобто GST дорівнює 13 секундам 22 серпня 1999 року 00:00:00 UTC. Це було зроблено для того, щоб не мати ніякої різниці між GPST і GST.

ГЛОНАСС час формується за допомогою центрального синхронізатора ГЛОНАСС та різниці між UTC та часом Росії (UTC (SU)). GLONASST не повинен перевищувати 1 мс + 3 год:

$$GLONASST = UTC(SU) + 3h + \tau$$

де  $|\tau| < 1ms$ . ГЛОНАСС реалізує стрибок секунд, такий як у UTC. ГЛОНАССТ передає секунду дня і день року.

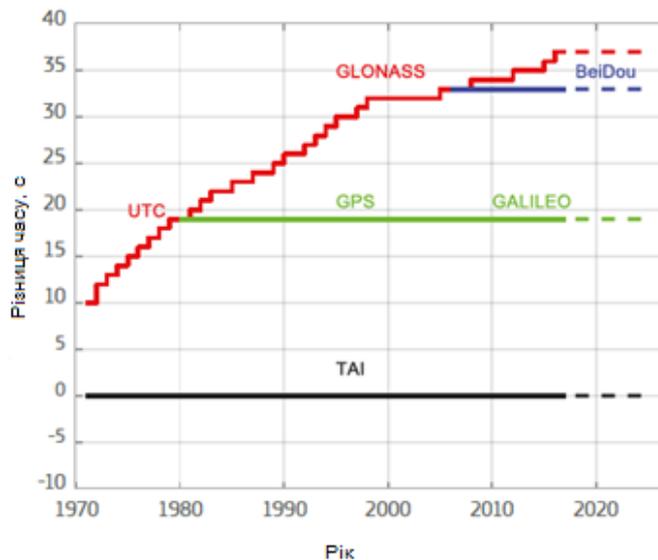
Час BeiDou (BDT) - це безперервна шкала часу, починаючи з 0 годин UTC з 1 січня 2006 р., і дотримується UTC.

Мульти-GNSS приймачі можуть відслідковувати та використовувати різні GNSS для рішення PVT. Зазвичай, приймач реалізує лише один годинник на основі одного еталонного часу. У табл. 5.2 представлені співвідношення між часовими інтервалами GNSS, TAI та співвідношенням між UTC та TAI. На рис. 5.3 показана різниця часу між еталонними часами та TAI.

Система	Взаємозв'язок
GPST – TAI	$TAI = GPST + 19s$
GST – TAI	$TAI = GST + 19s$
GLONASS – TAI	$TAI = GLONASST - 3h + leapsecond_{UTC-TAI}$
UTC – TAI	$UTC = TAI - leapsecond_{UTC-TAI}$
BDT – TAI	$TAI = BDT + 33s$

Відмінність часу у секундах від UTC до TAI визначається як  $leapsecond_{UTC-TAI}$ . Проте спільнота GNSS описує стрибок секунди як різницю часу між UTC і GPS. Різниця під може бути виражена як  $leapsecond = leapsecond_{UTC-TAI} - 19s$ .

GNSS приймачі зазвичай використовують системний час GPS, що потребує додаткової конвертації вимірювання часу ГЛОНАСС  $GPST = GLONASST - 3h + leapsecond$ , для генерації псевдовідстаней ГЛОНАСС на основі сирих даних, отриманих від Android-пристрою.



**Рис. 5.3.** Різниця часу між різними системами GNSS

### 5.3. Навігаційне повідомлення та стан відстеження

Приймач повинен синхронізуватися із сигналом, що передає супутник. В даний час GPS передає чотири різні сигнали в L1 [5], причому сигнал кодування Coarse / Acquisition (C / A) є найважливішим і найбільш часто використовуваним сигналом для пристроїв масового ринку. Код PRN базується на коді тривалістю 1 мс на швидкості 1,023 чипа на мс. Локальна копія коду C/A генерується з належною затримкою та Доплерівським зсувом. На рис. 5.4 показана ідеальна синхронізація між періодичним кодом C/A, переданим супутником (повторюється кожні 1 мс), і його локальна репліка, сформована приймачем (синій колір).

На цьому етапі приймач не може забезпечити повноцінну оцінку часу передачі, і доступні лише часткові псевдодані. Наприклад, при  $t_0$  приймач може лише надати відносну затримку до початку періоду коду C/A. Точно так само при  $t_1$  приймач забезпечує затримку до початку поточного коду C/A. Кількість цілих кодів C / A між  $t_0$  та  $t_1$  невідома.

Якщо приймач синхронізується лише з кодом C/A, дійсний діапазон переданого часу становить від 0 до 1 мс, що робить обчислення часу передачі неоднозначним.

Щоб вирішити неоднозначність цього часу, приймач може використовувати структуру навігаційного повідомлення. На рис. 5.5 показані різні етапи синхронізації, необхідні приймачу для отримання часу супутника:

- Code Lock: приймач заблоковано до коду C / A. Дійсний діапазон 0-1 мс.
- Bit Sync: приймач синхронізується з бітами. Діючий діапазон становить 0-20 мсек.
- Синхронізація підкадрів: приймач синхронізується з підкадрами. Діючий діапазон становить 0-6 с.

- TOW декодовані: усі субкадри містять TOW. Тому після розшифровки TOW діючий діапазон становить 0-1 тиждень.

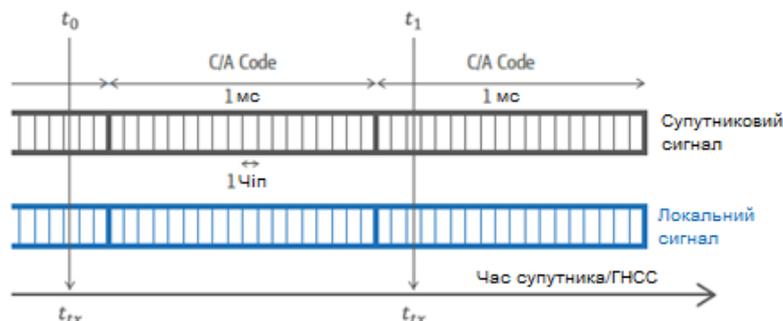


Рис. 5.4. Синхронізація з кодом С / А

В літературі описуються більш складні алгоритми, здатні обчислювати рішення PVT, використовуючи тільки часткову псевдовідстань. Це навігаційне рішення відоме як проблема грубої навігації [6]. Крім того, приймачі A-GNSS також можуть отримати TOW через зовнішні системи і не потребують декодування переданого повідомлення.

У випадку з GPS, п'ять послідовних субкадрів утворюють кадр, а навігаційне повідомлення складається з 25 кадрів. Більше інформації, пов'язаної з структурою GPS-повідомлення, можна знайти в [5].

Galileo використовує модуляцію E1 Open Service (OS) - мультиплексування двох компонентів:

- E1B: компонент E1 OS Data. Він породжується з потоку навігаційних даних I / NAV та основного коду (E1BC).
- E1C: експериментальний компонент E1 OS. Вона складається з основного коду (E1BC) та другорядного коду (E1C\_2nd).

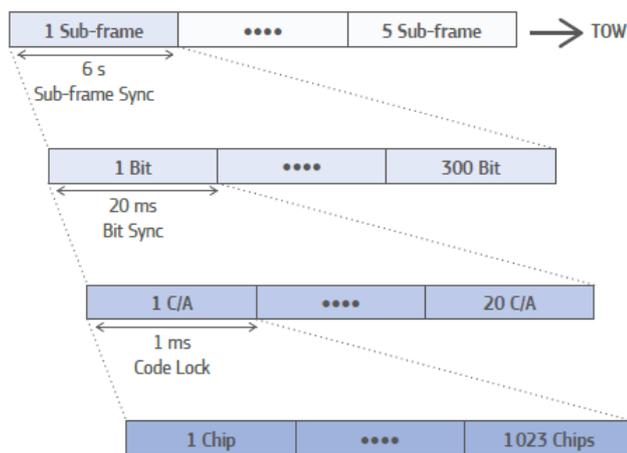


Рис. 5.5. Код L1 C/A системи GPS та структура навігаційного повідомлення

На рис. 5.6 показана структура як компонентів E1B, так і E1C. Перший заснований на первинному коді E1BC довжиною 4 мс з символами такої ж довжини, що й код E1BC. Сторінки (служба I / NAV) складаються з 500 символів,

включаючи TOW. Підкадр складається з 15 сторінок. Повне повідомлення I / NAV складається з 34 підкадрів.

Пілотний компонент складається з основного коду з довжиною 4 мс та додатковим кодом E1C\_2nd, який накладається на нього. Його довжина 25 чіпів, при цьому кожен чіп триває 4 мс. Повний вторинний код має довжину 100 мс. Оскільки в пілотному компоненті відсутнє навігаційне повідомлення, приймач може когерентно відслідковувати сигнал протягом тривалого періоду, що дозволяє обробити навіть слабкий сигнал. Багато ресиверів відстежують пілотний компонент, коли ефемериди та час отримуються через зовнішні джерела або декодуються з навігаційного повідомлення.

Після того, як приймач синхронізований з супутниковим сигналом і отримав GNSS час, однозначне може бути обчислений час передачі. Час GNSS також може бути отриманий з зовнішніх джерел, але ці методи виходять за рамки цього розділу. Відстеження вторинного коду Galileo призводить до неоднозначності часу в 100 мс. Оскільки час, протягом якого сигнал проходить від супутника до приймача, становить 70 мс, повна псевдовідстань може бути легко вірахована, на відміну від GPS.

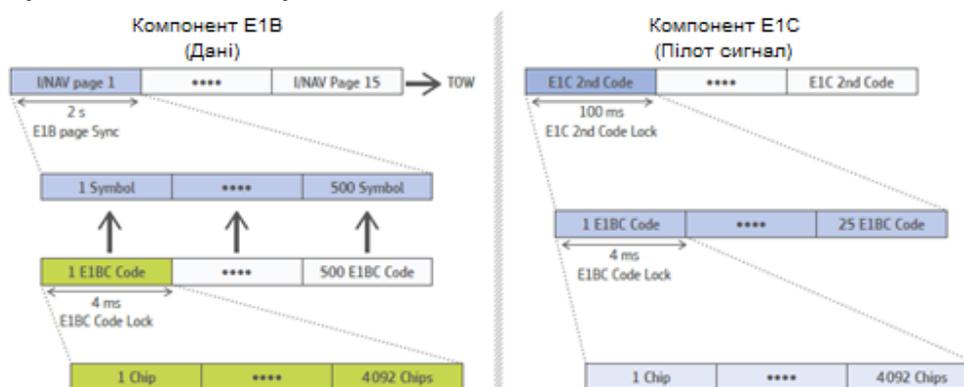


Рис. 1.6. E1B та E1C компоненти системи Galileo

Структура навігаційних повідомлень Beidou і GLONASS та статус відстеження аналогічні GPS. У табл. 5.3 наведено неоднозначність часу та стан відстеження для чотирьох основних сузір'їв.

GPS		Galileo		GLONASS		BeiDou	
Статус синхронізації	Час	Статус синхронізації	Час	Статус синхронізації	Час	Статус синхронізації	Час
код C/A	1 мс	код E1BC	4 мс	код C/A	1 мс	код C/A	1 мс
Біт	20 мс	2-й код E1C	100 мс	Біт	20 мс	Біт	20 мс
Синхронізація сабфреймів	6 с	сторінка E1B	2 с	Строка	2 с	Синхронізація сабфреймів	6 с
TOW	1 тиждень	TOW	1 тиждень	Час дня	1 день	TOW	1 тиждень

## 5.4. Генерування псевдовідстані

Незважаючи на те, що поняття псевдовідстані є простим, його розрахунок є доволі складною процедурою, оскільки це вимірювання відстані отримується за допомогою вимірювань часу. Приймачі GNSS обробляють прийняті сигнали для отримання переданого ( $t_{Tx}$ ) і прийнятого часу ( $t_{Rx}$ ). Різниця між ними - час проходження сигналу від супутника до приймача (при відсутності додаткових затримок через іоносферу, тропосферу та інших елементів). Псевдовідстань може бути розрахована як

$$\rho = (t_{Rx} - t_{Tx}) \cdot c,$$

де  $c$  - швидкість світла у вакуумі.  $t_{Tx}$  також необхідний для обчислення позиції супутника.

Генерація псевдовідстані та обчислення PVT можуть бути реалізовані за допомогою двох різних методів: загальний час прийому або загальний час передачі [7]. У наступних розділах генерація псевдовідстані базується на загальному часі прийому.

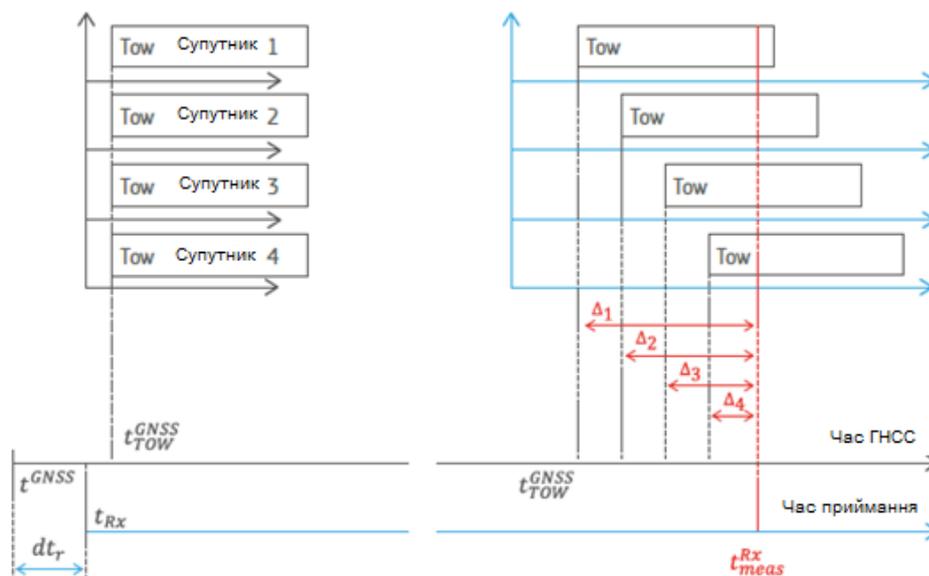


Рис. 5.7. Визначення псевдовідстані на основі загального часу прийому

Загальний час прийому відомий як час вимірювання ( $t_{meas}^{Rx}$ ). Чотири супутника передають сигнали одночасно, тому всі вони передають однаковий TOW і однаковий час епохи (зліва на малюнку 1.7). Через різні шляхи поширення, чотири сигнали надходять до приймача з різними затримками. Приймач потім обчислює часовий зсув між TOW і поточним часом в епоху. Це відоме як час вимірювання ( $t_{meas}^{Rx}$ ). В результаті, час, що передається супутником (наданий у системний час GNSS), в момент вимірювання може бути виражений як

$$\begin{aligned} t_{Tx,Sat1} &= t_{TOW}^{GNSS} + \Delta_1, \\ t_{Tx,Sat2} &= t_{TOW}^{GNSS} + \Delta_2, \\ t_{Tx,Sat3} &= t_{TOW}^{GNSS} + \Delta_3, \end{aligned}$$

$$t_{Tx,Sat4} = t_{TOW}^{GNSS} + \Delta_4,$$

де  $t_{TOW}^{GNSS}$  – переданий TOW,  $\Delta_i$  – затримка між TOW та часом вимірювання.

Перед тим як обчислювати перший PVT і декодувати TOW з принаймні одного супутника, приймач не має інформації про час GNSS. Таким чином, він повинен робити припущення, щоб генерувати час приймання і обчислити перший набір псевдовідстаней.

Перший супутниковий сигнал, що надходить, використовується як еталон. Час прийому ( $t_{meas}^{Rx}$ ) можна визначити як час передачі плюс еталонний час розповсюдження ( $t_{ref}^{path}$ ). Зазвичай передбачається стандартне значення від 65 до 85 мс. Тому перший вимірний час можна розрахувати як:

$$t_{meas}^{Rx}[1] = t_{Tx,Sat1}[1] + t_{ref}^{path}$$

Всі інші псевдовідстані вираховуються відносно першої. Оскільки присутня постійна помилка для всіх супутників (оскільки час розповсюдження був вибраний, а не визначений), вводять поправку між GNSS та отриманим часом приймання ( $dt_r$ ). Розрахований час в одиницях еталонного часу GNSS може бути виражений таким чином:

$$t_{meas}^{Rx,GNSS}[k] = t_{meas}^{Rx}[k] - dt_r[1]$$

де  $k$  – час  $k$ -того вимірювання Після того як був обчислений перший набір псевдовідстаней і отриманий перший PVT,  $dt_r$  визначається і використовується для всіх наступних наборів псевдовідстаней. Проте приймач обчислює та оновлює часову поправку для всіх наборів PVT. Отже, наступні безліч псевдовідстаней можна обчислити як:

$$\begin{aligned} \rho_1[k] &= (t_{meas}^{Rx}[k] - t_{Tx,Sat1}[k] + dt_r[1])c, \\ \rho_2[k] &= (t_{meas}^{Rx}[k] - t_{Tx,Sat2}[k] + dt_r[1])c, \\ \rho_3[k] &= (t_{meas}^{Rx}[k] - t_{Tx,Sat3}[k] + dt_r[1])c, \\ \rho_4[k] &= (t_{meas}^{Rx}[k] - t_{Tx,Sat4}[k] + dt_r[1])c, \end{aligned}$$

де  $c$  - швидкість світла в вакуумі. Деякі приймачі можуть надати ( $t_{meas}^{Rx}$ ) як суму виміряного часу та деякого зсуву.

## 5.5. Оцінка позиції

Якщо не враховувати додаткові ефекти на псевдовідстань, вимірювання відстані  $R^j$  між антеною приймача та  $j$ -тим супутником складається з реальної відстані та помилки годинника приймача, помноженої на швидкість світла у вакуумі:

$$R^j = \rho^j + c \cdot dt_r$$

Мета полягає в оцінці координат приймача антени ( $x, y, z$ ) та поправки годинника ( $dt_r$ ) з набору вимірювань псевдовідстаней. Знаючи положення  $j$ -го супутника ( $x^j, y^j, z^j$ ), отриманого з переданого навігаційного повідомлення або інших зовнішніх джерел, псевдовідстань може бути переписано як

$$R^j = \sqrt{(z^j - x)^2 + (z^j - y)^2 + (z^j - z)^2} + c \cdot dt_r, j = 1, 2, \dots, n (n \geq 4)$$

Одночасне вимірювання відстані щонайменше від чотирьох супутників є достатнім для вирішення проблеми. Оскільки рівняння визначає нелінійну систему, ми вирішуємо її з ітераційною лінеаризацією, починаючи з приблизної позиції отримувача

$$R^j - \rho_0^j = \frac{x_0 - x^j}{\rho_0^j} dx + \frac{y_0 - y^j}{\rho_0^j} dy + \frac{z_0 - z^j}{\rho_0^j} dz + c \cdot dt_r, j = 1, 2, \dots, n (n \geq 4)$$

де  $dx = x - x_0, dy = y - y_0, dz = z - z_0$ , а  $\rho_0^j$ - відстань до  $j$ -го супутника вирахована на основі його координат  $(x^j, y^j, z^j)$  та наближеного значення позиції приймача  $(x_0, y_0, z_0)$ . Система рівнянь може бути виражена у вигляді матриці як:

$$\begin{bmatrix} R^1 - \rho_0^1 \\ \vdots \\ R^n - \rho_0^n \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} \frac{x_0 - x^1}{\rho_0^1} & \frac{y_0 - y^1}{\rho_0^1} & \frac{z_0 - z^1}{\rho_0^1} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{x_0 - x^n}{\rho_0^n} & \frac{y_0 - y^n}{\rho_0^n} & \frac{z_0 - z^n}{\rho_0^n} & 1 \end{pmatrix}}_H \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \\ c \cdot dt_r \end{bmatrix}$$

Щоб вирішити систему рівнянь з чотирма невідомими, необхідні принаймні чотири супутника. Оскільки псевдовідстань містить різні джерела помилки (рис. 5.8), корисно використовувати всі доступні вимірювання псевдовідстані для оцінки позиції.

Для більш ніж чотирьох супутників ( $n > 4$ ) ми отримаємо перевизначену систему, яку можна вирішити, використовуючи процедуру оцінки нелінійного методу найменших квадратів (або відповідних методів з використанням фільтрів Калмана). Після вирішення рівняння оновлена оцінка координат приймача

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \end{bmatrix}$$

У наступному кроці ці рівняння псевдовідстаней можна знову лінеаризувати, використовуючи оновлену позицію приймача. Ці кроки повторюються, поки різниця між двома послідовними ітераціями не відповідає заданому порогу. Подальші подробиці щодо позиціонування наведені в [8, 9, 10].

Кілька сузір'їв GNSS можуть бути використані для вирішення задачі позиціонування. У складних умовах комбінація декількох сузір'їв GNSS може підвищити точність позиціонування. Однак поєднання сигналів з різних сузір'їв у PVT вимагає врахування часового зсуву між системами (Inter-System Bias, ISB) [11, 12]. В іншому випадку вимірювання відстані міститимуть додаткову помилку, що призведе до зниження точності визначення положення. Однією з стратегій є використання апріорного знання ISB. Наприклад, завдяки особливостей міжсистемної взаємодії Galileo та GPS, часовий зсув між GPS та Galileo (GGTO) передається в навігаційному повідомленні. Ця інформація також може бути надана користувачу за допомогою допоміжних джерел даних.

Якщо значення ISB відомо, то врахування позиції можна звести до рішення для однієї супутникової навігаційної системи [11]. ISB можна також оцінити, ввівши його як додатковий невідомий параметр у рівнянні положення.

Якщо для позиціонування використовуються всі чотири системи (GPS, ГЛОНАСС, Galileo та BeiDou), три міжсистемні зсуви між ГЛОНАСС, Галілео та BeiDou в порівнянні з GPS повинні бути визначені, в результаті чого можна отримати розширене рівняння навігації:

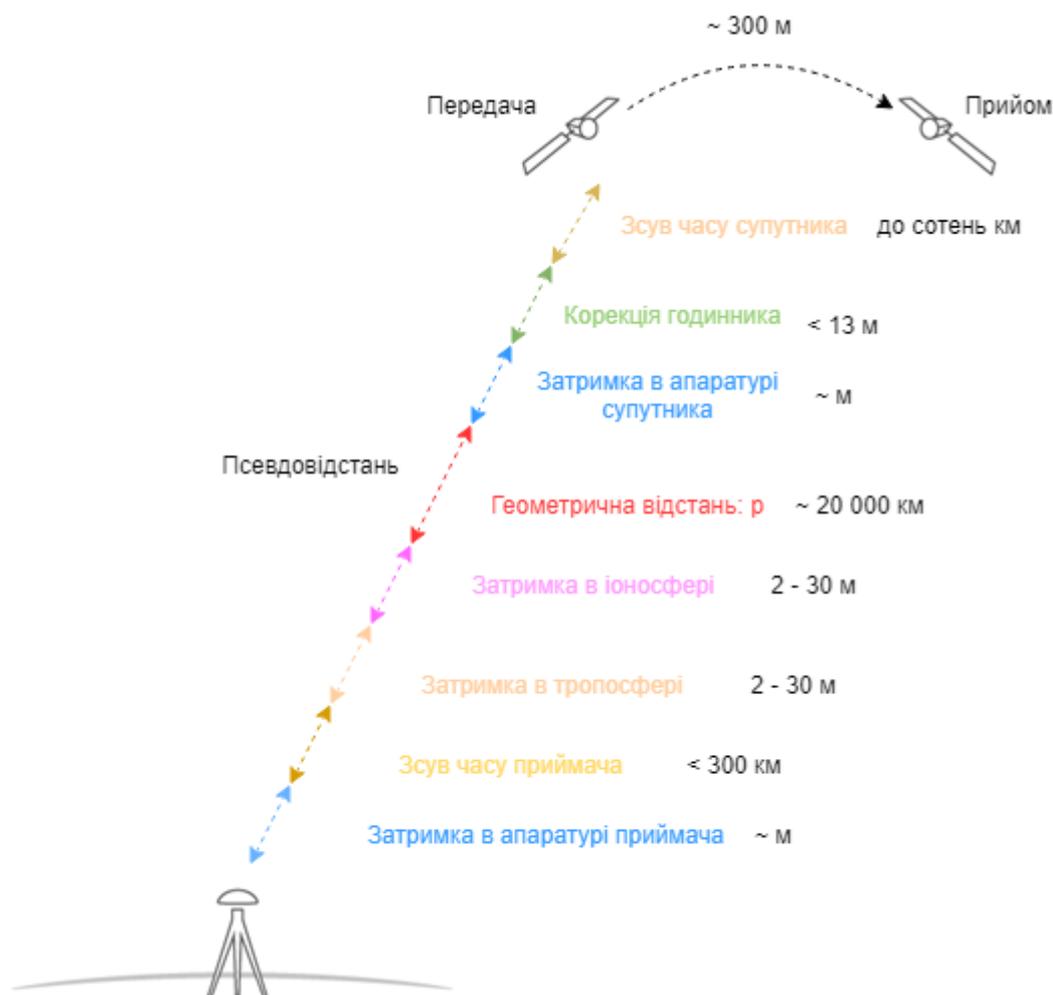


Рис. 5.8. Джерела помилок у підрахунку псевдовідстаней у GNSS системах [4]

$$\begin{bmatrix} R^1 - \rho_0^1 \\ \vdots \\ R^n - \rho_0^n \end{bmatrix} = H \cdot \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \\ c \cdot dt_r \\ c \cdot d\tau_{GPS/GLONASS} \\ c \cdot d\tau_{GPS/Galileo} \\ c \cdot d\tau_{GPS/BeiDou} \end{bmatrix}$$

У цьому випадку вимірювання відстані від щонайменше семи супутників є обов'язковими.

## 5.6. Доступ до необроблених вимірювань GNSS з використанням програмного інтерфейсу Android

Найпоширеніший спосіб отримати позицію на платформі Android - це узагальнений провайдер місця розташування, який поєднує в собі кілька джерел (GNSS, Wi-Fi або навіть мобільні мережі), щоб підвищити точність, час першого розрахунку позиції, доступність або споживання енергії. Цей функціонал доступний через програмний інтерфейс `android.gms.location`. З виходом версії Android 7 (Nugat), а також наступної версії (Android O) було представлено новий програмний інтерфейс місцезнаходження Android (`android.location`) що включає значні нововведення для служби локації.

Взаємодія між Android додатками і різними мобільними датчиками, такими як GNSS, здійснюється за допомогою програмного інтерфейсу (API) Android. Кожна нова версія платформи Android пов'язана з новим API та конфігурацією і рівень доступу користувачів до GNSS-чипсету залежать від рівня API. У таблиці 4 показано взаємозв'язок між версіями Android і рівнями API.

Таблиця 5.4. Версії Android

Версія	Кодове ім'я	API
2.3.3 - 2.3.7	Gingerbread	10
4.0.3 – 4.0.4	Ice Cream Sandwich	15
4.1.x	Jelly Bean	16
4.2.x		17
4.3		18
4.4	KitKat	19
5.0	Lollipop	21
5.1		22
6.0	Marshmallow	23
7.0	Nougat	24
7.1		25
8.0	Oreo	26
8.1		27

На рис. 5.9 підсумовано структуру програмного інтерфейсу Location API до версії Android 7 (рівень API 24), враховуючи драйвери GNSS-чипу та передачу даних між чіпом та ОС.

Додатки користувачів отримують доступ до даних GNSS за допомогою Location API. До API версії 23, цей доступ було обмежено даними, наведеними внизу на рисунку 9, а саме: супутникова інформація GPS (C / No, азимут, висота, якщо конкретний супутник був використаний у PVT), речення NMEA та рішення з PVT правильним значенням часу. Користувачі можуть надсилати базові команди конфігурації до чипсету, включаючи перезапуск / запуск чипсета GNSS або очищення допоміжних даних. Проте всі налаштування, які включають пріоритети сукупності GNSS та різні алгоритми PVT, конфігуруються самим чипсетом.

Починаючи з API 23 (Android 6), розробники отримали доступ до таких класів Android:

- GPS Satellite, що містить таку базову супутникову інформацію як азимут, висота, PRN та C/No. Він також позначає прапори, якщо супутник використовується у вирішенні PVT та наявності альманаху та ефемеридів.
- GPS Status надає інформацію про стан та рішення набору GNSS чипсету.
- Location, що вказує, чи надано рішення щодо позиції та часу.
- NMEA Listener, що передає базові речення NMEA.

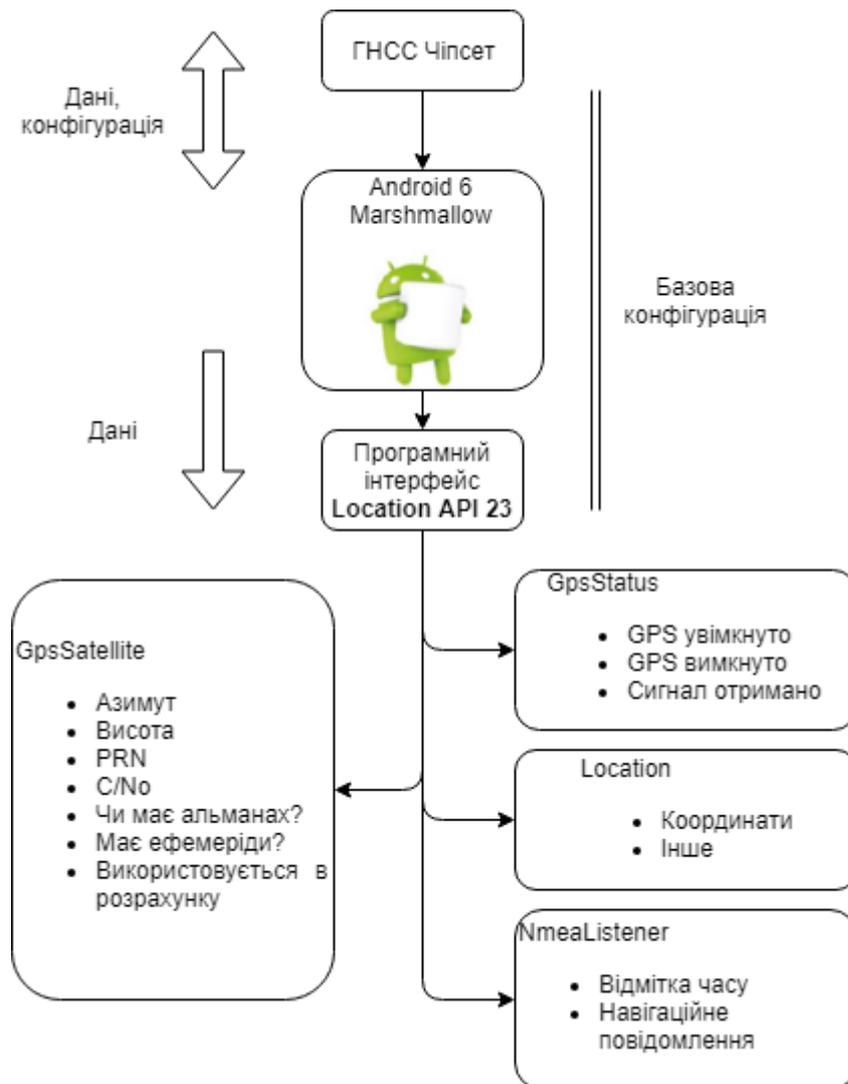


Рис. 5.9. Програмний інтерфейс Location в Android API 23

Будь-який новий рівень API сумісний з попередніми версіями, тобто всі можливості з попереднього рівня API залишаються дійсними у новій версії. На малюнку 10 показано рівень програмного інтерфейсу API 24, який реалізовано в Android 7.

Починаючи з API 24 (Android 7) розробники мають доступ до такої «сирої» та обчисленої інформації GNSS через класи Android:

- GNSS Clock, який містить: час приймача (використовується для обчислення псевдовідстані); відхилення годинника.

- Навігаційне повідомлення GNSS, яке містить: біти повідомлень навігації (усі сузір'я); статус навігаційного повідомлення.
- Вимірювання GNSS, яке містить: час прийому від супутника (використовується для обчислення псевдовідстані); код; фаза несучої.

Хоча ці дані надходять безпосередньо з чипсету GNSS, ми не маємо прямого доступу до самого чипсету.

Програмний інтерфейс Android не надає розраховані псевдовідстані. Список полів нового API місцезнаходження в Android 7 (табл. 5.5) не включає в себе час GNSS або псевдовідстані. Ці дані потрібно обчислити.

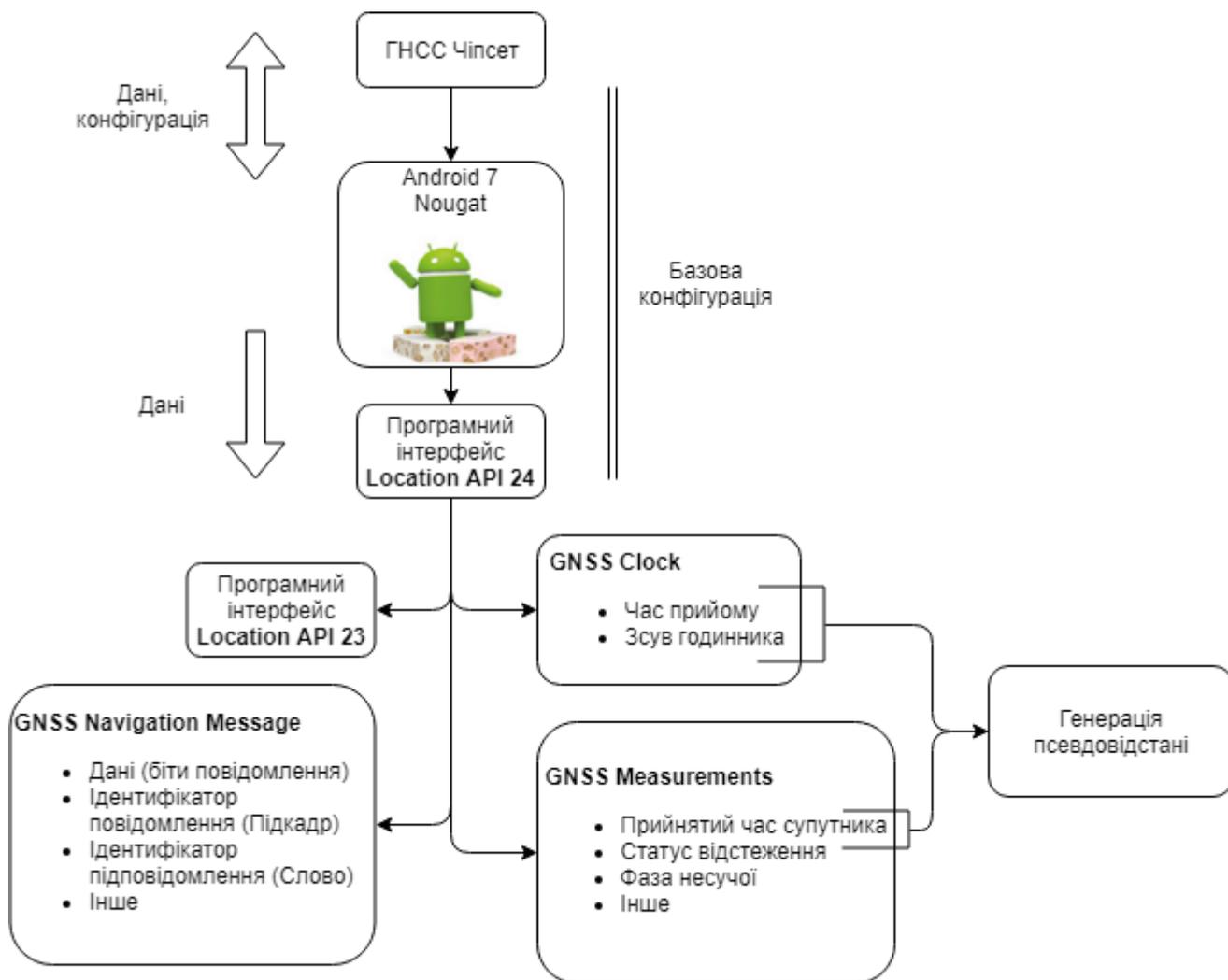


Рис. 5.10. Програмний інтерфейс Location в Android API 24-28

Таблиця 5.5. Поля нового програмного інтерфейсу

Дані «сирих» вимірювань, що доступні в програмному інтерфейсі Android 7 Location		
Ім'я класу в Android	Поле	Опис
GNSSClock	TimeNanos	Значення внутрішнього годинника GNSS приймача, в наносекундах
GNSSClock	BiasNanos	Корекція годинника, до наносекунди

GNSSClock	FullBiasNanos	Різниця між TimeNanos в середині GPS приймача та справжнього GPS часу, який пройшов з 0 год 0 хв 6-го січня 1980 року
GNSSClock	DriftNanosPerSecond	Відхилення годинника
GNSSClock	HardwareClockDiscontinuityCount	Кількість пропущених циклів
GNSSClock	LeapSecond	Стрибок секунди прив'язаний до часу годинника
GNSSMeasurement	ConstellationType	Тип сузір'я
GNSSMeasurement	Svid	Ідентифікатор супутника
GNSSMeasurement	State	Стан GNSS чіпу
GNSSMeasurement	ReceivedSvTimeNanos	Прийнятий час GNSS супутника в момент вимірювання
GNSSMeasurement	AccumulatedDeltaRangeMeters	Накопичена зміна відстані з моменту останнього ресету каналу
GNSSMeasurement	Cn0DbHz	Щільність частоти несучої по відношенню до шуму
GNSSMeasurement	TimeOffsetNanos	Зсув часу, в під час якого відбулось вимірювання, в наносекундах
GNSSMeasurement	CarrierCycles	Кількість повних циклів несучої між супутником і приймачем
GNSSMeasurement	CarrierFrequencyHz	Частота несучої, яка модулюється кодами та повідомленнями
GNSSMeasurement	PseudorangeRateMetersperSecond	Псевдошвидкість в поточний момент часу

Інформація щодо навігаційних повідомлень Android сумісна з GPS C / A, BeiDou D1 і D2, GLONASS L1 C / A, а також Galileo F / NAV та I / NAV, як зазначено в табл. 5.6. Однак точна інформація, що надається, залежить як від чипсета GNSS, так і від виробника смартфонів.

Таблиця 5.6. Дані навігаційного повідомлення

Android 7 Location - Navigation Message	
PARAMETER	DESCRIPTION
Data	Необроблені дані отриманого GPS повідомлення: <ul style="list-style-type: none"> <li>У випадку GPS L1 C/A, BeiDou D1 and BeiDou D2, кожний підкадр містить 10 30-ти бітних слова. Кожне слово (30 біт) знаходиться в останніх 30 бітах 4-ох байтового слова (в якому пропускаються байти 31 та 32), причому старший біт</li> </ul>

	<p>йде першим. Загалом використовується 40 байт, що передаються на протязі 6, 6 та 0.6 секунд відповідно.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• У випадку Glonass L1 C/A, кожна строка містить 85 біт даних, включаючи контрольну суму. Ці біти знаходяться в 11 байтовому слові у якому старший біт йде першим (біти 86-88 пропускаються). Період передачі – 2 с.</li> <li>• У випадку Galileo F/NAV, кожне слово складається з 238 біт, не враховуючи кінцеві біти та біти синхронізації. При чому старший розряд йде першим та біти 239 і 240 пропускаються. Час передачі – 10 с.</li> <li>• У випадку Galileo I/NAV, кожна сторінка містить дві частини – парну і непарну, загальним обсягом <math>2 \times 114 = 228</math> біт (не враховуючи кінцеві біти та біти синхронізації). Ці біти знаходяться в 29 байтовому слові у якому старший біт йде першим (біти 229-232 пропускаються).</li> </ul>
Message Id	<ul style="list-style-type: none"> <li>• У випадку 4 та 5 підкадрів GPS L1 C/A, це значення відповідає ідентифікатору фрейма навігаційного повідомлення в діапазоні 1-25 (підкадри 1, 2 та 3 не містять цього ідентифікатора, тому це значення рівне -1).</li> <li>• У випадку Glonass L1 C/A, відповідає ідентифікатору кадра в діапазоні 1-5.</li> <li>• У випадку BeiDou D1, відповідає номеру кадру в діапазоні 1-24.</li> <li>• У випадку BeiDou D2, відповідає номеру кадру в діапазоні 1–120.</li> <li>• У випадку номінальної структури кадру Galileo F/NAV, відповідає номеру підкадра в діапазоні 1–12.</li> <li>• У випадку номінальної структури кадру Galileo I/NAV, відповідає номеру підкадра в діапазоні 1–24.</li> </ul>
Status	Повертає статус навігаційного повідомлення.
Submessage Id	<ul style="list-style-type: none"> <li>• У випадку GPS L1 C/A, BeiDou D1 та BeiDou D2, відповідає номеру підкадру навігаційного повідомлення в діапазоні 1–5.</li> <li>• У випадку Glonass L1 C/A, відповідає номеру строки в діапазоні 1–15.</li> <li>• У випадку Galileo F/NAV, відповідає типу сторінки 1 або 6.</li> <li>• У випадку Galileo I/NAV, відповідає типу слова в діапазоні 1–10.</li> </ul>
Svid	Ідентифікатор супутника
Type	Тип навігаційного повідомлення.

### 5.6.1. Визначення часу GPS

Android 7 не забезпечує безпосередньо час GNSS, але надає час внутрішнього апаратного годинника та зміщення відносно справжнього часу

GPS (у наносекундах) можна отримати, якщо приймач оцінює еталонний час GNSS. Коли приймач оцінює час GPS, його можна розрахувати як

$$GpsTime = TimeNanos - (FullBiasNanos + BiasNanos)[нс],$$

де FullBiasNanos - зсув між годинником приймача та часом GPS у наносекундах і BiasNanos – має порядок менший наносекунди. Якщо приймач оцінює час за допомогою сузір'я, що не є GPS, приблизний час GPS може бути розрахований як

$$GpsTime = TimeNanos - (FullBiasNanos + BiasNanos) - InterSystemsBias$$

де InterSystemsBias - зсув часу між GPS та GNSS-супутником, що використовується в момент вимірювання.

## 5.6.2. Визначення псевдовідстаней

Як вже зазначалось, система Android не забезпечує безпосередньо передачу псевдовідстаней. Замість цього, вона надає всі параметри, необхідні для їх обчислення. Розрахунок псевдовідстаней залежить від різниці часу, тобто різниці часу між часом прийому (час вимірювання) і часом передачі.

$$\rho = \frac{(t_{Rx} - t_{Tx})}{1E9} \cdot c,$$

де  $t_{Tx}$  - час від GNSS-супутника в момент вимірювання, тобто момент часу, коли сигнал був переданий,  $t_{Rx}$  - це час вимірювання, а  $c$  - швидкість світла у вакуумі.  $t_{Tx}$  забезпечується системою Android 7 як:

$$t_{Tx} = ReceivedSvTimeNanos[нс],$$

де ReceivedSvTimeNanos – отриманий час, в наносекундах, GNSS супутника в момент вимірювання. Валідний діапазон  $t_{Tx}$  залежить від статусу стеження  $i$ , у випадку коли статус не рівний TOW decoded (GPS),  $t_{Tx}$  стає не однозначним, тому і псевдовідстані теж стають не однозначними.

Обчислення PVT через неоднозначні псевдовідстані, тобто навігаційна задача з наближеним часом, не в даному розділі не розглядається (докладніше див. [6]). Щоб отримати повні псевдовідстані (однозначні), потрібен наступний статус відстеження:

- GPS: TOW Decoded
- BeiDou: TOW Decoded
- ГЛОНАСС: Time of Day
- Галілео:
- TOW Decoded
- E1C 2nd Code: Незважаючи на діючий діапазон 0-100 мс, ці вимірювання повинні використовуватися для обчислення псевдовідстані.

Час вимірювання виражений у повному часі GNSS може бути побудований таким чином:

$$t_{RxGNSS} = TimeNanos + TimeOffsetNanos - (FullBias(1) + BiasNanos(1))[нс],$$

де час `timeOffsetNanos` – часовий зсув вимірювання, в наносекундах. Для обчислення всіх отриманих часових величин використовуються тільки перші значення `FullBiasNanos` і `BiasNanos`. Ця операція виконується до тих пір, поки не відбудеться розрив у внутрішньому часі прийому. Це зазвичай трапляється лише при перезапуску модуля GNSS.

$t_{Rx_{GNSS}}$  надається лише в системі відліку GNSS, яка використовується для обчислення часу прийому. Однак,  $t_{Rx_{GNSS}}$  передбачена для кожної системи GNSS, наприклад, GPST для вимірювань GPS або GLONASST для вимірювань ГЛОНАСС. Тому  $t_{Tx}$  необхідно конвертувати в ту ж систему відліку часу, що і  $t_{Rx_{GNSS}}$  і навпаки. Як правило, приймачі GNSS використовують GPS як еталонний час GNSS.

При обчисленні псевдовідстані, коли  $t_{Rx_{GNSS}}$  виражена в одиницях повного часу GNSS, з діапазоном  $t_{Tx}$ , взятим в залежності від стану стеження обидва компоненти повинні знаходитися в одному діапазоні значень.

Розглянемо два підходи до обчислення псевдовідстаней для GPS, Galileo, GLONASS та BeiDou на основі вимірювань  $t_{Rx_{GNSS}}$  і  $t_{Tx}$ , що потребують двох перетворень:

- обидва вимірювання до тієї ж системи часу GNSS
- обидва вимірювання до того ж дійсного діапазону.

В першому випадку [13], час вимірювання можна обчислити для GPS та Galileo з декодуванням TOW як:

$$t_{Rx} = t_{Rx_{GNSS}} - weekNumberNanos[нс]$$

для BeiDou з статусом TOW Decoded:

$$t_{Rx} = t_{Rx_{GNSS}} - weekNumberNanos[нс] - 14с$$

для Galileo зі статусом E1C 2-го коду:

$$t_{Rx} = t_{Rx_{GNSS}} - milliSecondsNumberNanos[нс]$$

для ГЛОНАСС (час доби) як:

$$t_{Rx} = t_{Rx_{GNSS}} - DayNumberNanos + 3h - leapsecond[нс]$$

Всі параметри у рівняннях повинні бути в наносекундах. `weekNumberNanos` - кількість наносекунд, що відбулися від початку часу GPS до поточного номеру тижня. `DayNumberNanos` - це кількість наносекунд, які відбулися з початку часу GPS до поточного дня. `milliSecondsNumberNanos` - це кількість мілісекунд, що відбулися з початку часу GPS. Їх можна розрахувати як:

$$\begin{aligned} & weekNumberNanos \\ &= floor\left(\frac{-FullBiasNanos}{NumberNanoSecondsWeek}\right) \\ & \cdot NumberNanoSecondsWeek[нс] \\ & dayNumberNanos \\ &= floor\left(\frac{-FullBiasNanos}{NumberNanoSecondsDay}\right) \\ & \cdot NumberNanoSecondsDay[нс] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \text{millisecondsNumberNanos} \\
& = \text{floor} \left( \frac{-\text{FullBiasNanos}}{\text{NumberNanoSeconds100Milli}} \right) \\
& \cdot \text{NumberNanoSeconds100Milli}[\text{нс}]
\end{aligned}$$

де *NumberNanoSecondsWeek* - кількість наносекунд протягом одного тижня, тобто *NumberNanoSeconds* = 604800e9. *NumberNanoSecondsDay* кількість наносекунд протягом одного дня і *NumberNanoSeconds100Milli* - кількість наносекунд протягом 100 мс.

В другому випадку, час вимірювання для GPS та Galileo з декодування TOW можна отримати як остачу від ділення наступних величин:

$$t_{Rx} = \text{mod}(t_{RxGNSS}, \text{NumberNanoSecondsWeek})[\text{нс}],$$

для BeiDou зі статусом TOW Decoded:

$$t_{Rx} = \text{mod}(t_{RxGNSS}, \text{NumberNanoSecondsWeek}) + 14\text{с}[\text{нс}],$$

для Galileo зі статусом E1C 2-го коду:

$$t_{Rx} = \text{mod}(t_{RxGNSS}, \text{NumberNanoSeconds100Milli})[\text{нс}],$$

та

$$t_{Rx} = \text{mod}(t_{RxGNSS}, \text{NumberNanoSecondsDay}) + 3h - \text{leapsecond}[\text{нс}],$$

для ГЛОНАСС із статусом "Час доби".

Коли розраховані  $t_{Rx}$  та  $t_{Tx}$ , розрахунок псевдовідстані доволі простий:

$$\rho = \frac{(t_{Rx} - t_{Tx})}{1E9} \cdot c[\text{с}],$$

### 5.6.3. Визначення фази несучої

Вимірювання фази носія забезпечується Android 7 в якості AccumulatedDeltaRangeMeters у метрах. Вони неоднозначні, без інформації про час, тобто приймач може лише розраховувати кількість циклів, що відбуваються між епохами. Якщо не буде відстежено один з циклів, то приймач втрачає цей рахунок. Дійсність вимірювання забезпечується через поле AccumulatedDeltaRangeState. Можливі прапорці наведено в табл. 5.7. Для розрахунку слід використовувати тільки дійсні вимірювання.

Таблиця 5.7. Можливі прапорці для визначення фази

AccumulatedDeltaRangeState		
Статус	Значення	Опис
ADR_STATE_CYCLE_SLIP	4	Визначено пропуск циклу.
ADR_STATE_RESET	2	Визначено стан скидання.
ADR_STATE_VALID	1	Стан валідний.
ADR_STATE_UNKNOWN	0	Стан не валідний або невідомий.

### 5.6.4. Цикл роботи приймача

Виробники смартфонів надають пріоритет низькому енергоспоживанню. Оскільки безперервно працюючий набір GNSS модулів споживає значний заряд

акумулятора, для підтримки низького енергоспоживання може бути реалізовано кілька методів. Найбільш поширеним є використання робочого циклу, зображеного на рис. 5.11.

Існують дві різні реалізації робочого циклу, залежно від стану GNSS часу:

- Апаратний годинник TCXO вимикається протягом інтервалів часу, в яких не відбувається відстеження. У телефоні є два генератори: високоточний з компенсацією зміни температури (TCXO), який використовується для відстеження GNSS та альтернативний, з малим енергоспоживанням, кварцовий генератор (ХО). Під час короткого періоду відстеження, коли чипсет відстежує дані GNSS, використовується TCXO. За межами цього періоду, коли чіп вимикається на кілька сотень мілісекунд, апаратний час забезпечується за допомогою ХО. Тому значення поля HardwareClockDiscontinuityCount збільшується, та робочий цикл можна визначити за допомогою «сирих» даних вимірів.
- Апаратний годинник TCXO працює протягом інтервалів часу, в яких не відбувається відстеження: коли чипсет GNSS вимкнено, годинник TCXO продовжує працювати, навіть якщо сигнал не відстежується. Користувачі не можуть визначити, коли приймачі використовують робочий цикл, так як не існує розриву в годинах GNSS, а HardwareClockDiscontinuityCount зберігає таке саме значення.

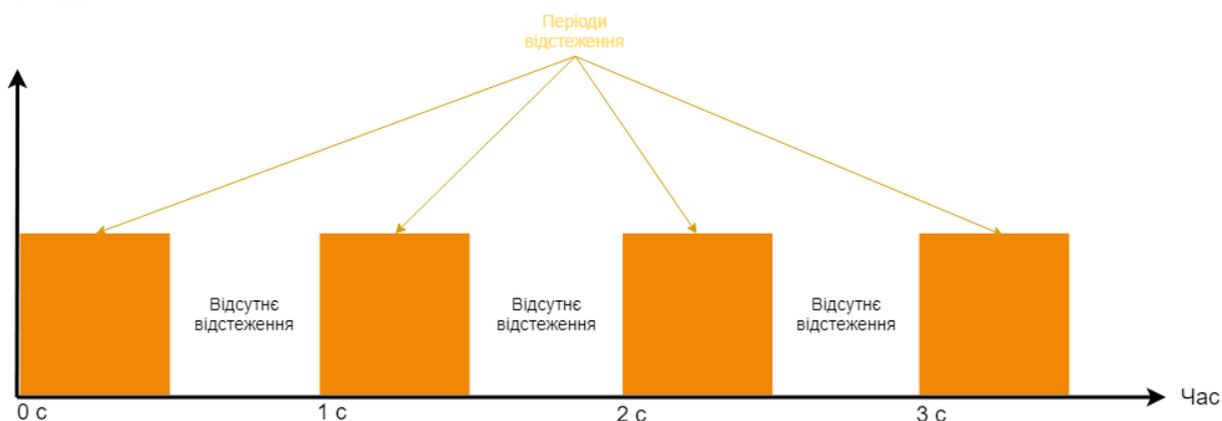


Рис. 5.11. Цикл роботи приймача відносно часу

Навіть незважаючи на те, що ця методика є прозорою для користувачів, у випадку коли нове місцеположення обчислюється кожену секунду, це може вплинути на вимірювання фази несучої. Без неперервності спостережень може відбуватися декілька циклів між двома послідовними вимірами, що серйозно обмежує використання таких передових технологій, як Real Time Kinematic (RTK) або Precise Point Positioning (PPP).

### 5.6.5. Зсув Допплера

Зсув Допплера, який виникає внаслідок руху супутника, може бути отриманий з PseudorangeRateMetersPerSecond, за умови, що швидкість в момент часу буде в м / с. Це значення в Гц не включає корекції помилок частоти

годинника приймача та супутника (незбалансоване значення). Позитивне "некоректоване" значення показує, що супутник відходить від приймача. Знак «некоректованої» псевдошвидкості і його відношення до знаку Зсуву Допплера можна визначити за рівнянням:

$$pseudorange\ rate = -k * dopplershift$$

де  $k$  – це константа, що залежить від центральної частоти сигналу (наприклад,  $f_c$  для L1 = 1575.42e6 Гц) та швидкості світла ( $c$ ) за формулою  $k = c/f_c$  або довжина хвилі.

### 5.6.6. Ідентифікатор супутника

Ідентифікатор супутника надається безпосередньо від Android 7, використовуючи поле Svid. Очікувані значення для кожного сузір'я:

- GPS: 1–32
- SBAS: 120–151, 183–192
- ГЛОНАСС: або номер орбітального слоту (OSN), або номер частотного каналу (FCN) + 100
  - o 1-24 як OSN (бажано, якщо це відомо)
  - o 93-106 як FCN (-7 до +6) +100. Тобто FCN -7 кодується як 93, 0 як 100 і +6 як 106. Оскільки два супутники GLONASS передають навігаційні сигнали на тій же несучій частоті, для ідентифікації правильного OSN необхідні допоміжні дані.
- o QZSS: 193–200
- Galileo: 1–36
- Beidou: 1–37

### 5.6.7. Ідентифікатор системи (сузір'я), що використовується

Ідентифікатор сузір'я надається безпосередньо Android 7, використовуючи поле ConstellationType. Значення для кожного сузір'я перелічені в табл. 5.8

Таблиця 5.8. Значення флагу для різних типів сузір'їв

ConstellationType	
Статус	Значення
CONSTELLATION_BEIDOU	5
CONSTELLATION_GALILEO	6
CONSTELLATION_GLONASS	3
CONSTELLATION_GPS	1
CONSTELLATION_QZSS	4
CONSTELLATION_SBAS	2
CONSTELLATION_UNKNOWN	9

## 5.7. Використання «сирих» навігаційних даних в ОС Android

Додатки користувачів отримують доступ до даних GNSS, використовуючи програмний інтерфейс Location API, який до випуску Android 7.0 обмежувався послугами Google Play Services (android.gms.location). Цей API орієнтований на інкапсульовані та спрощені відомості про місцезнаходження, який використовує оптимізований для батареї Агрегований постачальник місцезнаходження, що об'єднує декілька датчиків, включаючи GNSS, Wi-Fi та Bluetooth. Це можна розглядати як чорний ящик, оскільки все це робиться всередині чіпа: блоки збору та відстеження декодують навігаційне повідомлення і генерують псевдовідстані, фазові вимірювання та час. Ці дані коректуються за допомогою навігаційного повідомлення (помилки годинника, вплив іоносфери та тропосфери тощо). Нарешті, позиція, швидкість і час (PVT) обчислюються і віддаються чипсетом GNSS.

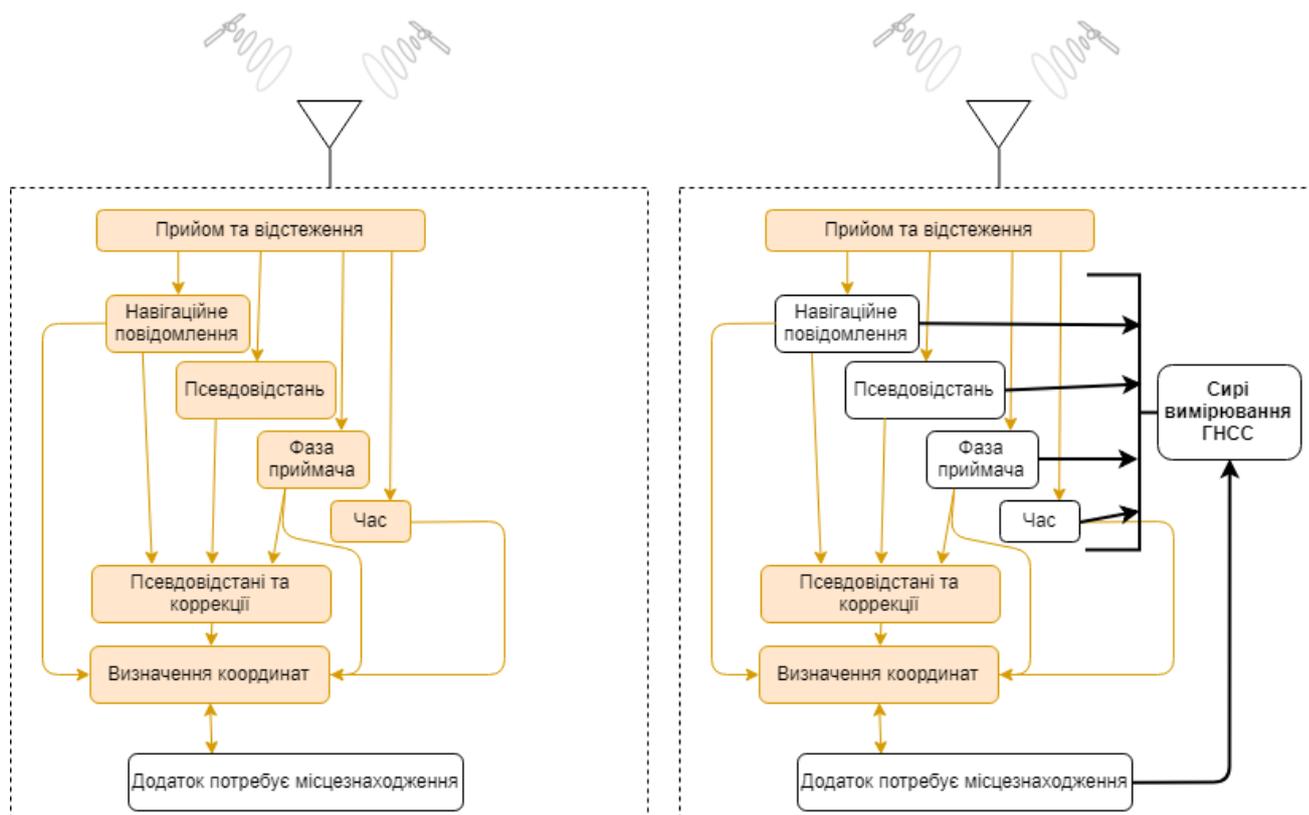
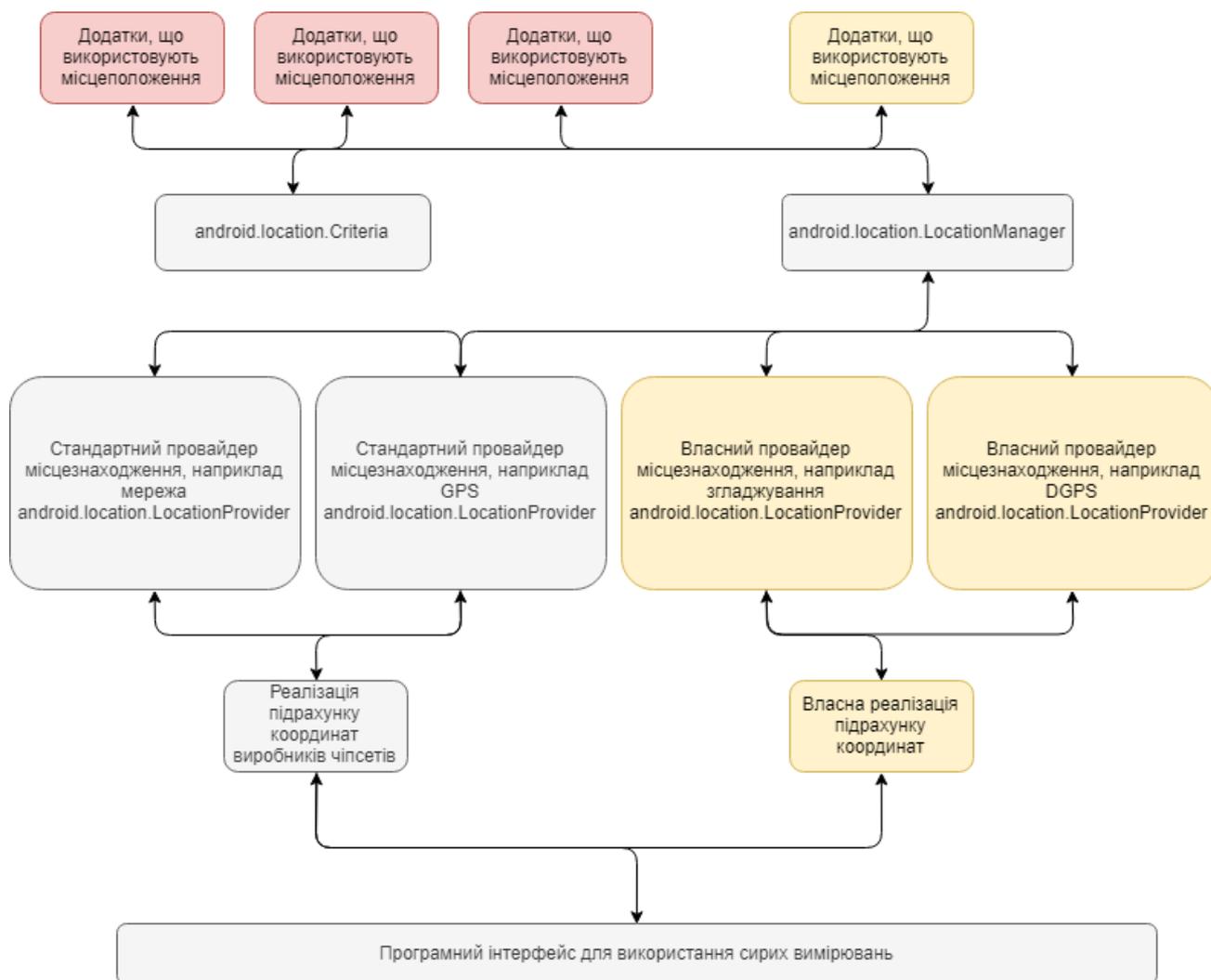


Рис. 5.12. android.gms.location (до Android 7) та android.location (Android 7)

Новий API (android.location) забезпечує прямий доступ як до «сирих» спостережень GNSS, так і до рішення щодо PVT. На рис. 5.12 показана архітектура підсистеми приймача та основні відмінності між новим та старим програмним інтерфейсом. Для ясності зображені лише нові параметри (білі коробки). Інші параметри, такі як позиція супутника або C/No не відображені. Псевдовідстані не можна отримати за допомогою нового API безпосередньо, але параметри, необхідні для їх створення, є в наявності.

Додатки, яким необхідне місцезнаходження, запитують його за допомогою класу `android.location.LocationManager`, вказуючи провайдера місцеположення (мережа, Wi-Fi або GPS / GNSS) або використовують агрегований провайдер залежно від критеріїв точності та споживання енергоресурсів.

При використанні необроблених вимірювань, ця архітектура може бути розширена за допомогою додавання спеціального постачальника геоданих, який може базуватися, наприклад, на згладжених псевдовідстанях або диференціальних даних GNSS.



**Рис. 5.13.** Архітектура використання сирих даних ГНСС в Android

Основними джерелами помилок GNSS є супутникові (орбіти і годинник), атмосферні (іоносферні та тропосферні затримки), шум та локальні ефекти (включаючи багатопроменеві). Диференціальні спостереження покращують точність позиціонування, надаючи зовнішні корекції до цих помилок, але, як правило, не корегують локальні ефекти, такі як багатопроменевість або перешкоди. Існує кілька методів для цього, причому найбільш часто використовуваним є DGNSS (або DGPS, Диференціальний GNSS / GPS) для

кодового рішення та кінематики в режимі реального часу (RTK), Network RTK і точного позиціонування точок (PPP) для рішень фаз.

В цьому випадку розташування користувача може бути розраховане як на рівні операційної системи, так і силами додатків, які можуть використовувати та обробляти «сирі» навігаційні дані. Нова архітектура зображена на рис. 5.13.

## Висновок

Для дослідження можливості використання диференційних поправок в ОС Android проаналізовано, які дані використовуються підчас розрахунку місцезнаходження користувача GNSS і розглянуто наявність можливості їх отримання в додатку Android.

Позиція користувача оцінюється, використовуючи вимірювання відстані (псевдовідстані) між антеною приймача користувача та позицією щонайменше чотирьох супутників. Обидва параметри визначаються приймачем, який оцінює сигнал супутника та навігаційне повідомлення, відповідно. Ця інформація вимагається рішенням PVT (Position Velocity Time), яке визначає розташування та час користувача в будь-якій точці земної кулі.

Найпоширеніший спосіб отримати позицію на платформі Android - це узагальнений провайдер місця розташування, який поєднує в собі кілька джерел (GNSS, Wi-Fi або навіть мобільні мережі), щоб підвищити точність, час першого розрахунку позиції, доступність або споживання енергії. Цей функціонал доступний через програмний інтерфейс *android.gms.location*. З виходом версії Android 7 (Nugat), а також наступної версії (Android O) було представлено новий програмний інтерфейс місцезнаходження Android (*android.location*), що включає значні нововведення для служби локації.

Додатки користувачів отримують доступ до даних GNSS за допомогою Location API. До API версії 23, цей доступ було обмежено, а саме надавалась лише наступна інформація: супутникова інформація GPS (C / No, азимут, висота, якщо конкретний супутник був використаний у PVT), речення NMEA та рішення з PVT правильним значенням часу.

Починаючи з API 23 (Android 6), розробники отримали доступ до таких класів Android:

- GPS Satellite, що містить таку базову супутникову інформацію як азимут, висота, PRN та C/No. Він також позначає прапори, якщо супутник використовується у вирішенні PVT та наявності альманаху та ефемеридів.
- GPS Status надає інформацію про стан та рішення набору GNSS чипсету.
- Location, що вказує, чи надано рішення щодо позиції та часу.
- NMEA Listener, що передає базові речення NMEA.
- Будь-який новий рівень API сумісний з попередніми версіями, тобто всі можливості з попереднього рівня API залишаються дійсними у новій версії.
- Починаючи з API 24 (Android 7) розробники мають доступ до такої «сирої» та обчисленої інформації GNSS через класи Android: GNSS Clock, який містить:

час приймача (використовується для обчислення псевдовідстані); відхилення годинника.

- Навігаційне повідомлення GNSS, яке містить: біти повідомлень навігації (усі сузір'я); статус навігаційного повідомлення.
- Вимірювання GNSS, яке містить: час прийому від супутника (використовується для обчислення псевдовідстані); код; фаза несучої.

Таким чином, в операційній системі Android існує весь необхідний функціонал для реалізації власного розрахунку місцезнаходження що робить можливим використання диференційних поправок для більш точного розрахунку.

## Список літератури

1. Current and Planned Global and Regional Navigation Satellite Systems and Satellite-based Augmentations Systems. UN OOSA. Vienna, Austria.
2. Peter J.G. Teunissen and Oliver Montenbruck, Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems, Springer (2017)
3. [http://www.navipedia.net/index.php/Code\\_Based\\_Positioning\\_\(SPS\)](http://www.navipedia.net/index.php/Code_Based_Positioning_(SPS))
4. Sanz Subirana, J et al. (2013). “GNSS Data Processing – Vol. I: Fundamentals and Algorithms”. European Space Agency (ESA). Noordwijk, The Netherlands. Режим доступу: <http://bit.ly/1QV4KAL>
5. Interface Specification IS-GPS-200, september 2013. Режим доступу: <http://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-200H.pdf>
6. Van Diggelen, Frank Stephen Tromp. 2009. A-GPS: assisted GPS, GNSS, and SBAS. Boston: Artech House.
7. Code Tracking and Pseudoranges, Inside GNSS, January/February 2012. Режим доступу: [http://www.insidegnss.com/auto/IGM\\_janfeb12-Solutions.pdf](http://www.insidegnss.com/auto/IGM_janfeb12-Solutions.pdf)
8. Gustafsson, F. (2010). “Statistical sensor fusion”. Studentlitteratur. Linkoeping University. Linkoeping, Sweden
9. Rahemi, N et al. (2014). “Accurate Solution of Navigation Equations in GPS Receivers for Very High Velocities Using Pseudorange Measurements”. Adv in Aerospace Eng, 2014, Article ID 435891, 8 pages
10. Brown, R G i Hwang, P W C. (2009). “Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering (3rd ed)”. John Wiley & Sons. New York, NY
11. Petrowski, Ivan G. (2014). “GPS, GLONASS, Galileo and Beidou for Mobile Devices”. Cambridge University Press. Cambridge, UK
12. GNSS Time Offset, Inside GNSS, September/October 2007. Режим доступу: [http://www.insidegnss.com/auto/SepOct07-GNSS\\_time\\_offset.pdf](http://www.insidegnss.com/auto/SepOct07-GNSS_time_offset.pdf)
13. GPS Measurement Tools, Google. Режим доступу: <https://github.com/google/gps-measurement-tools>

---

**ПРОГРАМНО-ВИЗНАЧУВАНІ РАДІОСИСТЕМИ  
В ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЯХ**

---

Кайденко М.М., Роскошний Д.В.

---

**SOFTWARE DEFINED RADIO IN  
TELECOMMUNICATION SYSTEMS**

---

Kaidenko M.M., Roskoshnyi D.V.

The chapter covers Software-defined radio systems and their usage in telecommunications. Features of the modern Software-defined radio systems were analyzed. The architecture of Software-defined radio system that is based on architecture of communication software was substantiated. The architecture that is oriented on realisation of Cognitive Radio System was proposed. The creation process of Software-defined radio system based on SDR Transceiver and technologies of system on crystal using modern means of software-oriented modeling was described in details. The variants of interaction between processor cores and programmable logic in the system on the crystal during creation of Software-defined radio system were considered. The publication is addressed to scientists, graduate students, and developers of radiocommunication equipment.

У розділі розглядаються програмно-визначувані системи, відносно їх застосування в телекомунікаціях. Проаналізовано особливості сучасних програмно-визначуваних радіосистем. Обґрунтована архітектура програмно-визначуваної радіосистеми, яка базується на архітектурі комунікаційного програмного забезпечення. Запропонована архітектура орієнтована на реалізацію конгнітивних радіосистем. Детально описано процес створення програмно-визначуваної радіосистеми на основі SDR трансивера та технологій системи на кристалі з використанням сучасних засобів програмно-орієнтованого моделювання. Розглянуто варіанти взаємодії між процесорними ядрами та програмованою логікою в системі на кристалі при створенні програмно-визначуваних радіосистем. Видання адресоване науковцям, аспірантам, розробникам радіотелекомунікаційного обладнання.

## 6.1. Особливості сучасних програмно-визначуваних радіосистем

Програмно-визначувана радіосистема SDR (Software-Defined Radio) це система, яка використовує набір апаратних і програмних технологій, при цьому деякі, чи усі функції роботи радіосистеми на фізичному рівні реалізуються за допомогою програмного забезпечення. Програмне забезпечення може модифікуватись, або може бути вбудованим, яке працює на програмованих пристроях обробки сигналів. Ці пристрої можуть включати в себе програмовані користувачем логічні матриці (FPGA), цифрові сигнальні процесори (DSP), процесори загального призначення (GPP), програмовані системи на кристалі SoC (System-on-chip) та інші спеціалізовані програмовані процесори. Використання цих технологій при побудові SDR дозволяє додавати нові безпроводові функції та можливості в існуючі радіосистеми без зміни апаратної платформи [1].

Програмно-визначувані радіосистеми поєднують в собі передові технології для забезпечення гнучкості при створенні радіосистем. До цих технологій відносяться широкосмугові технології, радіочастотні компоненти, програмовані радіочастотні компоненти, технології цифрової обробки сигналів, аналогово-цифрові та цифро-аналогові перетворювачі, синтезатори частоти, технології побудови системи на кристалі, технології обробки інформації. Завдяки передовим технологіям SDR надають можливість покращувати використання спектру, відкривати нові ринки телекомунікацій та розширювати перелік доступних послуг. Внаслідок гнучкості SDR технологій виникає ряд проблем при конфігуруванні та управлінні системою: збірка в єдине ціле обладнання та програмних компонент різних платформ в працюючу радіосистему; управління радіосистемою під час її роботи; робота радіосистеми у умовах фізичних та нормативних обмежень регулюючих органів різних країн; програмна самоконфігурація радіокомпонентів та адаптація; визначення загальних інтерфейсів для додатків та програмного забезпечення управління; використання бібліотек компонентів та радіоконфігурацій для різних апаратних та програмних платформ (переносимість) [2].

## 6.2. Архітектура програмно-визначуваної радіосистеми для розробки радіотелекомунікаційного обладнання

Архітектура програмного забезпечення SDR зазвичай базується на архітектурі комунікаційного програмного забезпечення SCA (Software Communications Architecture) [3], яка була розроблена в рамках програми Department of Defense Joint Tactical Radio Systems (JTRS) [4]. SCA була призвана забезпечити відкриту архітектуру, яка дозволяє розробникам радіозасобів поєднувати апаратні та програмні компоненти в одній системі. По суті SCA в деякому сенсі є «операційною системою», яка визначає взаємодію програмних компонентів SDR.

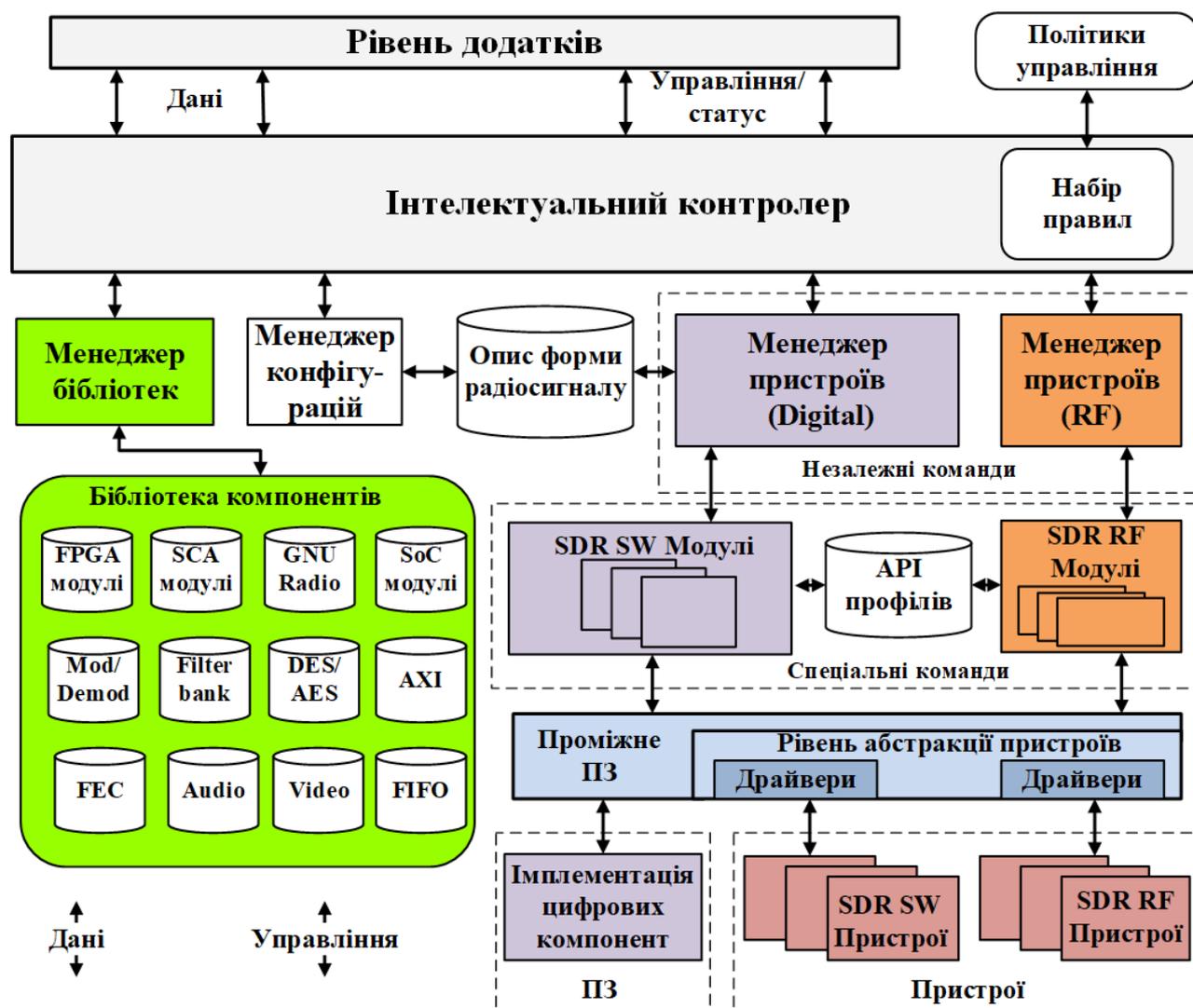


Рис. 6.1. Модель архітектури програмно-визначуваної радіосистеми для розробки радіотелекомунікаційного обладнання

Однак SCA рухається до SDR від програмного забезпечення, а не від реалізації радіосистеми та перспектив її життєвого циклу. Хоча підхід SCA забезпечує гнучкість для програмних компонент, однак перехід від програмних

компонент до робочої радіосистеми не є однозначним. Представлена в даному розділі архітектура, що схематично зображена на рис. 6.1, дозволить вирішити ці проблеми.

Запропонована архітектура побудована на основі SCA специфікації і використовується для виявлення необхідних компонентів при реалізації реальної когнітивної радіосистеми [5, 6]. Одним із основних компонентів, який використовується в цій моделі, є менеджер бібліотек для забезпечення організованого адміністрування компонент для безлічі файлів, що необхідні для програми SCA. Модель також демонструє використання класифікації компонентів, зокрема відповідних програмних інтерфейсів застосувань API (Application Programming Interface). API описує компонент для проекту таким чином, щоб дозволити компоненту інтерфейс з загальною архітектурою. Це покращує самосвідомість системи, яка в свою чергу покращує когнітивні здібності системи, дозволяючи радіосистемі визначати, які послуги надає доступний компонент і як отримати доступ до них просто знаючи тип класифікації.

В архітектурі використовується Інтелектуальний контролер для зв'язку з рівнем додатків. До його складу входить також менеджер, що визначає набір правил для визначених політик управління. Політики та правила генеруються для визначеного призначення радіозасобу в межах доступних для його реалізації компонентів. Інтелектуальний контролер визначає, які функції доступні і які компоненти активні, або які потрібно активізувати. Додатково Інтелектуальний контролер повинен містити модуль перевірки рівня доступу до додатків для забезпечення захисту від несанкціонованого доступу.

В архітектурі передбачено два менеджера пристроїв окремо для управління цифровими пристроями та радіочастотними пристроями. Це дозволяє забезпечити незалежне керування пристроями та покращити переносимість з платформи на платформу. Менеджери пристроїв створюють оперативну радіосистему інформація про яку знаходиться в описі програмного додатку SAD (Software Application Description). Динамічні радіосистеми можуть містити кілька SAD, які дозволять системі бути сумісними з різними стандартами та різними профілями передачі для одного стандарту. Після аналізу SAD цифрові пристрої та радіочастотні пристрої налаштовуються за допомогою менеджера пристроїв у відповідності до опису. Інформація для налаштування пристроїв (профілі) знаходиться в бібліотеці компонентів. Ця бібліотека зберігає зареєстровані компоненти, що доступні для радіосистеми, і керується менеджером бібліотек, який відповідає за внесення компонентів до бібліотеки, їх вилучення та підключення. Бібліотека компонентів використовується не тільки для забезпечення роботи радіосистеми і для покращення організаційного структура програмного забезпечення радіо, а й для поліпшення її автономності. У випадку когнітивного радіо під керуванням Інтелектуального контролера визначається найбільш оптимальний варіант для побудови радіосистеми у відповідності до поставленої задачі.

Логічні пристрої контролюють свої апаратні пристрої через відповідний інтерфейс. Використовуючи класифікацію API, логічний пристрій має лише знати тип пристрою, надаючи доступ до відповідної базової функції. Це дозволяє логічному пристрою, що представляє наприклад підсилювач, керувати ним до тих пір, доки він використовується драйвером пристрою. Для конкретного компонента логічний пристрій - це простий шаблон, який не буде потрібним для створення системи в режимі реального часу.

### 6.3. Процес створення програмно-визначуваної радіосистеми

Задачі створення та прототипування бездротових систем обговорюються протягом багатьох десятиліть, але тільки в останні роки з'явилася можливість повного циклу розробки на ПЕОМ - від створення моделі до завершення реалізації, що пов'язано з розвитком засобів програмно-орієнтованого моделювання Matlab/Simulink.

З появою технологій системи на кристалі відкрилися нові можливості для розробки SDR шляхом модельно-орієнтованого проектування з використанням високорівневих програмних засобів проектування. Використання SoC, які поєднують в собі універсальність ARM процесора і потужність обробки FPGA, дозволяє компромісно розподіляти ресурси для реалізації високошвидкісних і низькошвидкісних процесів цифрової обробки сигналів, алгоритмів прийняття рішення і алгоритмів керування між процесорними ядрами і FPGA. Високошвидкісні задачі цифрової обробки, які потребують виконання у реальному часі, такі як модуляція, завадостійке кодування, синхронізація, оцінки стану каналу та інші виконуються на FPGA. Для задач декодування даних, візуалізації, моніторингу і діагностики, підтримки зовнішніх апаратних та програмних інтерфейсів використовуються процесорні ядра.

Процес створення радіосистеми з використання модельно-орієнтованого проектування показано на рис. 6.2.

Першим етапом є створення моделі радіосистеми в середовищі Matlab/Simulink, при цьому в моделі повинні бути присутні модулі, які відповідають за взаємодію з апаратною платформою (SDR-модель). При створенні моделі враховується яка частина моделі (алгоритми) будуть реалізуватись на FPGA, а яка на ARM процесорах.

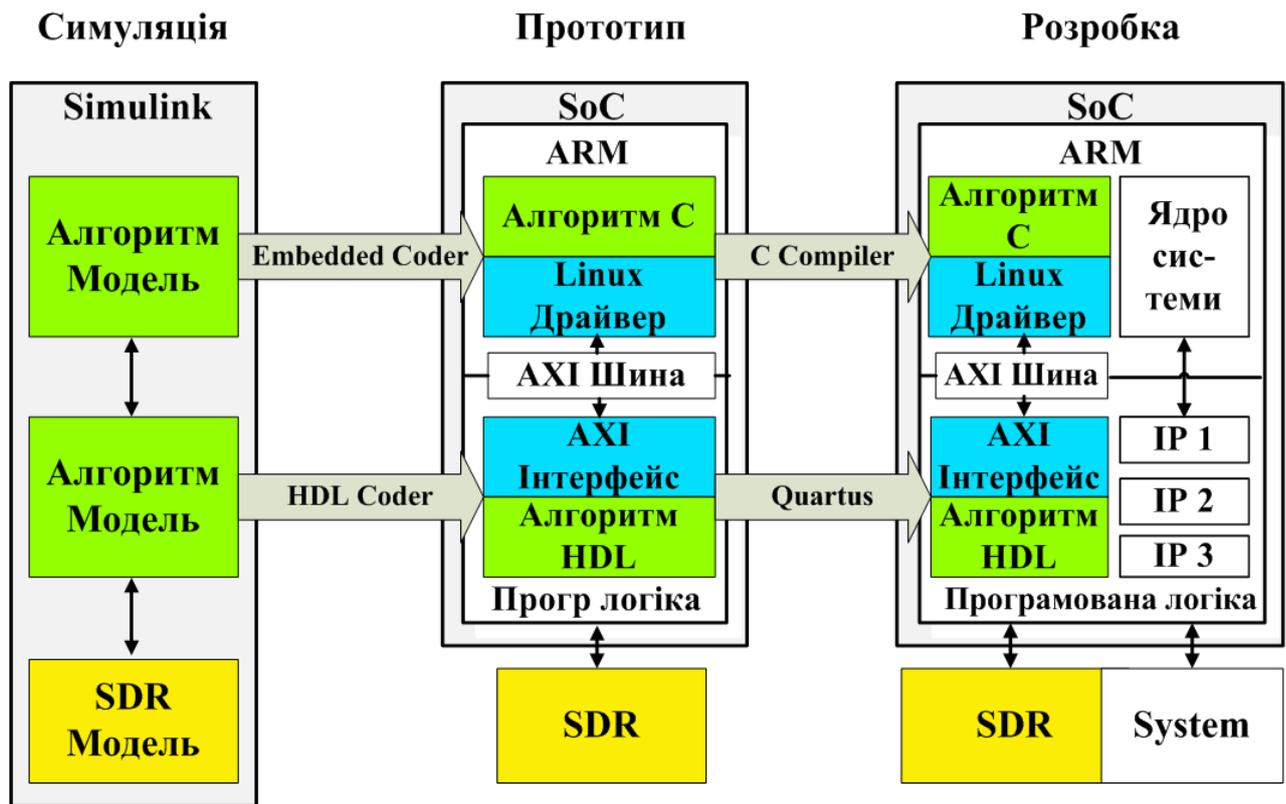


Рис. 6.2. Структура процесу створення програмно-визначуваної радіосистеми з використанням модельно-орієнтованого проектування.

Відладка моделі на першому етапі здійснюється в режимі програмно-апаратного моделювання. Програмно-апаратне моделювання НІЛ (Hardware-in-the-Loop Simulation) являє собою метод, який використовується в розробці і випробуванні складних технічних і технологічних вбудованих систем реального часу. Використання програмно-апаратного моделювання дозволяє проводити внутрішньосхемний і внутрішньосистемне тестування розроблених рішень і математичних моделей, істотно скорочувати терміни і вартість розробки [7].

Процес НІЛ - симуляції в загальному вигляді складається з трьох основних етапів:

- створення математичної моделі реального середовища, в якій буде використовуватися апаратний пристрій;
- тестування розробленої математичної моделі на реальному апаратному пристрої;
- реалізація процесу в реальному пристрої з урахуванням результатів тестування моделі.

При НІЛ - симуляції можливі як варіанти з математичним описом (програмною моделлю) середовища і внутрішньосхемним моделюванням процесу, який розробляється, так і з математичним описом процесу (програмною моделлю) і внутрішньосистемним моделюванням його поведінки в реальному середовищі.

З появою технологій програмно визначаються радіосистем і системи на кристалі можливості НІЛ - симуляції телекомунікаційних процесів і систем істотно розширилися, чому сприяло також забезпечення підтримки такого виду симуляції програмними середовищами моделювання, зокрема Matlab. Одним з найновіших рішень є використання SDR технології Analog Devices на базі AD9361 спільно з SoC Altera або Xilinx.

Програмно апаратне моделювання телекомунікаційних процесів і систем в Matlab базується на використанні ІО System Object, який в свою чергу заснований на специфікації системних об'єктів Matlab. ІО System Object працює як з Matlab, так і Simulink і призначений для обміну даними по мережі Ethernet з ADI апаратної платформою, підключеної до платформи FPGA / SoC, яка працює під управлінням розподіл ADI Linux. ІО System Object побудований на бібліотеці libiio і дозволяє моделі Matlab або Simulink обмінюватися потоками даних з апаратною платформою, контролювати її установки, а також здійснювати моніторинг різних параметрів. На рис. 6.3. представлена схема рівнів, що показує архітектуру системи в процесі симуляції.

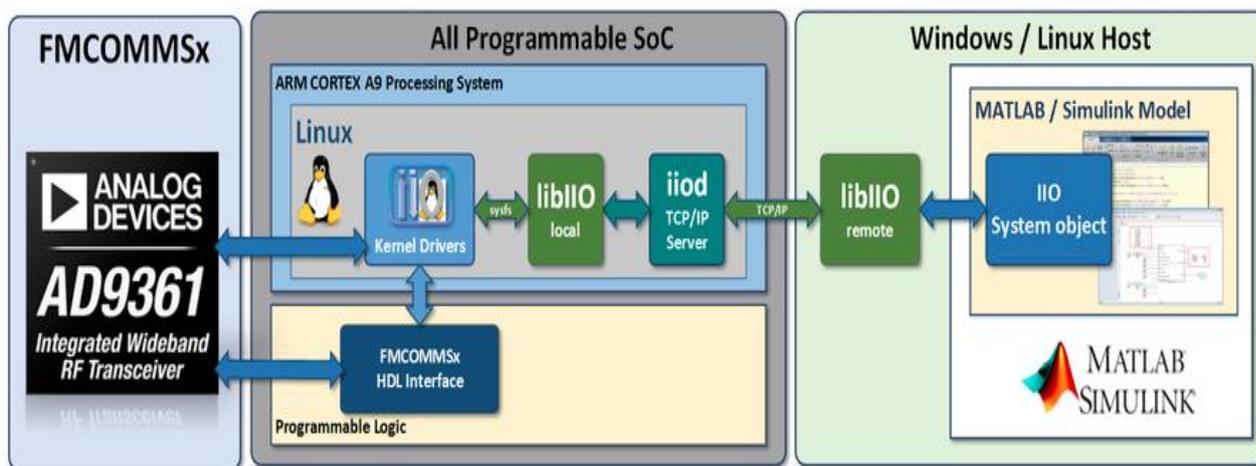


Рис. 6.3. Схема рівнів системи програмно-апаратного моделювання

Для роботи з середовища Matlab з програмно апаратної платформою створюється конфігураційний файл з розширенням .cfg і ім'ям, що збігається з ім'ям пристрою, встановленим в діалоговому вікні конфігурації блоку. Цей файл, містить набір полів, які визначають драйвери Linux для цільового пристрою і канали конфігурації, які будуть використовуватися блоком Simulink або скрипт Matlab.

На другому етапі, після того, як модель відпрацьована, генерується HDL код (IP Core) на мові VHDL (Verilog) за допомогою HDL Coder та C код за допомогою Embedded Coder, які входять до пакету Matlab/Simulink. На цьому етапі здійснюється відладка з використанням апаратної платформи для прототипування SDR, яка складається з модуля SDR радіотрансивера та SoC модуля. Відладка здійснюється в режимі симуляції Simulink «External». Перевіряється ефективність розроблених алгоритмів та моделей, здійснюються

всі необхідні налаштування, система вже є працюючою як під управлінням з боку Matlab/Simulink, так і автономно.

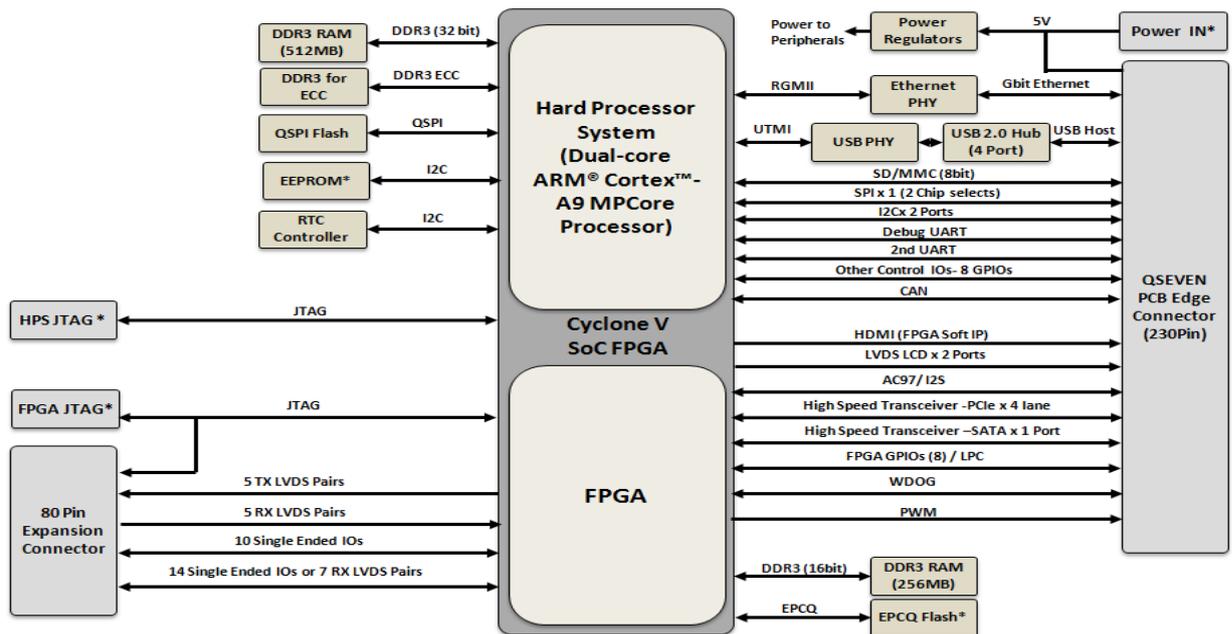


Рис. 6.4. Структура системи на кристалі SoC CycloneV

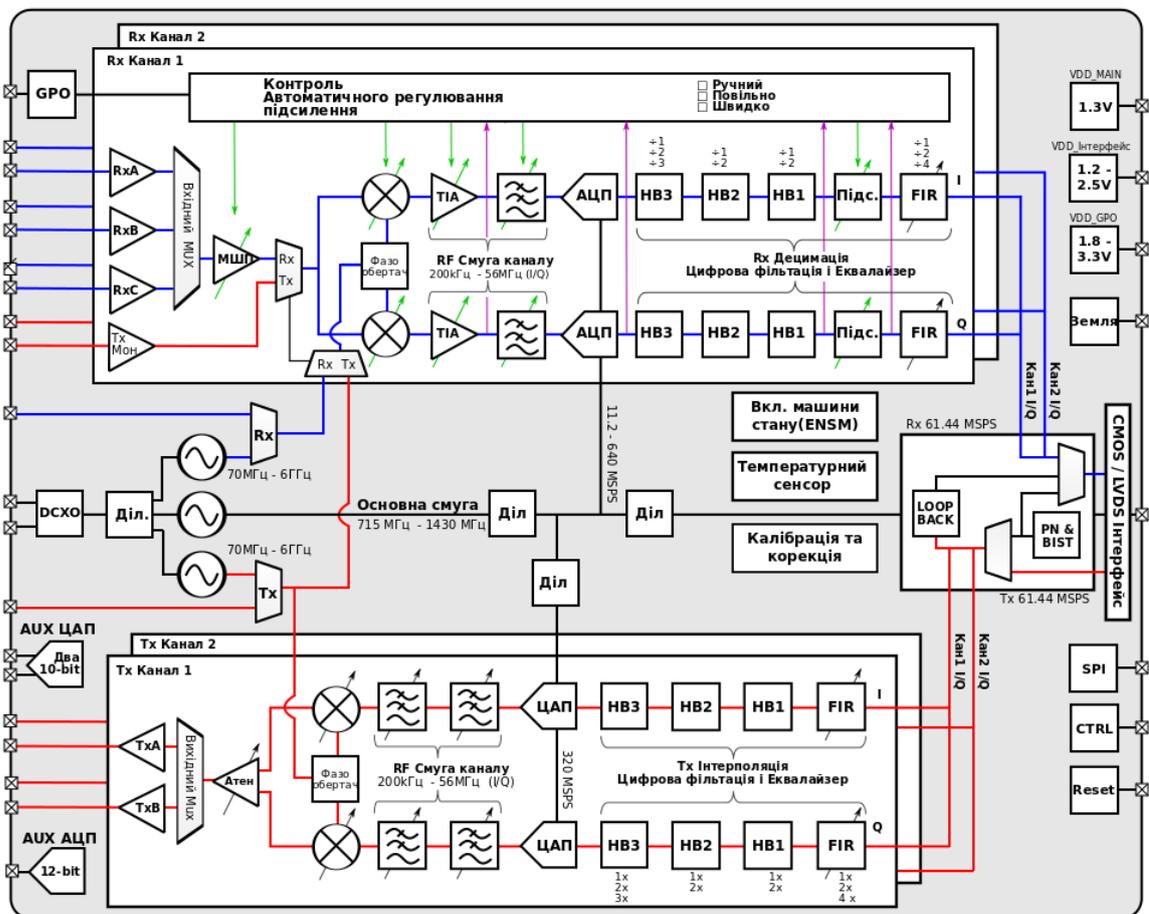


Рис. 6.5. Структура SDR трансивера AD9361

Останнім етапом є автоматична компіляція C-коду з використанням gcc linux компілятора та компілятора VHDL (Verilog), який входить до складу пакету Quartus (для SoC Altera).

Процес створення радіосистеми з використання модельно-орієнтованого проектування гарантує, що після того, як алгоритм системи SDR буде імплементований в кінцевий продукт, він буде повністю перевірений і випробуваний і забезпечить впевненість в надійності системи.

Процес створення радіосистеми був протестований та апробований [5, 6]. При цьому використовувались модулі SoCKit - the Development Kit for New SoC Device [8], в якому використовується SoC CycloneV фірми Altera, структура якого показана на рис. 6.4 та модулі SDR трансивера HSMC ARRadio на базі AD9361 фірми Analog Devices [9], структура якого показана на рис. 6.5.

#### 6.4. Організація взаємодії між HPS и FPGA SoC при створенні радіотелекомунікаційних пристроїв

В даний час розробка і застосування систем-на-кристалі (SoC) є одним з найбільш перспективних напрямків у розробці телекомунікаційних пристроїв і систем. У загальному випадку SoC є подальшим розвитком технології FPGA і являють собою інтегровані в одному кристалі апаратне процесорний ядро (ядра), блок програмованої логічної матриці FPGA, а також апаратно або програмно реалізовані модулі управління периферійними пристроями. Внутрішня шина даних з високою пропускною спроможністю понад 10 Гбіт/с, що з'єднує між собою процесорний ядро і логічну матрицю FPGA, дозволяє управляти периферійними модулями і в деяких випадках прискорити виконання алгоритмів, підвищуючи тим самим загальну продуктивність системи. Такий рівень інтеграції не тільки збільшує продуктивність, але і знижує потужність споживання, розміри і вартість кінцевого рішення.

В телекомунікаційних додатках, зокрема, в системах бездротового широкосмугового доступу, включаючи рішення SDR, використання технології HPS + FPGA дає можливість прискорити розробку кінцевих телекомунікаційних пристроїв, на виході якої можна отримати потужний пристрій здатний забезпечити більшість необхідних обчислень в режимі реального часу (завдяки можливості використання FPGA), який може легко інтегруватися в будь-яку систему в зв'язку з можливістю використовувати такі інтерфейси як Ethernet, I2C, SPI, CAN і інші, на високому рівні операційної системи.

Принципова особливість SoC - це наявність програмованих блоків. Тому SoC не просто інтегральна схема, а комплекс, до складу якого входять як апаратна частина (власне FPGA і периферійні пристрої), так і програмна, яка включає в себе вбудоване програмне забезпечення. Таким чином при проектуванні SoC необхідно виконати операції по спільній верифікації та налагодженні взаємодії програмної і апаратної частин. Додатковою перевагою застосування SoC

технології в SDR системах є те, що вона дозволяє проводити проектування каналу передачі даних на структурному рівні, при цьому низькорівневе проектування буде необхідне тільки для реалізації найбільш витратних з точки зору обчислювального ресурсу завдань.

При розробці SoC систем використовуються два основних підходи:

- створення пристрою без операційної системи (Bare Metal Application);
- використання операційної системи VxWorks / Linux.

Перший підхід дає можливість отримання системи з максимальним рівнем продуктивності, але реалізація його вкрай складна, так як передбачає повну розробку всіх необхідних для SDR пристроїв, інтерфейсів, і т.п. на низькому рівні.

Другий підхід полегшує завдання, так як на операційну систему лягає завдання управління периферійними пристроями, реалізації високорівневих протоколів обміну, таких як IP, TCP, UDP і навіть протоколів доступу до пристрою, наприклад FTP, NTP, Telnet, SSH та ін. Також використання операційної системи дозволяє створювати універсальні пристрої, які набагато простіше інтегрувати в існуючі системи, ніж при використанні Bare Metal Application.

Найбільш доцільним при створенні нових систем є використання операційної системи Linux для SoC пристроїв, так як вона має наступні переваги:

- широка апаратно-програмна підтримка розробника;
- величезна гнучкість в додатках готової системи;
- простота у використанні периферійних пристроїв;
- наявність розвиненої підтримки засобів розробки для вбудованих систем;
- на рівні ядра підтримка багатоядерних процесорів і процесорів ARM.

Існує три основні підходи до організації взаємодії HPS і FPGA в ОС Linux [10]:

1. Використання безпосереднього доступу до регістрів пам'яті FPGA.

Найпростіший спосіб обміну даних між FPGA і процесором в обхід операційної системи, який тим не менш дає можливість використовувати всі інші її можливості. Взаємодія з FPGA відбувається шляхом прямого запису / читання за адресами пам'яті, які їй надає операційна система. Не дозволяє використовувати додаткові можливості операційної системи і самої FPGA, такі як прямий доступ до пам'яті (DMA).

2. Використання призначеного для користувача інтерфейсу вводу/ виводу.

Інтерфейс вводу / виводу операційної системи Linux дозволяє створювати спрощену версію драйверів для обміну між FPGA і центральним процесором. При такому підході є можливість працювати по перериваннях в операційній системі, але відсутня можливість управління кешуванням, що не дає використовувати технологію прямого доступу до пам'яті.

3. Створення повноцінного драйвера пристрою Linux на функціональному рівні.

Комплексний підхід, який дозволяє використовувати всі можливості операційної системи і FPGA при роботі SoC з будь-периферією, в тому числі і

АЦП і ЦАП в SDR. Цей підхід також дозволяє використовувати один драйвер для однотипних пристроїв, що значно спрощує процес розробки готових систем.

Не залежно від використаного підходу по організації взаємодії HPS і FPGA, використання SoC пристроїв спільно з SDR дозволяє значно прискорити процес розробки безпроводових телекомунікаційних пристроїв і систем.

## Список літератури

1. Kaidenko M. M., Roskoshnyi D. V. Software Defined Radio in Communications. UKRMICO 2018. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 560. Springer, Cham, 2019 - P. 227-238.
2. Кайденко М.М, Роскошний Д.В. Архітектура програмно-визначуваних радіосистем для розробки радіообладнання // XII Міжнародна науково-технічна конференція "Проблеми телекомунікацій" ПТ-2018: Збірник матеріалів конференції. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. - с. 198-200
3. Software Communications Architecture Specification. FINAL / 15 May 2006 Version 2.2.2 - Режим доступу: [http://www.public.navy.mil/jtnc/SCA/SCAv2\\_2\\_2/SCA\\_version\\_2\\_2\\_2.pdf](http://www.public.navy.mil/jtnc/SCA/SCAv2_2_2/SCA_version_2_2_2.pdf)
4. Joint Tactical Radio Systems. - Режим доступу: <http://jtrs.army.mil>
5. S. Kravchuk, M. Kaidenko, "Modem equipment for the new generation compact troposcatter stations", Information and Telecommunication Sciences. – 2016. - No.1. - P. 5-12.
6. S. Kravchuk, M. Kaidenko, "Features of creation of modem equipment for the new generation compact troposcatter stations", 2016 International Conference Radio Electronics & Info Communications (UkrMiCo) IEEE Conference Publications Pages:1-4, DOI: 10.1109/UkrMiCo.2016.7739634.
7. Кайденко Н.Н., Кайденко В.Н. «Программно-аппаратное моделирование телекоммуникационных процессов и систем в MATLAB с использованием SDR и SOC технологий» // X Міжнародна науково-технічна конференція "Проблеми телекомунікацій" ПТ-2016: Збірник матеріалів конференції. К.: НТУУ "КПІ", 2016. - с. 250-253.
8. <http://www.terasic.com.tw/cgi-bin/page/archive.pl?Language=English&CategoryNo=167&No=816&PartNo=2>.
9. AD9361 RF Agile Transceiver - Режим доступу: <http://www.analog.com/en/products/rf-microwave/integrated-transceivers-transmitters-receivers/wideband-transceivers-ic/ad9361.html#product-overview>.
10. Кайденко В.М., Кайденко М.М., Крылач О.Ф., Роскошний Д.В. «Организация взаимодействия между HPS и FPGA на базе SoC технологий при создании телекоммуникационных устройств» // X Міжнародна науково-технічна конференція "Проблеми телекомунікацій" ПТ-2016: Збірник матеріалів конференції. К.: НТУУ "КПІ", 2016. - с. 254-256.



---

## ЗАСТОСУВАННЯ ПРОСТОРОВОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ ЗА ФОРМОЮ ФАЗОВОГО ФРОНТУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ХВИЛІ

Якорнов Є. А., Авдєєнко Г. Л.

---

### APPLICATION OF SPATIAL SIGNAL PROCESSING BY THE FORM OF THE ELECTROMAGNETIC WAVE PHASE FRONT

Yakornov Ye.A., Avdieienko H. L.

The main purpose of this section is to familiarize the reader with such trend of wireless communication systems development and improvement as spatial signal processing by the form of the electromagnetic wave phase front. The issue of the practical application of spatial processing is represented by investigations in improving the functional capabilities of phase direction-finders and phase system for determination of coordinates, first of all, the possibility of distance determining to radio source in the Fresnel zone. The features of spatial signal processing usage by the form of the electromagnetic wave phase front for the future development of radio relay communication lines which ensure reuse of radio frequency band are shown. The testbed description of the simplex radio relay communication line is presented. This testbed provides transmission of two digital radio signals at the rate of 41 Mbit/s in same frequency band due to spatial signal processing usage by the form of the electromagnetic wave phase front.

Основна мета розділу – ознайомлення з таким напрямком розвитку та удосконалення безпроводових телекомунікаційних систем (ТКС) як просторова обробка сигналів за формою фазового фронту електромагнітної хвилі (ЕМХ). Питання практичного застосування просторової обробки представлено напрацюваннями по удосконаленню функціональних можливостей фазових пеленгаторів та фазових систем визначення координат, в першу чергу можливості визначення дальності розташування джерела радіовипромінення (ДРВ) в зоні Френеля. Визначено особливості використання просторової обробки сигналів по формі фазового фронту в перспективних розробках радіорелейних ліній зв'язку (РРЛЗ) для забезпечення повторного використання їх радіочастотного ресурсу. Представлено лабораторний макет симплекної РРЛЗ, який забезпечує передачу двох цифрових радіосигналів зі швидкістю 41 Мбіт/с за рахунок використання просторової обробки сигналів за формою фазового фронту ЕМХ.

## 7.1 Загальні відомості про просторову обробку сигналів по формі фазового фронту електромагнітної хвилі

У сучасних радіотехнічних системах (наприклад, системах управління повітряним рухом, багатопозиційних системах радіолокації та фазової пеленгації, системах супутникового радіозв'язку тощо) просторова обробка сигналів є складовою частиною просторово-часової обробки сигналів.

Просторово-часова обробка сигналів (ПЧОС) – це сукупність дій над сигналами, що прийняті з різних точок простору антенними елементами або підсистемами, розташованими в одному або декількох пунктах, яка виконується з метою виділення корисної інформації у вигляді повідомлення або вимірювання одного чи декількох параметрів сигналів з метою визначення просторового положення ДРВ, швидкості та напрямку їх переміщення тощо. Основний зміст теорії ПЧОС – синтез оптимальних у тому чи іншому сенсі систем обробки сигналів й аналіз якості цих систем [1,2].

У більшості випадків для безпроводових ТКС виконується умова просторово-часової вузькосмуговості сигналів, тому ПЧОС можна розділити на два незалежні етапи – просторову обробку (селекцію) та часову обробку. Це в свою чергу дозволяє забезпечити можливість технічної побудови систем, що реалізують ПЧОС.

В умовах наявності зовнішніх завад, які за смугою радіочастот, поляризацією випромінювання співпадають із смугою частот та поляризацією випромінювання корисного сигналу, на етапі просторової обробки здійснюється таке вагове підсумовування вихідних напруг елементів антенної системи (АС), яке забезпечує оптимальний компроміс між просторовим накопиченням складових, породжених корисним сигналом, і взаємною компенсацією складових, породжених зовнішніми завадами, тобто компроміс між підсиленням АС в кутовому напрямі на ДРВ корисного сигналу та її послабленням ("провалами") в кутових напрямках на ДРВ завад. При цьому, чим більше інтенсивність зовнішніх завад в порівнянні з інтенсивністю внутрішніх шумів приймальної системи, тим більш глибокими виявляються провали в діаграмі спрямованості АС в кутових напрямках на ДРВ завад. Оптимальна часова обробка при цьому синтезується незалежно від просторової, тобто в припущенні, що конфігурація АС повністю задана.

Вживання адаптивної ПЧОС забезпечує високу ефективність придушення завад, просторове положення ДРВ яких відрізняється від розташування ДРВ корисного сигналу.

Головним недоліком ПЧОС є неможливість або низька ефективність придушення завад, що приходять з напрямів, близьких до напрямку приходу корисного сигналу, в особливості при їх потраплянні до головної пелюстки АС. У цьому випадку просторова обробка сигналів за кутовими координатами є неефективною і для виділення корисного сигналу на фоні завад необхідно використовувати відмінність по іншим ознакам корисного сигналу та завад.

Також ознакою може бути форма фазового фронту ЕМХ корисного сигналу та радіозавад на розкритті приймальної АС.

Як правило, розрізняють три основні види фазових фронтів ЕМХ: сферичний, циліндричний і плоский. Сферичний фазовий фронт ЕМХ зазвичай мають точкові ДРВ, циліндричний – лінійні ДРВ. ЕМХ, що створюються в однорідному ізотропному середовищі будь-якою системою випромінювання, на великій відстані від неї є сферичними. Таким чином, сферичними можна вважати, наприклад, ЕМХ біля поверхні Землі, що випромінюються антеною штучного супутника Землі або ЕМХ, що приймаються антеною радіорелейної станції №1 від антени кореспондуючої з нею радіорелейної станції №2 при умові, що відстань між цими станціями набагато перевищує лінійні розміри антен. У обох випадках передавальну антену можна вважати точковим випромінювачем, оскільки її лінійні розміри набагато менші за довжину траси, що з'єднує радіопередавальний та радіоприймальний пристрій.

При використанні апертурних антен (параболічні, рупорні, антенні решітки тощо), які формують спрямоване випромінювання на радіолініях зв'язку, в залежності від форми фазового фронту ЕМХ ДРВ прийнято розрізняти три хвильові зони поширення радіохвиль: ближня зона (БЗ), проміжна або зона Френеля, дальня зона (ДЗ) або зона дифракції Фраунгофера (рис. 7.1) [1].

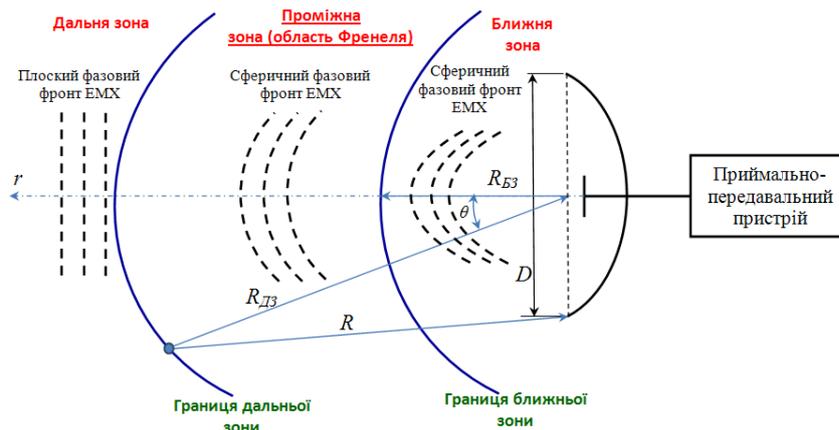


Рис. 7.1. Графічне пояснення до розмежування хвильових зон випромінювання

Прийнято вважати [1], що сигнал від ДРВ, що розташоване у ДЗ, створює на розкритті приймальної апертурної антени розподіл поля із плоским або близьким до плоского фазовим фронтом, а при розташуванні ДРВ в БЗ або зоні Френеля – зі сферичним хвильовим фронтом.

У свою чергу, границя ближньої та ДЗ визначається співвідношеннями [1, 3,6,7]

$$R_{БЗ} = 0.6\sqrt{\frac{D^3}{\lambda}}, \quad R_{ДЗ} = \frac{2\pi D^2 \cos^2 \theta}{\lambda} \quad (7.1)$$

де  $\lambda$  – довжина хвилі,  $D$  – лінійний розмір апертури антени (рис. 7.1),  $\theta$  – напрямок прийому (або випромінювання у випадку перевальної системи), що відраховується відносно вісі (фазового центру) антени.

Таким чином, якщо ДРВ корисного сигналу та ДРВ завад при співпадінні їх кутовим координат знаходяться у різних хвильових зонах приймальної антени (наприклад, ДРВ корисного сигналу у ДЗ, а ДРВ завади – у БЗ або навпаки) то

ЕМХ корисного сигналу на апертурі приймальної антени матиме плоский фазовий фронт а ЕМХ завади – сферичний чи близький до нього. Цю відмінність у формі фазових фронтів ЕМХ можна використати для виділення корисного сигналу та придушення завади, або навпаки виділення завади та придушення корисного сигналу шляхом використання просторової обробки сигналів по формі фазового фронту.

У загальному випадку, можна виділити три основні напрямки застосування просторової обробки сигналів в безпроводових ТКС по формі фазового фронту ЕМХ [3-7]:

1) просторова селекція корисного сигналу на фоні завад у випадку співпадіння кутових координат ДРВ корисного сигналу та завад при їх розташуванні у різних хвильових зонах;

2) визначення системою фазової пеленгації місцеположення (пеленгу та дальності) ДРВ корисного або завадового сигналу у випадку його розташування у зоні Френеля;

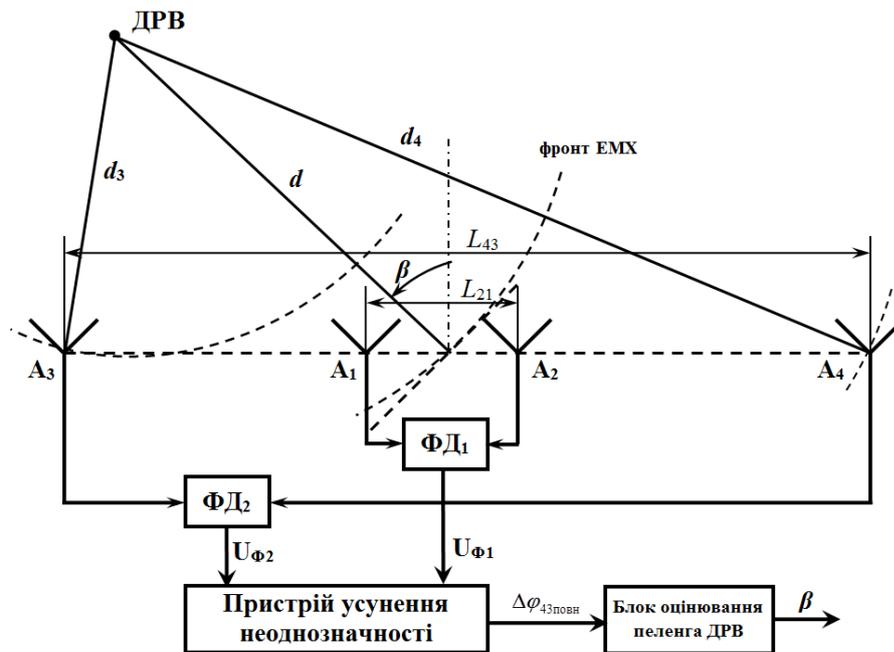
3) забезпечення повторного використання радіочастотного ресурсу в РРЛЗ, шляхом формування в одній й тій самій смузі радіочастот декількох незалежних просторових каналів передавання ЕМХ з різною формою фазового фронту, що забезпечує підвищення її пропускної здатності.

Перший напрямок використання просторової обробки сигналів по формі фазового фронту ЕМХ в теоретичному плані описаний у ряді джерел, наприклад, [1,2] і є не напрацюванням авторів цього розділу. Тому більш детально для практичного застосування розглянемо другий та третій напрямки використання просторової обробки сигналів по формі фазового фронту ЕМХ, які є власними науковими напрацюваннями авторів.

## 7.2. Застосування просторової обробки сигналів по формі фазового фронту в системах фазової пеленгації

Основним призначенням фазового пеленгатора є визначення пеленгу місцеположення ДРВ. Більшість розроблених на даний час фазових пеленгаторів визначають пеленг ДРВ по плоскому фронту ЕМХ від цього джерела, тобто у випадку, коли ДРВ знаходиться в ДЗ антенної решітки (АР) фазового пеленгатора. Найпростіший фазовий пеленгатор для визначення пеленгу  $\beta$  ДРВ по плоскому фазовому фронту ЕМХ як правило містить лінійну розріджену 2-х елементну АР (точна, але неоднозначна шкала вимірювання фазового зсуву  $L_{43}$ ), в середині якої розміщується 2-х елементна лінійна АР (груба, але однозначна шкала вимірювання фазового зсуву  $L_{21}$ ), як показано на рис. 7.2.

У роботі [4] доведено, що фазовий пеленгатор, зображений на рис. 7.2 також дозволяє визначити пеленг на ДРВ, ЕМХ від якого має довільну форму фазового фронту, включаючи й сферичний фазовий фронт.



**Рис. 7.2.** Структурна схема найпростішого фазового пеленгатора:  
 ФД – фазовий детектор

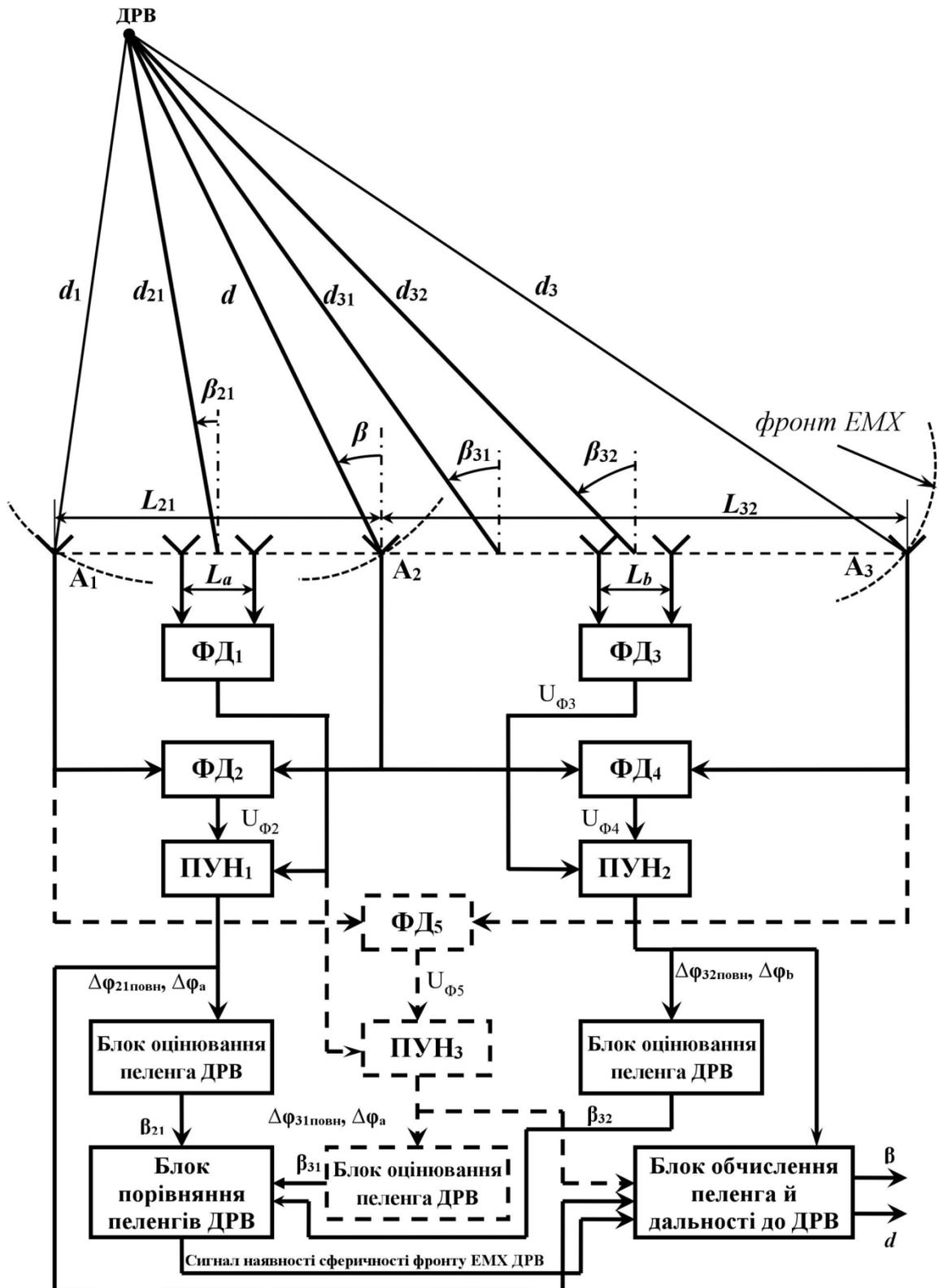
Разом з тим, застосування фазових пеленгаторів у надвисокочастотному діапазоні (НВЧ) може привести до ситуації, коли ДРВ буде попадати в зону Френеля АР пеленгатора, тобто перебувати від неї на відстані  $R$ , що задовольняє умові

$$R_{БЗ} < R < R_{ДЗ}, \quad (7.2)$$

Фазовий пеленгатор, зображений на рис.7.2 не дозволяє визначити дальність до ДРВ при його розташуванні у зоні Френеля, тому для вирішення цієї задачі необхідно збільшувати кількість елементів розрідженої АР до 3-х. При виконанні умови (7.2), всі відомі системи фазової пеленгації, що використовують 3-х елементну розріджену АР і працюють в припущенні наявності плоского фазового фронту ЕМХ неминуче будуть вносити значні погрішності у визначення значення пеленга ДРВ зі сферичним фазовим фронтом.

Разом з тим, у роботі [3] показано теоретичну можливість визначення дальності й пеленга ДРВ по формі сферичного фазового фронту ЕМХ у системах фазової пеленгації з використанням 3-х елементної розрідженої АР, однак по-перше, при цьому не враховувався механізм усунення неоднозначності виміру фазового зсуву між сусідніми елементами АР, а по-друге був відсутній механізм визначення виду фазового фронту ЕМХ, необхідний для переходу системи пеленгації в інший, у порівнянні з дальньою зоною, режим математичного обчислення пеленга. Тому розглянемо технічне рішення побудови фазового пеленгатора із використанням 3-х елементної розрідженої АР, який дозволяє визначати пеленг до ДРВ при його розташуванні в ДЗ а також визначати пеленг та дальність до ДРВ при його розташуванні в зоні Френеля АР пеленгатора (рис.7.3). Цей пеленгатор передбачає використання двох точних, але неоднозначних шкали вимірювання фази на базах  $L_{21}$  і  $L_{32}$  відповідно, а також

двох грубих, але однозначних шкал на базах  $L_a$  й  $L_b$ , розташованих усередині відповідних неоднозначних шкал причому  $L_a = L_b = 0.5\lambda$  [4].



**Рис. 7.3.** Фазовий пеленгатор на основі 3-х елементної розрідженої АР з використанням 2-х однозначних шкал вимірювання фази: ПУН – пристрій усунення неоднозначності; ФД – фазовий детектор

У випадку, коли на АР такого фазового пеленгатора падає плоский фронт ЕМХ від ДРВ, то згідно рис. 7.3 справедливі наступні співвідношення

$$\beta = \beta_{21} = \beta_{32} = \beta_{31}, \quad (7.3)$$

$$\Delta\varphi_{21\text{повн}} = \Delta\varphi_{32\text{повн}} \frac{L_{21}}{L_{32}} = \Delta\varphi_{31\text{повн}} \frac{L_{21}}{L_{31}}, \quad (7.4)$$

$$\Delta\varphi_{21\text{повн}} = \Delta\varphi_{21\text{вим}} + 2\pi k_{21}, \quad \Delta\varphi_{32\text{повн}} = \Delta\varphi_{32\text{вим}} + 2\pi k_{32}, \quad \Delta\varphi_{31\text{повн}} = \Delta\varphi_{31\text{вим}} + 2\pi k_{31}, \quad (7.5)$$

$$k_{21} = \left\langle \frac{1}{2\pi} \left( \frac{L_{21}}{L_a} \Delta\varphi_a - \Delta\varphi_{21\text{вим}} \right) \right\rangle, \quad k_{32} = \left\langle \frac{1}{2\pi} \left( \frac{L_{32}}{L_b} \Delta\varphi_b - \Delta\varphi_{32\text{вим}} \right) \right\rangle, \quad k_{31} = \left\langle \frac{1}{2\pi} \left( \frac{L_{31}}{L_a} \Delta\varphi_a - \Delta\varphi_{31\text{вим}} \right) \right\rangle, \quad (7.6)$$

де  $\Delta\varphi_{21\text{повн}}$ ,  $\Delta\varphi_{32\text{повн}}$ ,  $\Delta\varphi_{31\text{повн}}$  – повна різниця фаз ЕМХ відповідно між 2-ою та 1-ою, 3-ою та 2-ою, 3-ою та 1-ою антенами АР пеленгатора;  $\Delta\varphi_{21\text{вим}}$ ,  $\Delta\varphi_{32\text{вим}}$ ,  $\Delta\varphi_{31\text{вим}}$  – різниця фаз ЕМХ відповідно між 2-ою та 1-ою, 3-ою та 2-ою, 3-ою та 1-ою антенами АР пеленгатора, що визначається на основі сигналів фазових детекторів (ФД) ФД<sub>2</sub>, ФД<sub>4</sub>, ФД<sub>5</sub>;  $k_{21}$ ,  $k_{32}$ ,  $k_{31}$  – коефіцієнти, що враховують число повних періодів, втрачених при вимірюваннях різності фаз по відповідних базах фазового пеленгатора;  $\langle \cdot \rangle$  – операція округлення до найближчого цілого числа;  $\Delta\varphi_a$ ,  $\Delta\varphi_b$  – фазові зсуви, що визначаються по відповідних однозначних шкалах  $L_a$  та  $L_b$ .

На рис.7.3 штриховою лінією показані елементи схеми вимірювання пеленга  $\beta_{31}$  на базі  $L_{31} = L_{21} + L_{32}$ , які можуть і не використовуватися, якщо інформації, отриманої при вимірюваннях різності фаз по базах  $L_{21}$  і  $L_{32}$  буде достатньо. Спрощена типова схема пристрою усунення неоднозначності вимірювання фазового зсуву  $\Delta\varphi_{21\text{повн}}$  на прикладі ПУН<sub>1</sub> представлена на рис. 7.4.

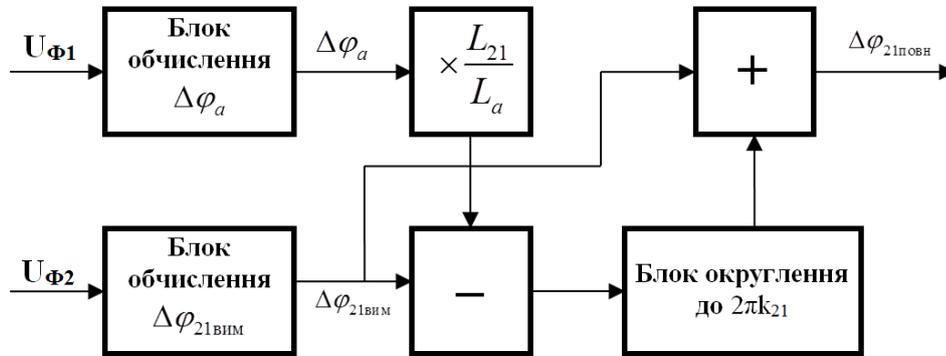


Рис. 7.4. Схема пристрою усунення неоднозначності вимірювання фазового зсуву  $\Delta\varphi_{21\text{повн}}$

Таким чином, якщо не виконується яка-небудь із рівностей (7.3) або (7.4) то можна вважати, що фазовий фронт ЕМХ від ДРВ на розкритті АР фазового пеленгатора є сферичним. Тоді як для плоского, так і для сферичного фронту ЕМХ можна записати, що [4]

$$\beta_{21} = \arcsin\left(\frac{\lambda}{2\pi L_{21}} \Delta\varphi_{21\text{повн}}\right), \quad \beta_{32} = \arcsin\left(\frac{\lambda}{2\pi L_{32}} \Delta\varphi_{32\text{повн}}\right), \quad \beta_{31} = \arcsin\left(\frac{\lambda}{2\pi L_{31}} \Delta\varphi_{31\text{повн}}\right). \quad (7.7)$$

При наявності на розкритті АР фазового пеленгатора сферичного фронту ЕМХ за умови, що ДРВ знаходиться в зоні Френеля і дальність його розташування більше лінійних розмірів АР пеленгатора, тобто  $L_{31}/d \ll 1$  справедливі наступні наближення

$$d_1 \approx d - L_{12} \sin \beta + \frac{L_{12}^2 \cos^2 \beta}{2d}, \quad d_3 \approx d + L_{32} \sin \beta + \frac{L_{32}^2 \cos^2 \beta}{2d}. \quad (7.8)$$

Тоді, повну різницю фаз  $\Delta\varphi_{21\text{повн}}$ ,  $\Delta\varphi_{32\text{повн}}$  можна подати у вигляді

$$\Delta\varphi_{21\text{повн}} = \frac{2\pi(d-d_1)}{\lambda} = \frac{2\pi}{\lambda} \left( L_{12} \sin \beta - \frac{L_{12}^2 \cos^2 \beta}{2d} \right), \quad \Delta\varphi_{32\text{повн}} = \frac{2\pi(d_3-d)}{\lambda} = \frac{2\pi}{\lambda} \left( L_{32} \sin \beta + \frac{L_{32}^2 \cos^2 \beta}{2d} \right), \quad (7.9)$$

Вирішив спільно рівняння (7.9), отримаємо що шуканий пеленг  $\beta$  і дальність  $d$  до ДРВ, обумовлені сферичністю фазового фронту ЕМХ, дорівнюватимуть

$$\beta = \arcsin \left[ \frac{\lambda L_{21} (\Delta\varphi_{21\text{повн}} + \Delta\varphi_{32\text{повн}})}{2\pi (L_{21} + L_{32}) L_{32}} \right], \quad (7.10)$$

$$d = \frac{L_{21}^2 \left[ 4\pi^2 (L_{21}^2 + L_{32}^2) L_{32}^2 - \lambda^2 L_{21}^2 (\Delta\varphi_{21\text{повн}} + \Delta\varphi_{32\text{повн}})^2 \right]}{4\pi\lambda (L_{21} + L_{32}) L_{32} \left[ L_{21}^2 \Delta\varphi_{32\text{повн}} + \Delta\varphi_{21\text{повн}} (L_{21}^2 - L_{32}^2 - L_{21} L_{32}) \right]}. \quad (7.11)$$

Основним істотним недоліком схеми фазового пеленгатора, що зображено на рис. 7.3, є необхідність застосування 2-х однозначних шкал вимірювання пеленга, що еквівалентно додатковому використанню 4-х слабоспрямованих антен. Крім того, через кінцеві габаритні розміри слабоспрямованих антен на НВЧ, що перевищують  $0,5\lambda$  може мати місце ситуація, коли неможливо буде їх розмістити на відстані  $L = 0,5\lambda$ .

Виходом з цієї ситуації може бути використання схеми фазового пеленгатора з 3-х елементною АР, в якому формування однозначних шкал вимірювання пеленгу здійснюється за рахунок використання схем ділення частоти (рис. 7.5).

Варто відзначити, що застосування схем ділення частоти можливо тільки у випадку випромінювання ДРВ гармонічного сигналу. При цьому для формування однозначних, але грубих шкал вимірювання фаз у фазових детекторах ФД<sub>1</sub> і ФД<sub>3</sub> коефіцієнти ділення частот повинні задовольняти рівностям

$$n_{21} = \frac{2L_{21}}{\lambda}, \quad n_{32} = \frac{2L_{32}}{\lambda}. \quad (7.12)$$

Основний недолік наведеної конструкції пеленгатора (рис. 7.5) – значне його ускладнення за рахунок введення схем ділення частоти.

Таким чином, при пеленгації ДРВ в зоні Френеля за кривизною фронту з використанням фазового пеленгатора, що складається з 3-х елементної розрідженої АР, необхідно послідовно виконати дві операції: 1) визначити факт наявності сферичності фронту ЕМХ; 2) перевести фазовий пеленгатор з режиму оцінки пеленга для плоского фазового фронту в режим оцінки пеленга за сферичністю фронту ЕМХ з обов'язковим усуненням неоднозначності визначення фазових зсувів, як було показано вище.

Якщо до АС фазового пеленгатора, зображеного на рис. 7.3 або рис. 7.5 додати ще одну лінійну АР, яка буде ортогональна першій, по загальна АР стає плоскою, що дає можливість вимірювати не тільки пеленг  $\beta$ , але й кут місця  $\alpha$ . Такий фазовий пеленгатор називають фазовою системою визначення координат (ФСВК). Розглянемо відповідно до [5] спрощену схему розташування плоскої АР

(рис. 7.6), яка для усунення неоднозначності фазових зсувів може бути доповнена однозначними базами, що розташовані у складі баз  $b_1, b_2, b_3$ .

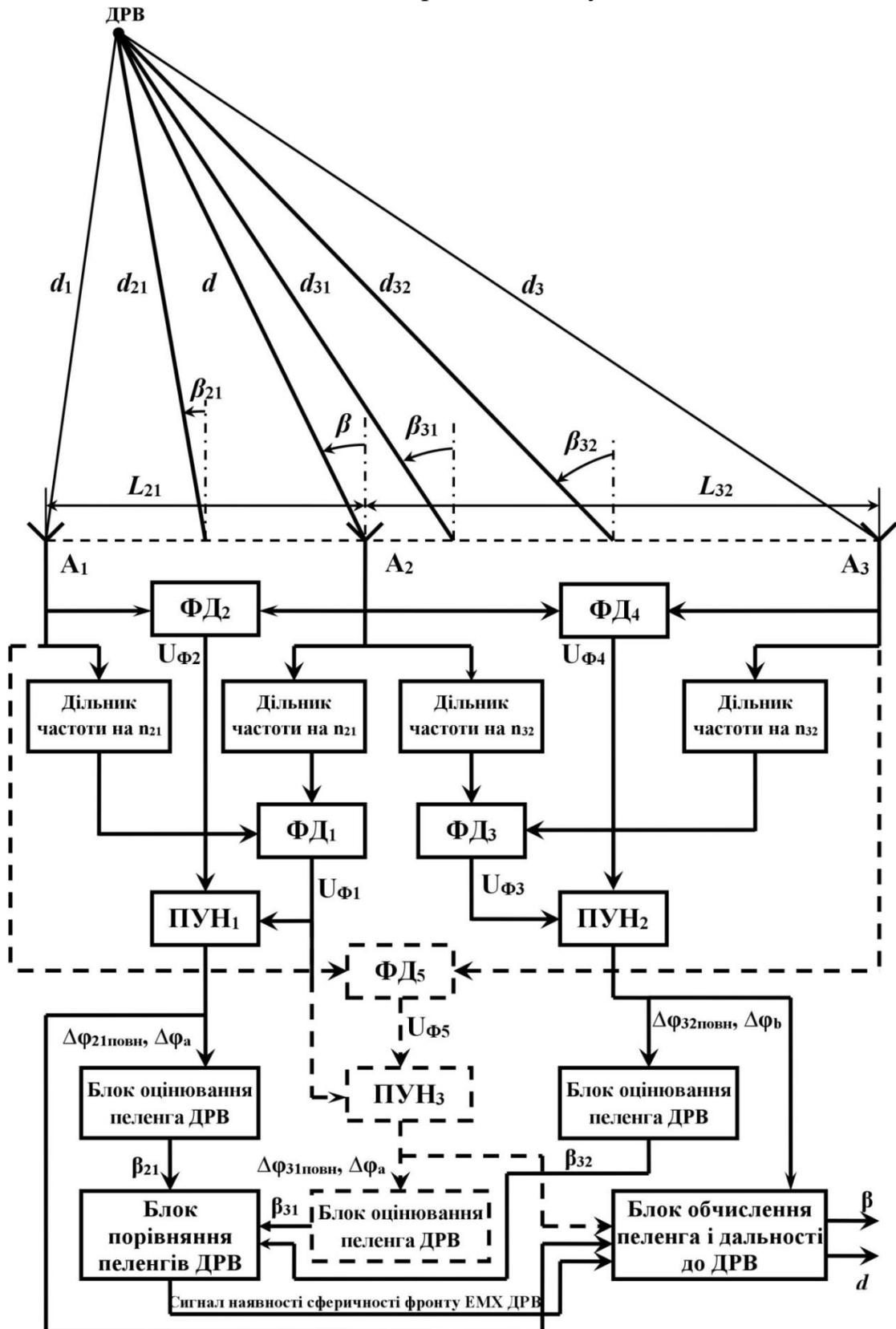


Рис. 7.5. Фазовий пеленгатор за кривизною фронту ЕМХ від ДРВ в зоні Френеля на основі сумісного використання 3-х елементної розрідженої АР та схем ділення частоти

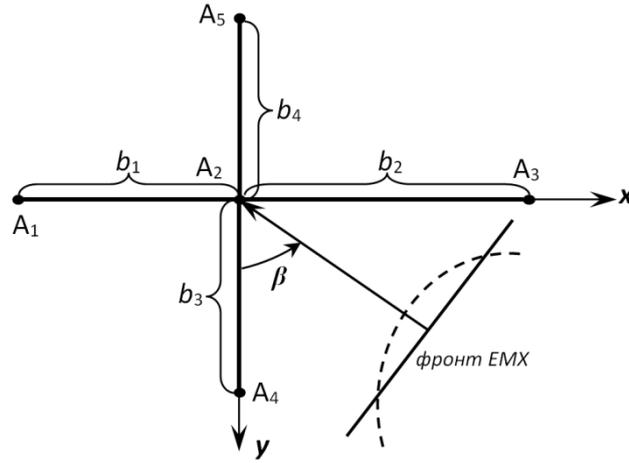


Рис. 7.6. Схема розташування антен у плоскій АР ФСВК

У випадку, коли фазовий фронт ЕМХ від ДРВ на розкриві АР ФСВК є плоским, пеленг та кут місця ДРВ розраховуються за наступними співвідношеннями

$$\beta = \arctg \left[ \frac{2b_3 \arctg(F(\beta, \alpha))}{(b_1 - b_2) \Delta \varphi_{42\text{повн}}} \right], \quad \alpha = \arccos \sqrt{\left( \frac{\lambda \arctg(F(\beta, \alpha))}{\pi(b_1 - b_2)} \right)^2 + \left( \frac{\lambda \Delta \varphi_{42\text{повн}}}{2\pi b_3} \right)^2}, \quad (7.13)$$

де  $F(\beta, \alpha) = \tg \left[ \frac{\pi(b_1 - b_2)}{\lambda} \cos \alpha \sin \beta \right]$  – пеленгаційна характеристика для плоского фазового фронту ЕМХ;  $\Delta \varphi_{42\text{повн}} = \Delta \varphi_{42\text{вим}} + 2\pi k_{42}$  – повний фазовий зсув між антенами А4 та А2 плоскої АР,  $\Delta \varphi_{42\text{вим}}$  – вимірений фазовий зсув між антенами А4 та А2 плоскої АР,  $k_{42}$  – ціла кількість періодів, що втрачається при вимірюванні за допомогою фазового детектору.

При наявності сферичності фазового фронту ЕМХ кутові координати розраховуються за наступними формулами

$$\beta = \arctg \left[ \frac{(b_3 b_4^2 + b_3^2 b_4)(b_2^2 \Delta \varphi_{21\text{повн}} + b_1^2 \Delta \varphi_{32\text{повн}})}{(b_1 b_2^2 + b_1^2 b_2)(b_3^2 \Delta \varphi_{52\text{повн}} + b_4^2 \Delta \varphi_{42\text{повн}})} \right], \quad (7.14)$$

$$\alpha = \arccos \sqrt{\left( \frac{\lambda (b_2^2 \Delta \varphi_{21\text{повн}} + b_1^2 \Delta \varphi_{32\text{повн}})}{2\pi (b_1 b_2^2 + b_1^2 b_2)} \right)^2 + \left( \frac{\lambda (b_3^2 \Delta \varphi_{52\text{повн}} + b_4^2 \Delta \varphi_{42\text{повн}})}{2\pi (b_3 b_4^2 + b_3^2 b_4)} \right)^2}, \quad (7.15)$$

де  $\Delta \varphi_{52\text{повн}} = \Delta \varphi_{52\text{вим}} + 2\pi k_{52}$  – повний фазовий зсув між антенами А5 та А2 плоскої АР,  $\Delta \varphi_{52\text{вим}}$  – вимірений фазовий зсув між антенами А5 та А2 плоскої АР,  $k_{52}$  – ціла кількість періодів, що втрачається при вимірюванні за допомогою фазового детектору.

Дальність до ДРВ за наявності сферичності фазового фронту ЕМХ можна розрахувати за допомогою наступного приблизного співвідношення

$$d \approx \frac{\pi b_4^2 (1 - \cos^2 \alpha \sin^2 \beta)}{\lambda \Delta \varphi_{42\text{повн}} - 2\pi b_4 \cos \alpha \sin \beta}. \quad (7.16)$$

Отже, при визначенні кутових координат ДРВ, розташованого в зоні Френеля по сферичному фазовому фронту ЕМХ на основі плоскої АР ФСВК необхідно

послідовно виконати дві операції: 1) визначити факт наявності сферичності фронту ЕМХ; 2) перевести ФСВК з режиму оцінювання пеленгу та кута місця для плоского фазового фронту ЕМХ в режим оцінки пеленга та кута місця, а також у випадку необхідності і дальності до ДРВ по сферичному фазовому фронту його ЕМХ.

### 7.3. Застосування просторової обробки сигналів у радіорелейному зв'язку

На даний момент основною тенденцією розвитку безпроводових ТКС є розширення обсягу і поліпшення якості надання користувачам різних інфокомунікаційних послуг (телефонія, доступ до мережі Інтернет, передача мультимедійної інформації в реальному масштабі часу і т.п.). Однак, впровадження таких сервісів реалізується в основному завдяки технічній можливості збільшення швидкості передачі інформації абонентським каналом у виділених для конкретної безпроводової системи смугах радіочастот. Тому задача по забезпеченню раціонального використання телекомунікаційними операторами радіочастотного ресурсу (РЧР) в умовах його обмеженості і конкурентної боротьби за нього між різними радіотехнологіями не втрачає своєї актуальності і донині.

Відноситься зазначена задача і до РРЛЗ, які добре себе зарекомендували при побудові безпроводових сегментів телекомунікаційних мереж різних операторів на магістральному, внутрішньозоновому і місцевому рівнях, а також при розгортанні радіоліній між базовими станціями систем стільникового рухомого радіозв'язку.

Вищезгадане говорить про доцільність подальшого пошуку способів раціонального використання РЧР для РРЛЗ шляхом поліпшення існуючих методів селекції радіосигналів (просторової, поляризаційної, частотної, часової, кодової і т.д), за якими на практиці на приймальній стороні можна буде здійснити розділення один від одного радіосигналів різних абонентів, що одночасно використовують один і той же РЧР, з мінімальними спотвореннями цих сигналів та їх взаємним впливом один на одного. При цьому вкрай бажано, щоб при практичній реалізації ці способи вимагали б мінімальних витрат на зміну існуючих апаратно-технічних рішень діючих та майбутніх РРЛЗ.

На думку авторів цього розділу, одним з перспективних способів, який може бути використаний для вирішення задачі повторного використання РЧР РРЛЗ, що в свою чергу дозволить збільшити її пропускну здатність, є просторова обробка сигналів по формі фазового фронту ЕМХ.

Враховуючи на даний час актуальність вирішення задачі нестачі РЧР в діапазонах частот нижче 40 ГГц для РРЛЗ, в роботах [6-8] теоретично розглянуто питання дослідження можливості застосування просторової обробки сигналів по формі фронту ЕМХ для забезпечення повторного використання радіочастотного ресурсу на РРЛЗ.

Загальна ідея, яка пояснює застосування просторової обробки сигналів по формі фазового фронту для РРЛЗ представлена у [9-10] і полягає в наступному: за допомогою діаграмоутворюючих схем (ДУС) передавального тракту радіорелейної станції (РРС) із радіосигналів різних джерел інформації штучно створюються ЕМХ, які випромінюються АР цієї станції в напрямку іншої РРС на одній й тій самій частоті, в одній і тій самій смузі радіочастот, але з різними формами фронтів ЕМХ, з подальшою просторовою селекцією вказаних ЕМХ одна від одної за формами їх фазових фронтів в АР та ДУС приймального тракту кореспондуючої РРС.

Розглянемо узагальнену структурну схему (рис. 7.7), яка пояснює ідею застосування просторової обробки радіосигналів формі фронту ЕМХ для симплексної РРЛЗ [9,10].

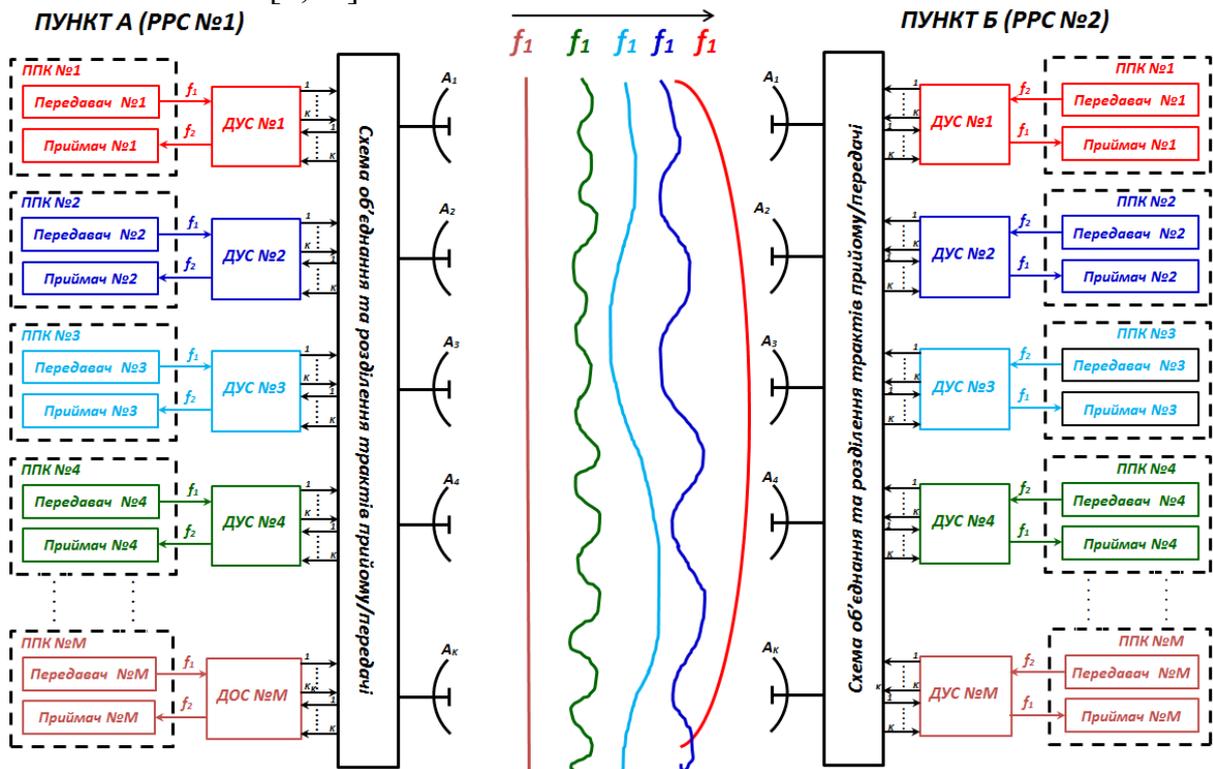


Рис 7.7. Структурна схема одноінтервальної ЦРРЛЗ з використанням просторової селекції сигналів, де ППК – приймальнопередавальний комплект

Припустимо, що передача ЕМХ йде від РРС №1 в напрямку РРС № 2. Сигнал від  $i$ -го передавача РРС № 1 надходить на вхід дільника потужності  $i$ -ї ДУС, де відбувається його поділ на  $M$  однакових сигналів. З виходів дільника потужності сигнали потрапляють на входи відповідних каналів  $i$ -ї ДУС, де відбувається їх перемноження на комплексні вагові коефіцієнти (з урахуванням амплітуди та фази). З виходів  $i$ -ї ДУС (рис. 7.8, а) сигнали надходять на відповідні суматори схеми розділення та об'єднання трактів передачі/прийому, де вони сумуються із сигналами інших передавачів. Далі сумарний сигнал потрапляє на смуговий фільтр, і потім на вихід  $l$ -го елемента АР РРС №1 (рис. 7.9). В результаті, в передавальній частині за допомогою відповідних ДУС здійснюється формування ЕМХ  $M$  різних передавачів, які випромінюють радіосигнали в одній смузі частот та з одним видом поляризації. У цьому випадку відмінною ознакою цих

радіосигналів на розкритті АР приймальної сторони є різні форми фазового фронту ЕМХ. Наприклад, ЕМХ першого передавача РРС №1 має на розкритті АР ЦРРС № 2 плоский фронт, ЕМХ 2-го передавача РРС №1 – зі сферичним чи близький до сферичного, а ЕМХ від М-ого передавача – фронт синусоїдального чи параболічного виду. На приймальній стороні у відповідних ДУС (рис. 7.8, а) шляхом зміни амплітуд та фаз здійснюється просторова селекція сигналів різних передавачів один від одного по формі фазового фронту.

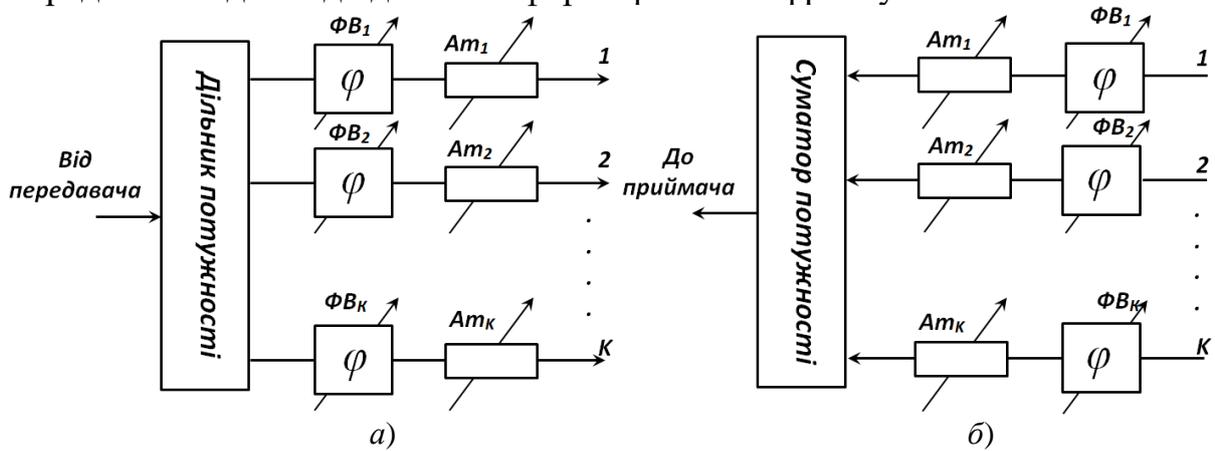


Рис.7.8 Структурні схеми ДУС: а) передавальний тракт; б) приймальний тракт

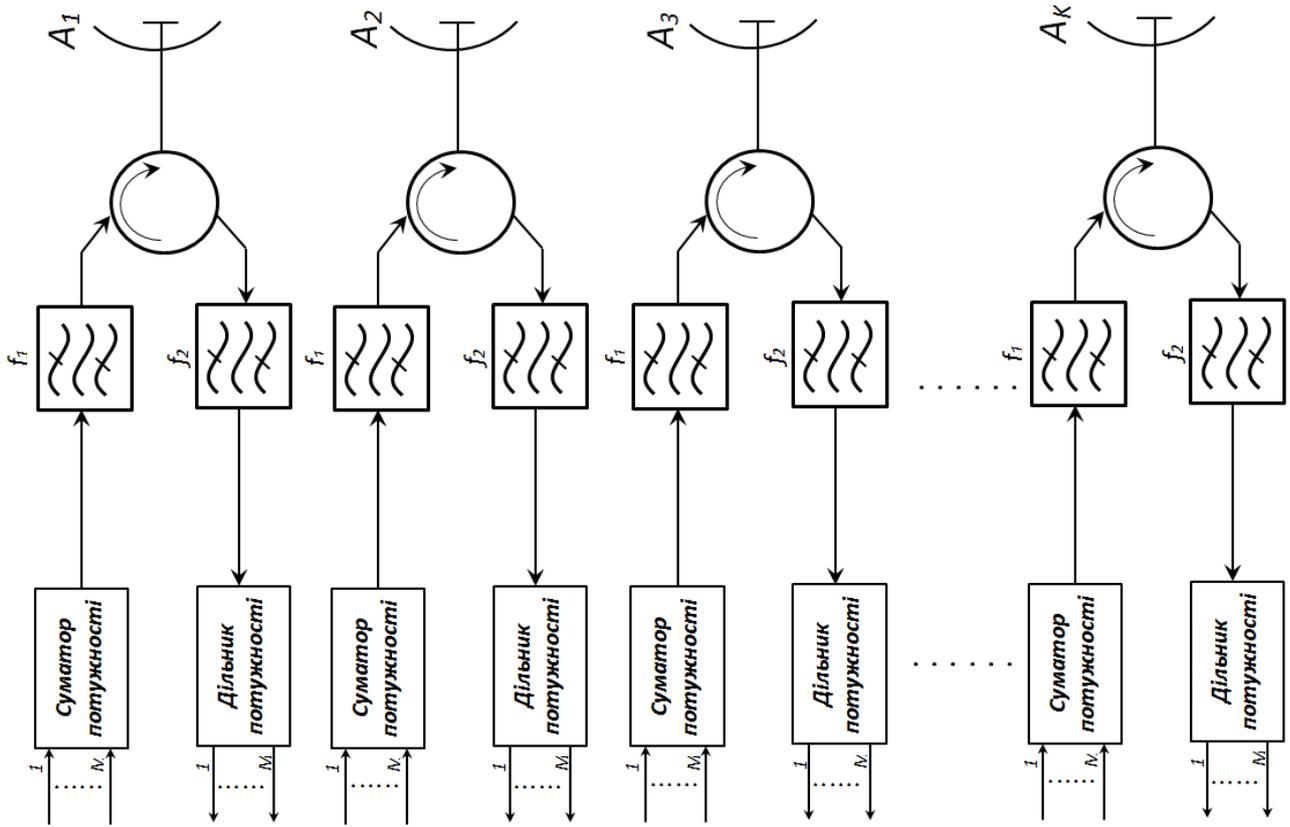
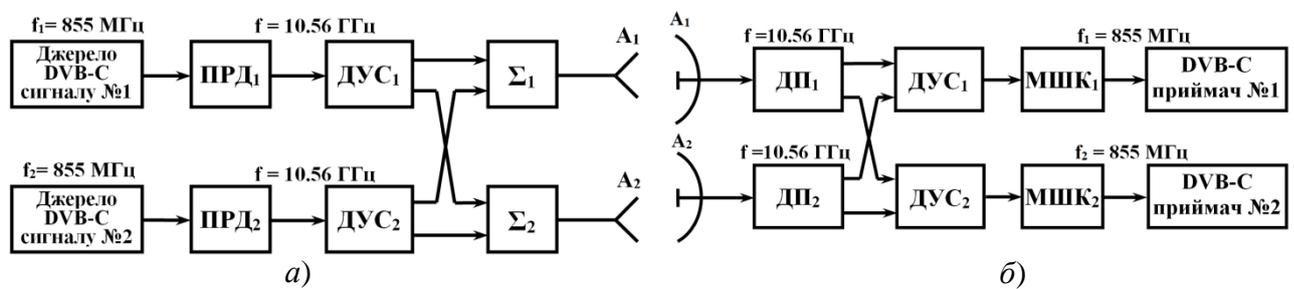


Рис.7.9 Схема об'єднання та роз'єднання трактів передачі/прийому для РРС з просторовою обробкою в передавальному та приймальному трактах

Як результат зрозуміло, що ключовими елементами що виконують просторову обробку є ДУС, які являються формувачами ЕМХ з різними фазовими фронтами в передавальній частині РРС №1 (№2) та просторовими

фільтрами ЕМХ по формі фазового фронту в приймальній частині РРС №2 (№1). Головною характеристикою ДУС є деякий набір комплексних вагових коефіцієнтів  $w_i = w_i \cdot e^{j\phi_i}$ , які відображають налаштування її фазообертачів та атенуаторів (при аналоговій реалізації ДУС). Відповідно набір вагових коефіцієнтів в ДУС і для передавальної, і для приймальної сторін, має бути таким, що забезпечує найкраще розділення радіосигналів різних передавачів РРС №1 (№2) один від одного в приймальному тракті РРС №2 (№1). При цьому під ефективністю просторової селекції розуміється здатність окремо взятого ДУС приймального тракту РРС №2 (№1) максимально придушувати радіосигнали передавачів від РРС №1 (№2) з одними формами фазового фронту ЕМХ і відокремлювати (селектувати) при цьому з найменшим його загасанням радіосигнал з необхідною формою фазового фронту ЕМХ.

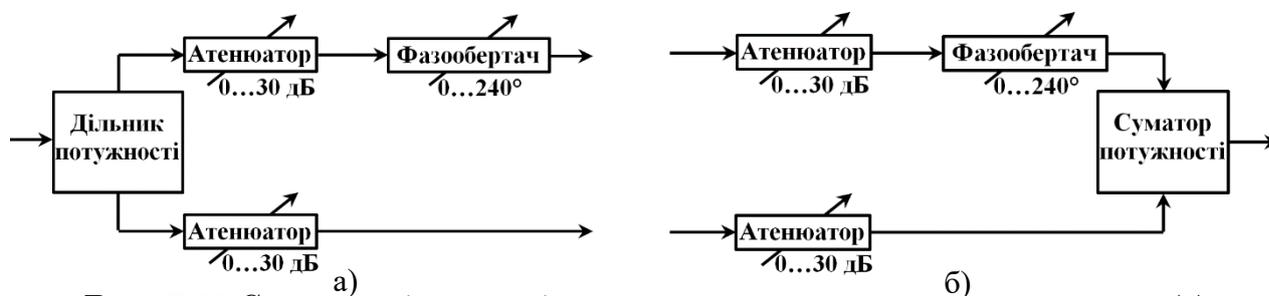
На рис.7.10 показано структурну схему передавальної та приймальної РРС лабораторного макету симплексної РРЛЗ з просторовою обробкою двох сигналів за формою фазового фронту, яка побудована на основі схеми рис. 7.7.



**Рис.7.10.** Структурні схеми передавальної (а) та приймальної (б) РРС лабораторного макету симплексної РРЛЗ з просторовою обробкою сигналів за формою фазового фронту

У відповідності до рис. 7.10, а передавальна РРС складається з двох джерел DVB-C сигналу, двох ДУС, двох суматорів ( $\Sigma_1$  та  $\Sigma_2$ ) та лінійної антенної решітки з рупорних антен  $A_1$  та  $A_2$ . Першим джерелом DVB-C сигналу є трансмодулятор OV75, який налаштований на прийом від супутника Astra 4A сигналу стандарту DVB-S з параметрами: несна частота  $f = 11.766$  ГГц, символна швидкість  $V = 27,5$  Мсимв/с, модуляція QPSK, швидкість кодування FEC = 3/4, ширина частотного спектру 36 МГц, горизонтальна поляризація. Трансмодулятор OV75 перетворює сигнал DVB-S у сигнал DVB-C, що має параметри: несна частота  $f = 855$  МГц, модуляція 64-QAM, символна швидкість  $V = 6.875$  Мсимв/с (бітова швидкість 41,25 Мбіт/с), ширина частотного спектру 8 МГц. Друге джерело DVB-C сигналу складається з професійного супутникового ресивера IRD-2600 CODICO Scorpus та модулятора Radyne Comstream QAM-256. Ресивер IRD-2600 налаштований на прийом сигналу стандарту DVB-S від супутника Astra 4A з параметрами: несна частота  $f = 12,073$  ГГц, символна швидкість  $V = 27,5$  Мсимв/с, модуляція QPSK, швидкість кодування FEC = 3/4, ширина частотного спектру 36 МГц, горизонтальна поляризація. Модулятор Comstream перетворює транспортний потік MPEG з виходу приймача IRD-2600 у DVB-C сигнал з параметрами: несна частота  $f = 855$

МГц, модуляція 64-QAM, символна швидкість  $V = 6,875$  Мсимв/с (бітова швидкість 41,25 Мбіт/с), ширина частотного спектру 8 МГц. Передавач (ПРД<sub>1</sub>, ПРД<sub>2</sub>) складається з частотного конвертору, смугового фільтру та двокаскадного транзисторного підсилювача. Вихідна частота та потужність передавача відповідно дорівнюють 10,56 ГГц та 0,06...0,1 мВт. Діаграмоутворюючі схеми (ДУС<sub>1</sub>, ДУС<sub>2</sub>) передавальної та приймальної РРС є хвилеводними вузлами, що складаються з послідовно з'єднаних дільника (суматора) потужності на базі квадратурного щілинного моста або подвійного хвилеводного трійника, хвилеводного змінного атенюатора та хвилеводного змінного фазообертача, які відповідно призначені для формування на одній тій самій частоті, поляризації, в одній й тій самій смузі радіочастот двох ЕМХ з різною формою фазового фронту на виході АР передавальної РРС та просторової селекції одна від одної цих ЕМХ по формі фазового фронту у приймальній РРС шляхом зміни амплітуди та фази ЕМХ (рис. 7.11).

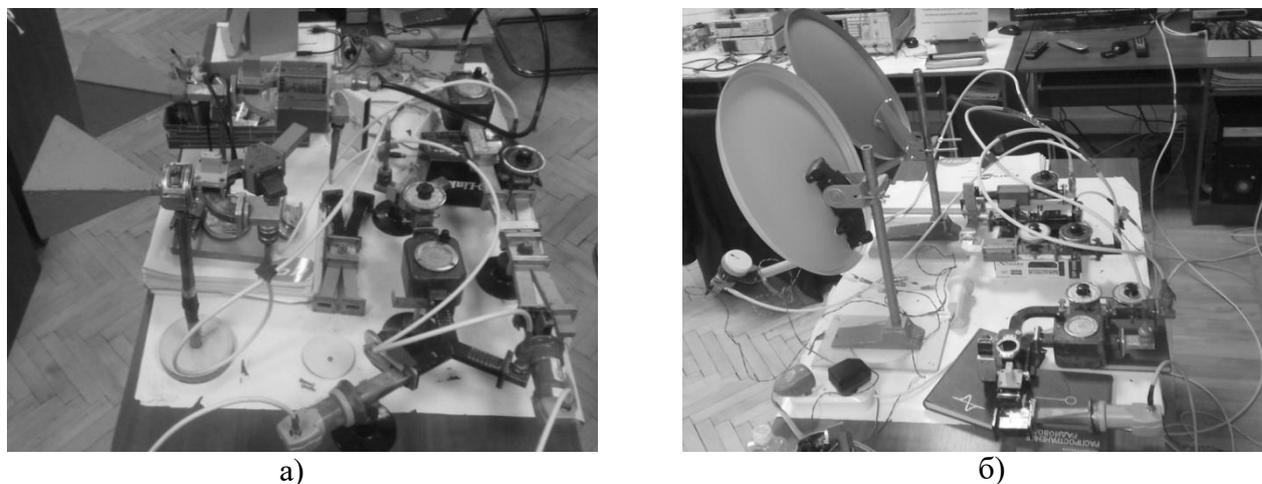


**Рис. 7.11** Структурні схеми діаграмоутворюючих схем передавальної (а) та приймальної (б) РРС

У передавальних РРС надвисокочастотні ЕМХ від ДУС надходять на входи суматорів  $\Sigma_1$ ,  $\Sigma_2$  і далі з їх виходів потрапляють на входи рупорних антен  $A_1$ ,  $A_2$  з апертурою  $15 \times 10$  см<sup>2</sup> з коефіцієнтом підсилення 21 дБі на частоті 11 ГГц. Рупорні антени випромінюють вертикально поляризовані ЕМХ, що відповідають двом джерелам DVB-C сигналів у напрямку приймальної РРС.

Приймальна РРС відповідно до рис. 7.10, б складається з двохелементної прямолінійної АР, до складу якої входять дві офсетні дзеркальні параболічні антени  $A_1$  та  $A_2$ , дільники потужності (ДП<sub>1</sub>, ДП<sub>2</sub>) у вигляді коаксіального трійника, діаграмоутворюючі схеми (ДУС<sub>1</sub>, ДУС<sub>2</sub>), малошумливі конвертори (МШК<sub>1</sub>, МШК<sub>2</sub>) та два приймача DVB-C сигналів, які підключаються до телевізійних приймачів. Дзеркальні антени мають діаметр 35 м, що відповідає коефіцієнту підсилення 33 дБі на частоті 11 ГГц. Кожен з виходів підключений до відповідної ДУС. Діаграмоутворююча схема ДУС<sub>1</sub> призначена для відокремлення ЕМХ першого сигналу DVB-C від ЕМХ другого сигналу DVB-C з тією самою частотою, поляризацією за рахунок відмінності у формі фазових фронтів цих ЕМХ, а діаграмоутворююча схема ДУС<sub>2</sub> навпаки для відокремлення ЕМХ другого сигналу DVB-C та придушення ЕМХ першого сигналу DVB-C також за рахунок відмінності у формі фазових фронтів цих ЕМХ. Після просторової селекції у ДУС<sub>1</sub> та ДУС<sub>2</sub> ЕМХ надходять у МШК<sub>1</sub> та МШК<sub>2</sub>, де вони фільтруються, підсилюються та перетворюються з частоти 10,56 ГГц у

DVB-C сигнали проміжної частоти 855 МГц, поступаючи далі у DVB-C ресивери Homecast та Каон, в яких вони демодуються та декодуються до рівня окремих наборів телевізійних програм. Фотографія радіотракту передавальної та приймальної РРС відображена на рис. 7.12.

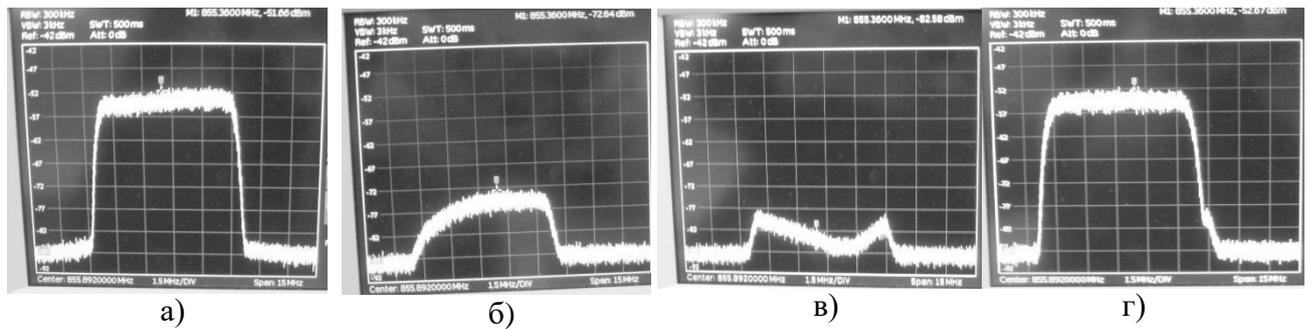


**Рис.7.12.** Фотографії радіотракту передавальної (а) та приймальної (б) РРС лабораторного макету симплексної РРЛЗ з просторовою обробкою сигналів за формою фазового фронту ЕМХ

Лабораторні дослідження макету симплексної РРЛЗ були проведені при рознесенні АР передавальної та приймальної РРС на відстань 7 метрів. Дві ЕМХ з різною формою фазового фронту, кожна яких відповідає окремому джерелу DVB-C сигналу, створювались шляхом ручного керування фазою та амплітудою ЕМХ в ДУС<sub>1</sub> та ДУС<sub>2</sub> передавальної РРС.

У свою чергу, просторова селекція ЕМХ по формі фазового фронту в приймальній РРС також реалізовувалась ручним налаштуванням змінних атенуаторів та фазообертачів ДУС<sub>1</sub> та ДУС<sub>2</sub>. Для відокремлення ЕМХ 1-го DVB-C сигналу атенуатори та фазообертач ДУС<sub>1</sub> налаштовувалися таким чином, щоб максимально придушити ЕМХ 2-го DVB-C сигналу. Подібним чином, для відокремлення ЕМХ 2-го DVB-C сигналу атенуатори та фазообертач ДУС<sub>2</sub> налаштовувалися таким чином, щоб максимально придушити ЕМХ 1-го DVB-C сигналу. Спектри потужності 1-го та 2-го DVB-C сигналів на виході МШК<sub>1</sub> після просторової обробки в ДУС<sub>1</sub> показані на рис.7.13,а,б, а спектри потужності 1-го та 2-го DVB-C сигналів на виході МШК<sub>2</sub> після просторової обробки в ДУС<sub>2</sub> відповідно на рис.7.13,в,г.

З рис. 7.13,а,б можна побачити, що рівень потужності 1-го DVB-C сигналу складає  $P_1 = -51.6$  дБм, рівень потужності шуму за смугою частот DVB-C сигналу  $N_1 = -87$  дБм, а рівень потужності залишка 2-го DVB-C сигналу змінюється в межах  $\Delta P_2 = -87 \dots -73$  дБм в смузі частот 8 МГц. Отже, відношення несна-шум для 1-го DVB-C сигналу  $(C/N)_1 = 21.5$  дБ на його центральній частоті 855 МГц та 35.5 дБ на його лівому краю, якому відповідає частота 851 МГц. У даному випадку, найкраще придушення 2-го DVB-C сигналу (більше 30 дБ) в ДУС<sub>1</sub> отримано на лівому краю спектра цього сигналу.



**Рис. 7.13** Спектри потужності 1-го (а) та 2-го (б) DVB-C сигналів на виході МШК<sub>1</sub> після просторової обробки сигналів ДУС<sub>1</sub> а також спектри потужності 1-го (в) та 2-го (г) DVB-C сигналів на виході МШК<sub>2</sub> після просторової обробки сигналів ДУС<sub>2</sub>

Подібним чином, з порівняння спектрів потужності DVB-C сигналів на рис.7.13,в,г, видно, що рівень потужності 2-го DVB-C сигналу  $P_2 = -52$  дБм, рівень потужності шуму за смугою частот DVB-C сигналу  $N_1 = -87$  дБм, а рівень потужності залишка 1-го DVB-C сигналу змінюється в межах  $\Delta P_1 = -85 \dots -77$  дБм в смузі частот 8 МГц. Таким чином, відношення несна-шум для 2-го DVB-C сигналу дорівнює  $(C/N)_1 = 24.3$  дБ на краю спектра сигналу (851 МГц) та 32.3 дБ на його несній частоті (855 МГц). Краще придушення 1-го DVB-C сигналу в ДУС<sub>2</sub> отримано на центральній частоті цього сигналу.

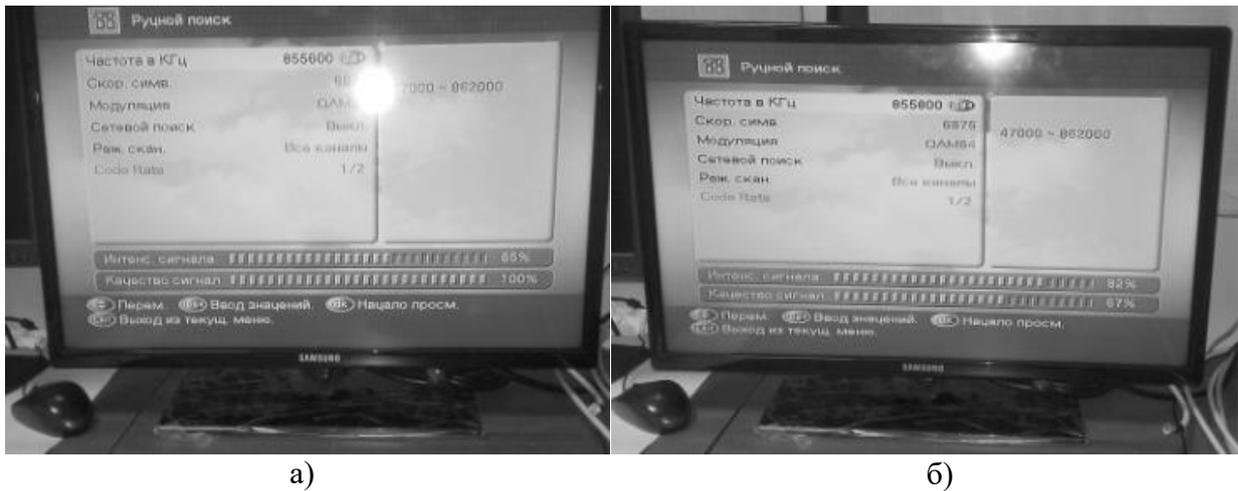
Неідентичність спектрів потужності залишків 1-го та 2-го DVB-C сигналів, показаних на рис.7.13,б,в може бути пояснена неідентичністю технічних параметрів основних елементів (атенюатори, фазообертачі) ДУС<sub>1</sub> та ДУС<sub>2</sub> в смузі частот DVB-C сигналу.

Проведений експеримент показує, що максимальний коефіцієнт придушення DVB-C сигналу, що заважає, на виході ДУС приймальної РРС не перевищує 30-35 дБ. Це пов'язано із неточністю налаштування змінних атенюаторів та фазообертача, яке виконується механічним повертанням їх відповідних органів керування.

На рис. 7.14 показано фотографії шкали рівня та якості демодульованого та декодованого 1-го та 2-го DVB-C сигналів у відповідних DVB-C приймачах.

З рис. 7.14 видно, що якість кожного з двох DVB-C сигналів, які одночасно передавалися по макету симплексної РПЛЗ на одній й тій самій частоті, поляризації, займаючи одну й ту саму смугу радіочастот і однакову символну швидкість 6,875 Мсимв/с, мають у DVB-C приймачі якість не гірше 65%. Цього рівня якості повністю достатньо для перегляду ТВ програм з високою якістю відтворення зображення та звукового супроводження без будь-яких переривань.

Розглянутий вище макет симплексної РПЛЗ практично підтвердив у лабораторних умовах можливість формування, передачі на одній й тій самій частоті, поляризації двох ЕМХ, які відповідають двом різним джерелам DVB-C сигналу, а також просторової селекції цих ЕМХ одна від одної по формі фазового фронту цих з високою якістю відтворення DVB-C сигналів у відповідних приймачах. Напрямок подальших досліджень буде дослідження ефективності просторової обробки по формі фазового фронту ЕМХ при більших відстанях між РРС та при кількості джерел DVB-C сигналів більший за 2.



**Рис.7.14** Фотографії шкали рівня та якості демодульованого та декодованого 1-го (а) та 2-го (б) DVB-C сигналів у відповідних DVB-C приймачах

## Список літератури

1. Кремер И. Я. Пространственно-временная обработка сигналов / И. Я. Кремер, А. И. Кремер, В. М. Петров и др.; Под ред. И. Я. Кремера. – М.: Радио и связь, 1984. – 224 с.
2. Комарович В.Ф. Методы пространственной обработки радиосигналов /В.Ф. Комарович, В.В. Никитченко. – Л.: ВАС, 1989. – 278 с.
3. Avdieienko H., Yakornov Y. Application of Spatial Signal Processing by the Form of the Electromagnetic Wave Phase Front in Wireless Communication Systems. UKRMICO 2018. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 560. Springer, Cham, 2019 - P. 239-261.
4. Авдеенко Г.Л., Якорнов Е.А., Липчевская И.Л Фазовые системы определения координат источника радиоизлучения гармонического сигнала в зоне Френеля // Изв. ВУЗов. Радиоэлектроника. – 2012. - №12. - С. 24-33.
5. Патент №64696 (Україна) «Фазова радіосистема визначення координат» G01S 3/00 // Авдєєнко Г.Л., Ільченко М. Ю. Манюгіна Д. В., Потапенко В. В., Якорнов Є. А., Пром.власність, 2011р., №21.
6. Якорнов Є.А., Коломицев М.О., Авдєєнко Г.Л., Лавріненко О.Ю. Теоретичний аналіз можливості застосування фізичного явища кривизни фазового фронту електромагнітної хвилі в стаціонарних системах радіозв'язку надвисокочастотного діапазону // Вісник НТУУ «КПІ». Сер. Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2012. – № 48. – С. 84–96.
7. Gleb L. Avdeyenko, Maxim A. Kolomytsev, Yevgeniy A. Yakornov “Efficiency of spatial signal processing in wireless communications” // Telecommunication Sciences, 2012, Vol. 3, N 2, pp.5-13.
8. Авдеенко Г.Л., Якорнов Е.А. Расчёт показателей эффективности оптимальной пространственной обработки сигналов для радиолинии стационарной беспроводной телекоммуникационной системы / Г. Л. Авдеенко Г.Л., Е. А. Якорнов// Вісник НТУУ «КПІ». Сер. Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2013. – № 52. – С. 92–101.
9. Патент №104240 (Україна). Система забезпечення зв'язку між двома радіорелейними станціями Н04В 7/14 // Ільченко М. Ю., Якорнов Є.А., Авдєєнко Г. Л., Чижевська А. В., Бранчук В. М., Пром. Власність, 2016р., №2.
10. Патент №104241 (Україна). Система забезпечення зв'язку між двома радіорелейними станціями» Н04В 7/14 // Ільченко М. Ю., Якорнов Є.А., Авдєєнко Г. Л., Чижевська А. В., Бранчук В. М., Пром. Власність, 2016р., №2.

---

## СИНХРОНІЗАЦІЯ ТА РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ЧАСУ В ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ ТА МЕРЕЖАХ

Бірюков М.Л., Тріска Н.Р.

---

## TIME SYNCHRONIZATION AND DISTRIBUTION IN TELECOMMUNICATION SYSTEMS AND NETWORKS

Biriukov N.L., Triska N.R.

The section deals with the main principles and trends in the field of synchronization in telecommunications. The presented approach is based on the respective ITU-T research and standardization activities as well as the authors' own studies and academic subjects in Institute of Telecommunication systems of "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute". The fundamental definitions of network synchronization and transmission modes as well as the actual requirements for frequency synchronization (FS), phase (PS) and time of day (*ToD*) synchronization and their metrics are analyzed. The relationships and limits of FS and PS characteristics are proposed based on the FS and PS conceptions indivisibility. The two-way precise time protocol (PTP) is analyzed subject to time delay random component and frequency deviation. The analysis of both well-known and new metrics evaluating the synchronization accuracy was performed. The PTP time stamps exchange was studied using Maximum Likelihood method and minimal time interval errors. The obtained results are summarized in Conclusions.

У розділі розглянуто основні засади та напрямки розвитку синхронізації в телекомунікаціях. Підхід авторів базується на відповідних напрямках досліджень і стандартизації ITU-T, власних дослідженнях та відповідних навчальних курсах, що викладаються в ІТС КПІ ім. Ігоря Сікорського. В роботі проаналізовано базові визначення стосовно синхронізації мереж та методів передавання, сучасні вимоги до синхронізації частоти (СЧ), фази (СФ) та часу, а також метрики з їх оцінювання. Виходячи з нероздільності понять СЧ та СФ, запропоновані їх співвідношення та обмеження. Аналізується двосторонній протокол часу (РТР) в присутності випадкової складової затримки часу та розбіжності частот. Проводиться аналіз відомих та новітніх метрик з оцінювання точності СЧ та СФ, а також обміну повідомленнями РТР методом максимальної ймовірності та мінімальних відхилів часових інтервалів. Результати узагальнюються та підсумовуються у висновках.

## 8.1. Вступ

Синхронізація<sup>1</sup> – фундаментальне явище природи, яке в широкому сенсі означає будь-яке узгодження процесів у часі [1–5]. Явище синхронізації охоплює ритми як біологічних, так і космічних світів. Середовища-“посередники”, які забезпечують захоплення, відстеження процесів у часі, представлені полями різної природи: механічні, включаючи акустичні, електромагнітні, гравітаційні тощо. Ці поля являють собою інструмент впливу – середовище взаємодії об’єктів різноманітної природи, яке за певних обставин створює явище синхронізації – узгодження ритмів живих організмів, мерехтіння світлячків або рух планет, біологічні та соціологічні ритми, від оплесків до революційних настроїв, від передавання та прийому інформації в системах зв’язку до динамічної синхронізації програмно визначених мереж [1–5]. Як визначав В.І. Вернадський, “...спрямування до синхронізації становить один із проявів самоорганізації природи”<sup>2</sup>.

Принципи та підходи методів синхронізації отримали свій розвиток в багатьох технічних застосуваннях, а також в природних та гуманітарних науках. В узагальненому вигляді засади синхронізації спільні для декількох загальнонаукових, міждисциплінарних галузей, зокрема, теорій коливань, біфуркації, катастроф та синергетики. З синхронізацією ці наукові напрямки поєднують основоположні засади, а саме: наявність систем, здатних генерувати ритми сигналів фізичної, біологічної, фізіологічної або соціальної природи; наявність “м’якого”, непрямого, нежорсткого зв’язку, що зазвичай має хвильову природу; і, нарешті, здатність (динамічної) системи внаслідок незначної зміни параметрів набувати нову якість, та іноді стрибком.

Синхронізація – це не тільки процес узгодження подій, а і метод дослідження, наприклад, синхроністичний метод в історичній науці – порівняння подій одного часу, що мали місце в різних країнах та у різних народів<sup>3</sup>, а також спосіб дослідження стійкості мереж стосовно так званих петель – циклів синхронізації [2-3, 26]. Методи визначення довготи у навігації являють приклад практичного порівняння (узгодження) у часі з метою визначення довготи знаходження об’єктів.

Синхронізація в телекомунікації охоплює всі зазначені вище напрямки з точки зору теоретичного і практичного застосування та набула широкого багатозначного сенсу, який потребує більш детального розгляду.

---

<sup>1</sup> Термін “синхронізація” походить від грецького слова *synchronos*, що означає “одночасно”.

<sup>2</sup> Цитується з [4], в перекладі авторів з російської.

<sup>3</sup> “Энциклопедия” Ф.А. Брокгауза и И.А. Ефрона в 86 томах: СПб, 1890–1907.

## 8.2. Основні терміни, визначення та актуальні завдання

Поняття синхронізації багатозначне та з огляду на застосування може мати суттєві розбіжності.

По-перше, слід розділяти задачі досягнення синхронізації безпосередньо в середовищі систем передавання та комутації та задачі синхронізації частоти, фази і часу в телекомунікаційних мережах (ТМ). Задачі першої групи виникли одночасно з розробкою та впровадженням телекомунікаційних систем і вирішувались в процесі розробки самої системи. Тому цей клас задач майже ніколи не виділявся та не наголошувався, але завжди ретельно відпрацьовувався під час проектування, налагоджування та експлуатації систем [1-3], наприклад, телеграфних систем, ІКМ, PDH, SDH, АТМ, Ethernet (BASE), Ethernet-TP, IP-MPLS тощо. В кожній з цих систем на фізичному та каналному рівні забезпечується частотна (тактова, біт-) –  $f$  та фазова –  $\phi$  синхронізація безпосередньо в процесі передачі інформації в реальному часі. Фазова синхронізація на каналному рівні моделі взаємодії відкритих систем OSI<sup>4</sup> зветься цикловою або пакетною в залежності від того, у який спосіб здійснюється передавання фрагментів інформації. Детально особливості режимів роботи телекомунікаційних мереж та методів передавання з огляду на рівні моделі OSI та з точки зору синхронізації буде розглянуто нижче в підрозділі 8.3.2.

Режим синхронізації – чи то всередині системи, чи в мережі – можна забезпечити тільки у два способи: примусовий або взаємний. Взаємний спосіб використовується в особливих випадках, наприклад, для резервування декількох первинних джерел однакової якості або в локальних комп'ютерних мережах.

В так званий “класичний” період синхронізації ТМ (80÷90-ті роки ХХ ст.) були розроблені основні принципи забезпечення примусової синхронізації частоти (тактової мережевої синхронізації – ТМС) в середовищі з синхронним способом передавання і орієнтацією на з'єднання, а також норми на ступені точності і стабільності сигналів та обладнання та методи підтвердження відповідності нормам. Ці основоположні засади, добре відпрацьовані на практиці, не втрачають актуальності і сьогодні, слугуючи основою для розробки рішень з синхронізації ТМ нового покоління [6-14].

Головна відзнака сучасного періоду мережевої синхронізації полягає в забезпеченні частотної і фазової синхронізації та узгодженні шкал часу в умовах асинхронного способу передавання – у пакетному середовищі. Це означає, що в різних, географічно віддалених місцях мережі фази мають бути однакові

---

<sup>4</sup> OSI – Open Systems Interconnection (OSI/IEC 7498-1:1994)

[G.8260<sup>5</sup>]. Іншими словами, події, наприклад, певні значущі моменти (Рис. 8.1) мають виникати одночасно, а показання часових шкал  $ToD^6$  мають співпадати.

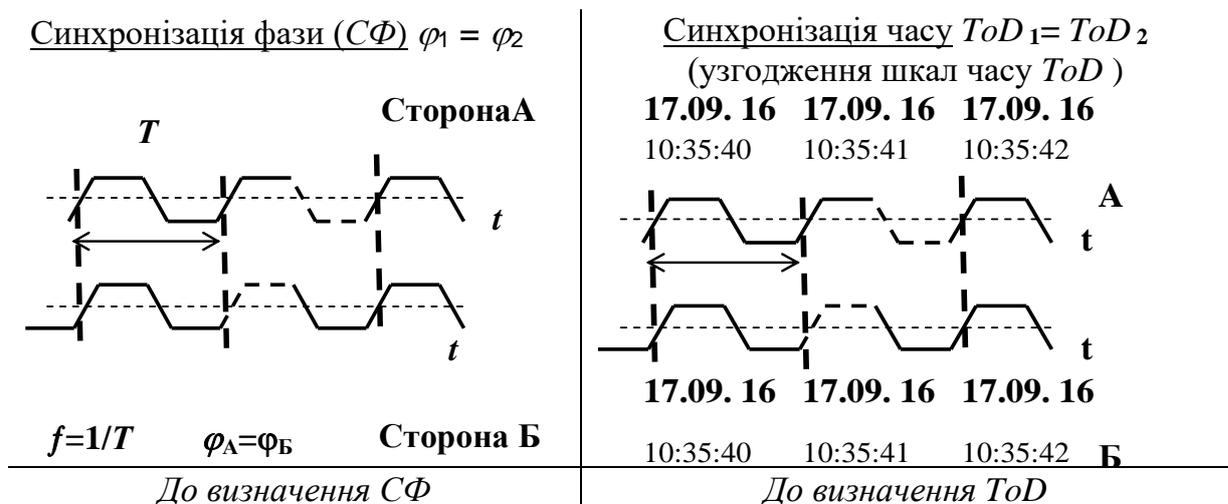


Рис. 8.1. Синхронізація фази (CФ) та часу ( $ToD$ ) в телекомунікаційній мережі

Нагальні сучасні завдання (і, відповідно, актуальні напрямки досліджень ІТУ-Т та інших органів стандартизації) в галузі синхронізації пов'язані зі створенням інфраструктури “Інтернету речей” ІоТ, мобільних мереж 4G та 5G (ІМТ2020), а також із супроводом переходу телекомунікаційної інфраструктури від NGN до програмно орієнтованих мереж SDN/NFV<sup>7</sup> [15, 16]. В цьому контексті актуальним завданням є методи та засоби оцінювання якісних показників пакетної передачі з огляду на можливості забезпечення відповідного рівня параметрів частоти та фази.

### 8.3. Модель сигналу тактової синхронізації та режими мереж синхронізації

#### 8.3.1 Модель сигналу тактової синхронізації

Модель оцінювання результатів вимірювання, розрахунку частоти проскакування, аналізу метрик базується на вимірюванні відхилю, розходження фаз –  $TE(t)$  (Time Error) еталонного ( $Ref$ ) та робочого ( $UT$ ) сигналів синхронізації (див. рис. 8.2).

Оцінювання відхилю часового інтервалу –  $TIE(t;\tau)^8$  проводиться з рівномірних вибірок  $TE(t)$   $\{x_i=x(i\tau_0), i=1,2,\dots, N\}$ , які відраховують за різницею значущих моментів між вимірюваним  $T(t)_{UT}$  та еталонним  $T(t)_{ref}$  тактовими сигналами за час вимірювань  $T=(N-1)\tau_0$ , де  $\tau_0$  – інтервал дискретизації, а  $N$  – кількість вибірок  $x(t)$ .

<sup>5</sup> Тут і далі посилання на номери Рекомендацій ІТУ-Т серії G подано в квадратних дужках. Актуальні версії всіх Рекомендацій ІТУ-Т доступні на офіційному сайті: <https://www.itu.int/>

<sup>6</sup> ToD – Time of Day

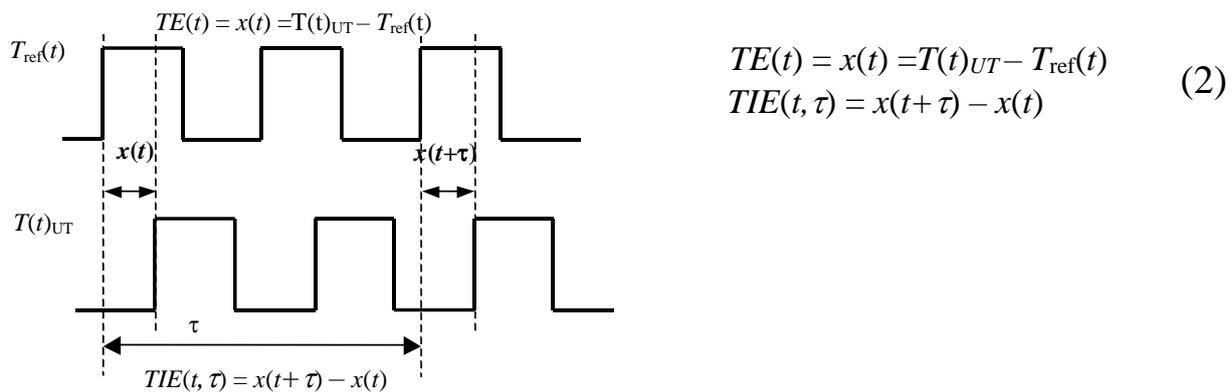
<sup>7</sup> SDN/NFV – Software Defined Network/Network Functions Virtualization

<sup>8</sup> TIE – Time Interval Error

Якщо припустити, що показники нестабільності опорного тактового сигналу незначні в порівнянні з показниками вимірюваного сигналу, і ними можна знехтувати, то загальна модель зсуву фази  $x(t)$  може бути представлена у вигляді [1-3]:

$$x(t) = x_0 \pm y_0 \cdot t \pm Dt^2/2 + \varepsilon(t) + j(t), \quad (1)$$

де  $x(t)$  – поточний зсув фази  $TE(t)$ ;  $x_0$  – початковий зсув фази,  $y_0$  – початкова неточність встановлення частоти відносно номінального значення частоти  $f_n$ ;  $y_0 = |f_0 - f_n| / f_n$ ;  $D$  – дрейф частоти,  $\varepsilon(t)$  – фазові шуми джерел сигналів та пристроїв виділення і відстеження тактової частоти,  $j(t)$  – невідповідності, алгоритмічні (наприклад, вставки узгодження – “стаффінг”) та інші складові паразитної фазової модуляції.



**Рис. 8.2** До визначення  $TE(t)$  та  $TIE(t;\tau)$ :  $T(t)_{UT}$  – вимірюваний тактовий сигнал,  $T(t)_{ref}$  – еталонний тактовий сигнал;  $x(t)$ ,  $x(t+\tau)$  – відхил значущого моменту вимірюваного сигналу від значущого моменту еталонного сигналу в моменти часу  $t$  і  $t+\tau$ , відповідно

З моделі (1) випливає, що за наявності принаймні тільки початкового розходження частот відхил значущих моментів сигналів двох несинхронізованих між собою генераторів буде зростати – виникає “проблема двох генераторів”, коли запис інформаційного сигналу здійснюється з однією частотою, а зчитування – з іншою. [1, 2, 17].

Виходячи з відомого співвідношення між частотою та фазою  $y(t) = dx(t)/dt$ , отримаємо модель для нормованої частоти:

$$y(t) = y_0 \pm Dt + \varepsilon(t)' + j(t)', \quad (3)$$

де всі позначення відповідають поясненням до виразу (1), а  $\varepsilon(t)'$ ,  $j(t)'$  – похідні від  $\varepsilon(t)$  та  $j(t)$ , відповідно.

У загальному випадку відхил часового інтервалу  $TE(t)$  являє собою результат впливу систематичних складових (початковий зсув частоти  $y_0$  і дрейф частоти  $D$ , алгоритмічні фазові спотворення) та випадкових складових (фазова або частотна модуляція тактових сигналів білим або дробовим шумами).

Окрім похибки початкового встановлення, зміщення частоти може бути обумовлене ефектом Доплера. Якщо об'єкти рухаються з постійною швидкістю, то ефект Доплера виявляється у постійному зміщенні частоти і, отже, зводиться до розглянутого випадку. Якщо б об'єкти рухалися з

прискоренням, то спостерігався б дрейф частоти, також зумовлений ефектом Допплера.

Таким чином,  $TE(t)$  є нестационарною, залежною від часу випадковою величиною. У випадках оцінювання відповідності характеристик слід також враховувати невизначеність вимірювання та можливі помилки обчислень.

Моделі (1), (3) змінюють свій зміст в залежності від режиму синхронізації мережі. Так, якщо оцінювати зсув фази у плезіохронному з'єднанні (в плезіохронній мережі – ПМ), то актуальними будуть усі компоненти виразів (1), (3), а у синхронному з'єднанні – тільки фазові шуми  $\varepsilon(t)$  та алгоритмічні зсуви фази  $j(t)$ . В ПМ найбільш впливову частку утворює компонент  $y_0 \cdot t$ , а на добових інтервалах часу відчутного впливу набуває дрейф частоти  $D$ .

### 8.3.2 Основні режими синхронізації ТМ

Як вже зазначалося вище, підходи та технічні засоби вирішення завдань синхронізації залежать від того, в якому режимі працює мережа на фізичному рівні моделі OSI, а також від того, у який спосіб здійснюється передавання фрагментів інформації на каналному рівні [1, 2, 6, 7, 13]. Основні варіанти режимів синхронізації ТМ та способів передавання узагальнено на рис. 8.3.

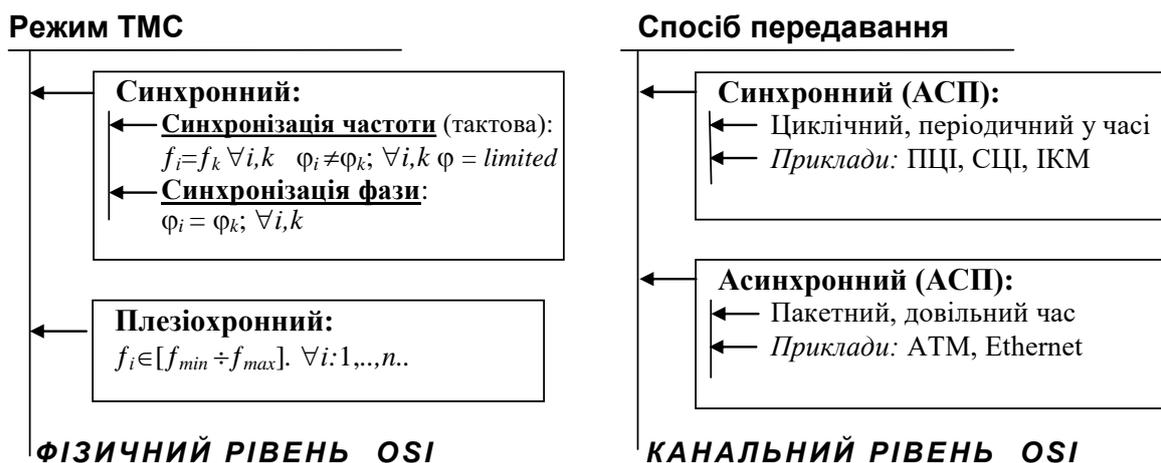


Рис. 8.3 Місце транспортних технологій (1 та 2 рівні) в моделі OSI

На фізичному рівні синхронізація ТМ безпосередньо в процесі передавання інформації в реальному часі може забезпечуватись в *синхронному* або *плезіохронному* режимах. Під синхронним режимом тут мається на увазі примусова синхронізація всіх елементів ТМ від опорного джерела (або кількох джерел) високої якості. В класичній мережі тактової синхронізації (ТМС) частоти у середньому однакові ( $f_i = f_k \forall i, k$ ), а фази – довільні, не однакові, але з обмеженим зсувом. Якщо мова йде про фазову синхронізацію (рис. 8.1), то, окрім однакової частоти, мережа ТМС має забезпечити також однакову фазу  $\varphi_i = \varphi_k$  для всіх елементів мережі. В плезіохронному режимі відсутня примусова синхронізація, і всі генератори в мережі працюють в режимі вільних коливань, але границі відхилю частот обмежені:  $f_i \in [f_{\min} \div f_{\max}]. \forall i: 1, \dots, n.$

Залежно від способу передавання фрагментів інформації на каналному рівні, розрізняють *синхронний* та *асинхронний* способи передавання (ССП та

АСП відповідно). Для ССП характерна циклічна, періодична у часі структура сигналу, в той час як АСП передбачає поділ цифрового потоку на фрагменти різної довжини (пакети) з подальшим передаванням пакетів у відносному масштабі часу [1-3]. З точки зору підтримки мережі ТМС, системи з ССП можуть працювати як в синхронному, так і в плезіохронному режимах (залежно від технологій передавання та комутації та конкретних проектних рішень). Мережі з АСП, за визначенням, є плезіохронними, але необхідність забезпечення точної синхронізації частоти/фази/часу, змушує розробників вдосконалювати системи з АСП, використовуючи традиційні підходи ТМС з їх адаптацією до роботи в пакетному середовищі [7-14].

В будь-якому випадку, характеристики мережі синхронізації суттєво впливають на якість роботи ТМ, особливо коли мова йде про надання телекомунікаційних послуг в режимі реального часу. На кожному етапі розвитку телекомунікації показники мереж синхронізації визначають рівень якісних показників ТМ, який може бути досягнуто, та найбільш ефективні шляхи впровадження та розповсюдження послуг з синхронізації. З точки зору синхронізації, мережі з АСП в порівнянні з ССП мають як переваги, так і вади, зокрема, в частині забезпечення рівня якості роботи в реальному часі, що пов'язано з дисперсією затримки прибуття пакетів – PDV<sup>9</sup>.

З огляду на сучасні тенденції переходу на повністю пакетні принципи передавання та комутації і відповідної зміни інфраструктури ТМ, особливий інтерес представляє плезіохронний режим ТМС (плезіохронна мережа – ПМ) як більш загальний випадок режиму роботи мережі [18-20]. Тому нижче буде розглянуто саме цей режим з точки зору виникнення та попередження проскакування.

## 8.4. Проскакування

### 8.4.1 Визначення

Головне призначення мереж синхронізації – це забезпечення якості передавання інформації, тобто безпомилкової роботи телекомунікаційної мережі. Розбіжність частот генераторів елементів мережі призводить до розбіжності фаз в обладнанні, що, в свою чергу, зумовлює проскакування процесу передавання. *Проскакування* (англ. *slip*) – це характерна помилка внаслідок розсинхронізації: втрата або повторення фрагменту цифрового потоку (біта, байта або циклу, пакета чи чарунки АТМ даних<sup>10</sup>)[1–3, 17-19].

### 8.4.2 Оцінювання частоти/періоду проскакування

Розбіжність частот на кожному елементі мережі – так звана “проблема двох генераторів” – має певні обмеження щодо різниці фаз, пов'язані з ємністю буферних запам'ятовуючих пристроїв (буферної пам'яті – БП), що

<sup>9</sup> PDV – Packet Delay Variation

<sup>10</sup> А також на виході фазового детектора в колі ФАПЧ, коли різниця фаз перевищує  $2\pi$  радіан

використовуються в обладнанні передавання та комутації. Приклад фізичної та логічної структури БП наведено на рис. 8.4 [18-20].

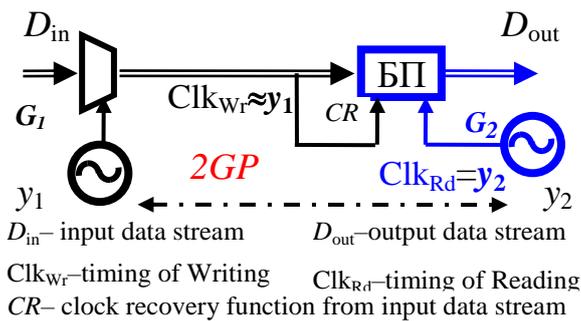


Рис. 8.4, а Буферна пам'ять (БП) в цифровому тракті одного напрямку в умовах ПМ

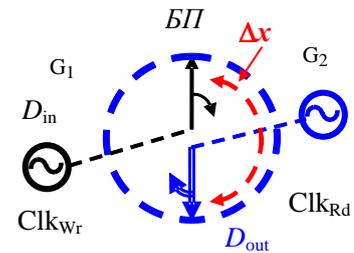


Рис. 8.4, б Логічна модель БП

Джерела тактових сигналів мають обмежену точність та стабільність, і тому реальні значення частот тактових сигналів під час запису та зчитування відрізняються від номінальних. В результаті в пристрої перезапису (наприклад, в БП) виникає розходження тактових частот запису та зчитування<sup>11</sup>, що в нормованому вигляді на рис. 8.4 позначено як  $y_1$  та  $y_2$ . Поточні значення  $y_1(t)$  та  $y_2(t)$  знаходяться на нормованому інтервалі  $[-1, +1] \cdot y_0$ . Зазначимо, що робота БП на рис. 8.4 показана в реальному часі. Модель БП при роботі у відносному часі, наприклад, за наявності очікування в черзі, принципово не відрізняється від моделі на рис. 8.4 [18-20].

Загальна практика оцінювання часу проскакування виходить з припущення максимального відхилення частот, тобто частоти мають крайні протилежні значення на припустимому інтервалі. Далі, виходячи з припустимого зсуву фаз двох сигналів  $x_{nrun}$  в (1) та нехтуючи іншими складовими, час проскакування  $t_{проск}$  визначають як:

$$t_{проск} \geq x_{nrun}/2 y_0 \quad (4)$$

З (4) випливає, що навіть якщо початкова неточність не зростає, неминуче виникає проскакування. Отримана оцінка вказує на найкоротший період проскакування. Так, наприклад, для типових значень для ЦАТС  $x_{nrun} = 125$  мкс та  $y_0 \approx 10^{-11}$  час можливого проскакування становить 72 доби.

Слід зазначити, що якщо оцінювати ймовірність розходження частот тільки за розподілом в двох граничних точках допуску, то, за умови однакової ймовірності розподілу по кінцях допустимого інтервалу, ймовірність однакових частот або їх віддалення на протилежні границі становить  $1/2$ . Іншими словами, екстремальний відхил, що дорівнює величині всього допустимого інтервалу відхилення, досягається з ймовірністю 0,5.

В загальному випадку частоти можуть приймати будь-які значення в межах допуску. Це дозволяє припустити, що реальні співвідношення для оцінювання періоду проскакування можуть суттєво відрізнятись в більшу сторону. Найбільш ймовірним здається припущення стосовно нормального розподілу частоти в межах нормованого інтервалу з середнім значенням  $y_0$  та максимальними

<sup>11</sup> Тут і далі для спрощення припускається, що номінальні значення та припустимі відхилення частот запису та зчитування однакові.

відхилами  $\pm 3\sigma$  на  $[-1,+1]$ . Дослідження аналітичними методами та ймовірнісним моделюванням [18-21] показали, що при нормальному розподілі значень частоти в допустимих межах інтервал часу між проскакуванням з довірчою ймовірністю 0,95 зростає принаймні вдвічі. Так, для згаданих вище значень  $x_{nrun} = 125$  мкс та  $y_0 \approx 10^{-11}$ , з 99 % ймовірністю оцінка інтервалу проскакування становить майже 118 діб, проти 72 діб.

Проведений аналіз виразу (4) підтверджує важливість підтримки більш високої власної точності сигналів у вузлах мережі, оскільки з погіршенням точності частота проскакування зростає зворотно пропорційно показнику ступеня точності. Припустима розбіжність фаз  $x_{nrun}$  визначається особливостями методу приймання, наприклад, при прийманні по бітах  $x_{nrun} \leq \pm 0,45$  одиничного інтервалу.

#### 8.4.3 Методи запобігання проскакування

Більшість традиційних завдань синхронізації в телекомунікації спрямовані саме на запобігання та/або мінімізацію проскакування. Такі методи умовно можна розділити на *немережеві*, тобто в умовах ПМ за рахунок ресурсів всередині систем передавання та *мережеві*, тобто створення єдиного, виокремленого середовища однієї частоти за рахунок розподільчої мережі від одного високоточного джерела.

До *немережевих методів* запобігання проскакування можна віднести:

- узгодження швидкостей під час обробки плезіохронних сигналів (в системах передавання PDH та SDH);
- відстеження тактової частоти, синхронізація в напрямку передавання; це можуть бути постійні з'єднання – лінійні тракти PDH та SDH, шлейфи на підстанції ЦАТС, синхронний Ethernet (SyncE), або тимчасові з'єднання – “тунелі”, емуляція каналів в системах АСП;
- використання БП для згладжування розбіжностей фаз в обладнанні систем передавання та комутації з ССП па АСП);
- приймання/передавання тактової частоти (retiming) з підвищенням якості тактової частоти (в обладнанні систем передавання та комутації з ССП та АСП).

Немережеві методи, окрім синхронізації по напрямках, вирішують задачу запобігання проскакування за рахунок обмеження тривалості неперервного передавання, тобто “розрізання” неперервного цифрового потоку на ділянки узгодження або пакети, тривалість яких не перевищує інтервал проскакування. Спосіб обмеження неперервного передавання обирають залежно від того, який спосіб передавання використовується на канальному рівні – ССП чи АСП.

В разі синхронного передавання (ССП) блоків інформації в реальному масштабі часу виконують пряме та зворотне узгодження у практично неперервному потоці (прикладом можуть слугувати процедури узгодження швидкостей компонентних потоків в ЦСП PDH та SDH).

В разі асинхронного передавання (АСП) цифровий потік попередньо розбивають на фрагменти різної довжини (пакети), і передавання пакетів здійснюють у відносному масштабі часу, що є прийнятним для передавання

даних, не критичних до затримок та/або дисперсії часу. В результаті тривалість сеансу неперервного передавання виявляється меншою за період розходження частот. Однак розкид часу відправлення та приймання пакетів, а також можливе виникнення черг під час запису та зчитування призводять до відповідного розкиду затримок, вимоги до яких для деяких послуг на 2 порядки величин жорсткіші, ніж сама величина затримки [18-20].

Метод синхронізації по напрямках (трактах) – це попередник створення мережі синхронізації, яка зняла обмеження локальності з'єднань або їх тимчасовості.

*Мережевий метод* запобігання проскакування – це створення мережі тактової мережевої синхронізації (ТМС), в якій проблема проскакування ефективно вирішується за рахунок підтримання високої точності та стабільності тактової частоти в усіх елементах мережі. Це примусовий засіб підтримання приблизно рівної у середньому частоти з обмеженим зсувом фази. Даний метод широко застосовують як в “класичних” мережах з ССП, так і в сучасних пакетних мережах з АСП, наприклад, SyncE.

## 8.5. Порівняння синхронного та плезіохронного режимів синхронізації ТМ

### 8.5.1 Плезіохронна мережа: переваги та вади

Плезіохронна мережа (ПМ) – більш поширений та узагальнений спосіб взаємодії телекомунікаційних мереж, особливо на міжнародному рівні. ПМ, як вже зазначено в п. 8.4.3, має в розпорядженні широкий вибір засобів по забезпеченню безпомилкової роботи телекомунікаційних систем, здатних забезпечити якість передавання *операторського класу* [9]. Це дозволяє ефективно маніпулювати в ПМ немережевими засобами синхронізації, включаючи методи локальної підтримки тактової синхронізації. Перспективні транспортні технології, наприклад, оптичні транспортні мережі (OTN), Ethernet-TP, IP/MPLS, передбачають роботу в умовах ПМ. Крім того, подальшому розвитку локальних методів підтримки високої точності сприятиме підвищення точності, збільшення номенклатури та зменшення вартості джерел точної частоти і часу, а також наявність багатьох розвинених всесвітніх супутникових навігаційних систем.

### 8.5.2 Синхронна мережа: переваги та вади

Цілком синхронізована мережа з примусовою синхронізацією потребує впровадження спеціальної досить складної і кошовної багаторівневої інфраструктури ТМС [22-25]. Мережі тактової синхронізації (ТМС) були створені в усіх розвинених країнах світу в 90-ті роки і сформували так званий *класичний етап* ТМС, який дозволив забезпечити найвищий рівень якості, який можна досягнути в телекомунікації (ТМ операторського класу) і якого неможливо безпосередньо досягнути виключно у пакетному середовищі [9,13,14].

Але мережі ТМС в своєму первинному вигляді мають низку вагомих недоліків. По-перше, вже зазначена вище висока вартість, по-друге, висока складність проектування та експлуатації. Остання причина обумовлена виникненням неконтрольованого проскакування, навіть у синхронізованому з'єднанні.

За визначенням, в синхронному стані на величину зсуву фази впливає тільки власний фазовий шум моделі (1), але на практиці накопичування блукань або тремтінь фази, а також петлі або човникові переключення можуть призводити до короткочасних або довготривалих збоїв з випадковим періодом тривалості, причину або первинне джерело яких дуже важко виявити [26-28]. На сталість ТМС впливають не тільки помилки під час планування мережі та програмування її елементів, а також оперативні роботи в разі втрати та переключення опорних сигналів синхронізації внаслідок виникнення аварійних ситуацій або при перебудові та розвитку мережі [13-25].

Для сталості ТМС необхідно, щоб граф мережі складав дерево синхронізації. Загальна кількість кореневих дерев  $D$  для розподілення сигналів синхронізації в мережі з кількістю вузлів  $N$  дорівнює  $D \leq N^{N-2}$  [26-28]. При збільшенні кількості вузлів та ребер  $R$  в мережі загальна кількість кореневих дерев і також потенційних загроз виникнення петель (циклів) синхронізації зростає:  $R_{загроз} = R - (N - 1)$ , особливо за умов оперативного відновлення мережі.

Тому під час вибору режиму ТМС та засобів передавання в мережі слід враховувати різноманітні фактори, щоб отримати схему синхронізації, яка найкращим чином відповідатиме послугам, що надаються.

## 8.6. Метрики з оцінювання синхронізації

Метрики з оцінювання якості сигналів, обладнання та з'єднань синхронізації склались в початковий класичний період впровадження цифрових телекомунікаційних мереж в 80, 90-ті роки ХХ сторіччя. Так, наприклад, для оцінювання якості роботи БП в ПМ було запропоновано функцію максимального відхилення часового інтервалу МТІЕ( $\tau$ )<sup>12</sup>. Суттєвий вплив на процес міжнародної стандартизації мали методи оцінювання перших високоточних цезієвих генераторів, наприклад, дисперсія Алана та її модифікація в вигляді стандартного відхилення часового інтервалу ТДЕВ( $\tau$ )<sup>13</sup>. Достатність цих двох метрик підтверджена багаторічною практикою та міжнародною стандартизацією [G.810 – G.813, G.823 та інші].

Труднощі з оцінювання відповідності якості передавання в пакетному, асинхронному середовищі вимогам попередніх технологій стимулювали пошук нових метрик [G.8260] та розширення родини класичних метрик, зокрема МТІЕ( $\tau$ ) та/або їх адаптацію і новітню інтерпретацію [30–34].

---

<sup>12</sup> МТІЕ – Maximum Time Interval Error

<sup>13</sup> ТДЕВ – Time Deviation

### 8.6.1 Властивості $MTIE(\tau)$

Загальні та розширені властивості функції  $MTIE(\tau)$  детально досліджені в [29-33]. Функція  $MTIE(\tau)$  визначається виразом:

$$MTIE(n\tau_0) = \max_{\substack{1 \leq k \leq N-n \\ k \leq i \leq k+n}} [x_{ppk}(\tau_k)], \quad n = 1, 2, \dots, N-1 \quad (5)$$

де  $x_{ppk}(\tau_k) = \left| \max_{k \leq i \leq k+n} x_i - \min_{k \leq i \leq k+n} x_i \right|$ .

Для подальшого розгляду вагомі наступні властивості  $MTIE(\tau)$ : 1) безпосередньо оцінює зсув фази  $TE(\tau)$  та  $TIE(t, \tau)$ ; 2) чутлива до усіх складових моделі ТС (1), крім постійної складової; 3) за визначенням дає оцінювання зверху усіх метрик з оцінювання зсувів на інтервалах спостереження; 4) виключення постійної складової  $x_0$  дає можливість оцінити саме варіацію затримки, нехтуючи абсолютною постійною складовою; 5) властивості функції можна просто розширити для оцінювання середнього або мінімального значення зсуву фаз на заданому інтервалі спостереження; 6) має характерну форму завдяки увігнутості; 7) дозволяє подання в нормованому вигляді та інтерпретацію як функції розподілу по інтервалах часу.

### 8.6.2 Розширення родини $MTIE(\tau)$

Розширення метрик на базі функції максимального відхилу часового інтервалу було запропоновано в [30] та поширено в [31–33]. Особливість цих функцій полягає в тому, що вони наслідують головні якості функції  $MTIE(\tau)$ . З огляду на практичне застосування для оцінювання та регулювання потоку  $TE(t)$ , доцільно визначити принаймні мінімальний розмах фази по інтервалах часу спостереження  $\tau - mTIE(\tau)$  та максимальне на інтервалах спостереження  $\tau$  значення частоти  $\hat{Y}_{pp}(\tau)$  [30, 32]:

$$mTIE(n\tau_0) = \min_{\substack{1 \leq k \leq N-n \\ k \leq i \leq k+n}} [x_{ppk}(\tau_k)], \quad n = 1, 2, \dots, N/2-1 \quad (6)$$

$$\hat{Y}_{ppk} = \max_{\substack{1 \leq k \leq N-n \\ k \leq i \leq k+n}} [x_{ppk}(\tau_k)] / \tau_k \geq \bar{y}_k, \quad (7)$$

де  $x_{ppk}(\tau_k)$  визначено в (5),  $\bar{y}_k = (x_{k+1} - x_k) / \tau_k$ ,  $\tau_k = t_{k+1} - t_k$ .

Вираз (7) можна розглядати як похідну від  $MTIE(\tau)$  і, таким чином,  $\hat{Y}_{pp}(\tau)$  можна розглядати як емпіричну щільність розподілу максимальних значень частоти по інтервалах часу спостереження.

За визначенням, функції  $mTIE(\tau)$  (6) притаманні властивості  $MTIE(\tau)$ . Для оцінювання мінімальних відхилів відміток часу в протоколах обміну область визначення в (6) обмежена половиною інтервалу контрольованого виміру.

Аналогічним чином визначено середні значення фази чи частоти по інтервалах часу, а також максимальні та мінімальні в ансамблі функції [32].

### 8.6.3 Практичне значення метрик

#### 8.6.3.1 Призначення $MTIE(\tau)$ , $mTIE(\tau)$ та $MATIE(\tau)$ , $MAFE(\tau)$

Практичне значення функції  $MTIE(\tau)$  полягає в тому, що вона оцінює розбіжність фаз  $x_{pp}(\tau)$ , що накопичується між тактовими сигналами за час

$t_0 \leq t_0 \leq t_0 + \tau$  заповнення чи спорожнення БП (рис. 8.4) пропорційно цій розбіжності. Виконання норм на  $MTIE(\tau)$  гарантує, що ємність БП не перевищена за даний інтервал часу  $\tau$ , тобто  $\max[x_{pp}(\tau)] \leq x_{ppum}$  і, отже, проскакування не відбудеться. Процесу передавання в синхронній мережі притаманні практично постійна затримка та обмежений зсув фази, випадкова складова поглинається в БП та згладжується в колах ФАПЧ. Як впливає з 8.4.2, в ПМ  $MTIE(\tau)$  дозволяє оцінювати можливість проскакування.

Як зазначено вище, процес передавання в асинхронний спосіб має суттєві відзнаки. Розмір та характер затримки залежить від системи обслуговування в комутаторах, маршрутизаторах, розгалужувачах тощо, а також від часу доби. З цього приводу запропоновано використання деяких нових метрик, зокрема, максимальна усереднена оцінка фази на інтервалі  $\tau$  –  $MATIE(\tau)$  та максимальна усереднена оцінка частоти –  $MAFE(\tau)$  [32]:

$$MATIE(n\tau_0) \cong \max_{1 \leq k \leq N-2n+1} \frac{1}{n} \left| \sum_{i=k}^{n+k-1} (x_{i+n} - x_i) \right| \quad n = 1, 2, \dots, N/2-1 \quad (8)$$

$$MAFE(n\tau_0) = MATIE(n\tau_0) / n\tau_0 \quad (9)$$

З порівняння виразів (6), (7) та (8), (9) можна бачити, що вони мають близькій підхід, але різні тлумачення. Більш того, як буде показано нижче,  $mTIE(\tau)$  можна використовувати для оцінювання двостороннього обміну мітками часу та отримувати дані, близькі до методу максимально ймовірного оцінювання [30, 33, 34].

### 8.6.3.2 Порівняння $MTIE(\tau)$ , $mTIE(\tau)$ та $MATIE(\tau)$ , $MAFE(\tau)$

За визначенням, на заданих інтервалах часу  $\tau$   $MTIE(\tau)$  дає оцінювання зверху метрик часу [32]:  $MTIE(\tau) \geq \{TIE(\tau), TDEV(\tau), TIE_{rms}(\tau), MATIE(\tau)\}$ , а  $\hat{Y}_{pp}(\tau)$  дає оцінку зверху безрозмірним, нормованим метрикам родини дисперсії Алана  $\hat{Y}_{pp}(\tau) \geq \{ADEV(\tau), MADEV(\tau), MAFE(\tau)\}$  та  $\hat{Y}_{pp}(\tau) \geq MAFE(\tau) \geq mTIE(\tau)/\tau$ .

$MATIE(\tau)$  і  $MAFE(\tau)$  оцінюють усереднені значення відхилів часу і частоти та не чутливі до зсуву фаз в моделі (1), частина інформації втрачається, внаслідок чого оцінюються не всі чинники процесу [32].

Аналіз результатів вимірів та моделювання свідчить про високий рівень кореляції між розглянутими метриками. Найбільш корельовано  $\hat{Y}_{pp}(\tau)$  та  $MAFE(\tau)$  при гаусовому розподілі фази – з коефіцієнтом кореляції не менш 0,9 – 0,95.  $MTIE(\tau)$  та  $mTIE(\tau)$  корельовано з коефіцієнтом більш ніж 0,9.

За наявності частотної синхронізації  $MTIE(\tau)$  та  $mTIE(\tau)$  вказують на відносний розмір випадкової розбіжності фаз, що спостерігався по інтервалах спостереження, нехтуючи постійною складовою  $x_0$  в (1). Таким чином, з точки зору СФ та  $ToD$  поточна помилка з фази  $\Delta\varphi(t)$  не менше  $TIE(t, \tau)$ , або  $\Delta\varphi(t) \geq x(t) = y_0 \cdot t$ . Взагалі  $\Delta\varphi(t)$  змінюється пропорційно  $TE(t)$  та нормованому значенню частоти:  $\Delta\varphi(t) \sim x(t) \sim y(t)$  [13]. З огляду на визначення і рис. 8.1 та 8.3, логічно є наступна послідовність оцінювання показників синхронізації: СЧ  $\leftrightarrow$  СФ  $\rightarrow T$  ( $ToD$ ) або  $f \leftrightarrow \varphi \rightarrow T$ .

## 8.7 Дослідження двостороннього протоколу часу

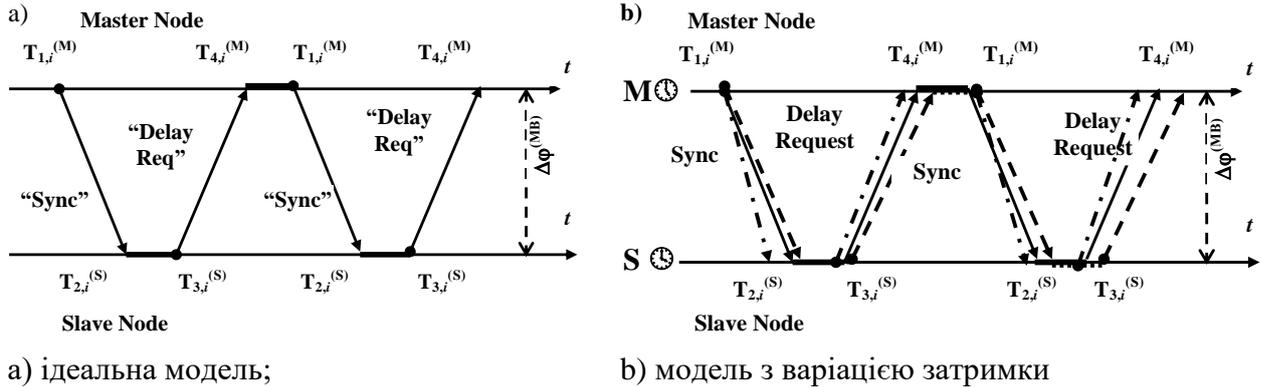
Спрощена загальна модель двостороннього протоколу обміну мітками часу (наприклад, протокол РТР) представлена на рис. 8.5 [33, 34]. На рис. 8.5а показано цикли обміну повідомленнями з двома етапами синхронізації як ідеальна модель, без варіації затримки пакетної передачі (PDV). Час затримки в кожному циклі оцінюється за (10), а зсув шкали часу оцінюється за (11).

$$\hat{d}^{(MS)} = \hat{d}^{(SM)} = \frac{1}{2} \cdot [(T_2^S - T_1^M) + (T_4^M - T_3^S)] \quad (10)$$

$$\hat{s}^{(MS)} = \frac{1}{2} \cdot [(T_2^S - T_1^M) - (T_4^M - T_3^S)], \quad (11)$$

де  $\hat{d}^{(MS)}$ ,  $\hat{d}^{(SM)}$  – оцінки одноразової затримки для передачі від провідного пристрою Master (M) до веденого – Slave (S) та від S до M, відповідно, а  $\hat{s}^{(MS)}$  – оцінки зсуву шкали часу.

Більш реальна модель обміну мітками часу показана на рис.8.5б, де час проходження мережі містить випадкову складову, а момент надходження пакету відхиляється навколо ідеального моменту на рис.8.5а. В обох моделях передбачається, що годинники M та S синхронізовані за частотою і мають однакову номінальну частоту в кожному інтервалу спостереження.



а) ідеальна модель;

б) модель з варіацією затримки

**Рис.8.5.** Спрощена загальна модель протоколу двостороннього обміну повідомленнями часу

Позначимо затримку в прямому напрямку від M до S як  $D(t)$ , а в зворотному напрямку –  $U(t)$ . Тоді (10) можна подати як:

$$D(t) = (T_2^S - T_1^M) = d^{MS} + \varepsilon(t)^{MS} + s^{MS} \quad (12)$$

$$U(t) = (T_4^M - T_3^S) = d^{SM} + \varepsilon(t)^{SM} - s^{SM}, \quad (13)$$

де  $s^{MS} = s^{SM}$  є різниця фаз між годинниками M і S;  $d$  – постійна складова затримки (зазвичай припускається  $d^{MS} = d^{SM}$ );  $\varepsilon(t)$  – випадкові складові, незалежні та нерівні для кожного напрямку, експоненціальні за розподілом у часі, тобто  $\varepsilon^{MS}$  та  $\varepsilon^{SM}$  – випадкові частини функцій відхилень у часі:  $TE(t)^{MS}$  та  $TE(t)^{SM}$  відповідно. Отже, швидкість пакетів, що приймаються ( $\lambda_r$ ), відрізняється від швидкості пакетів відправника  $\lambda$  випадковою складовою  $1/\varepsilon(t)$ .

Заміна (12) та (13) в (10) та (11) дає:

$$\hat{d}^{(MS)} = \hat{d}^{(SM)} = \frac{1}{2} \cdot [D(t) + U(t)] \quad (14)$$

$$\hat{s}^{(MS)} = \frac{1}{2} \cdot [D(t) - U(t)] \quad (15)$$

Коли і M і S отримують пакети з часом затримки  $d$  за умови, що  $\varepsilon^{MS} \neq \varepsilon^{SM}$ , то маємо оцінку затримки та зсуву фази (шкали часу) в вигляді:

$$\hat{d}^{(MS)} = \hat{d}^{(SM)} = d_{ideal} + \frac{[\varepsilon(t)^{MS} + \varepsilon(t)^{SM}]}{2} \quad (16)$$

$$\hat{s}^{(MS)} = s_{ideal} + \frac{[\varepsilon(t)^{MS} - \varepsilon(t)^{SM}]}{2} \quad (17)$$

Якщо протокол використовує кілька циклів обміну повідомленнями, то є два набори даних  $\{D_i\}$  і  $\{U_i\}$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$ . Тому ми можемо отримати оцінку затримки часу [30, 33] для, наприклад, експоненціального розподілу часу обслуговування, як  $\hat{d} = (\min_{1 \leq i \leq N} D_i + \min_{1 \leq i \leq N} U_i) / 2$ , а для нормального розподілу маємо:

$\hat{d} = (\bar{U} - \bar{D}) / 2$ . Відповідно отримані вирази для рівномірного розподілу при постійному часі обслуговування [30, 33]. Вибравши випадкові частини, отримуємо оцінку випадкової складової часу затримки  $\hat{d}_s^{(MS)} = [\min_{1 \leq i \leq N} \{\varepsilon_i^{MS}\} + \min_{1 \leq i \leq N} \{\varepsilon_i^{SM}\}] / 2$  та оцінку для шкали часу  $\hat{s}_s^{(MS)} = [\min_{1 \leq i \leq N} \{\varepsilon_i^{MS}\} - \min_{1 \leq i \leq N} \{\varepsilon_i^{SM}\}] / 2$ .

Було проведено порівняння  $mTIE(\tau)$  чи  $MTIE(\tau)$  з оцінюванням, отриманим методом максимальної ймовірності, наприклад, для припущення експоненціального розподілу  $mTIE(\tau)$  або детермінованого часу обслуговування  $MTIE(\tau)$ . Моделювання показало близькі результати оцінювання середніх, максимальних та мінімальних розбіжностей фаз при двохсторонньому обміні з низькою взаємною кореляцією ( $< 0,09$ ) [33].

Аналіз результатів моделювання та вимірювань на мережі показав також залежність дисперсії  $TE(t)$  від рівня розбіжності частот. Неточність частоти може бути подана виразом, аналогічним (12)÷(15). Цей висновок співпадає з висновком аналізу ПМ, де показано що функція розподілу  $TE(t)$  на виході БП одностороння і містить постійну складову затримки [18, 19]. Розподіли  $TE(t)$  тактової частоти в ПМ та затримок пакетів суттєво не відрізняються по формі. В останньому випадку суттєвою розбіжністю є значно більша затримка пакетів та її дисперсія (PDV).

## Висновки

Актуальні напрямки досліджень з синхронізації пов'язані зі створенням інфраструктури "Інтернету речей" IoT, мобільних мереж 4G та 5G (IMT2020), а також із супроводом переходу телекомунікаційної інфраструктури від NGN до програмно орієнтованих мереж SDN/NFV. При цьому не втрачає актуальності дослідження особливостей пакетного, асинхронного передавання с точки зору забезпечення вимог з точності частоти –  $f$ , фази –  $\varphi$  та часу  $T$  (ToD).

В умовах впровадження пакетної інфраструктури ТМ виникла потреба адаптації та доопрацювання традиційних підходів та технічних рішень з синхронізації (тобто "класичної" ТМС) для забезпечення СЧ/СФ/ToD в умовах плезіохронної мережі з АСП. Важливими кроками на цьому шляху є дослідження процесів синхронізації в пакетних мережах (зокрема, дослідження

двостороннього обміну мітками часу (ToD) за протоколом RTP) та пошук оптимальних засобів оцінювання (метрик).

Дослідження взаємодії провідного (Master) і веденого (Slave) генераторів за протоколом RTP в пакетній мережі було виконано на основі запропонованої моделі двосторонньої синхронізації, що включає випадкові компоненти. Запропоновано деякі можливі способи оцінювання випадкових частин затримки часу та фазового зсуву для двостороннього обміну даними.

Результати досліджень засвідчили, що метрики на базі  $MTIE(\tau)$ , завдяки своїм властивостям, можуть ефективно використовуватись для комплексного оцінювання якісних показників передавання в пакетній мережі, зокрема, для оцінювання двостороннього обміну мітками часу (ToD) за протоколом RTP.

Всі моделі та метрики, використовувані для аналізу сигналів синхронізації, базуються на вимірюванні відхилю, розходження фаз –  $TE(t)$  та обчисленні на його основі функції відхилю часового інтервалу –  $TIE(t;\tau)$ , яка, в свою чергу, є основою для розрахунку стандартизованих метрик. Було проведено ґрунтовні дослідження базової, широко відомої метрики – функції максимального відхилю (розмаху) часового інтервалу  $MTIE(\tau)$ , а також запропонованих на її основі нових метрик – мінімального розмаху фази  $mTIE(\tau)$  та максимального значення частоти  $\hat{Y}_{pp}(\tau)$ . За наявності частотної синхронізації  $MTIE(\tau)$  та  $mTIE(\tau)$  вказують на відносний розмір випадкової розбіжності фаз без врахування постійної складової  $x_0$ . Таким чином, з точки зору СФ та ToD, поточна помилка з фази  $\Delta\varphi(t)$  не може бути менше величини  $TIE(t,\tau)$ , тобто  $\Delta\varphi(t) \geq x(t) = y_0 \cdot t$ . Взагалі  $\Delta\varphi(t)$  змінюється пропорційно  $TE(t)$  та нормованому значенню частоти:  $\Delta\varphi(t) \sim x(t) \sim y(t)$ . З огляду на це, логічною є наступна послідовність оцінювання показників синхронізації: СЧ  $\leftrightarrow$  СФ  $\rightarrow T$  (ToD).

Проведені моделювання та вимірювання на діючих мережах свідчать, що для досягнення найкращого результату (рівня ТМ операторського класу) синхронізація сучасних пакетних мереж має провадитись в такій послідовності: 1) досягнення синхронізації частоти  $y$  на всіх елементах мережі з необхідною точністю на заданих інтервалах часу спостереження  $\tau$ ; 2) фазова синхронізація – вирівнювання зсуву фаз між елементами мережі на певних інтервалах часу  $\tau$  (рис. 8.1, 8.3); 3) синхронізація за часом, датою – ToD на певних інтервалах часу  $\tau$  (рис. 8.1).

Треба прийняти до уваги, що на інтервалах часу спостереження  $\tau$  відносна точність з синхронізації фази та часу не перевищує відносну точність з синхронізації частоти.

## Подяка

Автори висловлюють подяку кафедрі телекомунікацій ІТС КПІ ім. Ігоря Сікорського за надану можливість публікації результатів багаторічних досліджень з питань синхронізації та розповсюдження часу. Мотивацією для даних досліджень на різних етапах була діяльність Дослідної Комісії 15 ІТУ-Т. Спільна робота та спілкування з експертами ІТУ-Т сприяла вибору актуальних тем та методів досліджень. Більша частина наукових та практичних результатів була отримана авторами під час їх роботи в Українському науково-дослідному інституті зв'язку (ДП УНДІЗ). Подальшому розвитку та

систематизації отриманих результатів сприяло викладання відповідних навчальних дисциплін в ІТС і, зокрема, на кафедрі телекомунікацій. Експериментальні дослідження та комп'ютерне моделювання здійснювались за підтримки С. Михайличенка та О. Коржа ("Водафон Україна"), М. Леготіна та М. Моховикова. Також автори хотіли б висловити подяку своїм колегам М. Колтунову, А. Рижкову, Г. Коновалову, С. Кіссу, Д. Шноулі, М. Шварцу, Д. Шевченку та іншим за підтримку, співпрацю та корисні дискусії.

## Список літератури

1. Biriukov N.L., Triska N.R. Time and Synchronization in Telecoms. Processing and Control in Information and Communication Systems. UKRMICO 2018. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 560. Springer, Cham, 2019 - P. 205-223.
2. Бірюков М.Л., Стеклов В.К., Костік Б.Я. Транспортні мережі телекомунікацій: Системи мультимплексування: Підручник для студентів вищ. техн. закладів К., Техніка, 2005. – 312 с.
3. Vregni S. Synchronization of Digital Telecommunication Networks – John Wiley & Sons, Ltd. – 2002, 395 pp.
4. Блехман И.И. Синхронизация в науке и технике. – М.: Наука, 1981.–544 с.
5. Пиковский А., Розенблюм М., Куртс Ю. Синхронизация. Фундаментальное нелинейное явление. – М.: Техносфера, 2003.–496 с.
6. Бірюков Н.Л., Триска Н.Р. Синхронизация сетей связи с синхронным и асинхронным режимами передачи: опыт и проблемы. – “Электросвязь”, 2007, № 10. – С. 34-37.
7. Бірюков Н.Л., Триска Н.Р. Синхронизация транспортных технологий при переходе к NGN. – Электросвязь, № 9, 2009. – С. 30 – 35.
8. Триска Н.Р. Транспортные сети связи до и после NGN: анализ аспектов сетевой синхронизации. – Зв'язок, 2009, № 4. – С. 10-14.
9. Бірюков Н.Л., Макурин Н.А. Триска Н.Р. Актуальные задачи синхронизации в сетях операторского класса. – “Наукові записки УНДІЗ”, № 2(10), 2009. – С.53 – 59.
10. Бірюков Н.Л., Коновалов Г.В., Триска Н.Р. Современные тенденции развития и стандартизации частотно-временного обеспечения сетей связи. – Электросвязь, 2011, № 10. – С. 45–48.
11. Бірюков Н.Л., Семенко А.И., Триска Н.Р. Задачи частотно-временного обеспечения на современном этапе развития телекоммуникаций: Компютерні технології друкарства: Зб. наук. пр. Львів: Українська Академія Друкарства, 2011. №27. – С. 208-220.
12. Триска Н.Р. Синхронный Ethernet как метод обеспечения синхронизации в пакетных сетях. – “Наукові записки УНДІЗ”, 2009, № 3 (11) – С. 65-71.
13. Бірюков Н.Л., Триска Н.Р. Синхронный Ethernet как основа частотно-временного обеспечения современных и будущих сетей связи. – “Электросвязь”, 2013, № 2. – С. 8-12.
14. Бірюков Н.Л., Триска Н.Р., Худынцев Н.Н. Обзор направлений исследований МСЭ в области частотно-временного обеспечения современных сетей связи. – T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – № 2-2014. – С.12-17.
15. Триска Н.Р. Актуальные задачи синхронизации на этапе развертывания сетей 5G. – Одинадцята Міжнародна науково-технічна конференція “Проблеми телекомунікацій” (ПТ-2017), 18-21 квітня 2017 р. Матеріали конференції. – ІТС НТУУ “КПІ”. – С.102-104.
16. Триска Н.Р. Синхронизация в телекоммуникациях нового поколения: обзор технологий и стандартов. – Дванадцята Міжнародна науково-технічна конференція “Проблеми телекомунікацій” (ПТ-2018), 16-20 квітня 2018 р. Матеріали конференції. – ІТС КПІ ім. Ігоря Сікорського. – С.101-103.
17. Триска Н.Р. Методичні вказівки до виконання практичних занять з навчальної дисципліни “Основи теорії мереж синхронізації та розповсюдження часу” на тему:

Проскакування в цифрових системах зв'язку та методи їх запобігання. – НТТУ “КПІ”, ІТС, Кафедра телекомунікацій. – К., 2015.

18. Бирюков Н.Л., Триска Н.Р. Анализ проскальзывания в плезіохронной сети. T-Comm: Телекоммуникации и транспорт, 2016. – Том 10, №2. – С. 19-24.

19. Бирюков Н.Л., Триска Н.Р. Вероятностный анализ передачи информации в плезіохронной сети. – Інфокомунікації – сучасність та майбутнє: матеріали четвертої міжнар. наук.-пр. конф. м. Одеса 30-31 жовт. 2014 р. – Ч.1. – Одеса: ОНАЗ, 2014. – 180 с. – С. 115-119.

20. Бирюков Н.Л., Триска Н.Р. Особенности плезіохронной передачи в сетях NGN и FN. Дев'ята Міжнародна науково-технічна конференція “Проблеми телекомунікацій” (ПТ-2015), 21-24 квітня 2015 р. Матеріали конференції. – ІТС НТУУ “КПІ”. – С.125-127.

21. Бирюков Н.Л., Триска Н.Р., Шварц М.Л. Оценка задержек пакетов с учетом особенностей пакетной передачи. – XII Международная отраслевая научно-техническая конференция “Технологии информационного общества”, 14-15 марта 2018 г. Материалы конференции. – Москва, МТУСИ.

22. Бирюков Н.Л., Кильчицкий Е.В., Шмалий Ю.С., Савчук А.В. Проблемы синхронизации национальной сети связи Украины. – УНДІЗ, Збірник наукових праць. Вип. 1, Київ, 1998. – С.33-36.

23. Бирюков Н.Л., Шмалий Ю.С., Савчук А.В. Синхронизация сети связи Украины. – “Зв'язок”, № 3, 1998. – С.47-50.

24. Бирюков Н.Л., Хиленко В.В., Копийка О.В., Суворова Н.В. Архитектура сетей синхронизации: эволюция представлений о синхронизации сетей. – “Зв'язок”, № 4, 2003. – С.7-12.

25. Бирюков Н.Л., Триска Н.Р. Сети синхронизации: сценарии взаимодействия. – Сети и телекоммуникации, 2005, № 08-09 – С. 38-45.

26. Бирюков Н.Л. Проектирование потенциально устойчивых распределительных сетей тактовой синхронизации. – Электросвязь, 2008, № 10. – С. 57-61.

27. Бирюков М.Л., Лісковський І.О., Федорова Н.В. Методика аналізу стійкості мереж синхронізації. – “Зв'язок”, № 3, 2006. – С. 23-27.

28. Бирюков Н.Л., Лісковський І.О., Федорова Н.В. Алгоритм определения петель в сети синхронизации. – Труды 7-й международной НПК “Современные инф. и электрон. технологии”. – 22-26 мая, 2006, Одесса. – Том.1. – С. 190.

29. Бирюков Н.Л., Триска Н.Р. Использование функции максимальной ошибки временного интервала для состояния цифровых трактов – Зв'язок, № 1, 2004. – С. 28-32.

30. Бирюков М.Л. Оцінювання якості двохстороннього обміну повідомленнями точного часу за функціями відхилення часового інтервалу. – Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ „КПІ” № 1 – 2011. – С. 24-29.

31. N. Biriukov, N. Triska The properties and applications of peak-to-peak time interval error metrics. – Proceedings of Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SINKHROINFO-2017) Conference (Russia, Kazan, IEEE Conference Record № 41975), IEEE Digital Library: INSPEC Accession Number:: 17080281, DOI: 10.1109/SINKHROINFO.2017.7997502.

32. Бирюков Н.Л., Триска Н.Р. Свойства и применения метрик на основе размахов временных интервалов. – Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. – №1-2017. – С.85-91.

33. N. Biriukov, N. Triska, M. Khudyntsev Evaluation of the two-way time stamps exchange in packet network. – 2017 4th International Scientific-Practical Conference “Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T-2017), October 10-13, 2017 Kharkiv, Ukraine (IEEE Conference Record № 42018). Conference Proceedings. – Kharkiv, 2017. – p.342-345.

34. Бирюков Н.Л., Макурин Н.А., Триска Н.Р. Анализ использования двухстороннего протокола для подстройки сигналов тактовой синхронизации по сигналам времени. – “Наукові записки УНДІЗ”, № 4 (16), 2010. – С.5-11.

# **Системи та мережі**



---

**СИСТЕМИ ЗАГОРИЗОНТНОГО ЗВ'ЯЗКУ**

---

Ільченко М.Ю., Кравчук С.О., Кайденко М.М.

---

**OVER-HORIZON SYSTEMS OF COMMUNICATIONS**

---

Ilchenko M.Y., Kravchuk S.O., Kaydenko M.M.

The section presents the scientific and technical principles of constructing new heterogeneous systems of over-horizon communication with the use of reference small-sized stations of tropospheric communication and relay intellectual platforms and artificial formations that will be based on the application of new technologies of cognitive and program-defined radio, digital signal processing, organization of efficient interaction of system, hardware and application protocol levels, and simplification of control process and monitoring of structural elements, increasing their availability and reliability. In particular, the results of the development of a modern portable tropospheric radio relay station in the range 4.4 ... 5.0 GHz as general and special purpose (dual purpose) are presented. The model of path losses on the radio link of the over-horizon tropospheric communication (long-range tropospheric propagation or tropospheric scattering) is developed, which is based on the technique of ray tracing in two variants: simplified with homogeneous layers and complete with combination of blocks of scattering sphere structures in each of the layers. The possibility of using artificial passive formations in the troposphere for the directed reflection of the radio signal of the ground station with the possibility of creating an effective relay radio-line of large length is presented.

У розділі представлені науково-технічні засади побудови нових гетерогенних систем загоризонтного зв'язку із використанням опорних малогабаритних станцій тропосферного зв'язку і ретрансляційних інтелектуальних аероплатформ та штучних утворень, які базуватимуться на застосуванні нових технологій когнітивного і програмно-визначуваного радіо, кооперативної ретрансляції, M2M, цифрової обробки сигналів, організації ефективної взаємодії системного, апаратного та прикладного протокольного рівнів, та спрощення процесу управління і моніторингу структурних елементів, збільшення їх доступності та надійності. Зокрема, наведено результати розробки сучасної вітчизняної портативної тропосферного радіорелейної станції діапазону 4,4...5,0 ГГц як загального, так і спеціального призначення (подвійного призначення). Розроблено модель втрат на радіолінії загоризонтного тропосферного зв'язку (дальнього тропосферного поширення чи тропосферного розсіяння), що базується на техніці трасування променів у двох варіантах: спрощеному з однорідними шарами і повному з комбінуванням блоків структур сфер розсіювання в кожному із шарів. Представлено можливість застосування штучних пасивних утворень в тропосфері для направленою відбивання радіосигналу наземної станції з можливістю створення ефективної ретрансляційної радіолінії великої протяжності.

## 9.1. Загальні положення

Реалізація радіоліній систем загоризонтного зв'язку (СЗЗ) має широке застосування, зокрема у військовій сфері (в стратегічних, оперативних і тактичних ланках керування), спеціальних служб, служб порятунку і надзвичайних ситуацій. Особлива увага серед СЗЗ надається так званим тропосферним радіорелейним станціям (ТРРС), які значно складніші в реалізації ніж радіорелейні системи прямої видимості. Принцип дії таких тропосферних радіоліній зв'язку базується на двох механізмах поширення радіохвиль: на інтервалах більше  $\sim 70$  км – розсіюванні радіохвиль на неоднорідностях тропосфери; на коротких інтервалах - дифракційному поширенні радіохвиль. Основними особливостями такого тропосферного поширення радіохвиль, пов'язаними з фізичною природою цього явища, є дуже велике загасання радіосигналу на ділянці поширення й завмирання сигналу на вході приймача, які носять селективний по частоті характер.

Ранішні системи тропосферного зв'язку мали пропускну здатність радіоканалу достатню для передачі голосу і невеликих потоків даних на великі відстані без проміжних ретрансляторів. Ці системи характеризувались використанням понад потужних підсилювачів потужності, дуже великих антенних дзеркал, які були громіздкими для розгортання та складними для транспортування. Одним із кардинальних рішень нівелювання зазначених недоліків при збереженні необхідної завадостійкості в умовах багатопроблемних завмирань стало створення ефективних малогабаритних ТРРС нового покоління. Однак швидкий розвиток інформаційних мереж вимагає підтримки ТРРС високих значень пропускну здатності в межах 20...100 Мбіт/с при коефіцієнті готовності не менш 0,98, що реалізувати традиційними підходами дуже важко.

Головною перепорою значного поліпшення характеристик ТРРС є значне загасання сигналу при «далекому тропосферному поширенні», втрачається близько 80% потужності, що передається. Кардинально вирішити цю проблему пропонується шляхом використання в умовах непрямой видимості для передачі радіосигналу штучні утворення в тропосфері або множини (сузір'я) аероплатформ-дронів, що виконуватимуть функцію пасивної чи активної ретрансляції сигналу. Причому застосування ретрансляційних вузлів на базі аероплатформ відкриває нові перспективні можливості, зокрема, перерозподіл трафіку по різних напрямках та створення локальних зон покриття систем широкосмугового радіодоступу (із точкою доступу на аероплатформі), формування багаторівневої телекомунікаційної мережі із самоорганізацією, яка на великій протяжності не залежить від наземної інфраструктури. Такі властивості дуже актуальні для забезпечення телекомунікаційними послугами зон стихійного лиха, бойових дій, віддалених великих водних, гірських чи пустельних просторів.

Гетерогенні системи загоризонтного зв'язку, що представляються, будуються на основі малогабаритних станцій тропосферного зв'язку з можливістю роботи в режимах непрямой (тропосферного розсіяння або перевідбиття від штучних утворень в атмосфері) і прямої (з використанням однієї або сузір'я ретрансляючих аероплатформ-дронів) видимості. Аероплатформи, що ретрансляють, складають самоорганізуюче сузір'я (рій) у складі змішаних груп, які включають різні за призначенням безпілотні літаючі апарати (БЛА). Групове узгоджене застосування БЛА може істотно підвищити продуктивність процесів ретрансляції та можливість реалізації багатостанційного широкосмугового радіодоступу. У якості штучних утворень можуть бути задіяні різні пасивні завади.

Залучення до СЗЗ в якості ретранслятора аероплатформ на відміну від супутників дозволяє витримувати низьку затримку при передачі даних та мати невелику енергетику для формування радіотраси значно низьку собівартість системи.

Розробка науково-технічних засад побудови нових гетерогенних систем загоризонтного зв'язку із використанням опорних малогабаритних станцій тропосферного зв'язку і ретрансляційних інтелектуальних аероплатформ та штучних утворень, які базуватимуться на застосуванні нових технологій когнітивного і програмно-визначуваного радіо, кооперативної ретрансляції, М2М, цифрової обробки сигналів, організації ефективної взаємодії системного, апаратного та прикладного протокольного рівнів, та спрощення процесу управління і моніторингу структурних елементів, збільшення їх доступності та надійності.

## 9.2. Малогабаритна тропосферна станція

Малогабаритну ТРРС НТУУ.464465.001 створено по блочно-модульному принципу на базі єдиних уніфікованих конструкцій, розроблених з використанням сучасної мікроелектронної елементної бази та програмно-визначуваних систем.

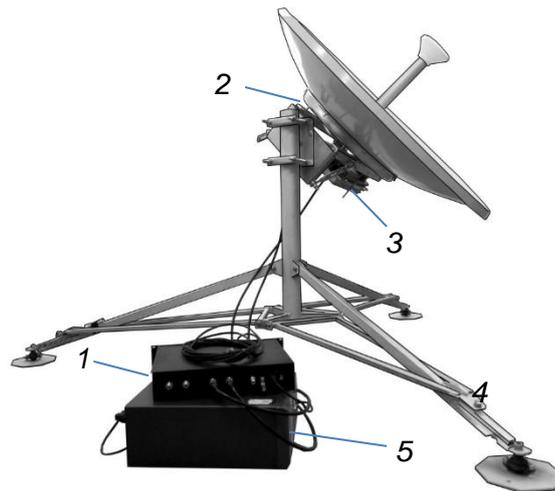
Основними складовими станції є наступні (рис. 9.1): антенно-поворотний пристрій (АПП); блок приймально-передавальний (БПП); модемний пристрій (МП); блок живлення; кабелі (високочастотний, живлення і сигналізації); пристрій контролю та управління дистанційний (мобільний гаджет).

Малогабаритна станція має наступні технічні характеристики:

1. Діапазон робочих частот 4,4 ... 5,0 ГГц.
2. Максимальна швидкість приймання/передачі цифрового інформаційного потоку до 8 Мбіт/с.
3. Інформаційний інтерфейс 10/100/1000 Base-T, наявні порти з можливістю інкапсуляції зовнішнього потоку конвертора E1 (G.703) в Ethernet.
4. Протокол та інтерфейс передачі даних IP (TCP/IP), Ethernet.
5. Дальність радіолінії при коефіцієнті готовності не гірше 0,98 і коефіцієнті бітових помилок не гірше  $10^{-6}$  на швидкості передачі цифрового потоку:

- 512 кбіт/с складає до 110 км,
- 2,048 Мбіт/с - до 85 км.
- 6. Час розгортання і входження в зв'язок ТРРС складає не більше 15 хв.
- 7. Автоматичне дискретне (з кроком 1 дБ) регулювання вихідної потужності - не менш 30 дБ.
- 8. Вбудована система функціонального контролю без випромінювання в ефір.
- 10. Управління ТРРС здійснюватися дистанційно на віддаленні не більше 100 м.

**Рис. 9.1.**  
 Малогабаритна ТРРС:  
 1 - модемний пристрій;  
 2 - антенно-поворотний пристрій;  
 3 - блок приймально-передавальний;  
 4 - бухта кабелів;  
 5 - блок живлення



Умови роботи ТРРС істотно відрізняються від умов роботи радіорелейної станції прямої видимості. В тропосферному каналі виникають складні завмирання (частотно-селективні, швидкі та повільні завмирання), які носять добовий та сезонний характер. Для компенсації завад, що виникають, додатково до традиційних методів боротьби з ними (висока потужність передавача та використання каналних еквалайзерів) в даній ТРРС застосовується багаторівнева адаптація до зміни умов роботи станції.

В станції використовується чотири рівні адаптації: частотна, модуляції і кодування, просторова (в двоканальному режимі роботи з просторовим рознесенням) та на МАС-рівні.

Завданням частотної адаптації є вибір оптимальної з точки зору пропускної здатності смуги частот в діапазоні робочих частот станції в умовах наявності тривалих частотно-селективних завмирань (тривалість завмирань перевищує тривалість кількох кадрів) і завад (структурованих і неструктурованих). Використовуються два етапи адаптації: початковий вибір частоти і адаптація в робочому режимі станції.

Оцінка стану каналу зв'язку здійснюється за допомогою аналізу амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) наскрізного тракту передачі (груба оцінка) в обраній смузі частот максимальної ширини. При грубій оцінці вибирається найменш піддана тривалим частотно-селективним завмиранням смуга частот, яка може бути менше максимальної. Груба оцінка здійснюється за допомогою сканування на етапі початкової ініціалізації і при необхідності вибору нової

смуги частот в робочому режимі. Для точної оцінки додатково до аналізу АЧХ здійснюється аналіз енергетичних характеристик і завадостійкості каналу для базового профілю передачі. Вибирається смуга з максимальним енергетичним запасом і максимальною пропускну здатністю. Частотна адаптація в робочому режимі здійснюється за наявності більш ніж одного каналу, який може працювати як незалежний.

Алгоритм початкової ініціалізації передбачає сканування діапазону частот кадрами мінімальної довжини, які складаються з трьох кадрів преамбули, один з яких використовується для синхронізації, а по двом іншим здійснюється оцінка АЧХ тракту, після передачі кадру сканування здійснюється пауза довжиною один кадр для переходу на іншу несучу частоту. Смуга частот, яка використовується при початковому скануванні 7 МГц. За результатами сканування визначаються смуги частот, в яких завадження є мінімальними. В визначених смугах частот максимально можливої ширини здійснюється повторне сканування кадрами мінімальної довжини (1 мс), які включають преамбулу і пакети псевдовипадкових даних для оцінки енергетичних характеристик (відношення сигнал/шум SNR) та завадостійкості. Для сканування використовується профіль з BPSK (Binary Phase-Shift Keying) модуляцією та максимальною коригуючою спроможністю завадостійкого коду. Завадостійкість визначається за показниками FEC (Forward Error Correction) декодера. Оптимальною вважається смуга з максимальним SNR та мінімальним BER. При початковій ініціалізації одночасно з вибором оптимальної смуги виключаються смуги частот, в яких присутні сигнали від інших радіозасобів, в тому числі інших станцій тропосферного зв'язку.

Алгоритм частотної адаптації в режимі основної роботи відрізняється від режиму початкової ініціалізації тим, що оцінка АЧХ всього діапазону частот не здійснюється, виконується оцінка SNR та BER з використанням кадрів базової тривалості (5 мс). Вибір необхідної смуги робочих частот здійснюється за результатами роботи алгоритму початкової ініціалізації. Оскільки завадження в тропосферному каналі носять в тому числі і добовий характер інформація про АЧХ в діапазоні робочих частот оновлюється з періодичністю не менше ніж 6 годин.

Перевагою застосування в станції режиму частотної адаптації і можливості встановлювати крок сітки частот з точністю менше 1 кГц дозволяє працювати без попереднього частотного планування і «жорсткого» закріплення сітки робочих частот.

Адаптивна модуляція та кодування (АМК) здійснюється тільки після частотної адаптації; оцінки стану каналу, отримані при АМК, використовуються в якості необхідних для точної частотної адаптації. Адаптивна модуляція та кодування відносяться до методів, в яких одночасно можуть змінюватись декілька параметрів каналу, при цьому одночасно змінюються як параметри модуляції, так і параметри завадостійкого кодування, а також використовується адаптація по потужності.

В якості показника стану каналу для адаптивної модуляції та кодування використовується середнє співвідношення сигнал/шум на інтервалі одного кадру даних та його статистичні характеристики, що вимірюється приймачем. При цьому параметри фізичного рівня (модуляція та завадостійке кодування) групуються в профілі передачі, кожен з яких визначає пропускну спроможність каналу та захищеність. Використовується п'ять профілів передачі один з модуляцією BPSK, швидкістю кодування  $\frac{1}{2}$  та розширенням спектру кодом Баркера, чотири інших використовують QPSK модуляцію зі швидкістю кодування приблизно  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{2}{3}$ ,  $\frac{3}{4}$ ,  $\frac{7}{8}$ .

Послідовність дій при використанні SNR наступна:

- в приймачі здійснюється оцінка інформації про стан каналу шляхом вимірювання SNR на інтервалі вікна оцінювання, який складає довжину кадру;
- інформація про SNR, яка враховує всі види спотворень, перетворюється в BER інформацію для кожного потенціального режиму припускаючи, що канал був АБГШ;
- по визначеному BER обирається режим, який буде оптимальним у відповідності до вибраного критерію (максимальна пропускну спроможність, максимальна достовірність передачі, максимальна енергетична ефективність)
- інформація про обраний режим передається на передавач;
- передавач змінює профіль на оптимальний.

В якості алгоритму для адаптивної модуляції та кодування використовується оригінальний нелінійний модифікований алгоритм на основі нечіткого висновку. Використання цього алгоритму дозволило збільшити пропускну спроможність станції в середньому на 15-20% у порівнянні з використанням лінійного алгоритму адаптивної модуляції та кодування.

Просторова адаптація полягає в виборі оптимальних параметрів налаштування антенної системи (азимут та кут місця), вона можлива тільки за наявності двоантенної системи з незалежними антенами і автоматичним регулюванням по кутам, в протилежному випадку вона полягає тільки в початковому виборі кутів. Просторова адаптація здійснюється незалежно від інших видів адаптації шляхом використання кожного просторового каналу як незалежного, при цьому загальна пропускну спроможність станції зростає максимально в два рази.

Адаптація на MAC рівні здійснюється незалежно від інших видів адаптації та полягає в повторній передачі неправильно прийнятого пакету даних. Максимальна кількість повторних передач пакету обмежується максимально допустимою затримкою пакету, яка є регульованим параметром і не перевищує 500 мс.

**Приймально-передавальний блок.** Потреба у створенні компактного малогабаритного ППБ, який водночас повинен бути досить потужним (мати високі рівні потужності на випромінювання), привела до максимальної інтеграції всіх функціональних вузлів ППБ в єдину технологічну конструкцію з використанням найсучаснішої елементної бази і новітніх матеріалів. Така

конструкція ППБ складається з двох функціонально пов'язаних між собою модулів: базового модуля дуплексора активного (ДПА) та змінного модуля підвищувальних і понижувальних конверторів (ППК) із системою керування ППБ.

Основні характеристики ППБ наступні:

- 1 Діапазон робочих частот, МГц, по піддіапазонам: нижній – 4435...4555; верхній – 4705...4825.
- 2 Максимальна вихідна потужність передавача на антенному фланці, Вт - 110.
- 3 Рівень вихідного сигналу ПЧ  $L$ -діапазону на прийом, мВт - 0,2...0,5.
- 4 Глибина автоматичного регулювання підсилення приймача, дБ – 35.
- 5 Відносний рівень побічних складових немодульованих спектрів вхідного сигналу на передачу та вихідного сигналу на прийом, дБн – мінус 67.
- 6 Коефіцієнт шуму приймального тракту відносно антенного фланцю, дБ – 3,2.

Зовнішній вигляд ППБ наведено на рис. 9.2.



Рис. 9.2. Зовнішній вигляд ППБ

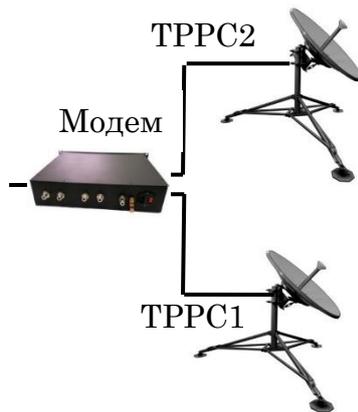


Рис. 9.3. Зовнішній вигляд модемного пристрою (з права на ліво: роз'єм типу WTY0122 з кнопкою «Живлення 220В», DN 3 - управління,  $N$  типу - сигнал ПЧ RX1,  $N$  типу - сигнал ПЧ TX1,  $N$  типу - сигнал ПЧ RX2,  $N$  типу - сигнал ПЧ TX2)

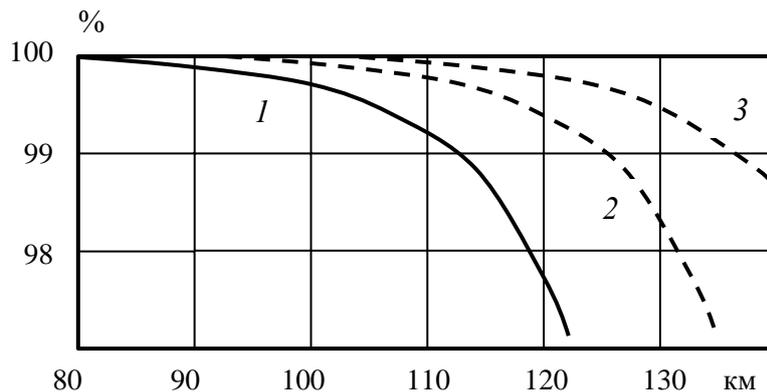
**Модемний пристрій.** Модемний пристрій забезпечує модуляцію, демодуляцію, формування інформаційних, голосових і службових потоків даних по радіо- і проводному інтерфейсах, багаторівневу адаптацію станції до постійно змінюваних умов роботи, синхронізацію, вибір режимів роботи станції, управління станцією та її окремими блоками, моніторинг стану станції та ін.

Модемний пристрій представляє собою повнофункціональний двоканальний модемний модуль, який будується на базі передових технологій програмованого керування радіо SDR (Software defined Radio) спільно з технологією системи на чіпі SoC (System-on-a-Chip). Даний варіант модемного пристрою орієнтований на використання в станціях не тільки при одноканальному режимі роботи, а й при двоканальному режимі з поляризаційним чи просторовим рознесенням. Зовнішній вигляд модемного пристрою представлено на рис. 9.3.

Спільне використання технологій SDR і SoC при створенні модемного обладнання тропосферної станції забезпечило наступні переваги:



**Рис. 9.4.**  
Конфігурація ТРРС  
для рознесеного  
прийому/передачі

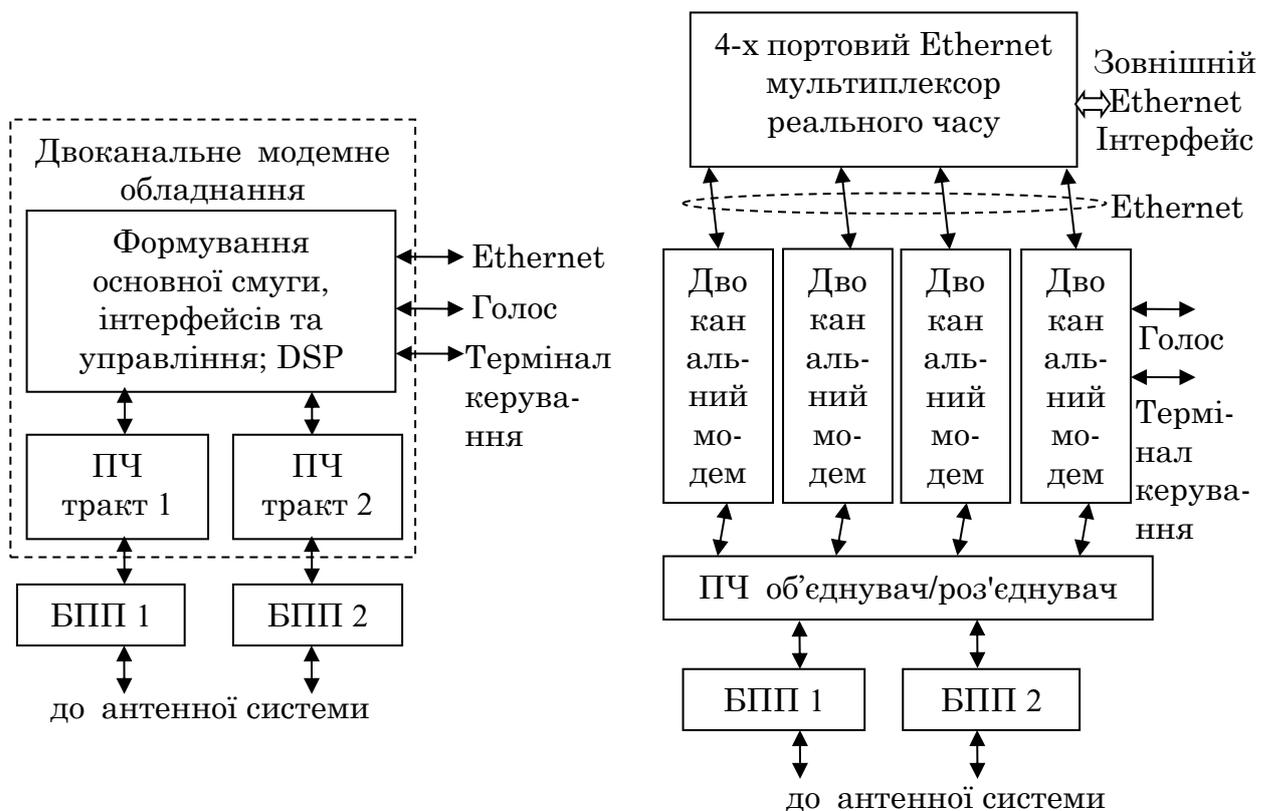


**Рис. 9.5.** Коефіцієнт готовності зв'язку (128 кбіт/с):  
1 – реалізована система; 2 – здвоєна антенна  
реалізована система; 3 – діаметр антен системи (п.  
2) збільшено до 2 м

- можливість подальшої модернізації без зміни апаратної платформи шляхом використання декількох програмних профілів для завантаження конфігурації станції в залежності від обраного режиму роботи;
- використання високої проміжної частоти (ПЧ) у порівнянні з традиційними рішеннями, формування сітки робочих частот та вибір робочої частоти безпосередньо в модемі, а не в блоці приймально-передавальному, що дозволяє підвищити швидкість переходу з частоти на частоту при застосуванні режиму частотної адаптації;
- фільтрація з використанням комбінації програмно реконфігурованих цифрових та аналогових фільтрів основної селекції, що дозволило створити модемний пристрій, який може використовуватись в широкому діапазоні частот, який обмежуються лише частото залежними узгоджувальними елементами (максимальний діапазон від 70 МГц до 6 ГГц);
- компромісний розподіл ресурсів для реалізації високошвидкісних і низькошвидкісних процесів цифрової обробки сигналів, алгоритмів прийняття рішення і алгоритмів керування між процесорними ядрами і FPGA;
- реалізація режиму адаптації по частоті (вибір несучої частоти та смуги пропускання) з швидкою зміною частоти несучої і смуги пропускання за рахунок використання цифрових синтезаторів частоти і набору програмно керованих аналогових і цифрових фільтрів основної селекції з заданими профілями налаштування коефіцієнтів;
- реалізація режиму адаптивної модуляції і кодування з швидкою зміною профілю, реалізованого на FPGA, і алгоритму прийняття рішення, реалізованого на процесорі типу ARM;
- реалізація MAC-рівнів проводового і безпроводового інтерфейсів були реалізовані на одному високопродуктивному кристалі, що дозволило забезпечити необхідну швидкодію;

- протоколи роботи модемного обладнання та станції були програмно реалізовані на мовах високого рівня, що дозволили скоротити терміни розробки обладнання;
- управління роботою модемного обладнання та станції здійснюється з використанням єдиної операційної системи на базі Linux.

Система ТРРС може конфігуруватись для рознесеного прийому (передачі) або просторово-часового мультиплексування МІМО, як представлено на рис. 9.4. Коефіцієнт готовності зв'язку при передачі даних зі швидкістю 128 кбіт/с в залежності від відстані між ТРРС представлено на рис. 9.5. Варіанти конфігурації обладнання ТРРС (різні варіанти комплектації станції) представлено на рис. 9.6. Схема реалізації збільшення швидкості передачі системи за рахунок незалежного мультиплексування потоків цифрових даних наведено на рис. 9.7.

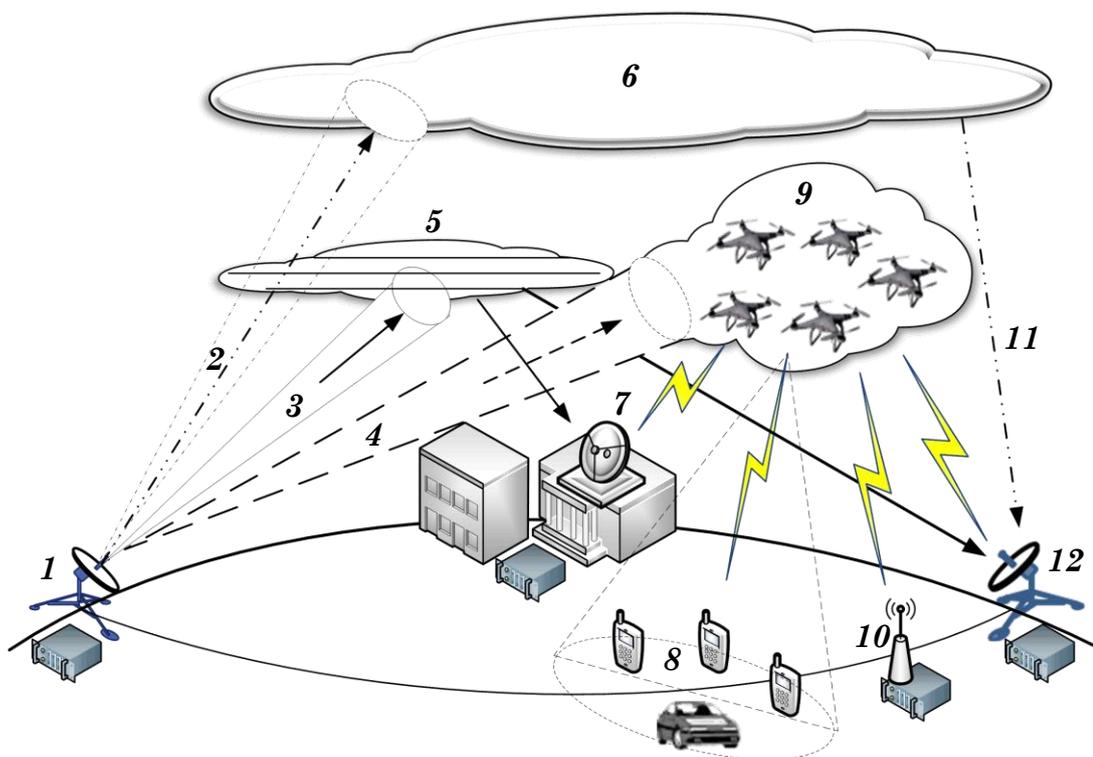


**Рис. 9.6.** Формування системи з рознесенням (рис. 9.4) **Рис. 9.7.** Схема реалізації збільшення швидкості передачі системи

### 9.3. Архітектура гетерогенних систем загоризонтного зв'язку із використанням опорних малогабаритних станцій тропосферного зв'язку і ретрансляційних інтелектуальних аероплатформ або штучних утворень

Запропоновані системи загоризонтного зв'язку будуються на основі ряду (від двох і більше) малогабаритних опорних станцій тропосферного зв'язку з можливістю роботи в режимах непрямой (тропосферного розсіяння або

перевідбиття від штучних утворень в атмосфері) і прямої (з використанням однієї або сузір'я ретранслюючих аероплатформ-дронів) видимості, з підтримкою декількох частотних діапазонів та зовнішніх мережних інтерфейсів. Аероплатформи, що ретранслюють, складають самоорганізуюче сузір'я (рій) у складі змішаних груп, які включають різні за призначенням (зв'язок, моніторинг, розвідка, пошук об'єктів, аерофотозйомка тощо) БЛА, або в складі автономно функціонуючих, але узгоджено керованих БЛА. Групове узгоджене застосування БЛА може істотно підвищити ефективність процесів ретрансляції та можливість реалізації багатостанційного широкосмугового радіодоступу в межах дії такого сузір'я, застосовуючи при цьому технології кооперативної ретрансляції і міжмашинної взаємодії M2M. У якості штучних утворень можуть бути задіяні різні пасивні завади, що є результатом розсіювання електромагнітних хвиль фольговими, дипольними, кутовими і лінзовими радіовідбивачами, антенними решітками, що відбивають, іонізованими середовищами і аерозольними утвореннями.



**Рис. 9.8.** Архітектура комбінованої гетерогенної системи загоризонтного зв'язку: 1, 12 – модернізована опорна ТРРС; 2, 3, 4 – радіопроміні в напрямках тропосферного розсіювання, штучних атмосферних утворень і рою дронів; 5 – шари штучних утворень в атмосфері; 6 – шари атмосфери, де можливе утворення об'єму тропосферного розсіювання; 7, 10 – окремі радіозасоби; 8 – радіотермінали мобільних користувачів; 9 – шар рою дронів; 11 – радіопромінь, утворений в результаті дальнього тропосферного поширення

Така СЗЗ може працювати в режимі «точка-точка» на відстанях від десятків до декількох тисяч км, або в суміщених режимах «точка-багатоточка» і «багатоточка-багатоточка». В останніх режимах за допомогою ретрансляційних вузлів, що знаходяться в повітрі, можуть формуватися окремі зони спеціального

користувацького радіодоступу із забезпеченням просторової, частотної та часової роздільності. У цьому випадку СЗЗ може забезпечити подовження, або формування віддаленої зони покриття як частини мережі стільникового мобільного зв'язку чи широкосмугового доступу одного оператора. Наприклад, в умовах необхідності надання послуг зв'язку на віддаленому острові чи континенті (дослідницькі станції в Антарктиді), або в умовах стихійного лиха, антитерористичних операцій чи бойових зіткнень.

Архітектура гетерогенних систем загоризонтного зв'язку із використанням опорних малогабаритних станцій тропосферного зв'язку і ретрансляційних інтелектуальних аероплатформ та штучних утворень представлено на рис. 9.8.

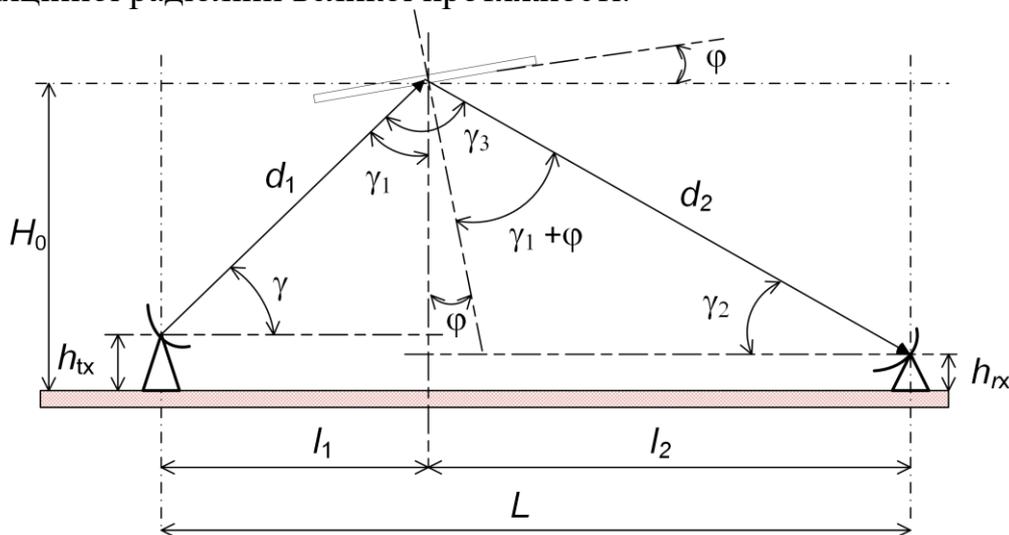
## 9.4. Моделювання втрат на радіолінії загоризонтного тропосферного зв'язку

Хоча основи теорії тропосферного розсіювання були розроблені ще в середині минулого сторіччя, однак розвиток систем загоризонтного зв'язку потребує постійних уточнень відомих теоретичних положень відповідно до нових даних про природу тропосферного розсіювання, атмосферних неоднорідностей, можливостей нових методів розрахунку та оцінювання поширення радіохвиль [9]. Якщо раніше для прогнозування поширення радіохвиль при тропосферному розсіянні використовувались виключно статистичні методи накопичення і аналізу експериментальних даних та великомасштабні інтегральні моделі об'єму тропосферного розсіювання, то на даний час все більше поширення отримали детерміновані методи, особливо на основі техніки трасування променів Ray-tracing [10]-[13]. В даній техніці промені геометрично простежуються від передавача до приймача із врахуванням взаємодії з оточуючими структурами (відбиття, дифракція або передача). Характеристики поширення радіохвиль прогнозуються на основі інформації про промені, такі як напруженість електричного поля, довжина шляху, кути падіння і відбиття. Тут існує взаємозв'язок між точністю прогнозування та необхідним часом обчислення. Щоб отримати високий рівень точності прогнозування, необхідно простежити трасування променів більш високого порядку, які зазнають безліч взаємодій, при цьому беручи до уваги якомога більше оточуючих структур. Це збільшує кількість проміжних процесів та часу обчислення. Головною проблемою даної техніки при відстеженні променів є прискорення процесу обчислення.

Так в [14]-[17] із використанням техніки трасування променів було розроблено аналітичну модель кільця розсіювання RSM (ring scatter model), яка дозволяє оцінити кореляцію завмирань у тропосферних системах в залежності від просторового, частотного і кутового рознесення. Дана модель може використовувати результати реальних вимірювань кількості води і пару, враховувати коливання повітряної турбулентності. Крім того, було порівняно вплив методів рознесення, які підходять для тропосферних комунікацій, і

різноманітні просторово-частотні техніки шляхом отримання їх розподілу досяжних швидкостей передачі даних. Однак модель використовує цільний інтегральний об'єм розсіювання з поперечним перерізом диференційного розсіювання, що визначається за допомогою релеєвського розсіювання, спектру Колмогорова (варіації індексу рефракції) та заданих по даному об'єму розподілів неоднорідностей в атмосфері. Все це значно обмежує використання моделі, особливо для вивчення впливу електрофізичних параметрів та штучних утворень на тропосферне розсіювання і потребує розробки нової більш мало масштабної моделі тропосферного розсіяння на основі техніки трасування променів з урахуванням розсіювання радіохвиль на окремих неоднорідностях та формуваннях атмосфери.

Тому розроблена модель радіолінії загоризонтного тропосферного зв'язку для дослідження можливості регулювання (покращення) затухання на такій трасі шляхом зміни електрофізичних характеристик оточуючого середовища, зокрема атмосферних турбулентностей, або задіяння штучних утворень в атмосфері. На основі розробленої моделі провести дослідження специфічних закономірностей тропосферного розсіяння на неоднорідностях і штучних утвореннях в атмосфері, електричні параметри яких можуть регулюватись, та визначити межі можливого застосування штучних пасивних завод в тропосфері для направленоного відбивання радіосигналу наземної станції з можливістю створення ефективної ретрансляційної радіолінії великої протяжності.



**Рис. 9.9.** Геометрична модель радіолінії з ретрансляцією через плоску поверхню:  $\gamma$  – кут місця осі головного пелюстка діаграми спрямованості антени станції, що передає;  $\gamma_2$  – кут місця осі головного пелюстка діаграми спрямованості антени станції, що приймає;  $\gamma_3$  – кут між похилими відстанями  $d_1$  і  $d_2$ ;  $\phi$  – кут відхилення між перпендикуляром до площі відбиття і перпендикуляром проєкції висотної точки на поверх  $h_{tx}$  і  $h_{rx}$  – положення над поверхнею Землі антени станції, що передає і приймає, відповідно;  $l_1$  і  $l_2$  – відстані між проєкцією на поверхню Землі висотної точки відбиття та станціями, що передає і приймає, відповідно;  $d_1$  і  $d_2$  – похилі відстані між антеною станції, що передає, та висотною точкою відбиття і між антеною станції, що приймає, та висотною точкою відбиття, відповідно;  $L$  – загальна відстань між наземними станціями;  $H_0$  – висота положення висотної точки відбиття відносно поверхні Землі

Спочатку представимо найпростішу геометричну модель радіолінії з ретрансляцією через плоску поверхню, що використовується для спрощених уточнюючих розрахунків і представлена на рис. 9.9.

Втрати на поширення радіохвиль із ретрансляцією через пасивну поверхню площею  $Area$  складають:  $path\_loss = pl_{fs} - G_{passiv}$ , де  $pl_{fs} = 20 \lg(4\pi \times (d_1 + d_2) / \lambda_0)$  – втрати у вільному просторі;  $\lambda_0$  - довжина хвилі у вільному просторі;  $G_{passiv} = 20 \lg(4\pi \times Area \times \cos(\alpha) \times KPD / \lambda_0 / \lambda_0)$  – коефіцієнт передачі пасивного ретранслятора площею  $Area$  і к.п.д. використання поверхні ретранслятора  $KPD$ ;  $\alpha = \gamma_3 / 2$  – половина кута між напрямками на ретранслятор і кінцеву станцію. Геометричні співвідношення між параметрами, що представлені на рис. 9.9 наступні:

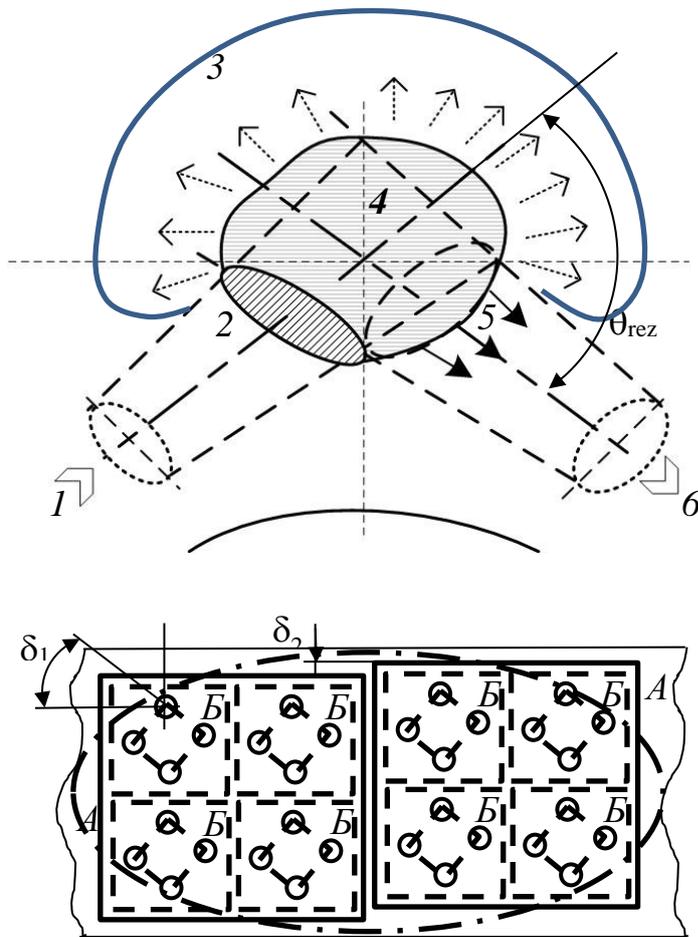
$$\begin{aligned} d_1 &= (H_0 - h_{tx}) / \cos(\gamma); & \gamma_1 &= \pi/2 - \gamma; \\ d_2 &= (l_2 \times l_2 + (H_0 - h_{rx}) \times (H_0 - h_{rx}))^{(1/2)}; & \gamma_2 &= \arctg((H_0 - h_{rx}) / l_2); \\ l_1 &= (H_0 - h_{tx}) / \tg(\gamma); & \gamma_3 &= \gamma_1 + \pi/2 - \gamma_2; \\ l_2 &= L - l_1; & \varphi &= \gamma_3 / 2 - \gamma_1. \end{aligned}$$

У запропонованій моделі об'єм тропосферного розсіювання представляється у вигляді багат шарової структури, обмеженої розмірами атмосферної турбулентності чи неоднорідності. Відповідно до моделювання шарів мають місце два варіанти представлення поширення радіохвиль через трасу тропосферного розсіювання: 1) спрощений - кожен окремий шар є однорідним з єдиними електрофізичними параметрами; 2) повний - кожен шар є складною структурою блоків сферичних розсіювачів з різними електрофізичними параметрами.

При спрощеному варіанті моделі із умов Вульфа-Брегга, які спостерігаються при дифракції рентгенівських променів в кристалічних тілах, при заданих куті розсіяння тропосферної траси  $\theta_{rez}$  (тобто траси певної довжини) і довжині хвилі  $\lambda$  ефективно розсіювання в напрямку на пункт прийому створюється тільки тими розсіювачами, які віддалені один від одного по вертикалі на відстань  $L = \lambda / 2 \sin(\theta_{rez} / 2)$ . Відстань  $L$  між паралельними ідеалізованими шарами атмосфери, де розміщуються джерела розсіювання, рівна розміру атмосферної турбулентності чи неоднорідності. Вона є просторовим періодом повторення неоднорідностей в тропосфері. В турбулентній атмосфері завихрення різних розмірів. Додатковий фазовий зсув між такими шарами буде  $\Delta\varphi = 4\pi L \sin(\theta_{rez} / 2) / \lambda$ .

При варіанті повної моделі провадиться повне трасування усіх променів, що можуть потрапити до площини 5 (рис. 9.10). Кожен шар неоднорідностей атмосфери представляється у вигляді незалежних блочних структур ( $A$  і  $B$ ) із сферичними розсіювачами [18], електрофізичні параметри яких описуються комплексною діелектричною проникністю  $\epsilon$  і провідністю  $\sigma$  (рис. 9.11). Блочні структури можуть бути зсунуті між собою на  $\delta_2$ , а сферичні розсіювачі формують квадратурну решітку із зсувом  $\delta_1$ . Формування дерева трасування відбувається на декількох підрівнях відповідно до самих структур  $A$  і  $B$  – великомасштабні і

мало масштабні. Техніка трасування променів, що використовується, аналогічна [19-20].



**Рис. 9.10.** Представлення об'єму тропосферного розсіювання: 1 – діаграма спрямованості від антени передавача; 2 – площа перетину діаграми спрямованості антени передавача із об'ємом розсіювання; 3 – промені, що розсіюються в напрямках не співпадаючих з діаграмою спрямованості приймача; 4 – об'єм розсіювання; 5 – площа перетину діаграми спрямованості антени приймача із об'ємом розсіювання; 6 – діаграма спрямованості антени приймача

**Рис. 9.11.** Представлення одного шару неоднорідностей атмосфери у вигляді незалежних блочних структур із сферичними розсіювачами

Обмежувачими умовами для проведення подальшого трасування променю в об'ємі розсіювання (тобто його виключення із розрахунків) є:

- миттєве значення потужності електромагнітної хвилі в точці приходу променю  $P_m$  з урахуванням значення втрат у вільному просторі  $g_m$ , які розраховані на відстані від точки приходу променю до положення антени приймача з коефіцієнтом підсилення  $G_{прм}$  у напрямку до точки приходу променю, менше чутливості приймача наземної станції  $P_ч$ , тобто  $P_m G_{прм} / g_m < P_ч$ ;
- додатковий фазовий зсув променю перевищує граничний фазовий зсув, що відповідає когерентній смузі пропускання каналу прийому;
- напрям (вектор) променю на граничних контурах об'єму має напрям, відмінний від напрямку до діаграми спрямованості антени приймача наземної станції (дана умова може відключатись).

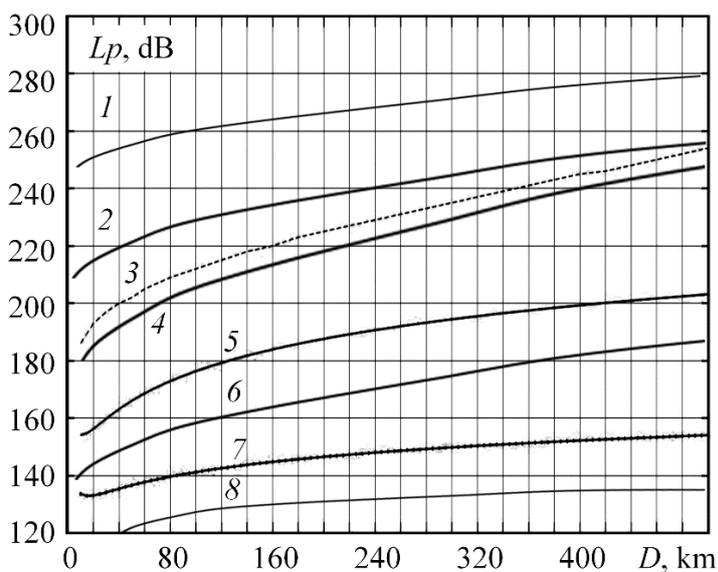
Потрібно відмітити наступне.

Будь-яка модель, що описує поширення через тропосферу Землі, вимагатиме певного опису стану середовища розповсюдження. Найпростіша модель поширення може просто взяти на себе глобальну середню атмосферу (наприклад, коефіцієнт земної кулі  $4/3$  для тропосферного поширення). Але глобальні та часові варіації можуть бути великими, і будь-яка модель, яка має на меті

враховувати цю мінливість, буде потрібна для представлення мінливості метеорологічних даних.

Організація МСЕ-R розробила цілий ряд методів для цього. Глобальна мінливість, як правило, описується картами, а для тропосфери основними посиланнями МСЕ-R є Рекомендація Р.453 для ефектів індексу переломлення та Рекомендація Р.837 для впливу дощу. Цифрові версії цих карт доступні на веб-сайті 3 дослідницької групи МСЕ-R. Рекомендація Р.453 надає мапи різної градієнтної та поточної статистики, яка була отримана з вимірювань радіозондів та моделей численних погодних умов. Наведено деякі дані про сезонні відмінності та мінливість часу градієнтів поверхневого шару.

У деяких випадках метод використовує комбінацію карт та моделювання для надання необхідних даних. Наприклад, розрахунок погіршення дощу в МСЕ-R Р.837 приймає три параметри, які географічно визначаються за допомогою мап, і використовує їх у формулах, що визначають часову залежність ослаблення дощу. В інших випадках була знайдена проста формула, достатня для вираження географічної мінливості метеорологічного параметра.



**Рис. 9.12.** Залежність медіанних втрат на поширення радіохвиль  $L_p$  від відстані між наземними станціями  $D$ :

1 - модель повного варіанту із введенням в  $\epsilon$  сфер уявної складової  $\epsilon'' = 0,035$ ; 2 - модель спрощеного варіанту; 3 - тропосферного розсіювання опорна; 4 - модель повного варіанту; 5 - модель повного варіанту із розрідженням об'єму розсіювання в перших трьох його шарах (в блоці А тільки один блок Б з пропорційним масштабуванням положення сфер); 6 - модель повного варіанту із збільшенням  $\epsilon$  сфер; 7 - втрати на поширення у вільному просторі довжиною  $2d$ ; 8 - модель повного варіанту із введенням в сфери провідності  $\sigma = 10^{-3}$  S/m (пари води зі смогом) площею  $10 \text{ м}^2$

Розрахунки проводились для радіотраси з наступними характеристиками: висота над рівнем Землі нижньої точки об'єму розсіювання (появи турбулентності та неоднорідності) становить 8 км, відстань від наземних станцій до нижньої точки об'єму розсіювання однакова як і їх кути місця (відстань по діагоналі до точки становить  $d = d_1 = d_2$ ), робоча частота радіохвиль 4,7 ГГц, висоти розташування антен станцій над поверхнею Землі 5 м, діаметр дзеркал параболічних антен 1,8 м. Прийняті модель плоскої поверхні Землі, умови

стандартної атмосфери, атмосферні турбулентності середньо-європейських широт літнього періоду (розміри турбулентності до 500 м), кути нахилу шарової структури об'єму розсіювання по відношенню до площини горизонту змінювались до 5 градусів. Для сфер розсіювання у якості матеріалу прийнята вода, а розподіл кількості крапель на кубічний метр повітря визначався за гамма-розподілом їх розмірів.

Розрахунки опорних медіанних втрат на трасі тропосферного розсіювання проводились згідно [9]. Опорні втрати використовувались для проведення порівняльного аналізу відповідності результатів, отриманих запропонованою моделлю, з даним опорних втрат. Також по даним опорних втрат проводилось калібрування моделі, бо вона має певні складові імітаційного моделювання (підбір  $\delta_1$ ,  $\delta_2$ ,  $\varepsilon$ , розмір сфер, слідування блоків  $A$  і  $B$ , висота і форма турбулентності, необхідна кількість гілок дерева трасування променів, обмеження ітерацій в шарі неоднорідностей атмосфери та кути нахилу такого шару до горизонтальної площини).

Результати моделювання при використанні запропонованої моделі втрат на радіотрасі наведено на рис. 9.12. Отримані результати свідчать про адекватність запропонованої моделі реальним експериментально отриманим втратам при тропосферному розсіянні (криві 2, 3, 4). Введення додаткового затухання  $\varepsilon''$  до сфер розсіяння зумовлює практично лінійне збільшення втрат тропосферного розсіяння без зміни нахилу кривої втрат (крива 1). Зростання дійсної частини  $\varepsilon$  веде до зменшення втрат (крива б), але до певного значення  $\varepsilon_{lim}$ , після якого втрати починають досить швидко зростати. Величина  $\varepsilon_{lim}$  залежить від багатьох факторів, наприклад усіх кутів нахилу структур сфер і шарів, кутів місці антен наземних станцій, довжини і висоти турбулентності. Великий вплив на втрати тропосферного розсіювання надає комбінування блоків  $A$  і  $B$  з пропорційним масштабуванням положення сфер (особливо їх нахилом) (крива 5). Таке комбінування може змоделювати практично будь-яку атмосферну турбулентність. Введення в сфери провідності різко знижує втрати на радіотрасі (крива 8), причому чим більша провідність, тим менше шарів об'єму розсіювання приймає участь у формування радіотраси. Це зумовлюється тим, що нижні шари практично екранують верхні, досягаючи ефект пасивної ретрансляції від площини, що має провідність. Практично тут моделюється процес відбиття від штучних відбивачів: диполі з алюмінієвої фольги; кутові відбивачі, що складається із взаємно перпендикулярних граней, розміри яких значно перевищують довжину падаючої радіохвилі; лінзи Люнеберга, що представляють собою діелектричний шар зі змінним коефіцієнтом заломлення; антенна решітка Ван-Атта.

## 9.5. Висновки

Представлені науково-технічні засади побудови нових гетерогенних систем загоризонтного зв'язку із використанням опорних малогабаритних станцій

тропосферного зв'язку і ретрансляційних інтелектуальних аероплатформ та штучних утворень, які базуватимуться на застосуванні нових технологій когнітивного і програмно-визначуваного радіо, кооперативної ретрансляції, M2M, цифрової обробки сигналів, організації ефективної взаємодії системного, апаратного та прикладного протокольного рівнів, та спрощення процесу управління і моніторингу структурних елементів, збільшення їх доступності та надійності.

Зокрема, наведено результати розробки сучасної вітчизняної портативної тропосферного радіорелейної станції діапазону 4,4...5,0 ГГц як загального, так і спеціального призначення (подвійного призначення). Станція відрізняється низьким енергоспоживанням, компактними габаритами і невеликою масою завдяки використанню новітньої елементної бази мікроелектроніки в надзвичайно високочастотному діапазоні, сучасних радіотехнологій формування та передачі сигналу через тропосферний канал.

Для компенсації перешкод, що виникають в даній ТРРС, застосована багаторівнева адаптація до зміни зовнішніх умов роботи станції. При цьому використовуються чотири рівні адаптації: частотна, модуляції і кодування, просторова і на MAC-рівні. Це дозволяє в радіоканалі досягати максимальної швидкості прийому / передачі цифрового інформаційного потоку до 8 Мбіт / с (протокол і інтерфейс передачі даних - IP (TCP / IP) і Ethernet).

Спільне використання технологій SDR і SoC при створенні модемного обладнання тропосферної станції забезпечує можливість подальшої модернізації станції без зміни апаратної платформи шляхом використання декількох програмних профілів для завантаження конфігурації станції в залежності від обраного режиму роботи.

Розроблено модель втрат на радіолінії загоризонтного тропосферного зв'язку (дальнього тропосферного поширення чи тропосферного розсіяння), що базується на техніці трасування променів у двох варіантах: спрощеному з однорідними шарами і повному з комбінуванням блоків структур сфер розсіювання в кожному із шарів.

Проведено дослідження можливості покращення затухання на трасі тропосферного розсіювання шляхом регулювання зміни електрофізичних параметрів неоднорідностей і штучних утворень в атмосфері.

Представлено можливість застосування штучних пасивних утворень в тропосфері для направленої відбивання радіосигналу наземної станції з можливістю створення ефективної ретрансляційної радіолінії великої протяжності.

Збіжність отриманих результатів проведеного моделювання із даними, отриманими відомими/традиційними аналітичними моделями, щодо розрахунку втрат на трасі тропосферного розсіювання підтверджує адекватність запропонованої моделі статистичним даним реальних втрат при тропосферному розсіянню.

## Список літератури

1. Pichenko M., Kravchuk S., Kaydenko M. Combined Over-the-Horizon Communication Systems. In: *Advances in Information and Communication Technologies. Processing and Control in Information and Communication Systems. UKRMICO 2018. Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol 560. Springer, Cham, 2019 - P. 121-145. DOI: 10.1007/978-3-030-16770-7 (https://doi.org/10.1007/978-3-030-16770-7\_6).
2. Kravchuk S., Kaidenko M. Features of creation of modem equipment for the new generation compact troposcatter stations // *Proceedings of the International Scientific Conference "RadioElectronics & InfoCommunications" (UkrMiCo'2016)*, 11-16 September 2016, Kyiv, Ukraine. – IEEE Conference Publications (IEEE Xplore Digital Library, DOI: 10.1109/UkrMiCo.2016.7739634), 2016.– P. 365-368.
3. Kravchuk S.O., Kaidenko M.M. Modem equipment for the new generation compact troposcatter stations // *Information and telecommunication sciences*. – 2016. – Vol. 7. – Nu. 1. – P. 5–12.
4. Ільченко М.Ю., Кайденко М.М., Кравчук С.О. Модемне обладнання на основі SDR-технології для тропосферних станцій нового покоління // *Наукові вісті НТУУ "КПІ"*. – 2016. – № 5. – 7–16.
5. Кравчук С.О. Портативна тропосферна радіорелейна станція зв'язку // *Матер. 10-ї міжнар. наук.-техн. конф. "Проблеми телекомунікацій"*, 19–22 квітня, 2016 р. – К.: Хімджест, 2016. – С. 305–307.
6. Кравчук С.О. Принципи створення портативних тропосферних радіорелейних станцій // *Матер. 9-ї міжнар. наук.-техн. конф. "Проблеми телекомунікацій"*, 21–25 квітня, 2015 р. – К.: НТУУ «КПІ», 2015. – С. 254–256.
7. Кравчук С.О., Кайденко М.М., Гаманенко О.І. Антенно-поворотний пристрій для малогабаритної тропосферної радіорелейної станції // *Матер. 11-ї міжнар. наук.-техн. конф. "Проблеми телекомунікацій"*, 18–21 квітня, 2017 р. – К.: Хімджест, 2017. – С. 159–162.
8. Приймально-передавальний блок для малогабаритної тропосферної радіорелейної станції / М.Ю. Ільченко, С.О. Кравчук, В.А. Хитровський, В.М. Бугай, Іванов В.М. // *Матер. 11-ї міжнар. наук.-техн. конф. "Проблеми телекомунікацій"*, 18–21 квітня, 2017 р. – К.: Хімджест, 2017. – С. 187–190.
9. Study on the prediction of troposcatter transmission loss / L. Li, Z.-S. Wu, L.-K. Lin, R. Zhang, Z.-S. Zhao // *IEEE Trans. on Antennas and propagation*. – 2016. - Vol. 64, No 3. - P. 1071-1078.
10. Yun Z., Iskander M. F. Ray Tracing for Radio Propagation Modeling: Principles and Applications // *IEEE Access*. - 2015. - Vol. 3. - P. 1089-1100.
11. Ray-traced tropospheric slant delays in VLBI analysis / V. Nafisi, M. Madzak, J. Böhm, H. Schuh and A.A. Ardalan // *Vermessung & Geoinformation*. – 2011. - No 2. - P. 149– 53.
12. Valtr P., Pechac P. Tropospheric Refraction Modeling Using Ray-Tracing and Parabolic Equation // *Radioengineering*. - 2005. - Vol. 14, No. 4. - P. 98-104.
13. Zhao X., Yang P. A Simple Two-Dimensional Ray-Tracing Visual Tool in the Complex Tropospheric Environment // *Atmosphere*. – 2017. - Vol. 8, No 35. - P. 1-10.
14. Dinc E., Akan O.B. A Ray-Based Channel Modeling Approach for MIMO Troposcatter Beyond-Line-of-Sight (b-LoS) Communications // *IEEE Trans. on Communications*. – 2015. - Vol. 63, No. 5. - P. 1690-1699.
15. Dinc E., Akan O. B. A Nonuniform Spatial Rain Attenuation Model for Troposcatter Communication Links // *IEEE Wireless Communications Letters*. – 2015. - Vol. 4, No. 4. - P. 441-444.
16. Dinc E., Akan O.B. Beyond-Line-of-Sight Ducting Channels: Coherence Bandwidth, Coherence Time and Rain Attenuation // *IEEE Communication Letters*. – 2015. - Vol. 19, No. 12. - P. 2274-2277.

17. Dinc E., Akan O.B. Fading Correlation Analysis in MIMO-OFDM Troposcatter Communications: Space, Frequency, Angle and Space-Frequency Diversity // IEEE Trans. on Communications. – 2015. - Vol. 63, No. 2. - P. 476-486.
18. Propagation of Radiowaves, Edited by L. Barclay, London: The Institution of Engineering and Technology, 2013, 470 p.
19. Parallel radio-wave propagation modeling with image-based ray tracing techniques / T.E. Athanaileas, G.E. Athanasiadou, G.V. Tsoulos, D.I. Kaklamani // Parallel Computing. – 2010. - Vol. 36. - P. 679–695.
20. Kaur B. MATLAB and K-Wave Based Outdoor Ray Propagation Predictor Tool SNELLIX for Surface Wave Modelling // Innovative Systems Design and Engineering. – 2015. - Vol.6, No.11. - P. 7-18.



---

## ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНІ СЕРВІСИ ДЛЯ ВІДДАЛЕНИХ ПОСЕЛЕНЬ – КРИТИЧНІ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

Кравчук С.О., Афанасьева Л.О., Кравчук І.М., Міночкін Д.А.

---

## TELECOMMUNICATION SERVICES TO VERY REMOTE VILLAGES - CRITICAL COMMUNICATIONS

Kravchuk S.O., Afanasieva L.O., Kravchuk I.M., Minochkin D.A.

The section deals with the possibility of providing telecommunication services to remote settlements, such as the Antarctic continent and the planet Mars. The existing communication systems are analyzed. Perspective strategies for future research in the field of deep space networks with high data transmission are outlined. Recommendations on the use of existing resources to provide critical telecommunication services and monitoring surface as throughout the Antarctic continent and beyond Earth are provided.

The publication is addressed to scholars, graduate students, heads of scientific and educational institutions, library staff, students of postgraduate pedagogical education.

Представлені можливості надання телекомунікаційних сервісів для віддалених поселень, таких як Антарктичний континент та планета Марс. Проаналізовано існуючі системи зв'язку. Визначено особливості надання якісних телекомунікаційних сервісів. Окреслено перспективні стратегії для майбутніх досліджень в області глибоких космічних мереж з високою швидкістю передачі даних. Надано рекомендації щодо використання існуючих ресурсів для забезпечення критично важливих телекомунікаційних послуг та моніторингу поверхні, як на всій території Антарктичного континенту так і за межами планети Земля. Видання адресоване науковцям, аспірантам, керівникам наукових і навчальних закладів, бібліотечним працівникам, слухачам післядипломної педагогічної освіти.

### 10.1. Критичні телекомунікації

Розвиток та становлення телекомунікаційної інфраструктури суспільства має на увазі надання відповідних інфокомунікаційних сервісів в будь-якому місці, де може перебувати людина, або штучний об'єкт, що виготовлений людством. Телекомунікації які надають телекомунікаційні сервіси для віддалених поселень чи штучних об'єктів можна назвати *критичними*.

В першу чергу інфраструктура будується і розвивається в урбанізованих місцях максимального скупчення населення. Це дає можливість швидкого

повернення затрат на будівництво, обслуговування і подальший розвиток телекомунікаційної інфраструктури. Тому місця віддалених поселень з низькою густиною населення в більшості випадків не мають розвиненої інфраструктури із-за її низької економічної ефективності. Причому, чим далі від урбанізованих центрів розташовані поселення, тим вище затрати на телекомунікації і нижче їх економічна ефективність. Прикладом таких поселень можуть бути науково-дослідні станції чи невеликі житла в Антарктиді, на окремих віддалених островах в океані, на високо-гірських плато, в підземних утвореннях та зонах стихійного лиха. Крім цього, прикладом критичних телекомунікацій може слугувати надання телекомунікаційних сервісів різним космічним апаратам, станціям на планетах сонячної системи, усім штучним об'єктам далекого космосу та ін.

Особливістю критичних телекомунікацій є їх робота на «межі» технічних можливостей при забезпеченні високої надійності в досить жорстких умовах навколишнього середовища. В даному розділі представлено дві базові зони, які мають на даний час високу перспективу створення і розширення віддалених поселень, і відповідно потребують становлення критичних телекомунікацій, щоб функціонувати і, взагалі, вижити. Мова йде про материкову частину Антарктиди та планетарну місію щодо колонізації найближчих планет сонячної системи, особливо – Марсу.

## 10.2. Телекомунікаційні сервіси Антарктичного континенту

На даний час антарктичний континент, що має найбільше віддалення від світових урбанізованих центрів, стає все привабливішим в плані проведення наукових досліджень, особливо метеорологічних, океанографічних і геологічних. Потреби зв'язку в Антарктиці швидко зростають із високими темпами наукової діяльності на континенті. Традиційні супутникові рішення не можуть задовольнити потреби створення і підтримки швидкісного каналу зв'язку, тому оптимізуються технології супутникового зв'язку для задоволення поточних і майбутніх потреб у передачі даних в режимі реального часу для міжнародного наукового співтовариства в Антарктиці.

### 10.2.1. Технології супутникових систем

Так як, система Iridium спочатку була розроблена як система передачі голосових повідомлень, то може забезпечити тільки низьку швидкість передачі даних (2,4 Кбіт/с), що недостатньо для швидкісної передачі даних. Тому, актуальним є розроблення систем передачі даних на основі супутників Iridium, але зі збільшеною ефективною пропускною спроможністю.

Основні вузькосмугові супутникові системи Південного полюсу - SPTR2, SKYNET і DSCS - забезпечують близько 12 години широкосмугового зв'язку кожен день. На станції Амундсен-Скотт Південного полюсу розміщена антенна решітка, що працює на основі технології IMCS (Iridium Multi-Channel System) та дозволяє зв'язати полосу пропускання окремих модемів в єдину віртуальну «трубу», тобто 4 модема Iridium з 2,4 Кбіт/с утворюють єдину лінію зв'язку. Багатоканальна система Iridium була розроблена для забезпечення релейного зв'язку передачі даних на континенті в період часу, коли головні супутники зв'язку не видно зі станції Південного полюса.

IMCS використовує мережний маршрутизатор для з'єднання 16 окремих супутникових каналів для передачі голосових повідомлень в два канали даних: 10 каналів зв'язку для наукових цілей, а також 6 каналів – для роботи станції. Ця передова технологія забезпечує пропускну здатність еквіваленту модему телефонної лінії зі швидкістю 38,4 Кбіт/с. IMCS використовує більш 13,5 млн. хвилин супутникового ефірного часу кожен рік .

В 2016 р. організація Inmarsat забезпечувала зв'язком багатопрофільну експедицію Heard Island Project на віддалений острів в Південному океані - Антарктиду, яку проводила некомерційна дослідницька організація США Cordell Expeditions. Діяльність експедиції постійно висвітлювалась по всьому світу за допомогою надійної і простої у використанні широкосмугової технології BGAN (Broadband Global Area Network), що підтримує Inmarsat. Типове апаратне забезпечення для цієї технології включає в себе невелику спрямовану антену (часто інтегровану з приймачем), яка легко розгортається кваліфікованим оператором. Вищого рівня версія цього пристрою дозволяє використовувати більш складні IT-рішення (наприклад, вбудовані маршрутизатори) за допомогою саморегулюючої антени, що більше підходять для встановлення на постійній основі.

Широкосмугова технологія BGAN пропонує послуги пакетної передачі даних, працює у середньому та високочастотному діапазоні поширення радіохвиль та забезпечує зв'язком навіть в незвичайних сонячних геомагнітних умовах [9]. На відміну від VSAT, більшість BGAN терміналів вже побудовані зі стандартним телефонним інтерфейсом.

До недоліків Inmarsat BGAN можна віднести направленість антени. Антена повинна бути направлена на фіксоване положення в небі під час розмови в той час як Iridium телефони використовують всеспрямовані антени і можуть бути переміщені. Тому послуги голосового зв'язку Inmarsat BGAN набагато гірші за Iridium. Щодо широкосмугового доступу в Інтернет, то BGAN має значний вигравш по швидкості передачі даних над Iridium (швидкість передачі даних стандарту IP Inmarsat BGAN може досягати до 492 Кбіт/с, а IMCS – 9,6 Кбіт/с).

Широкополосна супутникова система супроводження об'єктів та передачі даних TDRSS (Tracking and Data Relay Satellite System) - це мережа американських супутників зв'язку TDRS та наземних станцій, що використовуються NASA для космічного зв'язку. Система TDRSS створювалася з метою зменшити залежність NASA від мережі наземних станцій і збільшити

число апаратів, що постійно перебуває на зв'язку, а також збільшити кількість інформації, що передається.

При станції Амундсена-Скота для підтримки роботи нейтринної обсерваторії був створений і успішно функціонує дата-центр «Крижаний Куб», де система TDRSS забезпечує найбільш високошвидкісним виходом у всесвітню мережу в Антарктиді, а саме інтернет-доступ зі швидкістю 150 Мбіт/с. Головна проблема цього каналу зв'язку полягає лише в його частковій добовій доступності, яка становить близько 10 год.

Мережа TDRS має два типи каналів передачі даних: високої швидкості і низької швидкості. Канали з високою швидкістю передачі використовуються виключно для передачі наукових і оперативних даних з Південного полюса. Канали з низькою швидкістю працюють на швидкостях близько 5 Мбіт/с. При цьому вони забезпечують доступ до Інтернету та послуги телефонного зв'язку для користувачів мережі Південного полюса. Центр наземної маршрутизації та обробки даних такої системи знаходиться в місті Денвері у США і працює в рамках дослідницької програми USAP (United States Antarctic Program).

Європейська система ретрансляції даних EDRS (European Data Relay System) - це заплановане європейське сузір'я, як мінімум трьох сучасних супутників-ретрансляторів GEO, які будуть передавати інформацію та дані між супутниками, космічними апаратами, безпілотними літальними апаратами і наземними станціями. Дана система супутників EDRS використовує лазерні лінії зв'язку для завантаження живих зображень із супутників спостереження Землі. EDRS зможе передавати до 40 Тбайт даних в день в реальному часі зі швидкістю передачі даних 1,8 Гбіт/с - майже в три рази більше, ніж у американської супутникової системи стеження і передачі даних, яка працює у Ku- і Ka-діапазонах.

Системи супутникового зв'язку на базі VSAT пропонують швидкість завантаження даних 1 Мбіт/с, але дуже чутливі до несприятливих погодних умов. Сніг і опади за тисячі миль від бази можуть істотно впливати на обслуговування і перебої в подачі, викликати порушення підключення як до Інтернету так і для телефонних систем. Система VSAT, що встановлена на станції Ротера має антену діаметром 2,4 м для зв'язку з Кембріджем (Великобританією) через супутник геостационарної орбіти Землі (GEO) на відстані 22 000 миль над екватором. Система телефонії станції являє собою систему VoIP Cisco, яка використовує підключення до Інтернету для виконання вхідних та вихідних телефонних повідомлень. На сьогоднішній день доступна смуга пропускання в повнодуплексному режимі 384 кбіт/с. До недоліків системи супутникового зв'язку на базі VSAT відноситься висока ціна на апаратне забезпечення, необхідність висококваліфікованого персоналу для розгортання мережі.

Технологія iDirect являє собою універсальну супутникову платформу, призначену для побудови розподілених IP-мереж різних топологій з використанням супутників зв'язку, що працюють на геостационарній орбіті. Маршрутизатори iDirect підтримують DVB-S2 і використовують ефективні методи капсулювання, які забезпечують швидкість передачі даних до 140 Мбіт.

## 10.2.2. Наносупутникові системи

Як вище зазначалося, супутники, що розташовуються на геостаціонарній орбіті, видно тільки від північного краю антарктичного континенту і при дуже низьких кутах піднесення, тому традиційні супутникові рішення не оптимізовані для антарктичних користувачів, і в більшій частині континенту вони не можуть бути використані.

З огляду на той факт, що на низькій навколоземній орбіті наносупутники знаходяться ближче до Землі, і як наслідок необхідно менше енергії для передачі сигналу, в даний час використання низької навколоземної орбіти наносупутникових сузір'їв є ефективним рішенням. Таке супутникове рішення дозволить вирішити складнощі передачі даних в цьому регіоні, тому представляє інтерес для поточних і майбутніх дослідників в Антарктиці.

## 10.2.3. Оптиволоконні лінії зв'язку

На даний час усі континенти крім Антарктиди з'єднанні підводними кабелями зв'язку. Прокладання, супровід і утримування волоконно-оптичних кабелів на антарктичному континенті є дуже витратними технологіями. Це пов'язано із постійним накопиченням снігу на поверхні, дією сильного вітру та рухом льодовиків.

Відомий спосіб прокладки морських кабелів за допомогою кабелеукладачів, що представляють собою спеціальні морські судна. Недоліком такого способу є те, що при порівняно невеликих заворушеннях на море кабелеукладач припиняє роботу і лягає в дрейф, щоб не обірвався і не загубився кабель, так як знайти обірваний кінець - завдання надзвичайно складне. Зазначений спосіб також абсолютно не придатний для прокладки кабелю в льодах. Не рятує навіть застосування криголамів, так як прокладена канава швидко знову змерзається, а льоди, які ламає криголам, можуть легко пошкодити спусковий кабель.

Для вирішення цієї проблеми можуть бути застосовані нові технології, коли прокладку кабелю виконують за допомогою підводного човна і пов'язаного з ним тендера. При цьому прокладка кабелю проводиться без спливання підводного човна на поверхню.

Перспективність прокладення оптиволоконних кабелів буде зростати по мірі звільнення берегової лінії Антарктиди від льоду, збільшення кількості населення на континенті та збільшення зацікавленості в освоєнні континенту. Тоді буде добра можливість встановлення прибережної телекомунікаційної станції, підключеної через підводний кабель із материковою частиною Південної Америки, Австралії або Нової Зеландії.

Зрозуміло належить вирішити ще багато технічних проблем, зокрема, для внутрішніх частин Антарктики забезпечення доступу до кабельної мережі, що знаходиться під льодом, а також врахувати можливі проблеми через зсув самого шельфу, бо льодовик дрейфує більш ніж 10 метрів на рік. Однак, згадуючи ті

складнощі, що були вирішені при прокладанні першого кабелю зв'язку через Атлантику, і розвиток теперішніх технологій, можна з певністю передбачати успішність такого проєкту при умові виділення відповідних коштів.

Незважаючи на те, що не так давно NASA анонсувала швидкість передачі даних 91 Гбіт/с у своїй новій супутникової мережі ESnet, що дозволяє передати один Blue Ray образ диска всього лише за 2,1 секунди, підводні кабелі все ще будуть займати велике місце в інтернетизації світу.

#### 10.2.4. Мобільний наземний зв'язок

Першою країною, яка забезпечила стільниковим зв'язком своїх дослідників в Антарктиді була Аргентина. Оператори America Movil (Claro) і Telefonica Movistar використовуючи супутникове радіоустаткування створили системи, які за своєю суттю були віддаленим розширенням мереж в Аргентині. У 2014 році Департамент навколишнього середовища Австралії виставила мережу GSM від американської компанії Range Networks на своїй науково-дослідній станції на острові Маккуорі, приблизно на півдорозі між Австралією і Антарктикою. Потім вони розширили цю мережу до трьох науково-дослідних станцій на Антарктичному материка. На відміну від попередніх спроб, вони побудували автономну незалежну мережу зв'язку, яка на місці виконує управління і комутацію викликів, що аналогічно звичайному оператору мобільного зв'язку. Незважаючи на те, що для з'єднання з рештою світу як і раніше необхідний зв'язок із супутником, мережа буде продовжувати підключення викликів на місцевому рівні при відсутності зв'язку із супутником. Основу технологій складають звичайні GSM-телефони. Управління базовою станцією здійснюється, завдяки програмному забезпеченню OpenBTS з використанням відкритого коду. При цьому використовуються радіоприймачі зі спеціальним програмним забезпеченням для створення безпроводової лінії зв'язку, інші функції базової станції і мобільного ядра виконуються на звичайному сервері або в хмарі. База розташована на відстані понад 1000 км від найближчої точки в Південній Америці. Нововведення дозволять незабаром відмовитися від традиційних рацій, адже їх використання вкрай незручно. Більш того, мобільний зв'язок, як обіцяють, буде дешевше і надійніше.

Наступним великим оператором в Антарктиді планується бути французька компанія Sigfox, яка розширює свою мережу стільникового зв'язку для малопотужних пристроїв або "Інтернет речей". Спочатку компанія допомагатиме дослідникам на бельгійській антарктичній дослідницької станції "Принцеса Єлизавета". Ідентифікація пристрою, підключеного до мережі Sigfox допоможе дослідникам відстежувати місце розташування один одного. Потім мережа Sigfox буде використовуватися для збору наукових даних з датчиків на льоду для досліджень зміни клімату. На відміну від стільникових мереж для телефонів, мережа компанії спеціалізується на малопотужних пристроях, що формується в "Інтернет речей". Мережа Sigfox може відправляти тільки маленькі 12-байтові

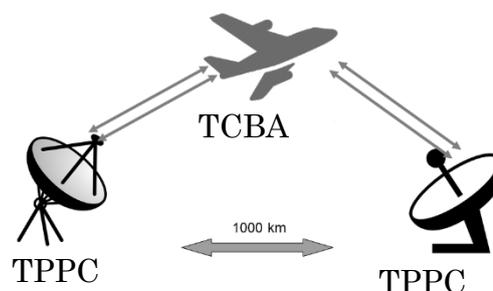
пакети даних. Для розгортання мережі Sigfox планується встановити близько 20 базових станцій для покриття необхідної області [1-2].

## 10.2.5 Телекомунікаційна система на основі висотних аероплатформ

Іншим можливим рішенням проблеми зв'язку в Антарктиді може бути використання нової архітектури телекомунікаційної мережі на основі висотних аероплатформ (ТСВА), яка спрямована на надання широкосмугових послуг (СШР) на далеких відстанях, використовуючи міжплатформенні оптичні лінії зв'язку з можливістю маршрутизації за декількома шляхами.

Однією з найбільш привабливих властивостей аероплатформ, на відміну від супутників, є можливість безпосереднього доступу до телекомунікаційного обладнання. Це робить системи на базі аероплатформ універсальними, дозволяє проводити обслуговування бортового обладнання та його модернізацію.

**Рис. 10.1** Телекомунікаційна система на основі висотних аероплатформ швидкого розгортання



Наземні системи загоризонтного зв'язку визначаються головним чином тропосферними радіорелейними системами (ТРРС), які здатні формувати радіотраси великої протяжності. Дія цих систем заснована на ефекті розсіювання радіохвиль на неоднорідностях в тропосфері, який називається «далеким тропосферним поширенням». Спільне використання обладнання двох ТРРС та однієї висотної аероплатформи (літального апарату, здатного нести телекомунікаційне обладнання) дає можливість створення радіолінії протяжністю 1000 км і більше (рис. 10.1). При цьому ТРРС працюватимуть в режимі прямої видимості через ретранслятор на аероплатформі. Таким чином можливе формування високошвидкісної (сотні Мбіт/с) радіотраси.

Існуючі на Антарктичному континенті системи зв'язку із зовнішнім світом, головним чином, використовують системи геостаціонарних супутників зв'язку та мобільної телефонії Ірідіум, які забезпечують низьку швидкість передачі даних із-за наявних на них вузькосмугових радіоканалів. На наш погляд для поліпшення послуг супутникових телекомунікацій в Антарктиці можуть бути використані наступні підходи:

- технології широкосмугового доступу iDirect, однак при цьому все одно реалізація високих швидкостей передачі даних залишається під сумнівом, бо Антарктичний півострів знаходиться на межі зони обслуговування геостаціонарних супутників і тому кути місця невеликі;

- технологія Inmarsat BGAN для широкопasmового доступу в Інтернет. Швидкість передачі даних стандарту IP Inmarsat BGAN може досягати до 492 Кбіт/с, хоча також необхідно зважати на той факт, що супутникова система Inmarsat лише частково покриває північні райони Антарктики;

- технологія Iridium Multi-Channel System дозволяє реалізувати швидкість передачі даних 9,6 Кбіт/с та забезпечити якісним телефонним зв'язком на всьому антарктичному регіоні, але цього замало для підтримки високошвидкісного каналу зв'язку;

- наносупутників (окремих або сузір'я), що зможуть забезпечити критично важливі телекомунікаційні послуги широкопasmового радіодоступу та моніторингу поверхні на всій території континенту. Найперспективнішою в напрямку реалізації орбітального сузір'я наносупутників є програма австралійського антарктичного широкопasmового доступу;

- телекомунікаційних систем на основі висотних аероплатформ швидкого розгортання та створення на їх основі мобільних широкопasmових систем абонентського радіодоступу місцевого обслуговування. Одним з найбільш привабливих властивостей аероплатформ, на відміну від супутників, є можливість безпосереднього доступу до телекомунікаційного обладнання. Це робить системи на базі аероплатформ універсальними, дозволяє проводити обслуговування бортового обладнання та його модернізацію.

### 10.3. Телекомунікаційні сервіси для поселень на планеті Марс

Майбутні завдання з проведення досліджень та розгортання людських поселень на поверхні Марса потребують нової телекомунікаційної інфраструктури для реалізації завдань місії. Автономні роботизовані місії будуть створювати багато типів даних, у тому числі наукових даних від датчиків різного призначення, управління і контролю, та телеметрії. Пілотовані польоти будуть підключати додаткові дані, в тому числі голосу, відео, а також даних астронавта про стан здоров'я. Тому, дані отримані в процесі проведення місії повинні бути розподілені між різними цільовими об'єктами, як на Марсі, так і на Землі. Таким чином, основні вимоги до телекомунікаційної мережі для підтримки такого розподілу даних місії повинні включати:

- *N*-сторонній зв'язок між поверхневими й орбітальними засобами на Марсі, розподіленим операційним центром і науковими командами в різних установах на Землі;

- пріоритезація потоків даних по каналам обмеженої смуги пропускання;
- простота модернізації при створенні нових технологій або протоколів;
- мультиплексування різноманітних застосувань, таких як інформація з датчиків в режимі реального часу та мультимедійні дані, в одному каналі;
- автоматична реконфігурація у відповідь на збій компонента;

- надійність щодо тимчасових відключень як поверхневих зв'язків так і зв'язків Земля-Марс;

- спільне використання ресурсів з комерційними та міжнародними партнерами.

Створення та підтримка комунікацій в масштабі міжпланетних відстаней є одним з основних завдань досліджень сонячної системи. Відстань між Землею та Марсом становить приблизно від 0,36 до 2,5 AU (AU - астрономічних одиниць). Таким чином, затримка двостороннього поширення становить від 6 до 42 хвилин (табл. 10.1). Це означає, що люди із поселень на Марсі отримають доступ до мережі Web 2.0 з затримкою до 3/4 год., що перевищить допустимий час затримки для підключення до аналогічної мережі Землі. З іншого боку, це є допустимим для використання електронної пошти, текстових повідомлень або "WhatsApping" з мешканцями Марса, а також повідомлень голосової пошти. При використанні вищезазначених послуг, потрібно буде принаймні 6 хв., щоб отримати відповідь.

**Табл. 10.1.** Часові затримки, що мають місце на односторонній (в одному напрямку) лінії зв'язку на різних відстанях

Система лінії зв'язку	Відстань	Часова затримка
Підводний кабель (UK-NZ)	~20 000 км	0,07 с (67 мс)
Геостаціонарна орбіта	~80 000 км	0,25 с
Земля-Місяць	384 000 км	1,3 с
Земля-Марс	55...378 млн. км	3...21 хв.
Земля-Юпітер	590...970 млн. км	33...53 хв.
Земля -Плутон	~5800 млн. км	5 год.

**Табл. 10.2.** Затухання поширення радіохвиль в шарах атмосфери Марсу для різних частотних діапазонів

Шари атмосфери	Затухання, дБ, для діапазонів частот (частоти в ГГц)			
	VHF (0,1...0,5)	S (2...4)	X (10...12)	Ka (30...38)
Іоносфера	0,5	0,15	0,1	0,05
Тропосфера (розсіяння)	0,0	0,0	0,0	0,0
Гази	0,0	0,0	< 0,5	< 1,0
Хмари	0,0	0,0	0,05	0,1
Дощ	0,0	0,0	0,0	0,0
Туман	0,0	0,0	0,0	0,1
Аерозолі (димка)	0,0	0,0	0,0	0,1
Пил	0,0	0,3	1,0	3,0
Загальні вертикальні	0,5	0,45	1,15	3,35

На Марсі домінуючим фактором затухання є пилові бурі. У найгіршому випадку затухання може становити 3 дБ в Ka-діапазоні. Однак такий тип пилового шторму зустрічається рідко. Пилові бурі в основному відбуваються в

південній півкулі в весняно-літній період. У нормальних умовах шторм може викликати втрати не більше 1 дБ.

Відомо, що на Марсі досі не спостерігалось дощів. Незважаючи на те, що дощ можливий, він буде настільки легким, що це не спричинить значного ослаблення радіохвиль. За оцінками, загальні втрати тропосфери, включаючи газове затухання, хмари, туман і тропосферне розсіювання (сцинтиляція і турбулентність) становлять близько 0,4 дБ в Ка-діапазоні. Таким чином, при нормальних умовах загальне затухання від пилової бурі та тропосфери, становить близько 1,4...2,0 дБ для хвилі, що вертикально розповсюджується (в порівнянні з приблизно 5 дБ на Землі). Загальне затухання буде приблизно 3,4 дБ для найгіршого випадку. Параметри затухання для різних смуг частот наведені в табл. 10.2.

**Табл. 10.3.** Втрати на поширення радіохвиль у вільному просторі між Землею і Марсом для різних частотних діапазонів

Відстань між Марсом і Землею, км		Втрати на поширення у вільному просторі, дБ, для діапазонів частот (частота в ГГц)			
		VHF (0,3)	S (3)	X (10)	Ka (32)
min	55 x 10 <sup>6</sup>	237	257	267	277
max	400 x 10 <sup>6</sup>	254	274	284	294

В табл. 10.3 наведено втрати у вільному просторі для різних смуг частот. Телекомунікаційна система встановлює швидкість передачі даних на основі цих втрат. Щоб підтримувати енергію в кожній бітовій частині вище порогової величини, більш низька швидкість передачі даних зазвичай використовується для більшої відстані (тобто великих втрат), тоді як більш висока швидкість передачі даних використовується для меншої відстані. Також, встановлюється запас (приблизно від 5 до 8 дБ) для погіршення погодних умов на Землі.

### 10.3.1. Земний кінець системи зв'язку

Супровід апарату в міжпланетному просторі відрізняється від супроводу на навколосеземній орбіті. Міжпланетний космічний апарат під час більшої частини своєї місії має прямий контакт з центрами управління на земній поверхні, і для зв'язку з апаратом досить невеликої кількості наземних станцій з широким охопленням. Мережа глибокого космосу NASA DSN (Deep Space Network) – є міжнародною мережею приймально-передавальних наземних станцій з велетенськими антенними системами, які забезпечують зв'язок між вченими та інженерами на Землі з місіями в космосі та на Марсі. Оскільки продуктивність лінії зв'язку має значення  $1/R^2$ , зв'язок з Марса на Землю, в певному сенсі, в 100 000 000 разів складніший, ніж геостаціонарна супутникова лінія Землі. Щоб справитися із значними втратами простору, глибокі космічні зонди NASA повинні використовувати складні радіосистеми. Щоб досягти швидкості

передачі даних, необхідної для вивчення Сонячної системи використовують антени великого діаметру з високим коефіцієнтом посилення та високою потужністю передачі для забезпечення необхідної еквівалентної ізотропної випромінюваної потужності (EIRP).

DSN складається з антенних комплексів в трьох точках по всьому світу та формує наземний сегмент системи зв'язку для космічних польотів. Ці об'єкти, розташовані на Землі приблизно на 120 градусів по довготі, забезпечують безперервне охоплення та відстеження далеких космічних польотів. Кожен комплекс включає в себе одну 70-метрову антену і ряд 34-метрових антен. Ці антени можуть використовуватися індивідуально або в кооперації (організуючи антенну решітку) для задоволення вимог до зв'язку кожної космічної місії (рис. 10.2).

Велика частина досліджень в області космічного зв'язку присвячена розробці систем зв'язку, антен, передавачів, сигнальних датчиків, методів модуляції, теорії кодування каналів, стисканню даних і симуляції. Ці дослідження також включають в себе оптичний зв'язок, в тому числі відповідну експертизу в оптичних приладах, оптичних системах, оптичних детекторах, лазерах. Дослідницькі об'єкти для космічного зв'язку складаються з 34-метрових дослідницьких антен (наприклад, комплекс DSN в Голдстоуні, Каліфорнія) і лабораторії телекомунікацій оптичного зв'язку з 1-метровим телескопом (в Обсерваторії Маунтаін в Райтвуді, штат Каліфорнія) [3, 4].



**Рис.10.2.** Мережа глибокого космосу DSN (Deep Space Network):

*a* - розташування основних антен DSN. Будь-який космічний апарат на відстані більше 30 000 км від поверхні Землі знаходиться в полі видимості як мінімум одного з комплексів DSN; *б* - антена діаметром 70 м в Голдстоуні, штат Каліфорнія, на фоні пустелі Мохаве. Антена праворуч - це високоефективна антена діаметром 34 м

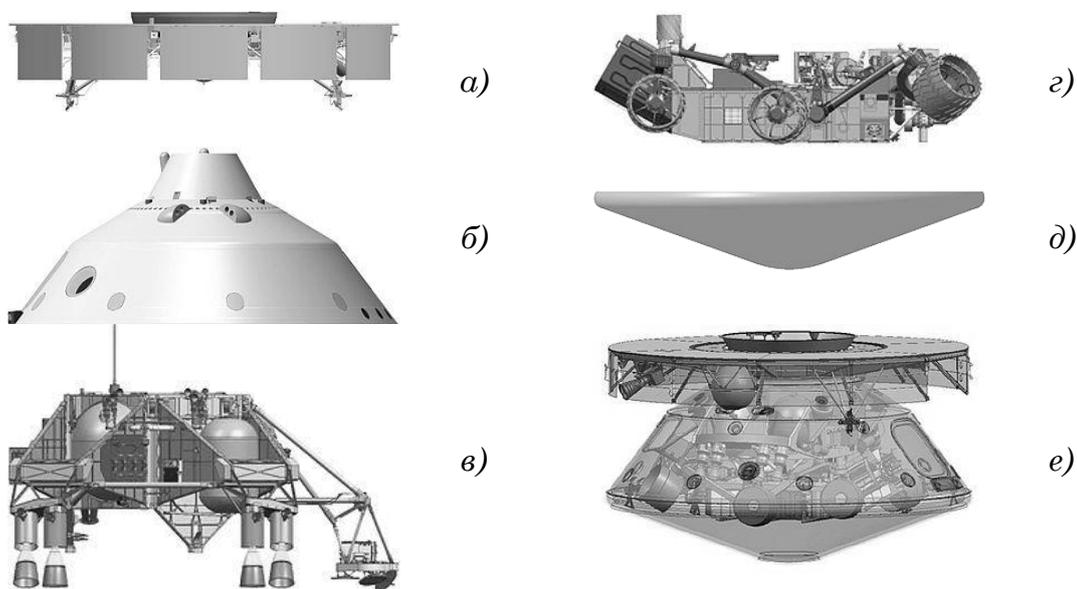
### 10.3.2 Системи зв'язку на планеті Марс

Планетоходи призначені для вивчення і аналізу планетарних ландшафтів та інших астрономічних тіл, оточуючих поверхню планети. Марсіанський

планетохід (марсохід) зв'язується з диспетчерською станцією за допомогою антен з високим діапазоном та низькою дальністю, щоб отримати команди від своїх операторів і потім відправити зібрані наукові дані назад на Землю. Через часові затримки такий зв'язок можливий лише протягом короткого періоду часу. Марсохід не тільки відправляє повідомлення в X-діапазоні безпосередньо на станцію DSN, але також може передавати інформацію на інший космічний апарат, що обертається навколо Марса. Як антена з низьким коефіцієнтом посилення, так і антена з високим коефіцієнтом посилення використовують X-діапазон променів для безпосереднього зв'язку з контрольною станцією на Землі. Низькочастотна антена (LGH) - є односпрямованою антеною і передає дані з меншою швидкістю (до 32 кбіт/с). Антена з високим коефіцієнтом посилення (HGA), створена на базі програмно-визначуваної радіосистеми Electra –Lite. HGA - є спрямованою та керованою антеною, відповідно виконує послідовність зв'язку з високою швидкістю та може спрямовувати антенну на Землю [5].

Всього на Марсі працювали чотири марсоходи для наукових досліджень. Два з них - «К'юріосіті» (Curiosity) та «Оппортьюніті» (Opportunity) - продовжують роботу і на даний час (станом на 1 травня 2018 р.).

Розглянемо процес спуску планетохода на поверхню Марса на прикладі марсохода «К'юріосіті» [6]. Перелітний модуль керує траєкторією під час польоту з Землі на Марс. Модуль включає в себе компоненти для підтримки зв'язку під час польоту і регулювання температури. Перед входом в атмосферу Марса відбувається поділ перелітного модуля та апарату, що спускається (рис. 10.3, а).



**Рис. 10.3** Складові частини для спуску марсохода «К'юріосіті» на поверхню Марса а) перелітний модуль, б) тильна частина капсули, в) «Небесний кран» г) марсохід «К'юріосіті», д) лобова частина капсули з теплозахисним екраном, е) спусковий апарат

Капсула необхідна для спуску через атмосферу. Вона захищає марсохід від впливу космічного простору і перевантажень під час входу в атмосферу Марса. У тильній частині знаходиться контейнер для парашута. Поруч з контейнером встановлено кілька антен зв'язку (рис. 10.3, б).

Після того, як теплозахисний екран і тильна частина капсули виконують своє завдання, вони розстикуються, тим самим звільняючи шлях для спуску апарату і дозволяючи радару визначити місце посадки. Після розстикування кран забезпечує точний і плавний спуск марсоходу на поверхню Марса, який досягається за рахунок використання реактивних двигунів і контролюється за допомогою радіолокатора на марсоході (рис. 10.3, в).

Марсохід «К'юріосіті» містить всі наукові прилади, а також важливі системи зв'язку і енергопостачання. Під час польоту шасі складається для економії місця (рис. 10.3, г).

Теплозахисний екран захищає марсохід від вкрай високої температури, що впливає на спусковий апарат при гальмуванні в атмосфері Марса (рис. 10.4, д).

Маса спускового апарату (зображений в зборі з перелітним модулем) становить 3,3 тони. Спусковий апарат служить для контрольованого безпечного зниження марсоходу при гальмуванні в марсіанській атмосфері і м'якої посадки марсоходу на поверхню (рис. 10.3, е).

### 10.3.3 Ретрансляційні лінії зв'язку

Ретрансляційні комунікації пропонують кілька інших переваг у порівнянні з прямим зв'язком з Землею. Ретрансляційні орбітальні пристрої можуть забезпечувати телекомунікаційними можливостями в той час, коли Землю не видно. Прикладом цього є можливість спілкуватися з посадковим пристроєм на нічній стороні Марса. Іншим, менш очевидним прикладом є здатність забезпечити контакт для довгоживучих посадкових пристроїв поблизу марсіанських полюсів. Коли вісь обертання повернена приблизно на  $258^\circ$  до площини екліптики, полюса Марса сезонно виходять з поля зору Землі протягом кількох місяців. Ретрансляційні лінії зв'язку також дають можливість сформуванню відстеження радіометричних спостережень, що можуть підтримувати навігацію на місці. Наприклад, точні вимірювання доплерівського зсуву радіосигналу на ретрансляційній лінії між орбітальним апаратом і посадковим пристроєм протягом польоту по орбіті забезпечують інформацію про стан посадкового пристрою щодо траєкторії орбіти, яка, в свою чергу, пов'язана з марсіанською системою відліку, заснованою на звичайних методах доплерівського відстеження глибокої космічної мережі [7].

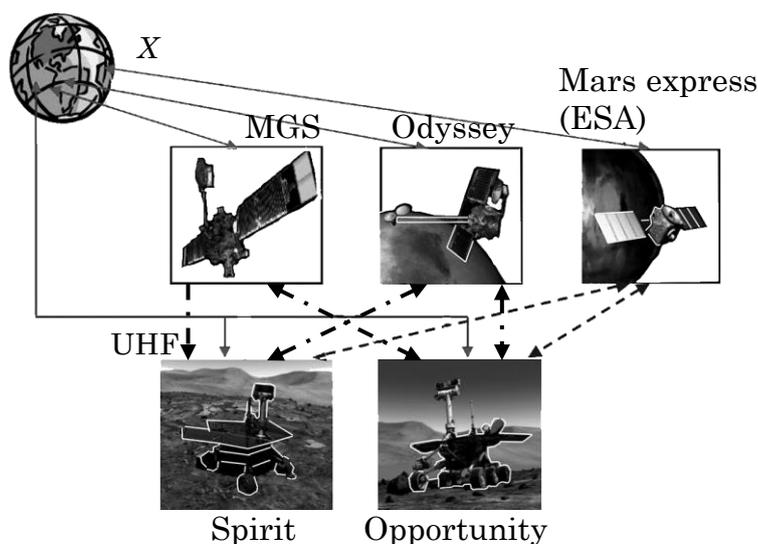
Три космічні станції: «Марс Одисей» (Mars Odyssey), «Марс-експрес» (Mars Express) та «Марсіанський розвідувальний супутник» (MRO, Mars Reconnaissance Orbiter), які зараз знаходяться на орбіті Марса, представляють міжнародну ретрансляційну інфраструктуру, що забезпечує надійні, надлишкові ретрансляційні послуги та глобальне покриття для потенційних користувачів в будь-якому місці на марсіанській поверхні або в атмосфері Марса.

«Марсіанський розвідувальний супутник» має триметрову параболічну антену для далекого космічного зв'язку, працює в X-діапазоні (близько 8 ГГц) та Ка-діапазоні (32 ГГц). Найбільші швидкості передачі даних складають до 6 Мбіт/с, що в 10 разів перевищує швидкості попередніх апаратів. На апараті встановлено два підсилювача X-діапазону з потужністю в 100 Вт (один запасний), один 35 Вт підсилювач Ка-діапазону і два транспондера типу SDST (Small Deep-Space Transponder).

Швидкості передачі даних між марсоходом «К'юріосіті» та орбітальним апаратом MRO можуть бути 2 Мбіт/с, а з «Марс Одісей» - 256 Кбіт/с. Кожен супутник має можливість тримати зв'язок з марсоходом «К'юріосіті» приблизно 8 хв. на день.

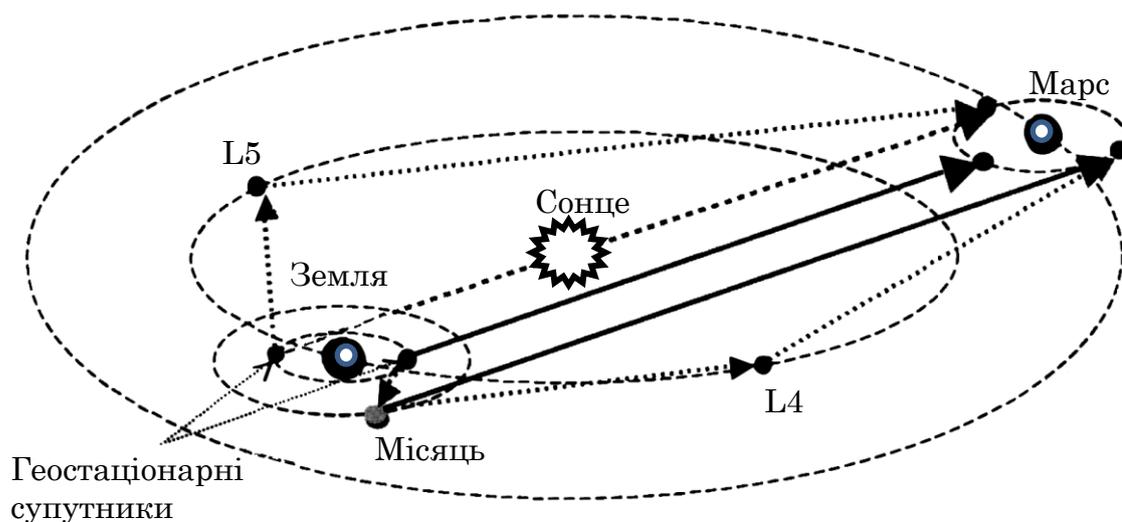
Переваги використання орбітальних космічних апаратів полягають в тому, що орбітальні пристрої знаходяться ближче до марсоходу, ніж антени DSN на Землі та, відповідно, Земля знаходиться з ними в прямій видимості протягом більш тривалих періодів часу, ніж марсохід на Землі. Оскільки орбітальні космічні апарати знаходяться всього на відстані від 160 миль до 250 миль (257 км і 400 км) над поверхнею Марса, марсоходу не потрібно використовувати таку ж кількість енергії при відправці повідомлення на орбітальні пристрої, як при відправці до антен на Землі (рис. 10.4).

**Рис. 10.4.** Телекомунікаційна архітектура роботизованої міжпланетної місії NASA (лінії зв'язку в діапазонах частот: X (неперервні лінії), UHF (Ultra High Frequency) (лінія типу «точка-пунктир»), UHF в якості запасних каналів (пунктирна лінія))



Розглянемо різні конфігурації ліній зв'язку між Землею та Марсом (рис. 10.5). Оскільки екліптичне відхилення марсіанської орбіти до орбіти Землі становить  $1,8^\circ$ , а нахил між екліптикою і екватором складає  $23,4^\circ$ , то ретрансляційний супутник не може встановити зв'язок з Марсом з частотою аналогічно затемненню геостаціонарного супутника. Тому, необхідна наявність як мінімум двох ретрансляційних супутників в двох місцях біля Землі для підтримки зв'язку на 100%. З іншого боку, радіус аероцентричної орбіти Марса становить близько 20 400 км, а радіус Марса - близько 3400 світлових років. Отже, необхідно принаймні, три аероцентричних супутника біля Марса для забезпечення 100% -ї наявності зв'язку [8].

Для лінії зв'язку супутник Марса - Марс встановлюється ретрансляційний зв'язок в полосі УВЧ на частоті близько 400 МГц, що відповідає довжині хвилі приблизно 75 см. На більш довгих хвилях, компоненти радіочастоти стають занадто великими, а при більш коротких довжинах хвиль погіршуються характеристики зв'язку між нерегульованими антенами з фіксованим посиленням. Реалізація такої лінії зв'язку вимагає специфікації форматів модуляції, схем кодування, швидкостей передачі даних, схем множинного доступу, протоколів ініціювання та завершення каналу зв'язку і протоколів для структурування вмісту даних, що передаються по каналу [5, 7].



**Рис. 10.5.** Різні конфігурації ліній зв'язку між Землею і Марсом (L4 і L5 - ретрансляційні станції, розташовані в точках Лагранжа Землі і Сонця)

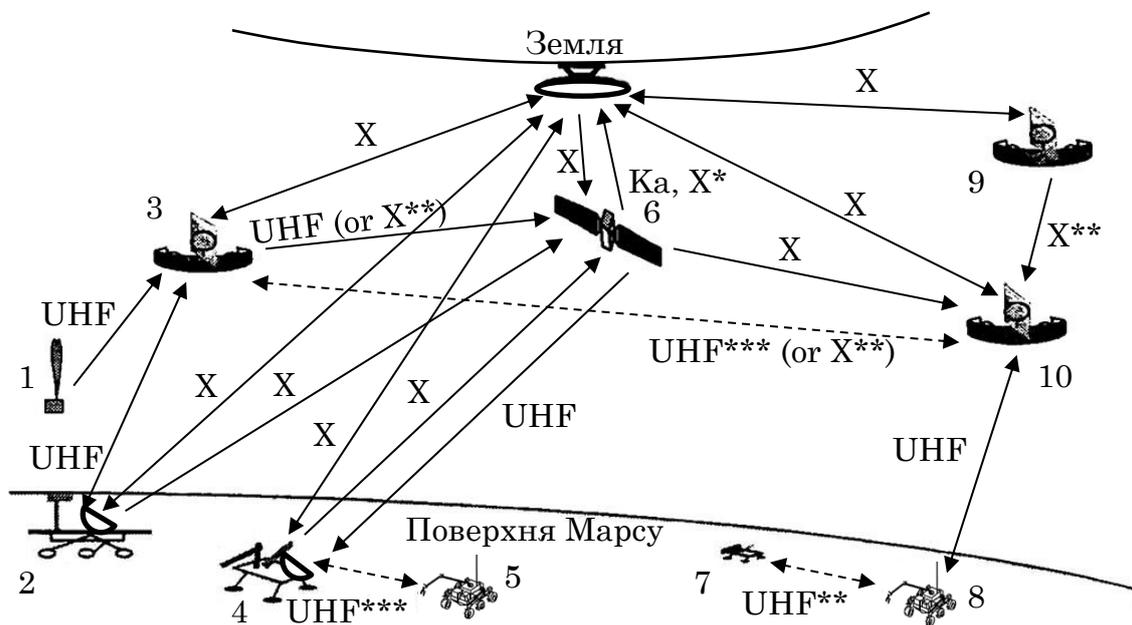
Ретрансляційні станції, розташовані в точках Лагранжа Землі і Сонця, L4 і L5, також показані на рис. 10.5. Ці ретрансляційні станції можуть використовуватися для побудови лінії зв'язку без впливу завад Сонця. Так само, в якості ретрансляційного вузла може розглядатися станція в полярній області Місяця, де марсіанський напрямок буде змінено приблизно на  $5^\circ$ . Так як орбітальний нахил Місяця від екліптики становить  $5,1^\circ$ , приймач повинен бути встановлений на великій висоті, наприклад, на краю кратера.

Лінія зв'язку супутник-Земля завершує шлях ретрансляції. На Землі дані приймаються наземними станціями з використанням великих супутникових антен. Продуктивність глибокої космічної низхідної лінії зв'язку на Землю залежить від потужності передавача орбітального супутника, посилення антени, апертури Землі і відстані до Землі. З великими спрямованими антенами на обох кінцях зв'язку, продуктивність зв'язку сприяє коротшим довжинам хвиль або вищим частотам. Номінальна частота глибокого космічного зв'язку для останніх місій склала 8,4 ГГц (X-діапазон). Останнім часом місії починають переходити на частоти 32 ГГц (Ka-діапазон) для досягнення покращення продуктивності.

В розглянутій топології каналу системи передачі даних Земля-Марс, можливо реалізувати кооперативну ретрансляцію на трьох рівнях: на Землі (кооперація антен комплексу DSN, організовуючи антенну решітку); на орбіті

навколо Землі (кооперація геостационарних супутників та станції в полярній області Місяця); на орбіті навколо Марсу (кооперація трьох наявних орбітальних космічних апаратів Марсу - «Марс Одісей», «Марс-експрес» та «Марсіанський розвідувальний супутник»).

Об'єднання множини антен орбітальних супутників (кооперативна ретрансляція) для паралельної передачі даних дозволить збільшити пропускну здатність каналу зв'язку для заданого набору діапазону частот. Суть методу кооперативної ретрансляції полягає в рознесенні терміналів шляхом декодування комбінованого ретрансляційного і прямого сигналу. Методи рознесення використовуються, щоб надати приймачу кілька дублікатів переданого сигналу для подолання проблеми завмирання і поліпшення ефективності радіоканалу без збільшення потужності передачі та поліпшення відношення сигнал/шум. Застосовуючи техніки рознесення і MIMO, кооперативні ретрансляційні лінії та прямі лінії зв'язку можуть використовуватися для передачі одного і того ж пакету для досягнення виграву від рознесення. Якщо пряма передача повідомлення від джерела до адресата не пройшла повністю успішно, додаткова інформація (overheard information) від джерела передається через ретранслятор, щоб дістатися до адресата іншим шляхом. Так як ці два повідомлення пішли один за одним різними шляхами, в цьому випадку реалізується концепція просторового і часового рознесення [9, 10].



**Рис. 10.6.** Ілюстрація частотної схеми для різних типів ліній зв'язку в регіоні Марсу (\* частоти на вторинній основі або в якості запасних; \*\* 8,4 ГГц; \*\*\* симплексні або напів-дуплексні лінії зв'язку):

1 – аеростатна платформа; 2 – великий марсохід (або великий посадковий модуль); 3, 10 – орбітальна ретрансляційна платформа; 4 – великий посадковий модуль або марсохід; 5, 8 – марсохід; 6 – ретрансляційна аероплатформа; 7 – малий посадковий модуль; 9 – доступна гранична орбітальна ретрансляційна платформа

На рис. 10.6 представлено частотну схему для гіпотетичної мережі зв'язку в регіоні Марса, де UHF використовується для низькошвидкісних каналів (включаючи перехресні лінії зв'язку і поверхневі лінії зв'язку) для ретрансляції даних або роботи мережі, в той час як 8,4 ГГц в основному використовується для високошвидкісних наземних супутникових каналів. Для ліній зв'язку між Марсом і Землею частоти висхідної і низхідної лінії такі ж, як типові місії далекого космосу (висхідна лінія 7,2 ГГц і спадна лінія 8,4 ГГц) з однієї модифікацією. Ka-діапазон - це основна частота низхідної лінії зв'язку для аеростационарного супутника, причому X-діапазон є резервним. Додаткові частоти (в тому числі діапазон від 37 до 38 ГГц) можуть бути пізніше представлені в мережі для надзвичайно високошвидкісних каналів для підтримки людського дослідження Марсу [11].

Найближчі місії будуть продовжувати використовувати UHF-діапазон в якості первинної частоти для локальних зв'язків на Марсі. Великі спускові апарати та марсоходи будуть використовувати X-діапазон для з'єднань із Землею на доповнення до UHF-діапазону для локальних операцій. Для цих великих елементів X-діапазон може використовуватися для високошвидкісних локальних зворотних каналів (з ретрансляційним супутником). Слід вивчити конструкції, які дозволяють використовувати обладнання X-діапазону для обох ліній зв'язку на Марсі та між Марсом і Землею.

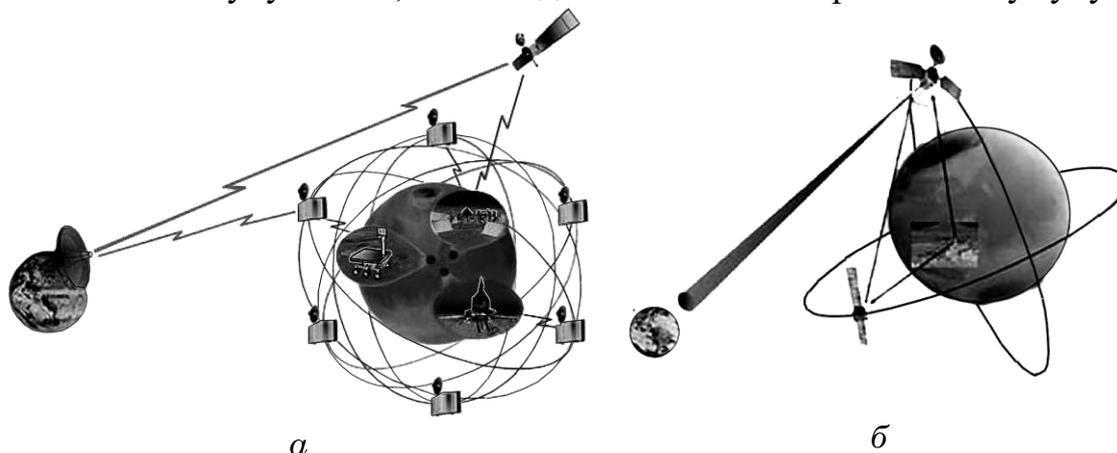
### 10.3.4 Оптичні космічні комунікації

Первинною мотивацією для збільшення швидкості передачі даних є підвищення обсягу наукових даних, що повертаються за допомогою інструментів з більш високою роздільною здатністю, та підготовка до майбутніх місій з дослідження космічного простору. Існує принципово інший підхід до збільшення швидкості передачі даних - використовувати замість радіохвиль оптичне випромінювання (лазерна зв'язок або Lasercom) [12]. Довжина хвилі лазерного випромінювання в десятки тисяч разів менша, ніж в радіодіапазоні. Тому розбіжність лазерного променя виходить значно меншою. Це дозволить істотно підняти швидкість передачі даних при більш низькому енергоспоживанні. Але у лазерного зв'язку є і недоліки: він потребує більш точного націлювання передавача, і, крім того, на його працездатність істотно впливають погодні умови, в першу чергу хмари. Тому міжпланетний лазерний зв'язок буде, швидше за все, підтримуватися з орбітальних апаратів (рис. 10.7).

Практично встановити виділену(спеціальну) оптику в променевому супутнику з довгою трубкою телескопа, такою ж, як космічний телескоп Хаббла, на геостационарній орбіті та інших супутниках, що утворює кластерну супутникову систему та розміщується на невеликій відстані від спрямованого променевого супутника. Це дозволить досягти необхідної точності визначення відкритості навколишнього середовища.

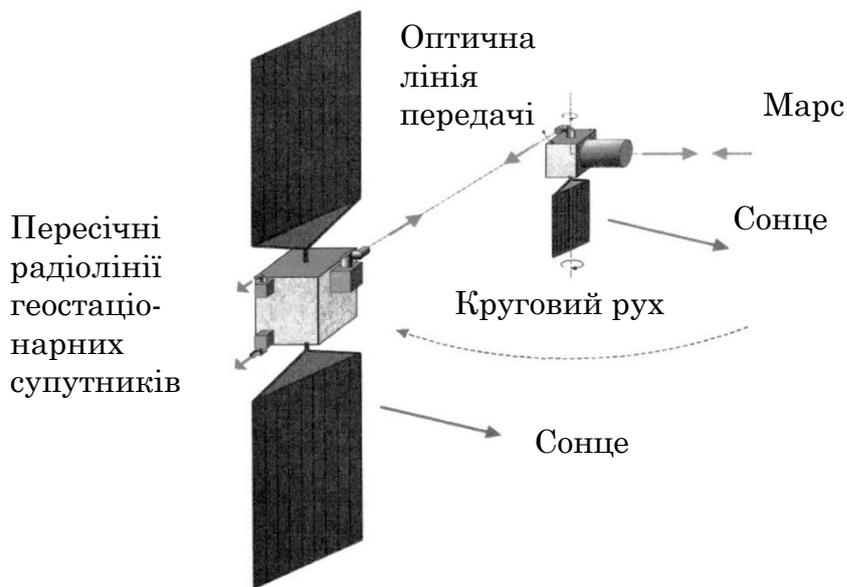
Така кластерна супутникова система із розподіленою функцією (рис. 10.8) складається з двох супутників: один - здійснює виявлення, відстеження і

наведення лазерних променів на Марс. Інший – супутник приймального ретранслятора - постачає електроенергію, генерує сигнал передачі, зберігає потоки даних, виконує обробку протоколів та здійснює зв'язок між Землею та іншими супутниками ретрансляції даних. Оскільки кластерна супутникова система із розподіленою функцією розміщується на геостаціонарній орбіті, то існує необхідність в орбітальній системі управління, щоб тримати дистанцію між двома супутниками постійною та для задоволення вимог до панелей сонячних елементів на обох супутниках, а також для телескопа на променевому супутнику.



**Рис. 10.7.** Концепція міжпланетної лінії зв'язку з орбіти Марса на Землю, і зв'язок з поверхневими активами місії на Марсі:  
*a* – загальної інфраструктури орбітального зв'язку; *б* - інфраструктура лазерного зв'язку

**Рис. 10.8** Кластерна супутникова система із розподіленою функцією



Перевантаження в спектрах радіочастот та збільшення продуктивності при однаковій потужності і масі повинні сильно мотивувати місії до прийняття оптичних комунікацій в майбутньому. Акценти в області досліджень і розробки оптичних комунікацій в Лабораторії реактивного руху JPL включають: оптичний зв'язок дальнього світла; розробка оптичної системи наближення; оптичні приймачі.

Ці технології можуть забезпечувати потокове зображення високої чіткості та передачу даних по міжпланетним відстаням [13, 14].

### 10.3.5 Міжпланетний інтернет

Науково-дослідний центр NASA JPL (Jet Propulsion Laboratory) розробляє технологію, що дозволяє спілкуватися на Інтернеті з космічними апаратами. Однак на відміну від Інтернету, чий протоколи вимагають затримок на мс, для глибокого космічного зв'язку потрібні нові протоколи, які можуть витримувати затримки або збої протягом декількох годин.

Міжпланетна передача даних базується на створенні мережі з толерантною затримкою чи мережі, що стійка до розривів, DTN (Delay Tolerant Network) Це мережний протокол, який дозволяє передавати дані навіть в умовах переривчастих збоїв зв'язку. У мережі DTN, якщо на даний час немає шляху до бажаного адресату даних, дані зберігаються на локальному вузлі до тих пір, поки шлях не стане доступним знову. Ця можливість дає DTN кращу надійність і підтримку мобільності у комунікаційному середовищі Марса, ніж традиційні мережні протоколи, які відкидають дані, якщо пункт призначення недоступний [15].

У середині станцій (поселень) може бути розбита радіосистема типу LTE, WiMAX або UWB. При віддаленні від станції на значну відстань, можна поставити високу антену і на більш довгих хвилях зв'язуватися з більш далекими об'єктами. Це питання вже вирішене в рамках технічних завдань на Землі, де існує безліч різних систем дальнього і ближнього зв'язку. Для пересувних систем, наприклад марсоходів або автомобілів для транспортування людей, швидше за все доведеться розгортати радіоканал на ультрависоких (300...3000 МГц) або надвисоких (3...30 ГГц) частотах, який буде забезпечувати достатній зв'язок в деякому радіусі.

Спочатку, запуск першої мережі LTE планується реалізувати на Місяці в 2019 р. Даний проект носить назву «Місячна місія». Запуск космічного апарату планується з мису Канаверал - його виведе в космос одна з ракет типу Falcon 9 від компанії SpaceX. Пара чотириколісних місяцеходів від компанії Audi буде використовувати цю мережу для підключення до базової станції Автономного посадочно-навігаційного модуля (ALINA). Використовуючи мережу 4G, місяцеходи зможуть передавати дані та знімати відео з роздільною здатністю HD на місячну капсулу Apollo 17, запущену в 1972 р. Таким чином, всі жителі Землі одержать можливість дивитися прямі трансляції з Місяця в HD-режимі.

Розвиток марсіанської телекомунікаційної ретрансляційної мережі, зокрема застосування методів кооперативної ретрансляції, забезпечить своєчасну і високошвидкісну передачу даних роботизованих місій та можливих пілотованих місій на червоній планеті. Така мережа дозволить значно збільшити потік даних при одночасному зменшенні маси обладнання та потужності передачі, за рахунок зменшення відстані передачі між супутниками, надасть можливість зв'язку за відсутності прямої видимості з Землею, забезпечить прийом інженерної

телеметрії під час критичних подій місії, таких як вхід, спуск та посадка. Вважається, що лазерний зв'язок є найбільш перспективною стратегією для майбутніх досліджень в області глибоких космічних мереж з високою швидкістю передачі даних. Технології лазерного зв'язку відіграватимуть важливу роль в майбутніх міжпланетних мережах.

## Список літератури

1. Afanasieva L., Minochkin D., Kravchuk S. Providing telecommunication services to Antarctic stations // Proc. of the 2017 International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo) 11-15 Sept. 2017 Year, Odessa, Ukraine. - IEEE Conference Publications (IEEE Xplore Digital Library, DOI: 10.1109/UkrMiCo.2017.8095419), 2017. – P.1-4.
2. Афанасьєва Л.О., Кравчук С.О., Міночкін Д.А. Історична ретроспектива телекомунікацій в Антарктиці // Матер. 11-ї міжнар. наук.-техн. конф. “Проблеми телекомунікацій”, 18–21 квітня, 2017 р. – К., 2017. – С. 184–186.
3. Афанасьєва Л.О., Кравчук С.О., Міночкін Д.А. Стан та перспективи розвитку телекомунікацій в Антарктиці // Тези 8-ї Міжнародної Антарктичної конф., присвяченої 25-річчю приєднання України до договору про Антарктиду «МАК 2017», 16-18 травня, 2017 р., м. Київ, Україна. – К., 2017. - С. 175-177.
4. NASA Deep Space Network // [https://en.wikipedia.org/wiki/NASA\\_Deep\\_Space\\_Network](https://en.wikipedia.org/wiki/NASA_Deep_Space_Network) [Aug 23,2018].
5. Baig M.W.I. Mars Planetary Rover Control Protocol // International journal of multidisciplinary sciences and engineering. – 2014. - Vol. 5, No. 2. - P 36-40.
6. Марсианская научная лаборатория // [https://ru.wikipedia.org/wiki/Марсианская\\_научная\\_лаборатория](https://ru.wikipedia.org/wiki/Марсианская_научная_лаборатория) [Aug 23,2018]
7. Edwards C. D. Relay Communications for Mars Exploration // Int. J. Satell. Commun. Network. – 2007. - P. 111-145.
8. Iida T., Arimoto Y., Suzuki Y. Earth-Mars communication system for future Mars human community: A story of high speed needs beyond explorations // Aerospace and Electronic Systems Magazine IEEE. – 2011. - vol. 26, no. 2. P. 19-25.
9. Афанасьєва Л.О., Кравчук І.М., Кравчук С.О. Метод кооперативного рознесення // Матер. 10-ї міжнар. наук.-техн. конф. “Проблеми телекомунікацій”, 19–22 квітня, 2016 р. – К.: Хімджест, 2016. – С. 257–259.
10. Афанасьєва Л.О. Пропускна здатність каналів з кооперативною ретрансляцією // Матер. 10-ї міжнар. наук.-техн. конф. “Проблеми телекомунікацій”, 19–22 квітня, 2016 р. – К.: Хімджест, 2016. – С. 260.
11. Frequency Bands for Mars In-Situ Communications / D. Hansen, M. Sue, C. Ho, M. Connally, T. Peng, R. Cesarone, and W. Home // Proc. IEEE Aerospace Conf., 2001.
12. Hemmati H., Biswas A. Lasercom From Mars: Orbiters Landers and CubeSats // Proc. International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS) 2014. - P. S3-3.
13. Deep space communications // <https://scienceandtechnology.jpl.nasa.gov/research/research-topics-list/communications-computing-software/deep-space-communications> [Aug 29,2018].
14. Roberts W. Discovery deep space optical communications (DSOC) transceiver // Proceedings of SPIE. – 2017. - vol. 10096. - P. 10096V-1-15.
15. Caini C. Delay- and Disruption-Tolerant Networking (DTN): An Alternative Solution for Future Satellite Networking Applications // Proceedings of the IEEE. – 2011. Vol. 99, no. 11. - P. 1980-1997.

---

**БЕЗПРОВОДОВІ СЕНСОРНІ МЕРЕЖІ ІЗ  
МОБІЛЬНИМИ СЕНСОРАМИ**

---

Лисенко О.І., Явіся В.С., Валуйський С.В., Прищепя Т.О.,  
Романюк А.В.

---

**WIRELESS SENSOR NETWORKS WITH MOBILE  
SENSORS**

Lysenko O.I., Yavisya V.S., Valuiskyi S.V., Pryshchepa T.O.,  
Romaniuk A.V.

The section deals with the features of the construction, operation and design of wireless sensor networks (WSN) with mobile sensors (MS). The problems of WSN control are analyzed. The functional model of the WSN control system is substantiated. The functional model produces solutions (control methods) for management functions at different levels of the OSI model. It was proposed an algorithm of solving the problem rational topology planning using the knowledge base of specially designed rules of such repeaters placement, which avoids exhaustive search of network graphs to get close to the optimal solution in real time. The application of the algorithm allows to obtain rational solutions (which differ from the optimal ones by 5-7%) in real time (units / tens of seconds). It was done an analysis of the possibilities of using of nanosatellites in WSN as repeaters and mobile sensors.

У розділі розглядаються особливості побудови, функціонування та проектування безпроводових сенсорних мереж (БСМ) із мобільними сенсорами (МС). Проаналізовано задачі управління БСМ з МС. Обґрунтовано функціональну модель системи управління БСМ з МС, яка виробляє рішення (методи управління) за функціями управління на різних рівнях моделі OSI. Запропоновано алгоритм планування раціональної топології безпроводової сенсорної мережі із застосуванням бази правил для скорочення повного перебору графів мережі. Застосування алгоритму дозволить отримати раціональні рішення (які відрізняються від оптимальних на 5-7%) в режимі реального часу (одиниці/десятки секунд). Проведено аналіз можливостей застосування наносупутників в БСМ в якості ретрансляторів і мобільних сенсорів.

### 11.1. Особливості побудови БСМ з МС

Безпроводова сенсорна мережа (БСМ) або WSN (Wireless Sensor Network) являє собою розподілену та стійку до відмов окремих елементів мережу мініатюрних електронних пристроїв (сенсорних вузлів), які здійснюють збір даних про параметри зовнішнього середовища та їх передачу в центр обробки за

допомогою ретрансляції від вузла до вузла. У якості вузлів БСМ використовуються спеціальні пристрої – так звані моти.

Мот – мініатюрний обчислювально-комунікаційний пристрій, який являє собою невелику плату, до складу якої входить модуль збору і обробки даних (процесор, оперативна пам'ять, флеш-пам'ять), приймально-передавальний модуль, а також джерело живлення і датчики. Типи датчиків можуть відрізнятися за призначенням сенсорного вузла (температури, тиску, вологості, освітлення, вібрації тощо) [1]. На рис. 1.1 зображено складові сенсорного вузла для моніторингу радіації із трубкою Гейгера.

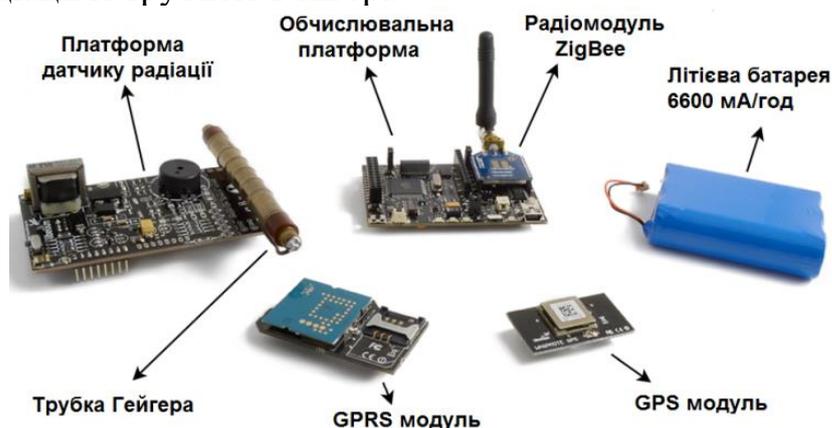


Рис. 11.1 Склад сенсорного вузла

У загальному, функціонування БСМ ґрунтується на спільній роботі великої кількості мотів, які можуть бути розташовані на значній географічній території, здійснюючи одночасний моніторинг великої кількості параметрів навколишнього середовища, в якому вони знаходяться, з подальшою передачею інформації моніторингу на спеціальні шлюзи, а від них – на центри обробки інформації. На відміну від традиційних датчиків, моти оснащені процесором, тому, замість передачі всіх даних моніторингу, можуть їх обробляти, виконуючи прості обчислення, і передавати в радіомережу тільки необхідну інформацію, економлячи при цьому вузлові та мережеві ресурси. Розміри мотів дозволяють розташовувати їх у важкодоступних місцевостях або використовувати для операцій, які вимагають швидкого реагування без присутності людини. Це означає, що мережеві протоколи та алгоритми роботи мота повинні мати можливість самоорганізації сенсорних вузлів у мережу.

Основними характеристиками БСМ є: розмірність: сотні, тисячі (залежить від області застосування); принципи організації і побудови: самоорганізація мережі, комутація пакетів, кожен вузол може бути маршрутизатором; мобільність: мобільні БСМ є окремим випадком MANET; тип і спосіб управління: ієрархічний, розподілений; потужність передачі терміналу: визначається типом сенсора; дальність зв'язку: в залежності від потужності та виконання конкретної задачі; швидкість передачі: швидкість передачі в радіоканалі залежить від відстані між абонентами, потужності передавача та інших параметрів фізичного рівня.

Сенсорні вузли можуть встановлюватися стаціонарно або мати можливість довільно пересуватися в певному просторі (так звані мобільні сенсори на основі платформ наземного, повітряного або космічного базування), не порушуючи логічної зв'язаності мережі, у цьому випадку БСМ не має фіксованої топології і має самоорганізовану структуру. Під самоорганізацією розуміється автоматичний вибір топології мережі, автоматичне підключення нових пристроїв до мережі, автоматичний вибір маршрутів передачі пакетів в мережі без участі людини.

До числа основних функціональних і експлуатаційних переваг БСМ слід віднести: можливість самоорганізації та самовідновлення мережі; масштабованість мереж з щільним розміщенням вузлів в просторі; високі показники надійності і відмовостійкості за рахунок комунікаційної надлишковості і наявності альтернативних маршрутів передачі даних; низька вартість та малі масогабаритні показники вузлів; висока енергетична ефективність; стійкість до модифікації топології мережі та змін характеристик середовища в якому поширюються радіохвилі; здатність вузлів спільно обробляти отримані дані і приймати рішення на базі розподілених алгоритмів; можливість швидкого і, за необхідності, прихованого розгортання мережі.

## 11.2. Аналіз задач управління БСМ з МС

Розробка БСМ залежить від чинників, які впливають на розробку моделей БСМ, а також є вирішальним для розробки протоколів або алгоритмів роботи БСМ. До таких чинників відносяться: відмовостійкість, масштабованість, витрати на виробництво, топологія мережі, навколишнє середовище, способи передачі даних, потужність споживання, самоуправління, децентралізоване управління, безпека, покриття, зв'язність вузлів мережі.

Таким чином, розробка БСМ з можливістю самоорганізації потребує вирішення великої кількості задач, які в загальному можна класифікувати наступним чином (рис. 11.2).



Рис. 11.2. Класифікація задач управління БСМ

За етапами задачі управління БСМ діляться на задачі планування, розгортання (організаційні способи) і оперативного управління (організаційно-технологічний спосіб) [2].

Етап планування здійснюється відповідно до технічного завдання з урахуванням умов застосування БСМ. Сутністю планування (виходячи із прогнозованої обстановки та наявних ресурсів) є: визначення районів покриття; способів встановлення (випадковий або детермінований) та доставки (постановці) сенсорів; визначення вузлів-шлюзів, способів збору та доставки інформації моніторингу тощо.

Етап розгортання полягає розгортанні в заданому районі (наприклад, вручну чи за допомогою літака, якій розкидає сенсори з повітря над певною площею) або переміщення сенсорних вузлів. При цьому задачі етапу розгортання БСМ можуть виконуватися й на етапі оперативного управління при значних її змінах (ушкодженні, введенні нових сенсорних вузлів й ін.).

На етапі оперативного управління за прийнятими критеріями ефективності постійно оцінюється стан сенсорної мережі, і приймаються заходи (відповідно до плану та реальної обстановки) щодо підтримання її показників ефективності функціонування в заданих межах або здійснюється їх системна (користувальницька) оптимізація. Задачі оперативного управління (на відміну від задач планування) вирішуються змішаним способом (централізовано/децентралізовано) у режимі реального часу, а за змістом багаторазово повторюються.

Цикл управління БСМ включає (рис. 11.3):

- збір інформації про стан мережі (необхідно приймати рішення за об'ємом, типом, способом, рівнями, функціями збору службової інформації);
- аналіз даної інформації – визначаються: рівень виконання мережею своїх функцій, необхідність управляючого впливу, цілі управління з подальшою деталізацією їх на підцілі;
- прийняття рішення (обчислення маршруту, вибір протоколу доступу, вибір методу передачі, способу розсилання службової інформації тощо);
- реалізація рішення (розсилання службової інформації, резервування ресурсу, установлення потужності передачі, спрямованості антен тощо).

Вирішення зазначених вище задач на всіх етапах функціонування БСМ неможливе без ефективної системи управління БСМ [3]. До системи управління БСМ пред'являються наступні вимоги:

- забезпечення адаптивного та розподіленого функціонування мережі з можливістю її самоорганізації;
- оптимізація характеристик мережі;
- забезпечення прийняття рішень у реальному масштабі часу;
- максимальна автоматизація процесів управління;
- безпека передачі та мінімальне завантаження службовою інформацією.



Рис. 11.3 Класифікація задач оперативного управління БСМ

### 11.3. Функціональна модель системи управління БСМ з МС

Об'єднання функцій системи управління у відносно незалежні групи дозволяє здійснити декомпозицію управління мережею на підсистеми (що значно спрощує задачу розробки математичного забезпечення управління): контроль елементів мережі та якості обслуговування потоків даних; збір службової інформації про стан мережі; управління побудовою та підтримкою маршрутів; управління топологією мережі; управління безпекою; управління радіоресурсом; управління навантаженням; планування, корегування та навчання. Функціональна модель системи оперативного управління мережі, яка реалізується на кожному вузлі надана на рис. 11.4.

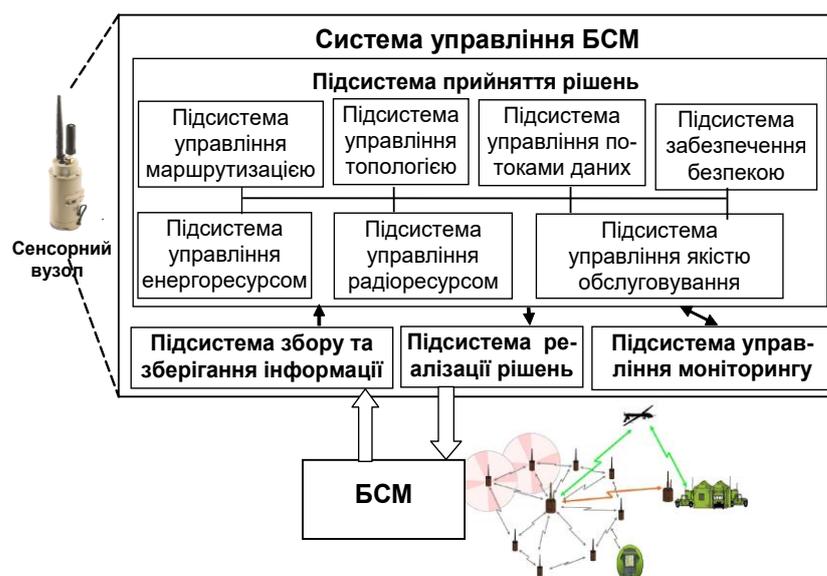


Рис. 11.4 Функціональна модель системи оперативного управління

За функціями задачі управління БСМ діляться на дві групи:

1. Спеціальні задачі управління (наприклад, визначення маршрутів переміщення сенсорів-роботів й координація їхнього переміщення).
2. Універсальні задачі управління [3,4]: управління топологією, управління маршрутизацією, управління навантаженням, управління радіоресурсом, управління енергоресурсом тощо. Однак, конкретна реалізація методів управління БСМ повинна враховувати її призначення та особливості архітектури (розмірність, мобільність, ресурс батарей тощо).

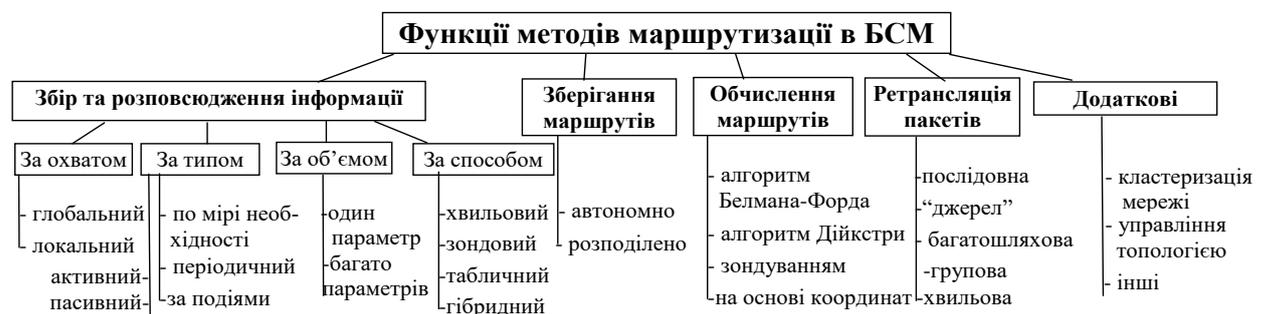
Розглянемо основні функціональні підсистеми моделі оперативного управління БСМ (рис. 11.4) та напрямки їх синтезу: управління маршрутизацією, управління радіоресурсом, управління енергоресурсом, управління передачею інформації із заданою якістю обслуговування, управління безпекою, прийняття рішень по управлінню та інші.

### *Підсистема маршрутизації повідомлень в БСМ [5]*

Ця підсистема забезпечує побудову та підтримку маршрутів передачі заданої якості при виконанні вимог до їх функціонування (децентралізованості, мінімізації службового трафіку тощо). Особливості БСМ потребували провести класифікацію методів та функцій маршрутизації, які запропоновані для безпроводних сенсорних мереж, а також розробки нових ефективних методів маршрутизації (рис. 11.5, 11.6).



**Рис. 11.5** Класифікація методів маршрутизації в БСМ



**Рис. 11.6** Класифікація функцій методів маршрутизації в БСМ

Синтез певного методу маршрутизації буде визначатися параметрами мережі (розмірністю, площею покриття) та сенсорів (кількість параметрів моніторингу, ємність батареї, потужність передавача, об'єм інформації моніторингу тощо).

### *Підсистема управління радіоресурсом в БСМ*

Мета цієї підсистеми – розподіл часового, просторового, частотного, кодового ресурсів для забезпечення інформаційного обміну між сусідніми вузлами.

На рис. 11.7 наведена класифікація методів доступу в БСМ класу MANET.



Рис. 11.7 Класифікація методів доступу до радіоресурсу

В якості напрямків рішення проблеми розподілу радіоресурсу в БСМ можна віднести наступні: вдосконалення протоколу доступу IEEE 802.11; розробка нових методів детермінованого доступу; вдосконалення протоколу IEEE 802.15; застосування надширококомовних сигналів (UWB) тощо.

### Підсистема управління топологією БСМ [3]

Топологія визначає потенційні можливості мережі щодо доставки інформації (пропонується, що кожен вузол може змінювати потужність передачі з певним шагом дискретизації або змінювати спрямованість антен). Залежно від основного критерію ефективності, розрізняють наступні варіанти постановки задач синтезу топології БСМ (рис. 11.7):

- за критерієм мінімуму використання сенсорів – знайти зв'язну топологію з мінімальною кількістю сенсорних вузлів при заданих обмеженнях (в якості обмежень можуть виступати кожний із критеріїв ефективності);
- за критерієм необхідної зв'язності (структурної надійності) – знайти зв'язну ( $\nu$ -зв'язну) топологію мережі при заданих обмеженнях;
- за критерієм часу – знайти топологію, що забезпечує мінімізацію максимальної затримки передачі повідомлень у мережі (напрямку) при заданих обмеженнях;
- за критерієм мінімуму трат енергії батарей, яка витрачається при передачі повідомлень за даної топології.



Рис. 11.7 Класифікація задач синтезу топології БСМ

Важливою особливістю задач управління є динамічний характер БСМ. Доцільно розглядати побудову мережі як багатоетапний процес її розвитку з деякої початкової топології в кінцеву. Звідси впливає постановка задачі динамічного програмування: задана загальна кількість районів спостереження. Потрібно розподілити їх за етапами (кількість в загальному випадку може бути невідомою) таким чином, щоб забезпечити оптимум прийнятого критерію ефективності. Показниками оцінки ефективності результату процесу управління БСМ можуть виступати ступінь досягнення й час виконання  $i$ -ї задачі (мети) управління.

Необхідно відзначити, що синтез топології мереж великої розмірності наштовхується на низку труднощів, пов'язаних з великою розмірністю БСМ та багатоекстремальністю цієї задачі. Перелічені труднощі викликають необхідність використання декомпозиційного підходу: загальна задача синтезу топології розбивається на низку підзадач за певними пріоритетами критеріїв ефективності. Зазначені часткові задачі синтезу не є незалежними. Рішення перерахованих часткових задач, у сукупності складає загальну задачу синтезу, та здійснюється, як правило, з використанням наближених евристичних методів.

### *Підсистема управління енергоспоживанням [3]*

Електроживлення сенсорних вузлів здійснюється від батарей (використання їх ємності визначається параметрами процесора, пам'яті, пристрою моніторингу і потужності прийомопередавача), тому в системі управління БСМ виділена підсистема управління енергоресурсом. Метою функціонування даної підсистеми є мінімізація споживання енергії вузлами мережі або максимізація „часу життя” мережі – часу роботи мережі до моменту відмови виконувати свої функції вузла (чи їх множини) через нульову ємність його (їх) батареї.

Проведений аналіз різних методів управління енергоспоживанням (рис. 11.8) показує, що управління енергоспоживанням повинне здійснюватися за функціями управління на різних рівнях еталонної моделі взаємодії відкритих систем (ЕМ ВВС). Проведені дослідження показують, що застосування розглянутих методів дозволяє в середньому збільшити „час життя” мережі в 1.5...2 рази та зменшити середню потужність передачі на одну ретрансляційну ділянку на 15...20%. Синтез оптимального методу управління енергоресурсом (або їх множини) буде визначатися параметрами конкретної мережі та ухваленими рішеннями щодо реалізації інших функцій управління мережею.



**Рис. 11.8** Класифікація методів управління енергоспоживанням (ф – фізичний, к – канальний, м – мережевий рівні еталонної моделі)

### Підсистема управління потоками даних [3]

Підсистема управління навантаженням в основному працює на транспортному (управління швидкістю передачі та управління чергами у вузлах) та мережевому рівні (підсистема маршрутизації рис. 11.9).



**Рис. 11.9** Управління потоками даних



**Рис. 11.10** Класифікація методів управління потоками даних

На сьогодні розроблено багато методів і протоколів управління передачею даних в телекомунікаційних мережах на транспортному рівні моделі OSI, які можна класифікувати за наступними ознаками (рис. 11.10):

- за кількістю підтримуваних швидкостей передачі: багато швидкісні та одношвидкісні;
- за кількістю маршрутів: одномаршрутні та багатомаршрутні;
- за функціонуванням на рівні моделі OSI: однорівневі, багаторівневі (міжрівневі);

- за класом обслуговування: максимальних зусиль (Best effort), гарантована передача (Assured forwarding); термінова передача (Expedited forwarding);
- за місцем управління: у вузлах мережі, з кінця в кінець.

Таким чином параметри навантаження, тип трафіка та параметри БСМ будуть визначати вибір або синтез нових методів управління потоками та боротьби з перевантаженнями.

### *Підсистема управління якістю обслуговування (QoS-передачі даних)*

Одним із завдань оперативного управління БСМ є забезпечення передачі певних класів трафіка з заданою якістю обслуговування (QoS, *Quality of Service*) [6], наприклад, передача відеозображення полю бою. Проведений аналіз можливих методів управління якістю обслуговування за рівнями еталонної моделі. Традиційні QoS-методи управління (*Differentiated service* та *Guaranteed service*) не враховують особливості БСМ і тому є неефективними. Розробка QoS-методів управління для динамічної або статичної природи БСМ при заданих вимогах потребує окремого рішення низки задач для більшості рівнів моделі OSI з координацією їх роботи під управлінням системи управління, яка буде реалізована на кожному вузлі мережі.

Для сенсорних мереж на сьогодні запропонована низька QoS-моделей управління (наприклад, для мережевого рівня QoS-маршрутизація SPEED, для транспортного ESRT [7]). Однак, кожен з них передбачає управління якістю на певному рівні еталонної моделі взаємодії відкритих систем.

Забезпечення заданої якості обслуговування в БСМ повинне здійснюватися за функціями з їхньою реалізацією на всіх рівнях моделі OSI під управлінням виділеної QoS-підсистеми (*cross level*), основними елементами якої є база методів управління (за рівнями еталонної моделі) і підсистеми прийняття QoS-рішень (містить знання про цілі управління й методи їхнього досягнення, а також базу моделей ресурсів мережі) [6].

### *Підсистема забезпечення безпеки передачі даних [8]*

Проведений аналіз основних аспектів безпеки: уразливість БСМ, потенційна можливість атак, оцінка їх погроз, необхідні сервіси безпеки та можливі механізми їх реалізації.

Сервіси безпеки повинні враховувати особливості БСМ і забезпечуватися відповідними механізмами безпеки з метою захисту від певної множини атак. Сервіси безпеки звичайно включають наступні основні поняття: таємність, автентифікація, цілісність, контроль доступу, неспростовність та доступність.

Зроблено висновок, що захист від зовнішніх атак у БСМ повинен здійснюватися методами криптографічного захисту, внутрішніх атак – застосуванням систем виявлення атак (СВА). Проведений аналіз варіантів побудови СВА дозволяє зробити наступні рекомендації з їхньої побудови: архітектура конкретної СВА буде визначатися архітектурою БСМ (для

ієрархічних БСМ тактичного рівня доцільна архітектура „агент-менеджер”); кожен вузол мережі повинен бути оснащений децентралізованою локальною СВА реального часу з можливістю колективного прийняття рішень щодо виявлення атак і відповідній реакції (рис. 11.11); перспективною технологією прийняття рішень у СВА є інтелектуальні мобільні агенти з використанням нейромереж і/або нечіткої логіки; функціонування СВА вузла повинне бути погоджене за рівнями еталонної моделі взаємодії відкритих систем і функціями системи управління БСМ.

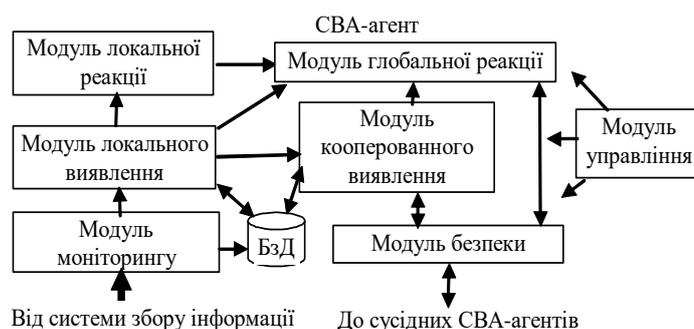


Рис. 11.11 Концептуальна модель IDS-агента

### *Підсистема прийняття рішень щодо оперативного управління БСМ*

Системи управління (СУ) можуть бути класифіковані як централізовані, децентралізовані та ієрархічні [9]. В централізованих СУ (BOSS, MOTE-VIEW, SNMS, Sympath) базова станція збирає інформацію про стан сенсорної мережі та приймає рішення по управлінню. Переваги цієї СУ: необмеженість ресурсів та добра якість рішень, недолік – низька живучість, неможливість управління при розподілі мережі на підмережі та значний службовий трафік. В децентралізованих СУ (DSN RM, Node-energy level management, App-Sleep) критичний ресурс вузлів та значна складність задач управління.

Класична реалізація систем управління архітектури агент-менеджер наведена в BOSS і MANNA [10]. На основі інтелектуальних агентних технологій побудована система управління Agent-Based Power Management [11].

Пропонується вироблення рішень (методів управління) системою управління здійснювати за функціями управління на різних рівнях моделі OSI [3]. Через динамічний характер задач управління, їх високу розмірність, неповноту й нечіткість контрольної інформації пропонується використати нечітку систему управління (НСУ). Розглянуто структуру НСУ, що складається з наступних компонентів: знання про об'єкт управління; знання про цілі функціонування й управління; знання про способи досягнення цілей (рис. 11.12). Запропоновано схему прийняття рішень НСУ, що враховує послідовність етапів циклу управління: оцінка ситуації, визначення мети управління, виявлення необхідності управління, пошук припустимих рішень і методу досягнення поставленої цілі й реалізація обраного методу.

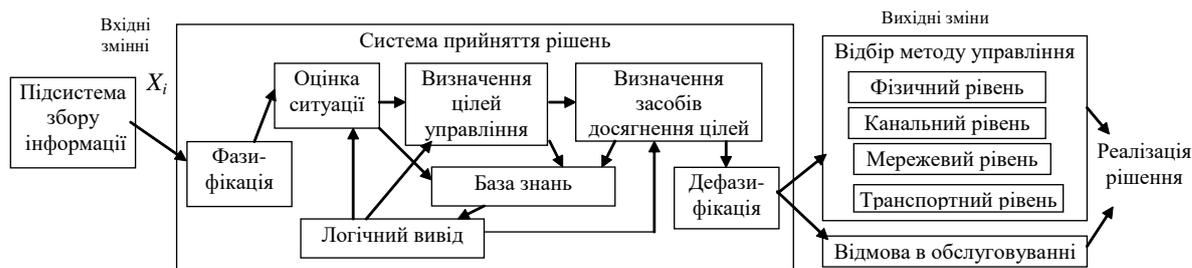


Рис. 11.12 Процес прийняття рішення по управлінню БСМ

В умовах децентралізованого управління кожен вузол буде реалізовувати дві взаємозалежні групи цілей, що визначають багатокритеріальність управління: користувальницькі цілі (досягнення екстремуму або виконання обмежень на показники ефективності при передачі повідомлень) і мережеві (зонові) цілі (досягнення оптимальних мережевих або зонових показників ефективності). Задача ухвалення рішення в управлінні БСМ зведена до задачі багатокритеріальної оптимізації для нечітко заданих цілей й альтернатив, представлених у вигляді дерева „цілі – методи”.

#### 11.4. Алгоритм управління топологією БСМ з МС

Актуальність і практична значимість задачі проектування раціональної топології БСМ обумовлена наступним. Положення кінцевих пристроїв (КП) мережі не може вибиратися довільно і визначається конкретними умовами задачі моніторингу. Обмежений радіус дії радіопередавачів цих вузлів обумовлює необхідність включення до складу мережі ретрансляторів, що здійснюють передачу інформаційних повідомлень від КП до шлюзу (ЦОД). Маючи обмежену можливість вибору кількості, розміщення і технічних характеристик таких вузлів і бажаючи мінімізувати затрати на створення та обслуговування БСМ, зберігаючи при цьому її працездатність і надійність на заданому рівні, ми стикаємось з проблемою оптимізації технічного рішення – топології мережі. Раціональна топологія БСМ дозволить скоротити трафік і знизити енергоспоживання на вузлах, що у свою чергу дозволить збільшити тривалість безвідмовної роботи мережі і знизити загальні витрати на її обслуговування.

Розглянемо приклад архітектури БСМ із застосуванням потіряних ретрансляторів у якості беспілотних літальних апаратів (БПЛА) (рис. 11.13). БСМ складається із сукупності  $N$  сенсорів, кінцевих вузлів (КП), розміщених з координатами  $(x_i, y_i), i = \overline{1, N}$ , на деякій території розміром  $r$ , яку часто називають сенсорним полем. Для того, щоб зібрати дані з сенсорів і передати на шлюз використовується сукупність  $K$  ретрансляторів (маршрутизаторів) на основі мініатюрних БПЛА, розміщених на висоті  $h$  з координатами проекції  $(x_{ok}, y_{ok}), k = \overline{1, K}$  і радіусом зони радіопокриття  $R$ . Якщо сенсор знаходиться в зоні

радіопокриття БПЛА, дані мережею ретрансляторів потрапляють на шлюз, а потім через глобальні мережі в центр оброблення даних.

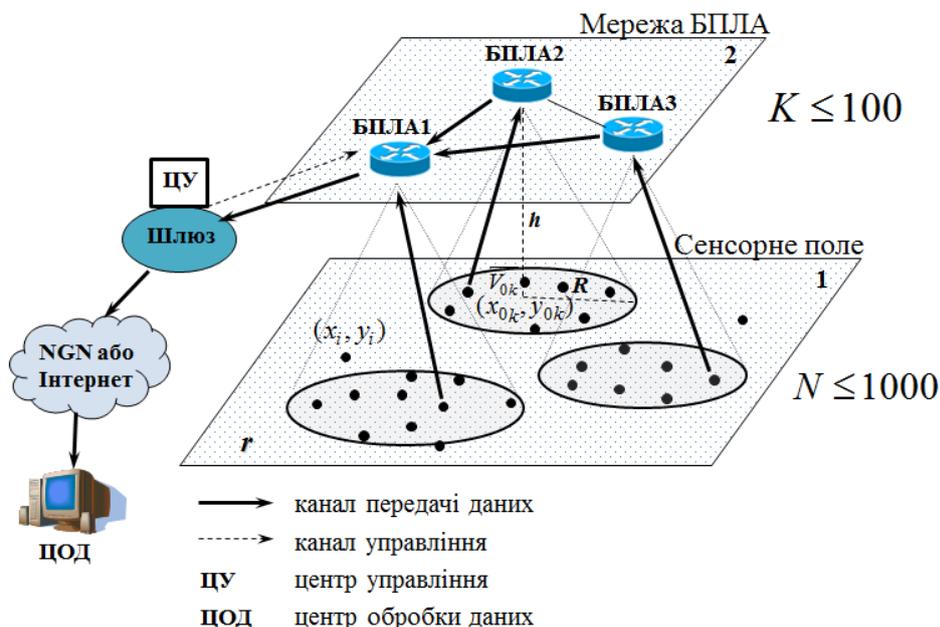


Рис. 11.13 Приклад архітектури БСМ із БПЛА

Під топологією мережі будемо розуміти сукупність геометричного розташування її вузлів і ймовірностей використання комунікацій між ними для доставки повідомлень:  $(\|R_i\|, \|p_{ij}\|), i, j = \overline{1, N}$ , де  $\|R_i\|$  - множина вузлів БСМ;  $\|p_{ij}\|$  - множина ймовірностей використання комунікацій між вузлами. Таким чином, БСМ можна представити у вигляді спрямованого зваженого графа, що складається з безлічі вершин (вузлів) і ребер (каналів зв'язку) (рис. 11.14).

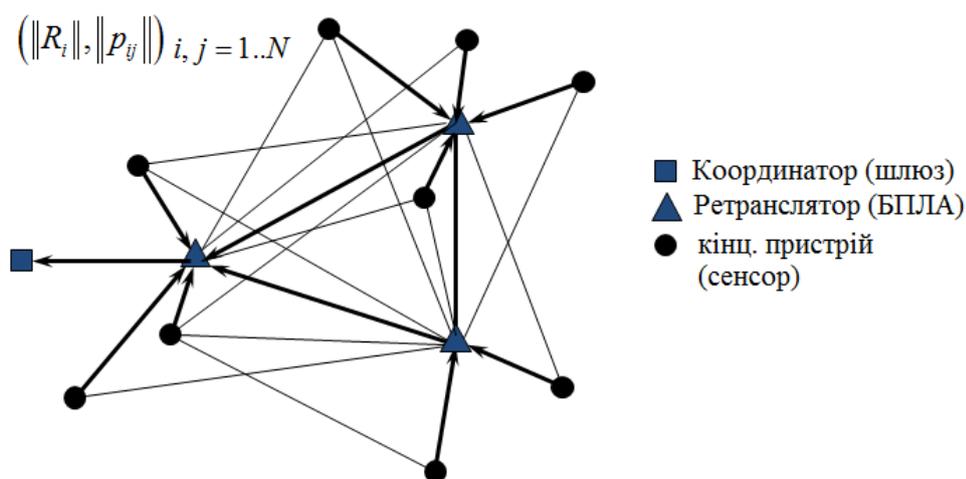


Рис. 11.14 Приклад графу мережі БСМ із МС

Побудова маршрутів від КП до шлюзу здійснюється за допомогою алгоритму динамічного програмування – методу Беллмана-Форда. Критеріальна функція

цього алгоритму (функція Беллмана) визначає умовну вартість транспортування потоку даних між сусідніми вузлами маршруту [12]:

$$W = C_m + C_r \xrightarrow{\|R_i\|} \min, \text{ де } C_m = \begin{cases} C_m^{nom} \\ 0 \end{cases}, \quad (1)$$

$$C_r = \begin{cases} \frac{U_{RX}^* + U_{TX}^*}{U_{max} - U_w^*} C_m^{nom}, (U_{RX}^* + U_{TX}^*) \leq (U_{max} - U_w^*) \\ \infty, (U_{RX}^* + U_{TX}^*) > (U_{max} - U_w^*) \end{cases}$$

де  $C_m$  - умовна вартість вузла БСМ, приймаюча нульове значення при повторному використанні вузла в топології (чим досягається мінімізація кількості ретрансляторів),  $C_m^{nom}$  - умовна номінальна вартість вузла,  $C_r$  - умовна вартість ретрансляції,  $U_{RX}^*, U_{TX}^*$  - фактичний трафік через вузол з урахуванням повторних ретрансляцій,  $U_{max}$  - максимальний трафік через вузол,  $U_w^*$  - еквівалентна щільність потоку даних, випромінюваного сусідніми вузлами з урахуванням конкуренції за доступ до середовища передачі (радіоканалу).

Таким чином, можемо сформулювати наступну *математичну постановку задачі* – знайти таку топологію мережі (місце розташування ретрансляторів), яка мінімізує вартість транспортування потоків даних від сенсорів до шлюзу, при виконанні обмежень на ресурси мережі, забезпеченні структурної зв'язності і показників функціонування мережі:

$$X_0 = \arg \min_{X_0 \in \Omega_{1,2}} C(X) = \arg \min_{X_0 \in \Omega_{1,2}} \sum_{i=1}^{N+K} \sum_{j=1}^{N+K} W_{ij}, i \neq j, \quad (2)$$

$$\Omega_1 : \{X \in r, p_{ij} \leq PER^0, P \leq P^0, N \leq 1000, K \leq 100\}$$

$$\Omega_2 : \{s(m_{ab}) \geq s^0, t_3(m_{ab}) \leq t_3^0, a, b = \overline{1, N}\},$$

де  $X$  – вектор координат проєкцій розміщення множини БПЛА;  $PER^0$  – граничне значення ймовірності пакетної помилки в радіоканалі;  $P, P^0$  – надійність і обмеження надійності мережі;  $s(m_{ab}), t_3(m_{ab}), s^0, t_3^0$  - пропускна здатність (ПЗ) і затримка в маршруті  $m_{ab}$  і відповідні обмеження.

Задача проектування раціональної топології БСМ з формальної точки зору аналогічна задачі формування топологічної структури будь-якої безповодової мережі, яка є однією з основних при її проектуванні та полягає у виборі оптимальної схеми з'єднання вузлів комутації та концентрації, виборі пропускної здатності ліній та оптимальних маршрутів передачі інформації.

Відомі на сьогодні підходи до рішення подібних задач засновані на застосуванні апарату комбінаторного аналізу [13]. Подібні алгоритми опираються на представлення мережі передачі даних у вигляді кінцевого графу без петель і кратних ребер, вершини якого відповідають вузлам мережі, а ребра – лініям зв'язку. Застосування теорії перерахування графів для рішення задачі

топологічної оптимізації останнім часом знаходить все більш широке застосування, що зв'язано з підвищенням продуктивності ЕОМ, розробкою нових високоефективних алгоритмів генерації графів із заданими властивостями. Основною перевагою даного підходу є можливість отримання точного рішення, тому для невеликих мереж цей підхід є ефективним. Крім того, наявність точного рішення дозволяє оцінити якість існуючих та розроблених підходів к оптимізації топології.

Основний недолік алгоритмів конструктивного перерахування графів полягає в неможливості їх застосування для побудови топологій мереж великої розмірності, оскільки число генеруємих графів зростає експоненційно по мірі росту кількості вузлів мережі. Це обумовлює доцільність розробки альтернативних підходів до проектування раціональної топології БСМ.

Для вирішення даної задачі розроблено алгоритм, детально описаний в [14], який являє собою обчислювальну процедуру, що включає наступні основні етапи:

1 – Оцінка зв'язності мережі. У разі мобільних сенсорів спочатку прогнозується тривалість їх перебування в зоні радіо видимості ретрансляторів, а в разі фіксованих - відразу оцінюється ступінь покриття сенсорів ретрансляторами мережі. При не виконанні умов по зв'язності і надійності мережі - виконується відповідна процедура розміщення БПЛА.

2 – оцінка заданих функціональних показників (затримка, ПЗ маршрутів).

3 – удосконалений алгоритм пошуку раціональної топології БПЛА.

Суть удосконалення полягає в тому, що для скорочення повного перебору топологій застосовується сукупність правил такого розміщення ретрансляторів, яке дає раціональне рішення і мінімізує час його пошуку.

Правила представляють собою правила продукційного типу, які складаються з умови і дії. За однакового ефекту декількох правил застосовуються мета-правила. Правила можуть бути класифіковані залежно від необхідної мети - для забезпечення зв'язності, користувальницької або системної оптимізації. Наприклад, для забезпечення зв'язності мережі необхідно розміщувати БПЛА таким чином, щоб покрити якомога більше вузлів. Для максимізації ПЗ мережі – перерозподілити потоки по недовантаженим маршрутами.

Таким чином, застосування алгоритму дозволить скоротити перебір можливих графів і отримати раціональні рішення (які відрізняються від оптимальних на 5-7%) в режимі реального часу (одиниці/десятки секунд).

## 11.5. Аналіз можливості застосування наносупутників в БСМ в якості ретрансляторів та мобільних сенсорів

Побудова великорозмірних всеосяжних БСМ ускладнюється обмеженням дальності прямої радіовидимості між вузлами мереже через кривизну земної поверхні, а отже доцільним є розвиток можливостей використання ретрансляторів із мобільними сенсорами повітряного базування на основі БПЛА, а також

космічного базування на основі штучних супутників різного класу. Через високу вартість виготовлення і запуску супутників зв'язку на стаціонарну, середню чи низьку орбіту привабливою є ідея використання наносупутників (НС) формату *CubeSat*, що є досить дешевими, екологічними (протягом року згорають в атмосфері) і можуть бути виведеними на орбіту за допомогою систем “повітряного старту”, наприклад, на основі Ан-124-100 [15].

Пропонується створити НС угруповання, яке буде складатись з кластерів. Кожен кластер за об'ємом виконуваних функцій буде аналогічним супутнику системи *Iridium*. За таких умов, для створення глобальної системи супутникового зв'язку необхідно буде розташувати на шести орбітах мінімум 66 кластерів НС (по 11 на кожній орбіті).

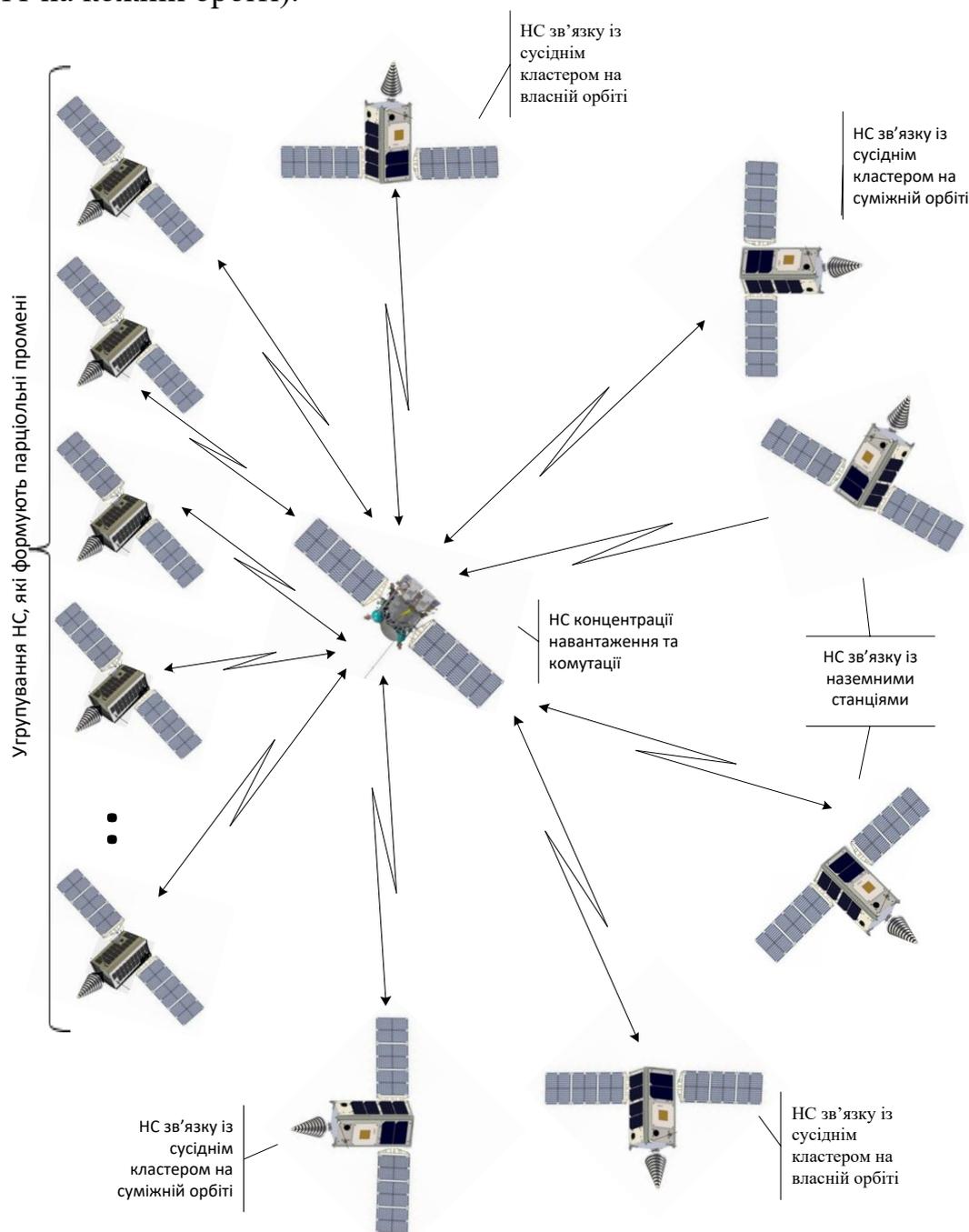


Рис. 11.15 Приклад архітектури кластеру наносупутників

Склад кластеру із НС може бути не однорідним з погляду на функції, що виконуються окремими апаратами: основна частина НС може використовуватися для зв'язку із абонентськими терміналами, інші – для концентрації і комутації навантаження всередині кластеру, зв'язку із сусідніми кластерами НС, які розташовані на власній та суміжних орбітах, а також для зв'язку із наземними станціями. Оскільки відстань між НС кластеру складає лише кілька десятків метрів, взаємодія між ними може здійснюватися за допомогою *Wi-Fi* або лазерного променя. Склад кластеру пояснює рис. 11.15.

Мінімальна кількість НС у одному кластері визначиться наступним чином. Для зв'язку із абонентськими терміналами, за умови формування одним НС одного парціального променя, потрібно 32 апарати. Функцію концентрації і комутації навантаження всередині кластеру буде виконувати один НС (бажано із дублюванням). Для зв'язку із іншими кластерами на власній та суміжних орбітах – чотири НС, для зв'язку із наземними станціями – два НС. Таким чином, для виконання функцій аналогічних за обсягом тим, що виконує супутник *Iridium NEXT*, в кластері повинно бути не менше 40 НС.

Для формування діаграми спрямованості, яка забезпечить обслуговування території, що за площею співвідноситься із зоною обслуговування одного парціального променя супутника *Iridium NEXT*, пропонується використовувати спіральну конічну антену. За умови знаходження НС на висоті 750 км для покриття зони діаметром 700 км, необхідна антена із шириною діаграми спрямованості  $\theta = 50^\circ$ . Для середньої частоти взаємодії НС і абонентського терміналу 1,6 ГГц при довжині антени  $l=21$  см та діаметрі спіралі  $d=6$  см, підсилення становить  $G=9-11$  дБ. У згорнутому стані така антена являє собою пружину, що займатиме об'єм близько  $V=11$  см<sup>3</sup>, тобто 1,1 % від загального об'єму *CubeSat-1*. Антени НС, що формують парціальні промені на межі зони обслуговування кластеру, повинні забезпечити ширину діаграми спрямованості до  $\theta = 30^\circ$ , при цьому підсилення становить  $G=13-15$  дБ, але довжина антени збільшиться до  $l=56$  см при тому ж діаметрі. Тоді у складеному вигляді об'єм антени збільшиться майже у 2,5 рази [16].

Необхідне взаємне розташування променів НС в кластері можна забезпечити лише при керованому польоті НС. Тому на кожному НС необхідно мати систему орієнтації та стабілізації. Доцільно використовувати комбіновану систему [17], яка буде складатись з магнітних котушок, що дозволяють вирішувати безпосередньо завдання стабілізації й орієнтації, а також іонних двигунів, які будуть задіяні, в основному, для зміни орбіти НС. Це дозволить здійснити конфігурування взаємного розташування НС в кластері, значно збільшити термін служби НС та здійснювати їх плановий відхід з орбіти по закінченні експлуатації. Ця система також забезпечить необхідне положення сонячних батарей відносно Сонця.

## Список літератури

1. Кучерявый Е.А., Молчан С.А., Кондратьев В.В. Принципы построения сенсоров и сенсорных сетей // Электросвязь. – 2006. – № 6. – С. 10–15.
2. Романюк В.А. Цільові функції управління повітряною радіомережею. X Міжнародна науково-технічна конференція "Проблеми телекомунікацій" ПТ-2016: Збірник матеріалів конференції. К.: НТУУ "КПІ", 2016. – С. 43-47..
3. Лисенко О. І. Функціональна модель системи управління безпроводовою сенсорною мережею із самоорганізацією для моніторингу параметрів навколишнього середовища / О. І. Лисенко, К. С. Козелкова, В. І. Новіков, Т. О. Прищепа, А. В. Романюк // Системи обробки інформації. - 2015. - Вип. 10. - С. 222-225. - ISSN 1681-7710.
4. Романченко І.С., Лисенко О.І., Новіков В.І, Романюк В.А., Сова О.Я., Андрієвський А.П., Функціональна модель системи управління безпроводовою сенсорною мережею із самоорганізацією для зони АТО // Збірник наукових статей по матеріалам доповідей науково - практичної конференції «Винахід заради перемоги: обмін досвідом модернізації і ремонту бойової техніки та озброєння в умовах АТО» / (29 травня 2015р., ЦНДІ ОБТ ЗС України). – К., 2015. – С. 39-48.
5. Новіков В.И., Лысенко А.И. Метод адаптивного управления маршрутизацией в условиях нестабильности связей между узлами беспроводной сенсорной сети. X Міжнародна науково-технічна конференція "Проблеми телекомунікацій" ПТ-2016: Збірник матеріалів конференції. К.: НТУУ "КПІ", 2016. – С. 447-449.
6. Миночкин А.И., Романюк В.А. Управление качеством обслуживания в мобильных радиосетях // Зв'язок. – 2005. – № 8. – С. 17 – 23.
7. Chen D., Varshney P.K. QoS Support in Wireless Sensor Networks: A Survey // Proc. of the 2004 International Conference on Wireless Networks (ICWN 2004), June 21-24, 2004.
8. Міночкін А.І., Романюк В.А., Шаціло П.В. Виявлення атак в мобільних радіомережах // Збірник наукових праць № 1. – К.: ВІТІ НТУУ “КПІ”. – 2005. – С. 102 – 111.
9. Миночкин А.И., Романюк В.А. Методология оперативного управления мобильными радиосетями // Зв'язок. – 2005. – № 2. – С. 53 – 58.
10. Walters J. P., Liang Z., Shi W., Chaudhary V. Wireless Sensor Network Security: A Survey // Security in Distributed, Grid, and Pervasive Computing Yang Xiao,(Eds.) 2006.
11. Lee W. L., Datta A. Network Management in Wireless Sensor Networks // Handbook of Mobile Ad Hoc and Pervasive Communications, American Scientific Publishers, 2006.
12. Лисенко О.І., Чумаченко С.М., Валуйський С.В., Тесленко О.М. Питання оперативного розгортання сенсорних радіомереж на забруднених територіях // Збірник наукових праць УкрНДІЩЗ. – 2014.
13. Ільченко М.Ю., Кравчук С.О. Телекомунікаційні системи. – К.: Наукова думка, 2017.
14. Lysenko O.I., Valuiskyi S.V. Capacity increasing of sensor telecommunication networks / O.I. Lysenko, S.V. Valuiskyi // Telecommunication Sciences. – 2012. – vol. 3. – № 1. – P. 5–11.
15. Лисенко О.І., Гусинін В.П., Сердюк І.І., Жуков В.В., Чеканова І.В. Підходи до створення національної авіаційно-космічної системи легкого класу // Міжвідомчий науково-технічний збірник. “Адаптивні системи автоматизованого управління”, вип. № 4 (24), Дніпропетровськ, “Системні технології”, 2001.
16. Неганов Н.А., Ключев Д.С., Табаков Д.П. Устройства СВЧ и антенны. Теория и техника антенн. Часть 2. – М.: Едиториал УРСС, 2016. – 728 с.
17. V.S. Yavisya, N.M. Bendasiuk. Analysis of Methods fo Orientation and Stabilization of Nano-Satellites // 4th International Conference METHODS AND SYSTEMS OF NAVIGATION AND MOTION CONTROL (MSNMC-2016), October 18-20, 2016, Kyiv, Ukraine, pp. 158-161.

---

**НАДШИРОКОСМУГОВІ ІМПУЛЬСНІ  
РАДІОСИГНАЛИ ТА СИСТЕМИ**

Бунін С.Г., Трубаров І.В.

---

**ULTRA-WIDEBAND PULSED RADIO SIGNALS  
AND SYSTEMS**

Bunin S.G., Trubarov I.V.

The section deals with various aspects of utilization of ultra-wideband and, particularly impulse-radio ultrawide-band (IR-UWB) signals in communications systems. The strengths and weaknesses of such signals are discussed, as well as frequency bands where their usage is expedient. The specific features of generation and receiving of such signals are considered. The efficiency of non-coherent receiving scheme using a non-energy receiver is proved for the receiving of IR-UWB signals. Basic types of modulation for IR-UWB signals are introduced. The opportunity and efficiency of IR-UWB signals usage in satellite communication systems is proved.

У розділі розглядаються різні аспекти використання надширокосмугових та, зокрема, імпульсних надширокосмугових сигналів (IR-UWB) у системах зв'язку. Розглядаються переваги та недоліки таких сигналів, а також частотні діапазони, в яких їхнє використання є доцільним. Розглядаються особливості генерування та прийому таких сигналів. Показано ефективність некогерентного прийому з використанням схеми неенергетичного приймача для приймання IR-UWB сигналів. Наведено основні схеми модуляції IR-UWB сигналів. Обґрунтовано можливість та ефективність використання імпульсних надширокосмугових сигналів у системах супутникового зв'язку.

## 12.1. Визначення та характеристика надширокосмугових сигналів

В даний час проблемі застосування надширокосмугових (НШС) імпульсних радіосигналів у системах радіозв'язку приділяється значна увага. Це пов'язано з тим, що такі сигнали мають низку переваг по відношенню до вузькосмугових та широкосмугових сигналів, що базуються на синусоїдальних несучих.

Загальноприйнятий термін для НШС сигналів – «Ultra-Wide Band» (UWB) – означає в даний час цілу низку радіотехнічних понять: «імпульс», «імпульс короткої тривалості», «несинусоїдальний сигнал», «сигнал без несучої частоти», «моно-імпульс», «надширокосмуговий радіосигнал», «короткочасний імпульс». Даний вид сигналів є широкосмуговим, так як відношення його ширини смуги до значення центральної частоти спектра сигналу становить величину, більшу одиниці (для традиційних радіосигналів в системах радіозв'язку це відношення істотно менше). Для НШС поняття несучого коливання не визначене, проте для спрощення замість нього умовно розглядають центральну частоту спектра. Таким чином, термін НШС (UWB) скоріше є загальною назвою, яку дали фізичному процесу в кінці 80-х років.

Для визначення НШС сигналу вводять показник широкосмуговості  $\eta$  який задається співвідношенням:

$$\eta = \frac{\Delta f}{f_0} = 2 \frac{(f_{\max} - f_{\min})}{(f_{\max} + f_{\min})}, \quad (12.1)$$

де  $f_0$ ,  $f_{\min}$ ,  $f_{\max}$  – середня, мінімальна та максимальна частоти функції спектральної щільності одновимірного перетворення Фур'є  $S(f)$  сигналу  $S(t)$ ;  $\Delta f = f_{\max} - f_{\min}$  – ширина смуги частот сигналу.

У відповідності до (12.1) системи або сигнали, що мають  $\eta \leq 0,01$  відносять до вузькосмугових,  $0,01 < \eta \leq 0,25$  – до широкосмугових,  $0,25 < \eta \leq 1$  – до надширокосмугових. Однак, аналіз робіт, пов'язаних з побудовою UWB систем показує, що розширення смуги частот підвищує інформативність системи в тому випадку, коли просторова протяжність сигналу  $c \cdot \tau$  ( $c$  – швидкість світла,  $\tau = 1/\Delta f$  – тривалість простого сигналу,  $\Delta f$  – ширина спектра сигналу) стає набагато менше розміру випромінюючої (приймальної) апертури або розміру  $L$  об'єкта, що відбиває сигнал.

Тому більш точне та фізично обґрунтоване розмежування сигналів і систем за шириною смуги частот дає таке визначення: системи або сигнали є:

- вузькосмуговими при  $L/(c \cdot \tau) \ll 1$ ;
- широкосмуговими при  $L/(c \cdot \tau) \approx 1$ ;
- надширокосмуговими при  $L/(c \cdot \tau) \gg 1$ .

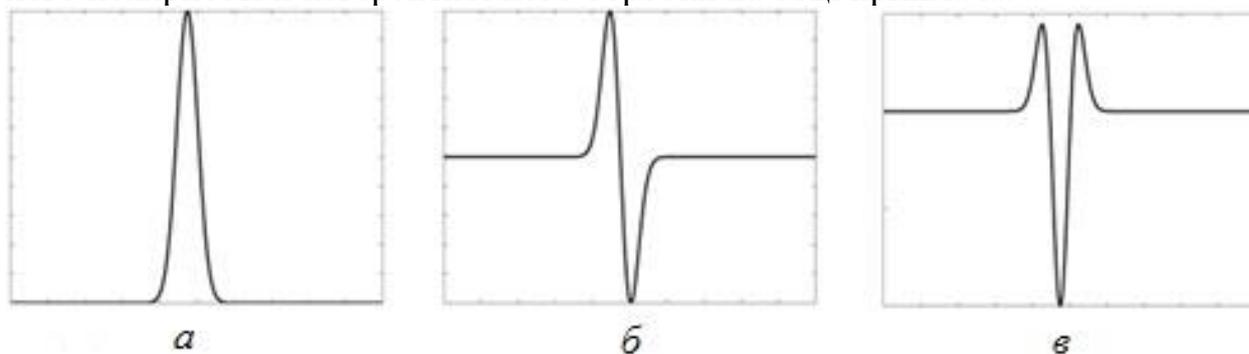
Це визначення пов'язує поняття ширини смуги системи безпосередньо з розмірами її антени або об'єкта опромінення.

Особливий інтерес представляють імпульсні надширокосмугові радіосигнали (Impulse Radio – UltraWide Band – IR-UWB), що являють собою послідовність надкоротких імпульсів (зазвичай тривалістю  $\tau_i < 2$  нс). У якості вихідних для передавання звичайно використовують прямокутні імпульси постійного струму, які через паразитні параметри схем генерації за формою наближаються до імпульсів зі згладженими фронтами (рис. 12.1, а). Форма таких імпульсів достатньо точно описується формулою гаусівського розподілу:

$$s(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-(t-\mu)^2/(2\sigma^2)}$$

Під час подачі такого імпульсу до антени у ній відбувається його диференціювання (оскільки антена не випромінює постійної складової), і електромагнітне поле в дальній зоні відповідає першій похідній гаусівського імпульсу. Дана похідна називається гаусівським моноциклом (рис. 12.1, б). Тривалість гаусівського моноциклу  $\tau_i$  визначає частоту максимуму спектра сигналу, а період повторення моноциклів – його вигляд. Енергетично значущий спектр (наприклад, на рівні -10 дБ від максимального значення) розташований в діапазоні від частоти, близької до нуля, до значень, які більш ніж у три рази перевищують частоту максимального рівня спектру, що відповідає «частоті періоду» моноциклу.

Приймальна антена також диференціює моноцикл, що приймається, в результаті чого на вхід приймача потрапляють імпульси у формі другої похідної гаусівського імпульсу (рис. 12.1, в). Слід звернути увагу на несиметричність форми даного сигналу по відношенню до нульового рівня. Дана обставина відіграє певну роль під час оцінок можливостей модуляції сигналу шляхом зміни його полярності й когерентної його обробки на боці приймача.



**Рис. 12.1.** Перетворення гаусівського імпульсу в процесі передачі: а – гаусівський імпульс; б – перша похідна гаусівського імпульсу; в – друга похідна гаусівського імпульсу

## 12.2. Переваги та особливості застосування надширокосмугових сигналів

Технологія UWB є альтернативною технологією бездротового доступу, що забезпечує обмін даними по радіоканалу між периферійними пристроями на

невеликих відстанях, з дуже високою швидкістю та малими енергетичними витратами. За рахунок широкого радіочастотного діапазону технологія UWB дозволяє передавати по бездротовому каналу на невеликі відстані (наприклад, в межах будинку або невеликого офісу) значно більші обсяги даних за менший час, ніж у традиційних бездротових технологіях. У поєднанні з малим енергоспоживанням та імпульсним характером передачі даних це дозволяє досягати високих швидкостей передачі без перешкод з боку обладнання інших бездротових стандартів, таких як Wi-Fi, WiMAX та стандартів стільникового зв'язку.

Інтерес до створення систем передачі інформації на базі UWB сигналів зумовлений низкою переваг, які вони мають у порівнянні з існуючими системами зв'язку. Одними з основних переваг є прихованість та стійкість до придушення. Приймачі звичайних радіосистем сприймають UWB сигнал, як випадкові перешкоди, що нерідко виявляються повністю замаскованими по амплітуді в природних шумах. Різноманітні НШС системи використовують різні алгоритми побудови кодових псевдовипадкових послідовностей, загальне число яких є дуже великим. Тому випадкові збіги кодів у різних систем практично виключені, а цілеспрямований підбір коду являє собою досить складну та трудомістку задачу. Навіть якщо принцип виявлення UWB передачі буде відомий, важко буде реалізувати систему придушення через широку смугу робочих частот.

Розширення смуги каналу зв'язку, перехід до каналів з надширокою смугою дає можливість практично необмеженого збільшення числа каналів зв'язку. Заздалегідь розподіливши сигнали (частоти, види модуляції та інше) між абонентами, можна забезпечити незалежний в сенсі взаємного прослуховування та взаємних перешкод зв'язок між ними. При цьому багатоканальний, але розділений в часі, зв'язок не потребує підвищення потужності передавача, тоді як одночасна передача незалежної (різної) інформації декільком абонентам вимагатиме збільшення цієї потужності або скорочення швидкості передачі інформації.

Оскільки UWB сигнал розподілений в широкому спектрі частот, вплив вузькосмугових перешкод обмеженої потужності на нього виявляється незначним в результаті кореляційної обробки. Крім того, застосування дуже коротких імпульсів дозволяє генерувати їх з високою шпаруватістю (тобто відносно «рідко»), при якому сумарна тривалість імпульсів може становити менше 1% від загального часу зв'язку і, таким чином, більше 99% шуму стробуванням буде просто «вирізатися».

Ще однією перевагою даної системи в порівнянні зі звичайними вузькосмуговими є слабка чутливість до спотворень в умовах багатопроменевого поширення радіохвиль. Даний ефект, обумовлений надходженням на приймальну антену, як прямого сигналу від передавача, так і сигналів, відбитих від навколишніх предметів, є одним з найважливіших факторів погіршення умов радіоприйому в будь-яких системах. Формування спотворень в таких каналах пов'язано з накладенням одного сигналу на інший з приблизно рівною амплітудою, але відмінних за фазою. В результаті відбувається часткове або

повне придушення одного сигналу іншим. До теперішнього часу розроблений набір методів зменшення цього ефекту, проте жодна з традиційних технологій не здатна боротися з відбитими сигналами, які мають затримку в одиниці наносекунд, що характерно для випадків поширення радіохвиль всередині приміщень.

Використання UWB технології дозволяє забезпечити високий ступінь електромагнітної сумісності. Малі рівні сигналів, шумоподібна структура UWB та використання кодування в тому числі для згладжування спектра потужності призводять до того, що UWB системи практично не створюють перешкод для інших пристроїв, що дозволяє в більшості випадків працювати на безліцензійній основі (рис. 12.2). На представленому рисунку горизонтальна пунктирна лінія означає допустиму величину щільності потужності сигналу-завади, визначену Федеральною комісією зі зв'язку США (FCC). Видно, що НШС сигнал не буде причиною шумів для існуючих систем.

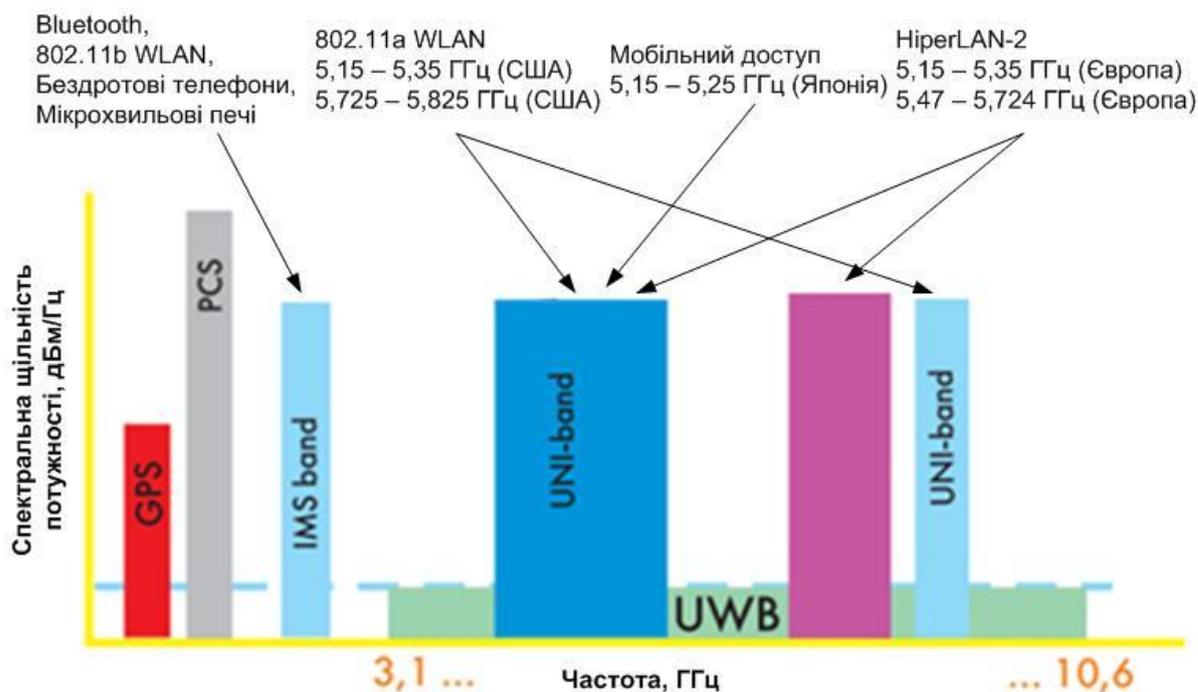


Рис. 12.2. Відношення частотних смуг відомих технологій та НШС систем

Відповідно до чинного «Регламенту радіозв'язку», весь спектр радіочастот розподілений між різними службами, у зв'язку з цим вільних ділянок вже практично не залишилося в усьому діапазоні від наднизьких до надвисоких частот. Однак, як вже зазначалося, різні UWB системи, що використовують різні кодові послідовності, можуть працювати на однакових частотах, не впливаючи на роботу один одного. Крім цього, перевагою UWB систем є той факт, що їм для роботи не потрібний спеціально виділений для них частотний діапазон, оскільки вони можуть використовувати ділянки спектра, вже зайняті іншими системами, не створюючи для них перешкод. Це обумовлене тим, що, навіть володіючи досить високою сумарною потужністю передачі в ефір, UWB сигнали, розподілені в надширокій смузі частот, в кожній конкретній точці цього спектра

мають дуже невеликий рівень. На практиці він не перевищує рівнів побічних випромінювань, дозволених для різноманітних домашніх, офісних та промислових пристроїв, тому за чинними правилами є допустимим. Іншими словами, формально UWB системи, що не порушують прийнятих правил, можуть використовуватися без отримання будь-яких спеціальних ліцензій.

Висока проникна здатність UWB сигналів через різні перешкоди забезпечує їх надійне розповсюдження за будь-яких умов: всередині та навіть в невеликій товщі землі. Саме завдяки НШС, загасання короткоімпульсних сигналів в різних середовищах виявляється досить малим, оскільки їх придушення зазвичай відбувається не в усьому діапазоні. Саме тому, навіть при малій потужності, такі сигнали можуть ефективно використовуватись, наприклад, для задач підповерхневої радіолокації та спостереження через стіни. Сигнал UWB значно краще проникає крізь стіни та інші перешкоди, що робить мережі на базі UWB більш привабливими для створення офісних мереж.

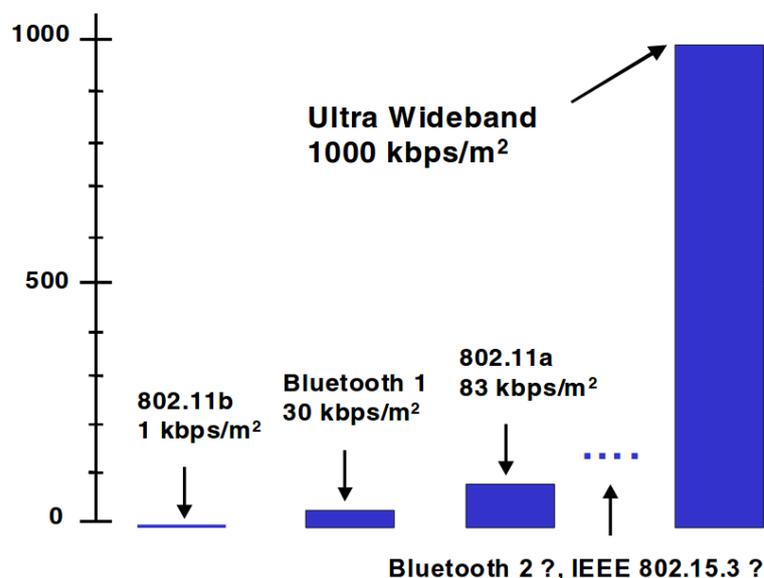
Можливість вимірювання відстаней з дуже високою точністю є також однією із позитивних особливостей UWB сигналів. Дуже мала тривалість імпульсів обумовлює можливість визначення відстаней з похибкою до одиниць сантиметрів.

Для невеликої області радіопокриття можлива робота з малою випромінюваною потужністю, що забезпечує, окрім прихованої передачі радіосигналів з низькою ймовірністю перехоплення інформації, мініатюризацію обладнання та економічне енергоспоживання. Технологія UWB, в порівнянні з традиційними системами, допускає роботу зі значно меншими потужностями передавача, а, отже, з малими енерговитратами. Крім цього, так як UWB системи оперують з імпульсами дуже малої тривалості при коефіцієнті заповнення імпульсної послідовності всього близько 0,5 - 1%, це у свою чергу також знижує споживання енергії UWB пристроями.

Технічна простота та відносна дешевизна апаратурної реалізації приймальних і передавальних пристроїв забезпечує високу рентабельність та економічність для масового виробництва. Вироби на основі UWB технічно простіше традиційних, адже в UWB системах немає необхідності у використанні потужних підсилювачів, їх приймачі не мають гетеродинів і прецизійних елементів частотної фільтрації, а вузли модуляції та демодуляції сигналів досить прості та дешеві. В системах UWB схема передавача є дуже простою, оскільки в ньому, по суті, лише формується імпульс необхідної форми, який далі одразу можна подавати до антени. Антенні системи UWB є також досить простими у виконанні та можуть виготовлятися безпосередньо на друкованих платах. У приймальному пристрої сигнал проходить через широкосмуговий фільтр, що виділяє робочу зону спектра, посилюється і в результаті кореляційної обробки одразу набуває вигляду готових видеоімпульсів, які далі подаються на пристрій декодування. Таким чином, технологія UWB дозволяє створення однокристальних приймально-передавальних пристроїв без будь-яких складних зовнішніх кіл частотної фільтрації та підсилення.

Найважливішим критерієм, що характеризує ефективність систем бездротового зв'язку, є висока потенційна питома щільність передачі даних. (рис. 12.3). Вона визначається як величина досяжної сумарної швидкості передачі даних на один квадратний метр робочої зони та має розмірність біт/(с·м<sup>2</sup>). UWB системи мають найвище на сьогоднішній день значення цього показника – близько 1 Мбіт/(с·м<sup>2</sup>).

**Рис. 12.3.** Порівняльна характеристика питомих щільностей трафіку для IEEE 802.11, Bluetooth та UWB



Зазначені технологічні та експлуатаційні переваги UWB технології зумовлюють різноманітні можливості їх застосування. Таким чином, UWB технологія має низку переваг, які роблять її привабливою для застосування в області телекомунікацій. Зокрема, майбутні UWB системи володітимуть наступними характеристиками:

- потенційно низька складність та низька вартість;
- шумоподібні властивості сигналу;
- стійкість до багатопроменевості та завмирань;
- велике часове розширення, що є позитивним фактором для визначення місця розташування та відстеження об'єктів.

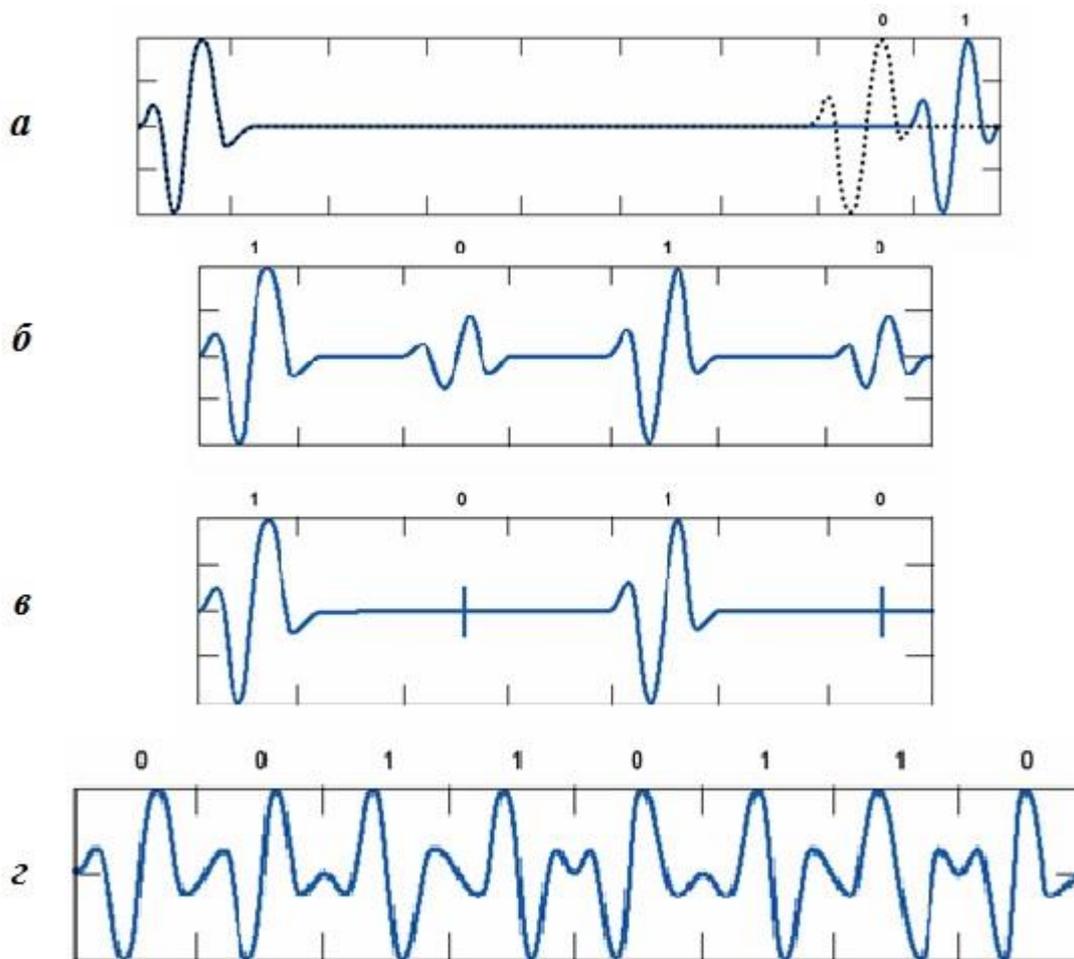
### 12.3. Методи модуляції імпульсних НШС сигналів

На практиці тривалість імпульсів, яка використовується в НШС системах, варіюється від 200 пс до 1 нс, а інтервали проходження імпульсів лежать в межах від 10 до 1000 нс. Зазвичай (але не обов'язково) UWB сигнали мають форму ідеалізованих гаусівських моноциклів, параметри яких підібрані таким чином, щоб основна частина спектра випромінювання була зосереджена в діапазонах частот, визначених FCC.

Модуляція сигналу UWB може здійснюватися або зміною амплітуди імпульсу (вмикання/вимикання або зміна знаку полярності на протилежний), або зміщенням центру імпульсу всередині періоду повторення  $T_p$ . Перевагою такого

каналу зв'язку є те, що за рахунок зміни тривалості імпульсу  $T_p$  можливо керувати шириною спектра сигналу, а за рахунок зменшення періоду повторення імпульсів  $T_p$  можна знижувати рівень усередненої спектральної щільності потужності сигналу. Такий підхід дозволяє не створювати перешкод іншим приймальним системам, діапазони яких перекривають спектр імпульсу (наприклад діапазони GPS, ISM і/або U-NII). Множинний доступ в такій системі реалізується за рахунок розширюючої прямої послідовності або часовим зсувом імпульсів у псевдовипадковій послідовності. Таким чином, НШС технологія дозволяє одночасно забезпечити високу пропускну здатність, малий вплив на вузькосмугові системи та велику кількість користувачів в обмеженій області простору (наприклад, в межах приміщення).

В UWB системах застосовується ряд відомих видів модуляції: імпульсно-позиційна модуляція PPM (Pulse Position Modulation), амплітудно-імпульсна модуляція PAM (Pulse Amplitude Modulation), маніпуляція ввімкнення-вимкнення On-Off Keying (OOK), двійкова фазова маніпуляція Bi-Phase Modulation (BPSK). Перераховані методи імпульсної модуляції представлені на рис. 12.4.



**Рис. 12.4.** Види модуляції сигналів IR-UWB: а – імпульсно-позиційна модуляція PPM; б – амплітудно-імпульсна модуляція PAM; в – маніпуляція ввімкнення-вимкнення OOK; г – двійкова фазова маніпуляція BPSK.

Модуляція UWB імпульсів корисними даними в принципі може здійснюватися будь-яким методом, представленим вище. Однак на практиці найбільш поширеною є модуляція PPM або SPPM (Single Pulse Position Modulation), за якої одиночний імпульс зміщується відносно його заданого положення на часовому проміжку назад або вперед, тим самим відображаючи 1-й або 0-й біт інформації (рис. 12.4, а).

У випадку PPM, в залежності від миттєвого значення модулюючого сигналу, позиція кожного робочого імпульсу змінюється в часовій області по відношенню до положення періодичних опорних імпульсів, що генеруються приймачем. Типова величина часового зсуву вибирається дуже малою та не перевищує  $1/4$  від тривалості імпульсу.

Один інформаційний біт кодується послідовністю багатьох імпульсів, наприклад 200 імпульсів на біт, середній період повторення імпульсів визначає в кінцевому підсумку швидкість передачі даних. Так, при періоді повторення імпульсів 10 нс максимальна швидкість передачі складатиме 100 Мбіт/с.

Багатоканальну передачу (мультиплексування) можливо реалізувати тимчасовим поділом каналів при відповідній синхронізації. Застосування відомих ортогональних кодів для управління тимчасовими затримками імпульсів дозволяє створити в одній смузі до 1000 і більше дуплексних каналів зв'язку на одній станції.

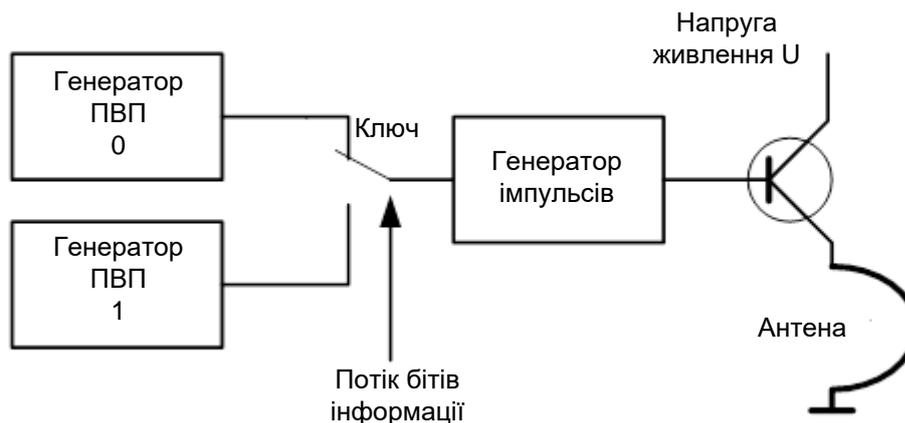
На відміну від технології CDMA, системи імпульсного радіо використовують ортогональні псевдовипадкові послідовності не для розширення спектра сигналу (спектр короткого імпульсу і так досить широкий), а тільки для згладжування його спектральної характеристики, формування окремих каналів зв'язку та захисту від перешкод.

## 12.4. Передавання та прийом імпульсних НШС сигналів

Сучасний передавач являє собою схему генерації вихідних імпульсів, їхнє розташування у часовій області (кодування) та їхнє «підсилення» за рахунок регенерації (повторювання) з більш високою амплітудою швидкодіючими транзисторними ключами. На виході передавача підсилені імпульси подають на надширокосмугову спрямовану або неспрямовану антену. На рис. 12.5 представлено спрощену схему імпульсного передавача з кодуванням сигналу псевдовипадковими послідовностями (ПВП). У даній схемі антена представлена мідною смужкою шириною декілька сантиметрів і довжиною 5...7 см, увімкненою в навантаження імпульсного емітерного повторювача. Така антена має низьку добротність, що мінімізує резонансні коливання у відповідь на її збудження, і, таким чином, більшу широкосмуговість.

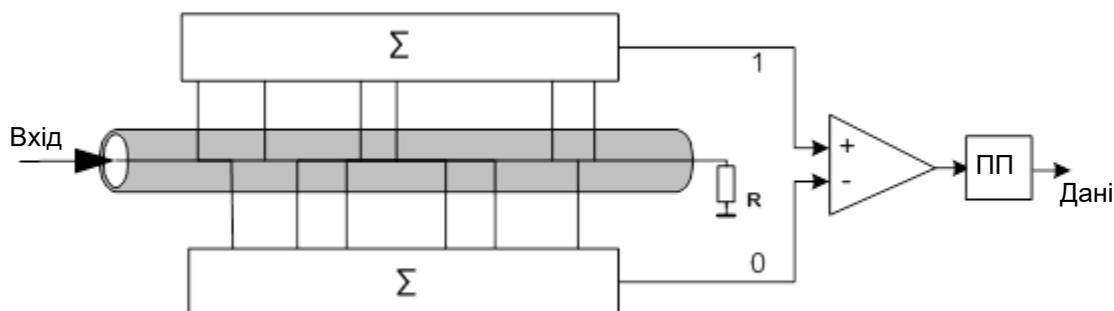
Імпульсний надширокосмуговий сигнал у результаті різного ступеня поглинання різних ділянок спектра в середовищі розповсюдження може змінювати свою форму, але не свою тривалість (якщо не враховувати

малоймовірного складання імпульсів за рахунок багатопроменевого поширення). Це означає, що в приймачі досить складно здійснити когерентне приймання, що потребує порівняння форм опорного та прийнятого сигналів. Окрім цього, у випадку використання активного корелятора (АК) необхідною є синхронізація прийнятого та опорного сигналів. Фіксація співпадіння настільки коротких імпульсів у часі є складною, або навіть нездійсненною задачею. Когерентний прийом технічно можливий у випадку використання пасивних кореляторів, які є інваріантними до часу надходження сигналу або у випадку використання системи з передаванням опорних імпульсів.



**Рис. 12.5.** Схема передавача DS-UWB сигналу з кодуванням псевдовипадковими послідовностями

Кореляційна функція може бути «розрахована» і з допомогою іншого пристрою, що дозволяє здійснити оптимальний прийом, – пасивного узгодженого фільтра (ПУФ), схему якого для приймання бінарних сигналів зображено на рис. 12.6. У ПУФ суміш сигналу та шуму, що приймається, подають у лінію затримки з відгалуженнями, навантажену на поглинаючий опір  $R$  для створення у лінії режиму біжучої хвилі. Положення відгалужень уздовж лінії затримки відповідає імпульсній функції, комплексно спряженій з сигналом. Відгалуження ліній затримки підключені до суматорів напруг каналу прийому одиниць та нулів. Виходи суматорів підключені до входів диференційного підсилювача. Різницєва напруга з виходу підсилювача надходить на пороговий пристрій (ПП) з нульовим або симетричним двополярним порогом. Напруга на виході ПП свідчить про приймання того чи іншого символу.



**Рис. 12.6.** Пасивний узгоджений фільтр для приймання бінарних сигналів

Сигнал, що надійшов у лінію затримки з узгодженими з часовим положенням імпульсів відгалуженнями, викликає сплеск напруги одночасно на всіх відгалуження і, отже, максимально можливу напругу на виході суматора, а шум створює напругу, пропорційну значенню його взаємнокореляційної функції з імпульсною характеристикою ПУФ. У результаті напруга сигналу перевищує напругу шуму на виході суматора. Якщо сигнальна напруга на суматорі того чи іншого символу перевищує рівень сигналу на іншому суматорі, а різницевий сигнал з виходу диференційного підсилювача – заданий поріг на пороговому пристрої, сигнал вважається прийнятим.

У наведеній схемі одна лінія затримки може бути використана також і для приймання багатоалфавітних сигналів. Для цього використовуються різні комбінації відгалужень лінії затримки.

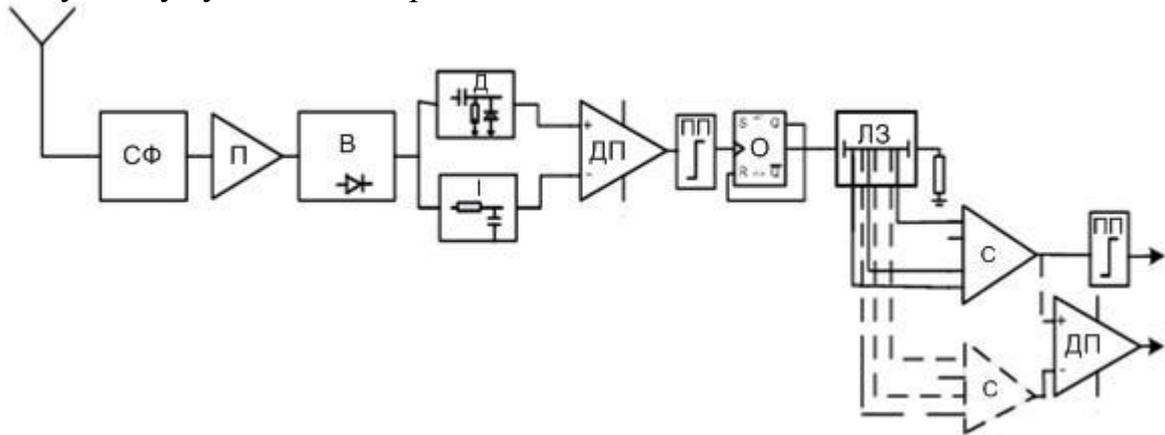
На жаль, за великої тривалості сигналу фізична довжина лінії затримки, наприклад, на основі смужкової лінії на підкладці з діелектричною постійною  $\varepsilon = 10 \dots 25$ , може бути неприйнятно великою. Швидкість поширення у хвилеводних середовищах зменшується у  $\sqrt{\varepsilon}$  разів по відношенню до відповідної швидкості в лініях з повітряним діелектриком. Так, за швидкості передачі 100 Мбіт/с (тривалість сигналу  $T_c = 10^{-8}$  с) довжина лінії затримки становитиме  $l = c \cdot T_c / \sqrt{\varepsilon} = 3 \cdot 10^{10} \text{ см} / c \cdot 10^{-8} \text{ с} / \sqrt{25} = 60 \text{ см}$  ( $c = 10^{10} \text{ см/с}$  – швидкість світла у вільному просторі). Скорочення її довжини є можливим за рахунок збільшення діелектричної постійної використовуваного у ній діелектрика або використання лінії затримки, реалізованої на інших фізичних принципах.

## 12.5. Неенергетичний прийом ультракоротких імпульсних сигналів

У всіх системах зв'язку достовірність прийнятої інформації визначається відношенням енергії сигналу до спектральної щільності шумів –  $E_c/N_0$  на пристрої прийняття рішення приймача. Енергія сигналу дорівнює потужності сигналу, помноженій на його тривалість:  $E_c = P_c \tau$ . У зв'язку з ультракороткою тривалістю імпульсного сигналу його енергія виявляється достатньо низькою. Для передавання інформації таким сигналом з необхідною достовірністю потрібно кодувати інформацію множиною імпульсів із забезпеченням складання їхніх потужностей за допомогою системи синхронізації. Реалізувати таку систему синхронізації досить складно через високу необхідну точність.

Розв'язання даної проблеми було запропоновано патентом України «Спосіб прийому коротких імпульсних сигналів та пристрої, що його реалізують [1, 2, 3]. Даний спосіб прийому було названо «неенергетичним», оскільки енергія імпульсів, що приймаються, не визначає якості прийому сигналу. Схему приймача в аналоговій формі, який реалізує «неенергетичний» спосіб прийому, зображено на рис. 12.7.

Коротко опишемо процес прийому. Прийняті та підсилені імпульси подаються на квадратор. Функція квадратора полягає у перетворенні суміші сигналу та шуму в однополярний відеосигнал.



**Рис. 12.7.** Функціональна блок-схема приймача: СФ – фільтр, узгоджений зі спектром імпульсів; П – підсилювач; В – випрямляч (квадратор); Д – пристрій диференціювання; ДП – диференційний підсилювач; І – інтегратор; ПП – пороговий пристрій; О – одновібратор; ЛЗ – лінія затримки; С – суматор

Відеосигнал подається на протифазні входи диференційного підсилювача через два кола – в одному з них сигнал диференціюється, в іншому – інтегрується. Диференціювання виділяє імпульси з високою крутизною переднього фронту, як правило інформаційних імпульсів та імпульсів шуму.

На виході інтегратора, – наприклад, ємності, навантаженої на опір розрядження, – напруга пропорційна середньоквадратичній напрузі шумів та завад. Імпульси сигналу чинять малий вплив на величину цієї напруги завдяки великій прогальності сигналу. Усереднена напруга з виходу інтегратора використовується у якості сигналу автоматичного регулювання підсилення диференційного підсилювача або у якості регулятора порогу, що перекриває канал для сигналів з малою амплітудою.

На виході диференційного підсилювача включено пороговий пристрій, що відсікає сигнали за рівнем як знизу, так і зверху. На виході порогового пристрою виникають сформовані імпульси, потрібні для підвищення точності спрацьовування наступного блоку приймача – одновібратора.

Одновібратор, у відповідь на імпульси запускання, що подаються на його вхід, генерує імпульси фіксованої тривалості й амплітуди. Тривалість цих імпульсів обирається меншою тривалості мінімальних пауз між імпульсами в коді сигналу. Час слідування згенерованих одновібратором імпульсів відповідає послідовності імпульсів у сигналі, що приймається, але можливість керування їхньою енергією, тобто амплітудою й тривалістю, дозволяє знизити конструктивні вимоги до наступного вузла схеми – пасивного узгодженого фільтра.

Пасивний узгоджений фільтр виконаний на лінії затримки з відведеннями та одному або декількох суматорах. Узгоджений фільтр обчислює кореляційну функцію між сигналом та комплексно спряженою з ним імпульсною функцією лінії затримки шляхом підсумовування амплітуд імпульсів на відведеннях у часі.

При співпадінні положення імпульсів, що відповідають коду сигналу, що приймається, з точками відведень лінії затримки, на виході суматора з'являється напруга, що відповідає піку кореляційної функції, величина якого пропорційна сумі напруг усіх прийнятих імпульсів кодової послідовності.

До виходу суматора під'єднаний пороговий пристрій. Величина порогу обирається з відомих міркувань компромісу між хибним спрацьовуванням з відсутності сигналу та чутливістю приймача при прийманні не всіх імпульсів у сигналі. Напруга на виході порогового пристрою свідчить про прийом сигналу з даним кодом. Наявність напруги відповідає 1, її відсутність – 0 (сигнал «з пасивною паузою»).

У випадку використання двійкових ортогональних сигналів використовують два узгоджених фільтра (на одній лінії затримки) з відведеннями, що відповідають символам сигналів, і замість обмежувачів на виході суматорів використовують пристрій порівняння – диференційний підсилювач, полярність напруги на виході якого буде вказувати на приймання одного з символів – 1 або 0 (сигнал «з активною паузою»). Даний варіант зображено на схемі пунктирними лініями.

Використовуючи лінію затримки з багатьма комбінаціями відведень та суматорами сигналів можна реалізувати приймання багатосимвольних сигналів. Таким чином, в даній схемі надкороткі імпульси сигналу використовуються не в якості носіїв енергії сигналу, а в якості синхроімпульсів, які вказують на положення у часі імпульсів коду сигналу. При цьому важливою є не їхня енергія, а амплітуда, що має бути достатньою для виділення імпульсів на тлі шуму.

## 12.6. Використання надширокосмугових сигналів для супутникового зв'язку

Відповідно до обмежень FCC, основною сферою застосування НШС сигналів є ближній радіозв'язок. Однак, відійдемо від загального уявлення про призначення НШС технологій та розглянемо можливість застосування технології UWB для фіксованої супутникової служби з передачею даних по низхідній лінії зв'язку. На рис. 12.8 показано концептуальний вигляд НШС імпульсної супутникової системи, що функціонує в Ku-діапазоні.

Діапазон частот до 11 ГГц активно використовується різноманітними радіослужбами (Wi-Fi, GPS). Головна задача, яку необхідно вирішити для перевірки можливості реалізації супутникового IR-UWB каналу зв'язку – перевірити електромагнітну та функціональну сумісність використання НШС технології в супутниковому зв'язку у смузі частот 3,1 – 10,6 ГГц з урахуванням обмежень FCC на випромінювання. Досліджувана смуга частот знаходиться в межах 3.1-10.6 ГГц та становить:

$$\Delta F = 10,6 - 3,1 = 7,5 \text{ [ГГц]}.$$

В якості «центральної» частоти оберемо  $f_c = 6,85$  ГГц, яка є центральною в діапазоні 3,1 – 10,6 ГГц. Оцінімо тривалість імпульсу:

$$\tau_{\text{імп}} = \frac{1}{f_c} = \frac{1}{6,85 \cdot 10^9} = 145,9854 \text{ [пс]}.$$

В якості штучного супутника зв'язку (ШСЗ) будемо використовувати геостационарний супутник, який знаходиться на висоті  $H_{\text{ГЕО}} = 35786$  км. Координати ЗС або мобільного наземного абонента відповідають геодезичним координатам м. Київ

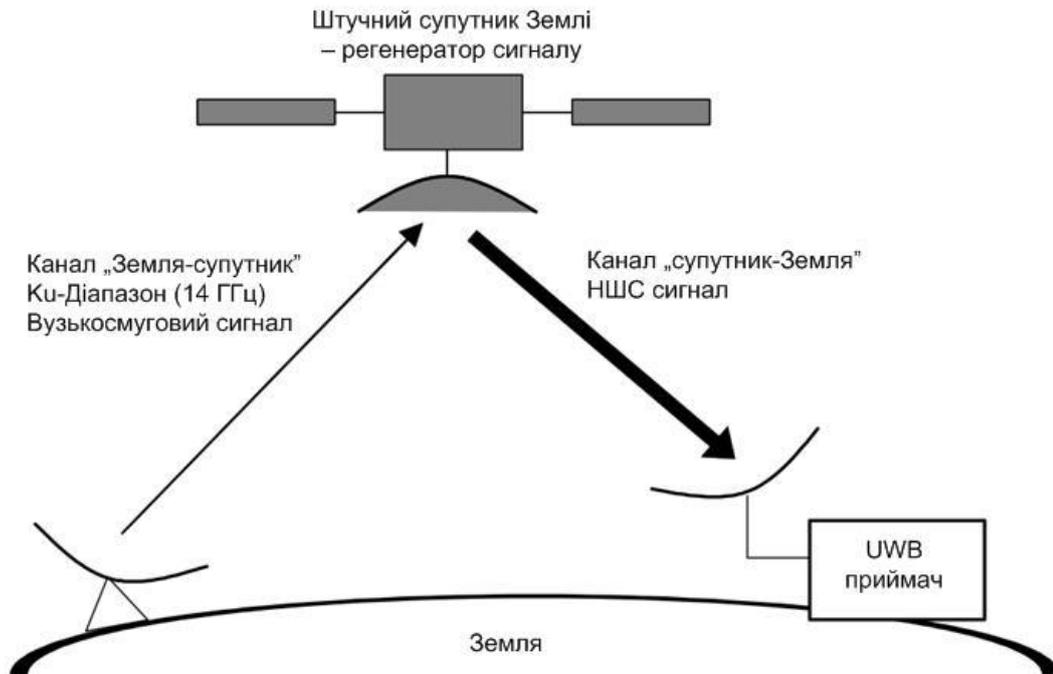


Рис. 12.8. Концептуальний вигляд супутникової UWB системи Ku-діапазону

Найпоширенішими модуляціями, які використовуються при когерентному аналізі радіосигналів, вважають PAM та PPM. На рис. 12.9 представлена характеристика величин ймовірності помилки на біт приведена з урахуванням різних рівнів багатопозиційної PAM та PPM модуляцій. Для того, щоб порівняти продуктивність обох типів модуляції, середня енергія в кожному сузір'ї символів вважають рівною.

Нижчі рівні M-позиційної модуляції PAM вимагають меншої величини відношення енергії на біт до шуму для досягнення заданої бітової ймовірності помилки. Таким чином, досягнення кращих характеристик радіопередачі можливо за рахунок зменшення рівня модуляції модуляції PAM.

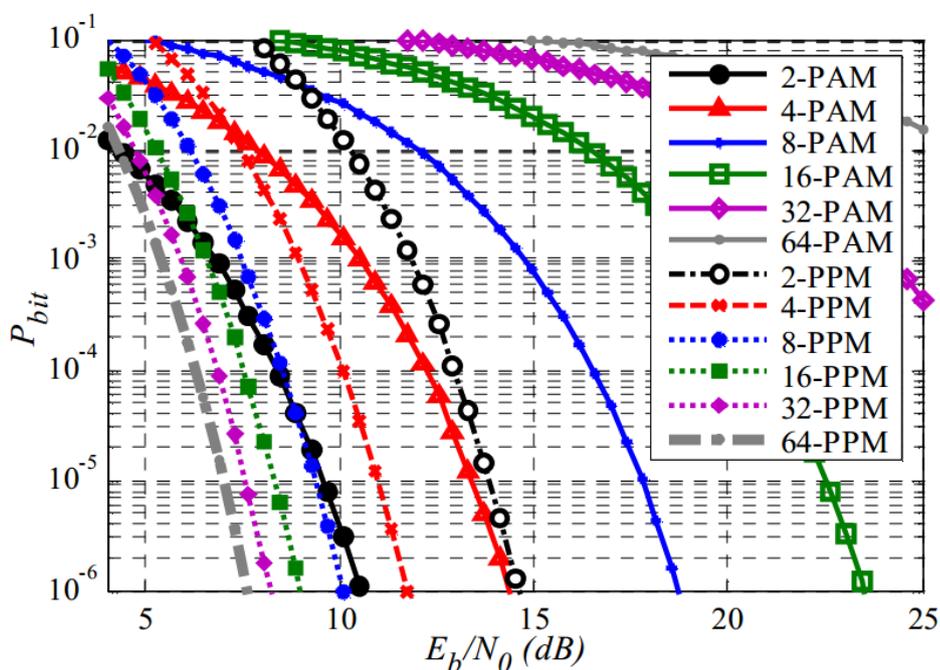
При використанні модуляції PPM варто брати до уваги, що для заданої ймовірності бітової помилки найкращі характеристики передачі виходять за вищих порядків PPM сигналів. Дана особливість обумовлена ортогональністю модуляції. Наприклад, застосування восьми або вищого порядку позиційної модуляції PPM при  $BER = 10^{-6}$  дозволяє досягнути вищої продуктивності у порівнянні з двійковою модуляцією PAM.

У супутниковому зв'язку найпоширенішим видом модуляції є QPSK та QAM малої кратності, оскільки забезпечують високим енергетичним потенціалом на протяжних радіолініях та жорстких умовах розповсюдження. Таким чином,

перевіримо для НШС супутникового зв'язку енергетику дво-, чотири-, восьми- та шістнадцятипозиційної модуляції – PAM та PPM. Порівняємо величину розрахованого енергетичного показника з пороговим показником для обраних видів модуляції. Для адекватності оцінки необхідно перевести значення відношення енергії на один біт до спектральної щільності шуму –  $E_b/N_0$  (рис. 12.11) до відношення потужності сигналу до потужності шуму. Скористаємося наступним співвідношенням:

$$\frac{P_S}{P_{\text{ш}}} = \frac{E_b}{N_0} (\text{дБ}) + \frac{R}{\Delta F} (\text{дБ})$$

де  $\Delta F$  – ширина смуги частот;  $R = V \cdot \log_2 M$  – бітова швидкість передачі при використанні багатопозиційних методів модуляції;  $M$  – позиційність модуляції.



**Рис. 12.9.** Функціональна залежність бітової ймовірності помилки від  $E_b/N_0$  для різних рівнів PAM та PPM

Однією із основних характеристик при проектуванні імпульсних систем зв'язку є прогальність імпульсів. Прогальність визначається як  $Q = T/\tau = 1/(V \cdot \tau)$ , де  $T$  – період слідування імпульсів;  $\tau$  – тривалість імпульсу;  $V$  – швидкість передачі інформації.

Задамося значенням  $BER = 10^{-6}$ . Нижче, для прикладу, представлений розрахунок для 2-PAM ( $M = 2$ ,  $Q = 10$ ).

$$\frac{P_S}{P_{\text{ш}}} = \frac{E_b}{N_0} + 10 \cdot \log \left( \frac{\log_2 M}{\Delta F \cdot Q \cdot \tau} \right)$$

$$\left(\frac{P_S}{P_{\text{Ш}}}\right)_{\text{порог}} = 11 + 10 \cdot \log\left(\frac{\log_2 2}{7.5 \cdot 10^9 \cdot 10 \cdot 145.9854 \cdot 10^{-12}}\right) = 0.606293 \text{ [дБ]}$$

$$\left(\frac{P_S}{P_{\text{Ш}}}\right)_{\text{розрахункове}} > \left(\frac{P_S}{P_{\text{Ш}}}\right)_{\text{порог}}$$

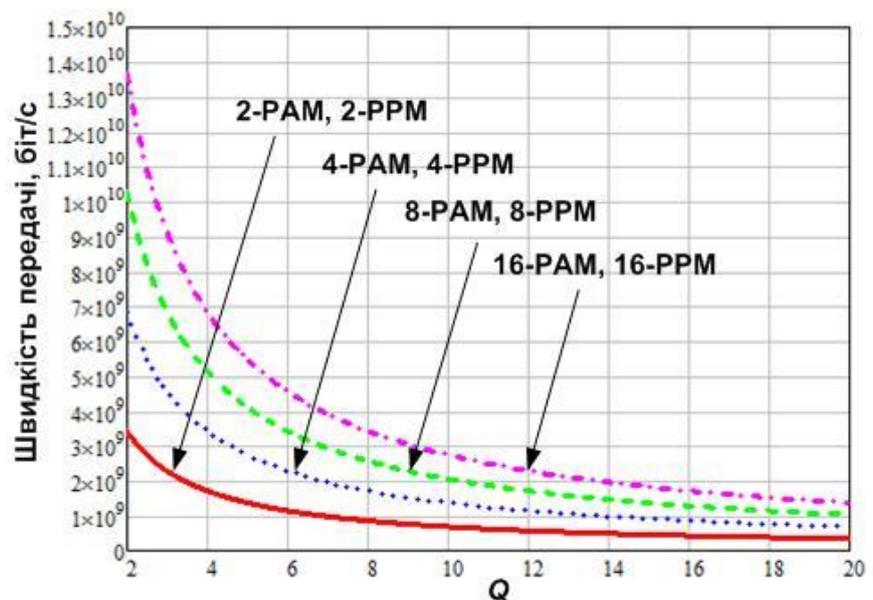
Таким чином, використання 2-РАМ енергетично ефективне, оскільки розрахований показник С/Ш на вході приймача значно перевищує пороговий рівень для BER = 10<sup>-6</sup>. Завадостійкість НШС буде гарантовано забезпечена. Результати розрахунків інших кратностей та видів модуляції відображено в таблиці 12.1.

**Таблиця 12.1.** Порогові значення відношення С/Ш при BER = 10<sup>-6</sup> та Q = 10

Модуляція	(P <sub>S</sub> /P <sub>Ш</sub> ) <sub>порог</sub> , дБ
2-РАМ	0,606293
4-РАМ	6,916593
8-РАМ	13,177506
16-РАМ	19,126893
2-PPM	4,106293
4-PPM	4,116593
8-PPM	4,377506
16-PPM	4,626893

З табл. 12.1 видно, що відношення сигнал/шум на вході приймача для представлених видів модуляції є достатнім, оскільки значно перевищує порогові значення енергетичних відношень.

Побудуємо графічну залежність досяжних швидкостей передачі від коефіцієнта скважності для М-РАМ та М-PPM (рис. 12.10). Отримані візуальні дані відповідають обраній тривалості імпульсу (τ = 145.9854 пс = const).



**Рис. 12.10.** Графічна залежність швидкості передачі від коефіцієнта прогальності для 2/4/8/16-РАМ та 2/4/8/16-PPM

Аналіз рис. 12.10 дозволяє зробити висновок, що при когерентному прийомі НШС радіосигналів (М-РАМ, М-РРМ) та з врахуванням особливостей формування імпульсного сигналу можливо досягти значних швидкостей передачі. Чим більша кратність модуляції, тим більшу кількість інформаційних бітів можливо передати в одній моноімпульсній послі. Проте, варто враховувати, що високопозиційні М-РАМ та М-РРМ потребують вищого енергетичного відношення для забезпечення відповідної якості передачі.

Результати розрахунку для низхідної НШС супутникової радіолінії підтверджують досягнення швидкостей порядку 1 Гбіт/с при забезпеченні ЕМС з наземними системами, не порушуючи межі, визначеної FCC. Проте, для підтвердження ефективності та доцільності використання НШС сигналів в супутниковому зв'язку необхідно порівняти отримані результати з параметрами сучасних супутників. Порівняльну характеристику розрахованого супутникового каналу та трьох реальних супутників наведено в табл. 12.2.

**Таблиця 12.2.** Порівняння енергетичних параметрів сучасних GEO супутників з розрахунковими значеннями для НШС супутникової радіолінії

Назва GEO супутника	Intelsat 903	Astra 1A	Yamal-401	Розрахунковий ШСЗ
Дата запуску	30.03.2002	06.08.2011	02.11.2012	-
Орбітальна позиція (довгота)	32,5°W	19,2°E	90°E	30,5°E
Діапазон частот:	C, Ku	Ku	C, Ku	
Робоча смуга частот	72 МГц	26/33 МГц	72 МГц	7500 МГц
ЕІВП	36 дБВт (C) 47,43 дБм/МГц  53 дБВт (Ku) 64,43 дБм/МГц	54 дБВт 68,81 дБм/МГц	47 дБВт (C) 58,43 дБм/МГц  51 дБВт (Ku) 62,43 дБм/МГц	99,28208 дБВт 90,53147 дБм/МГц

Як бачимо, розрахунковий показник спектральної щільності ЕІВП значно перевищує значення для сучасних супутників. Це означає, що імпульсні передавачі бортової апаратури супутника потребуватимуть більш потужних імпульсних підсилювачів у порівнянні зі звичайними вузькосмуговими супутниками. Такий підхід є програшним для застосування НШС технології. Але, якщо внести деяку поправку, при врахуванні прорахованого надлишкового енергетичного відношення С/Ш на приймальній стороні, то погляд на ефективність кардинально змінюється.

Під час розрахунку можливих швидкостей передачі для розглянутої радіолінії було виявлено, що відношення  $P_S/P_{Ш}$  на вході приймача ЗС складає 60,35128 дБ. Особливістю є те, що порогове значення  $(P_S/P_{Ш})_{\text{порог}}$  для 16-РАМ

знаходиться на рівні 19,126893 дБ. Дана величина достатня для забезпечення  $BER = 10^{-6}$  та швидкості передачі 2,7 Гбіт/с при  $Q = 10$ .

Таким чином, розраховане значення ЕІВП супутника можливо зменшити на величину  $(60,35128 - 19,126893) = 40,66198$  дБ при збереженні достатньої енергетики для достовірного виявлення НШС сигналу. Як результат, величина спектральної щільності ЕІВП НШС супутника буде на рівні або навіть менше за спектральну щільність ЕІВП сьгоднішніх бортових ретрансляторів.

Розраховані швидкості передачі, які можливо досягти в супутникових радіолініях при використанні НШС технології, підтверджують можливість досягнення високої пропускної спроможності для дальнього радіозв'язку. В сучасних супутникових стандартах широкосмугового доступу швидкості передачі в каналі «Супутник-Земля» знаходяться в межах 10 – 400 Мбіт/с. При застосуванні НШС сигналів можливо досягти швидкостей на рівні декількох Гбіт/с.

Таким чином, імпульсна НШС технологія придатна не тільки для високошвидкісної передачі ближнього радіусу дії, але й розгортання радіоліній дальнього зв'язку при дотриманні вимог FCC.

## Список літератури

1. Спосіб прийому коротких імпульсних радіосигналів та пристрій, що його реалізує. Патент України на винахід № 97705 від 12.03.2012 р.
2. Бунин С.Г. «Неенергетический» прием ультракоротких импульсных сигналов // Telecommunication Sciences, v.1, No.1, July – December 2010. - P. 7 – 13. (ISSN: 2411-2976) .
3. Бунин С.Г., Долженко Д.О. Оцінка завадостійкості приймача, що реалізує «неенергетичний» спосіб прийому // Наукові Вісті № 2(76), 2011. - с. 7 – 15.

---

**ОСОБЛИВОСТІ РОЗВИТКУ СУПУТНИКОВОГО  
ЗВ'ЯЗКУ**

Ільченко М.Ю., Наритник Т.М., Капштик С.В.

---

**FEATURES FOR THE DEVELOPMENT OF  
SATELLITE COMMUNICATIONS**

Ilchenko M.Y., Narytnyk T.N., Kapshytyk S.V.

The section deals with the current state and prospects for the development of satellite telecommunication systems in the context of the satellite communications services market and technical solutions used in the space segment. The features of the development of geostationary satellite systems using high throughput satellites are considered. The material of the section is addressed to students, graduate students and teachers, specialists in the field of satellite communications, spacecraft and space-based information systems.

В розділі розглядається сучасний стан та перспективи розвитку супутникових телекомунікаційних систем в розрізі ринку послуг супутникового зв'язку та технічних рішень, які застосовані в космічному сегменті. Розглянуто особливості розвитку геостаціонарних систем супутникового зв'язку, які використовують супутники великої пропускної здатності.

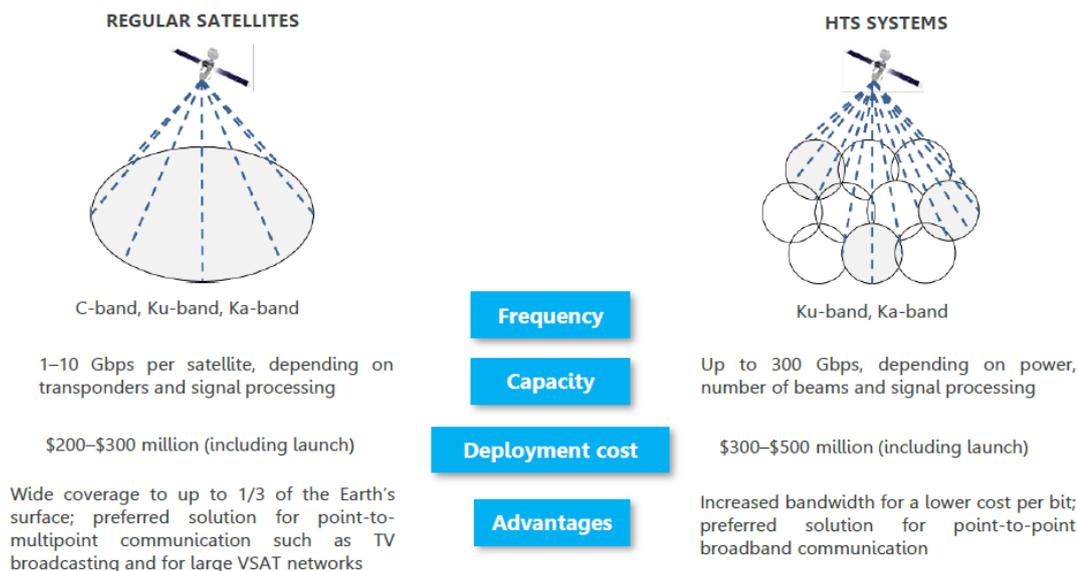
Матеріал розділу адресований студентам, аспірантам та викладачам, фахівцям в галузі супутникового зв'язку, космічних апаратів та інформаційних систем космічного базування.

**13.1. Особливості традиційних геостаціонарних  
супутників та супутників великої пропускної здатності**

На межі ХХ-ХХІ сторіччя завдяки досягненням в багатьох галузях техніки та технологій було сформовано типовий погляд на вимоги, показники та склад бортового обладнання геостаціонарного (ГСО) супутника зв'язку загального призначення. Супутник має корисне навантаження в одному або декількох частотних діапазонах L, S, C, Ku,

Ка (в залежності від супутникової служби: ФСС, РСС, МСС), надає послуги в декількох напівглобальних або регіональних променях, які формуються антенами із контурною діаграмою спрямованості. В кожному промені послуга надається декількома транспондерами, що досягається за рахунок дво- або триразового використання виділеної смуги частот. Сумарна смуга пропускання традиційного супутника не перевищує 10 ГГц. В залежності від частотного діапазону супутника визначені вимоги щодо точності утримання в орбітальній позиції ( $\pm 0,1^\circ$  для С діапазону та  $\pm 0,05^\circ$  для Ku діапазону). Плановий строк експлуатації ГСО супутників становить 15 років.

Роботи із стандартизації протоколів супутникового зв'язку DVB-S (в тому числі DVB-S2, DVB-S2x), проведені комітетом із стандартизації DVB [2], дозволили уніфікувати вимоги до високочастотного обладнання корисного навантаження ГСО супутників і сформувати типову модель тракту лінії супутникового зв'язку [1].



**Рис. 13.1.** Концепції звичайних супутників (Regular Satellite) фіксованого супутникового зв'язку та супутників систем великої пропускної здатності (HTS Systems).

Звичайний супутник (Regular Satellite) (рис.13.1) має широку зону обслуговування, використовує частотні діапазони С (4/6ГГц), Ku (11/14, 12/17 ГГц), Ka (20/30 ГГц) (один чи одночасно декілька). Сукупна пропускна здатність звичайного супутника становить 1...10 Гбіт/сек. Вартість створення та запуску оцінюється в межах \$200...300 млн. Перевагою цих супутників є здатність ефективно забезпечити передачу інформації від одного кореспондента до багатьох кореспондентів (режим «точка-багато точок» (point-multipoint)). Класичною галуззю застосування звичайних ФСС та РСС супутників є супутникове

телемовлення та надання інших видів послуг із розповсюдження відеоінформації.

**Таблиця 13.1.** Перелік комерційних супутників зв'язку, успішно виведених на геостаціонарну орбіту в період з 1 січня 2016 року по 5 липня 2017 року

Дата	Назва супутника	Дата	Назва супутника
15.01.2016	Belintersat-1	5.01.2017	TJS 2
27.01.2016	Intelsat 29e (*)	28.01.2017	Hispasat AG1
29.01.2016	Eutelsat 9B	14.02.2017	Intelsat 32e/SkyBrasil-1 (*), Telkom-3S
4.02.2016	SES-9	16.03.2017	Echostar 23
9.03.2016	Eutelsat 65 West A	30.03.2017	SES-10
6.05.2016	JCSAT-14	12.04.2017	Shijian 13
27.05.2016	Thaicom 8	4.05.2017	Koreasat-7, SGDC-1
9.06.2016	Intelsat 31, DLA-2	5.05.2017	GSAT-9
15.06.2016	Eutelsat 117 West B, ABS-2A	15.05.2017	Inmarsat-5 F4 (*)
18.06.2016	EchoStar 18, BRIsat	18.05.2017	SES-15
5.08.2016	Tiantong-1 01	1.06.2017	ViaSat-2 (*), Eutelsat 172 B (*)
14.08.2016	JCSAT-16	5.06.2017	GSAT-19
24.08.2016	Intelsat 33e (*), Intelsat 36	8.06.2017	Echostar 21
5.10.2016	NBN-Co/Sky Muster II, GSAT-18	23.06.2017	BulgariaSat-1
22.11.2016	Tianlian I-04	28.06.2017	EuropaSat/HellasSat-3, GSAT-17
18.12.2016	EchoStar 19 (*)	5.07.2017	Intelsat 35e (*)
21.12.2016	Star One D1, JCSAT-15		

Примітка: позначкою (\*) позначені супутники, які відносяться до класу супутників великої пропускної здатності.

Супутник великої пропускної здатності HTS (High Throughput Satellite) формує зону обслуговування за допомогою великої кількості надвузьких променів, ширина яких зазвичай становить 1...2°, або менше. HTS супутники використовують частотні діапазони Ku (11/14 ГГц) та Ka (20/30 ГГц) із багаторазовим використанням виділеної смуги частот. Euroconsult поділяє HTS-супутники на два покоління: супутники першого покоління з пропускною здатністю до 100 Гбіт/сек, та супутники другого покоління із пропускною здатністю до 300 Гбіт/сек та більше [1]. Вартість виготовлення та запуску HTS супутника на геостаціонарну орбіту становить \$300...500 млн. До переваг HTS-супутників відноситься низька вартість передачі в перерахунку на один біт переданої інформації, що визначає їх високу ефективність при організації передачі інформації між двома окремими кореспондентами (режим «точка-точка» (point-to-point)). Але доступна для одного абонента (кінцевого споживача) пропускна здатність не перевищує 5% від загальної пропускної здатності HTS супутника.

Ще однією відмінністю системи із HTS супутниками є наявність окремих променів до шлюзових станцій (Gate Way), або телепортів, які призначені для комутації та маршрутизації трафіку. Ці промені наведені на район/райони розташування телепорту. На відміну від HTS супутників, в системах зв'язку із звичайними супутниками телепорт, або центральна станція (Hub) знаходяться як правило в одному промені зі абонентськими (прикінцевими) станціями.

За період з 1 січня 2016 року по 5 липня 2017 року, на ГСО було запуснено 42 комерційних супутника зв'язку (див. Табл. 13.7). З них 8 супутників відносяться до класу HTS супутників: Intelsat-29e, Intelsat-32e, Intelsat-33e, Intelsat-35e, EchoStar-19, Inmarsat-5 F4, ViaSat-2, Eutelsat-172B (див. примітку до Табл. 13.7). Решта – традиційні супутники.

## 13.2. Особливості сучасних геостаціонарних систем великої пропускної здатності

За півторарічний період, який розглядається, на ГСР було запуснено 8 HTS супутників. З них первинному визначенню «супутник великої пропускної здатності» [1] повністю відповідають три супутники: EchoStar-19, Inmarsat-5 F4, ViaSat-2.

**Система EchoStar.** Супутник EchoStar-19/Jupiter 2 (оператор: EchoStar Satellite Services L.L.C; виробник: Space System Loral) вироблений на базі платформи SSL-1300 і запуснений на ГСО за допомогою ракети-носія Атлас-V (Оператор пуску – United Launch Alliance, дата запуску 18 грудня 2016 року). Супутник виведений в орбітальну позицію 97,1° з.д. Супутник призначений для надання послуг ширококутового доступу в частотному діапазоні Ка (20/30 ГГц). На дату запуску супутник EchoStar-19 був найбільшим супутником за показниками сукупної пропускної здатності та кількості променів. Загальна пропускна спроможність супутника становить 220 Гбіт/с, що майже в двічі перевищує пропускну спроможність попереднього супутника EchoStar-17/Jupiter 1, пропускна здатність якого становила 120 Гбіт/с. Але це не межа. За повідомленнями компанії EchoStar, супутник EchoStar-24/Jupiter 3, замовлення на виробництво якого також отримала компанія Space System Loral, забезпечуватиме пропускну здатність 500 Гбіт/с [3]. В перспективі, за прогнозами компанії Euroconsult очікується поява супутників, пропускна здатність яких становитиме до 1 Тбіт/с [4]. Зона обслуговування супутника EchoStar-19/Jupiter 2 сформована за допомогою 130 надвузьких променів і забезпечує покриття всієї території США (див. рис.13.2, а).



**Рис.13.2:** а) зона обслуговування супутника EchoStar-19/Jupiter 2; б) наземна інфраструктура для управління та надання послуг ширококутового доступу до Internet

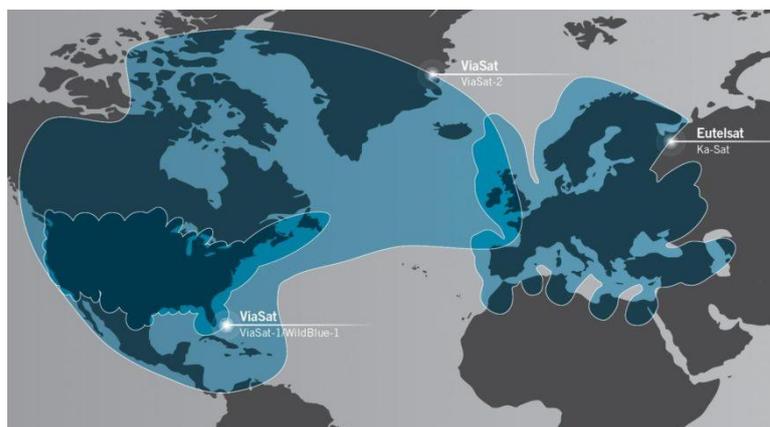
Супутник EchoStar-19/Jupiter 2 побудований на базі технології JUPITER™, розробленої компанією Hughes Network Systems, LLC. і реалізує технологію ширококутового супутникового доступу п'ятого покоління HughesNet®Gen5. Технологія JUPITER™ [3] побудована на базі нового стандарту DVB-S2x і забезпечує в прямому каналі символну швидкість передачі групового потоку до 225 Мсим/с, що дозволяє досягнути швидкості передачі інформації до 450 Мбіт/с, а в зворотному каналі символна швидкість становить до 8 Мсим/с. В прямому каналі використовується режим адаптивного кодування та модуляції (Adaptive Coding Modulation - ACM) для модуляції ФМ-4, ФМ-8, АФМ-16 и АФМ-32, а в перспективі АФМ-64 із коефіцієнтом крутизни 5% в поєднанні із кодування кодами із зниженою щільністю перевірок на парність (Low-Density Parity Check - LDPC) та із швидкістю кодування до 9/10. В зворотному каналі використовуються модуляція ФМ-4, ФМ-8 та кодування LDPC-кодами зі швидкістю до 9/10.

Експлуатацію супутника EchoStar-19/Jupiter 2 та надання послуг забезпечує наземна інфраструктура компанії EchoStar Satellite Services L.L.C у складі двох центрів управління та чотирьох телепортів (див. рис. 13.2, б).

**Система ViaSat.** Супутник ViaSat-2 (оператор: Viasat Inc.; виробник: Boeing Satellite Systems) вироблений на базі платформи BSS-702HP і запущений на орбіту за допомогою ракети-носія Arian-V (оператор пуску Arianspace, дата запуску 1 липня 2017 року) [5]. Супутник виведений в орбітальну позицію 69.9°з.д. На сьогодні супутник ViaSat-2 залишається найбільш потужним супутником, виготовленим компанією Boeing Satellite Systems на базі платформи BSS-702HP. Супутник призначений для надання послуг

ширококуткового доступу до Internet в Ka діапазоні (20/30 ГГц). Загальна пропускна здатність супутника становить приблизно 300 Гбіт/с, що в два з половиною рази перевищує пропускну здатність попереднього супутника ViaSat-1 (пропускна здатність супутника ViaSat-1 становить 130 Гбіт/с). Зважаючи на перспективи зростання попиту на пропускну спроможність супутників в регіоні Північної Америки та маючи на меті забезпечити глобальне покриття компанія ViaSat Inc. оприлюднила плани щодо досягнення на кожному з трьох супутників серії ViaSat-3 пропускної здатності 1Тбіт/с [6, 7].

Супутник ViaSat-2 надає послуги ширококуткового доступу в Ka діапазоні в Північній Америці за допомогою 72 надвузьких променів (промінь «B-Type Spot Beam»). Зона обслуговування супутника зросла більше ніж в сім разів [6,7] Для зв'язку із наземною мережею через GateWay станції супутник має 20 GateWay променів (промінь «A-Type Spot Beam») (зона обслуговування супутника ViaSat-2 приведена на рис.13.3).



**Рис.13.3.** Зона обслуговування супутника ViaSat-2 та спільна зона надання послуг ширококуткового доступу на базі технології ViaSat

Супутник використовує технологію SurfBeam®2 ширококуткового доступу споживачів до мережі Internet для надання широкого спектру інформаційних послуг. Корисне навантаження супутника побудовано за схемою bent-pipe із асиметричними лініями в прямому та зворотному напрямках. В напрямку до кінцевого користувача (пряма лінія) в смузі частот 500 МГц передається загальний потік на одній частоті в режимі часового ущільнення (TDMA) із символною швидкістю до 416,67 Мсим/с. В зворотному каналі використовується комбінований режим частотного ущільнення із часовим ущільненням на кожній частоті. В системі застосовується АСМ. В прямому каналі використовуються такі види модуляції: АФМ-16, ФМ-8, ФМ-4, в зворотному каналі: ФМ-8, ФМ-4, ФМ-2.

До переваг технології SurfBeam®2 відноситься призначення пропускної здатності системи на підставі загальносистемного класу

обслуговування, а не терміналу користувача. Перевагою користуються он-лайн послуги, на кшталт передачі відео та голосової інформації в реальному масштабі часу. Максимальна швидкість передачі інформації на один термінал в напрямку від станції спряження (прямий канал) становить до 12 Мбіт/с, в зворотньому напрямку до 3 Мбіт/с [8]. Компанія ViaSat Inc. ставить на меті забезпечити глобальне покриття поверхні земного шару не тільки в частотному діапазоні Ku (11/14 ГГц), але й в частотному діапазоні Ka (20/30 ГГц).

Новою тенденцією для операторів супутників великої пропускної здатності стало об'єднання зон обслуговування супутників для розширення зони надання послуг на основі спільної технології передачі інформації SurfBeam®2 DOCSIS® на термінали користувачів. На мал.13.3 наведено спільну зону обслуговування в Ka-діапазоні супутників ViaSat-2 та Ka-Sat.

**Система Inmarsat.** Супутник Inmarsat-5 F4 (рис.13.4, а) (оператор: Inmarsat plc, Великобританія; виробник: Boeing Satellite Systems) виготовлений на базі платформи BSS-702HP [9] і запусканий на орбіту за допомогою ракети-носія Falcon-9 (оператор запуску: SpaceX, дата запуску 15 травня 2017 р.). Супутник Inmarsat-5 F4 є четвертим супутником в серії з чотирьох HTS супутників, які формують космічний сегмент системи GlobalXpress. Основне корисне навантаження супутника Inmarsat-5 F4 в Ka-діапазоні складається з 89 транспондерів прозорого типу (bent-pipe). До особливостей супутника Inmarsat-5 F4 відноситься наявність гостьового корисного навантаження, яке працює в двох частотних діапазонах L та Ka, і замовником якого є Уряд США. Згідно офіційних заяв компанії Inmarsat plc. на час запуску, супутник Inmarsat-5 F4 розглядався як резервний супутник на геостаціонарній орбіті. Тимчасово супутник розміщений в орбітальній позиції 83,4° с.д.

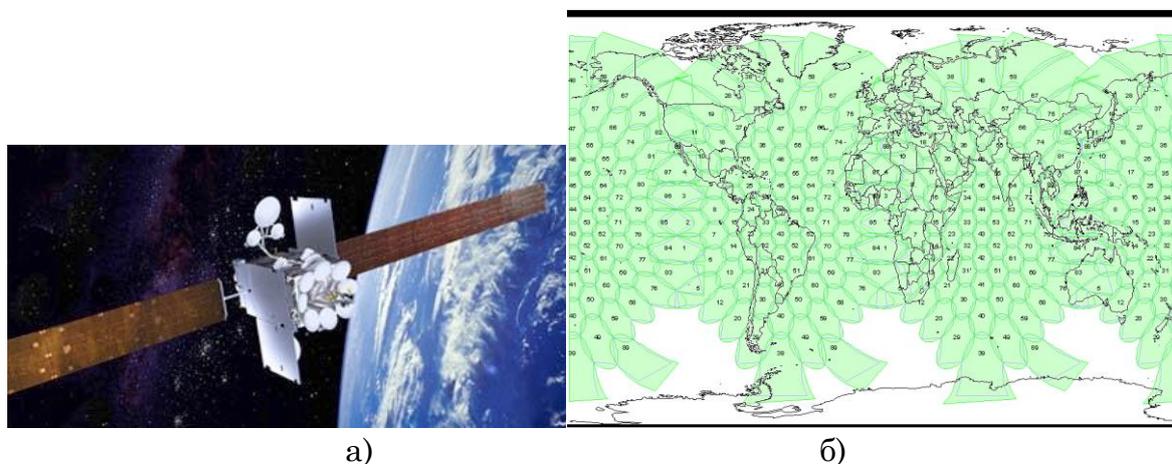


Рис.13.4. Супутник Inmarsat-5 F4: а) зовнішній вигляд супутника в робочому стані, б) покриття супутників Inmarsat-5 в системі Global Xpress

В Ка діапазоні супутник Inmarsat-5 F4 формує 89 фіксованих надвузьких променів круглої та еліптичної форми (рис. 13.4, б) та 8 керованих надвузьких променів, 2 з яких призначені для забезпечення зв'язку із GateWay станціями.

Основним призначенням супутника є надання в Ка діапазоні послуг високошвидкісної передачі даних та доступу до мережі Internet в системі Global Xpress мобільним споживачам на суші, на морі та в повітрі. В кожному фіксованому промені забезпечується загальна швидкість передачі інформації 100 Мбіт/с, яка розподілена між лінією «вниз» та лінією «вверх». Кожний термінал споживача в межах одного променя забезпечує прийом зі швидкістю до 50 Мбіт/с та передачу зі швидкістю до 5 Мбіт/с. Керовані промені здатні забезпечити передачу інформації зі швидкістю в декілька сотень Мбіт/с для військових та комерційних споживачів в каналах із смугою пропускання 40, 125, 270, 400 та 730 МГц (для комерційних споживачів до 600 Мбіт/с). На мал.13.5 показана схема організації надання послуг за допомогою керованих променів супутників Inmarsat-5.

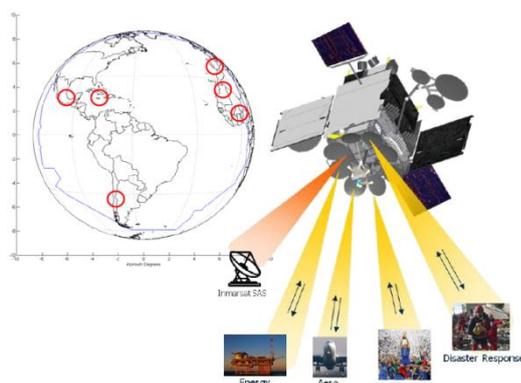


Рис. 13.5. Організація послуг супутника Inmarsat-5 з керованим променем в Ка діапазоні

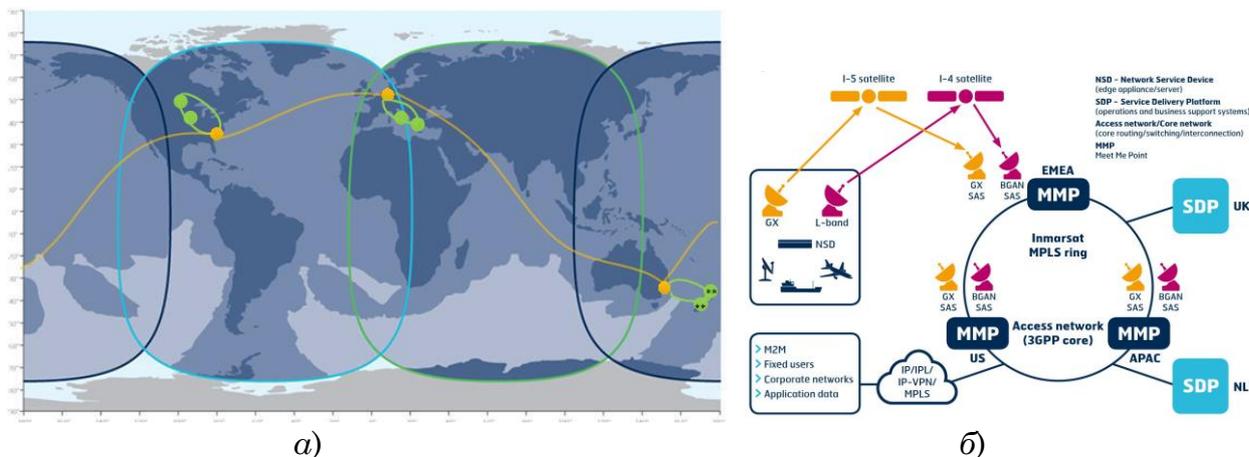


Рис. 13.6. Наземна інфраструктура Inmarsat для забезпечення надання послуг в системі Global Xpress: а) розташування телепортів та наземних оптико-волоконних ліній зв'язку, б) схема організації надання послуг

Система Global Xpress надає послуги широкосмугового доступу на базі технології iDirect, і використовує наземну інфраструктуру, до якої входять 6 телепортів, розташованих в межах зон надання послуг (мал.13.6.а). В прямому каналі (до терміналу кінцевого споживача) застосовується протокол iDirect, який використовує стандарт DVB-S2 в одночастотному режимі часового ущільнення, в зворотному каналі - багаточастотний режим ущільнення MF-TDMA із часовим ущільненням окремо кожної частоти. Телепорти з'єднані кільцем наземних ліній високошвидкісного оптико-волоконного зв'язку, що забезпечує високу надійність роботи системи та швидкість надання послуг (рис. 13.6, б).

**Система Intelsat.** Протягом 2016-2017 року світовий лідер супутникового зв'язку, компанія Intelsat S.A., ввела в експлуатацію нову ГСО систему супутникового зв'язку Intelsat EPIC<sup>NG</sup>. Космічний сегмент системи складають чотири супутники серії Intelsat EPIC<sup>NG</sup>: IS-29e (запущений 27 січня 2016 року, орбітальна позиція 50°з.д.), IS-33e (запущений 24 серпня 2016 року, орбітальна позиція 60°с.д.), IS-32e (запущений 14 лютого 2017 року, орбітальна позиція 43,1°з.д.), та IS-35e (запущений 5 липня 2017 року, орбітальна позиція 34,5°з.д.). Супутники IS-29e, IS-33e та IS-35e серії Intelsat EPIC<sup>NG</sup> зібрані на базі платформи BSS-702MP (виробник: Boeing Satellite Systems). Супутник IS-32e зібраний на базі платформи Eirostar-3000X (виробник Airbus Defence and Space).

Супутники Intelsat EPIC<sup>NG</sup> мають ряд відмінностей від HTS супутників інших операторів на кшталт EchoStar, ViaSat, Inmarsat. Супутники Intelsat EPIC<sup>NG</sup> використовують технології формування зони обслуговування за рахунок великої кількості надвузьких променів, яка характерна для супутників великої пропускну здатності в діапазоні Ка, в більш низьких частотних діапазонах С (4/6 ГГц) та Ku (11/14 ГГц). Супутники Intelsat EPIC<sup>NG</sup> мають корисне навантаження комбінованого типу, яке використовує усі частотні діапазони, виділені для фіксованої супутникової служби: С, Ku, Ка (Табл. 13.2).

Система Intelsat EPIC<sup>NG</sup> створюється компанією Intelsat S.A. як нова інноваційна платформа для надання послуг супутникового зв'язку та формування архітектури мереж в частотних діапазонах С, Ku та Ка [13]. Зона обслуговування системи Intelsat EPIC<sup>NG</sup> покриває суходіл та основні авіаційні і морські шляхи (рис.13.7). Така форма зони обслуговування зумовлена новим сегментом послуг супутникового зв'язку: надання послуг широкосмугового доступу для літаків у повітрі на магістральних шляхах трансокеанських перельотів, та морські судна у відкритому морі та міжнародних шляхах.

**Таблиця 13.2.** Параметри корисного навантаження супутників серії Intelsat EPIC<sup>NG</sup>

Супутник	IS-29e	IS-32e	IS-33e	IS-35e	
Орбітальна позиція	50°з.д.	43,17°з.д.	60°с.д.	34,5°з.д.	
Діапазон C	Смуга частот (МГц)	864		2670	4356
	поляризація	лінійна, вертикальна/горизонтальна		лінійна, вертикальна/горизонтальна а колова, правостороння/ лівостороння	колова, правостороння/ лівостороння
	ЕІВП (дБВт) Надвузький промінь			46,2 ÷ 52,4 41,0 ÷ 43,5	42,6 ÷ 54,6
	Широкий промінь	>36,0		33,3 ÷ 37,5	33,6 ÷ 37,4
	Добротність (дБ/К) Надвузький промінь			2,6 ÷ 12,8 -1,6 ÷ 1,5	3,6 ÷ 15,5
	Широкий промінь	2,7		-10,3 -7,2	-8,0 ÷ -4,2
	Кількість транспондерів	14		20	
Діапазон Ku	Смуга частот (МГц)	9395		9194	1404
	поляризація	лінійна, вертикальна/горизонтальна	лінійна, вертикальна/горизонтальна а*	лінійна, вертикальна/горизонтальна а	лінійна, вертикальна/горизонтальна а
	ЕІВП (дБВт) Надвузькі промені	46,7 ÷ 63,4	44,0 ÷ 61,5	48,7 ÷ 61,6	
	Широкий промінь	47 ÷ 48,2	45,7 ÷ 48,7*	43,6 ÷ 45,3	Карибський промінь: > 47,4 Європейський промінь: > 45,4 Африканський промінь: > 47,1
Добротність (дБ/К)					

	Надвузькі промені	7,1 ÷ 17,2	6,5 ÷ 15,8	7,0 ÷ 17,0	
	Широкий промінь	-1,0 ÷ 2,0	-1,4 ÷ 3,1	-3,3 ÷ -0,7	Карибський промінь: до 10,6 Європейський промінь: до 11,3 Африканський промінь: до 5,1
	Кількість транспондерів	56	60 (20*)		
Діапазон Ka	Смуга частот (МГц)	450		441	
	поляризація	колова, правостороння / лівостороння		колова, правостороння / лівостороння	
	ЕІВП (дБВт)	>35,5		>35,3	
	Добротність (дБ/К)	До 6,6		До -7,0	
	Кількість транспондерів	1	21	1	

Примітка: \* для супутника IS-32e показники ЕІВП та добротності приведені лише для корисного навантаження Intelsat EPIC<sup>NG</sup>

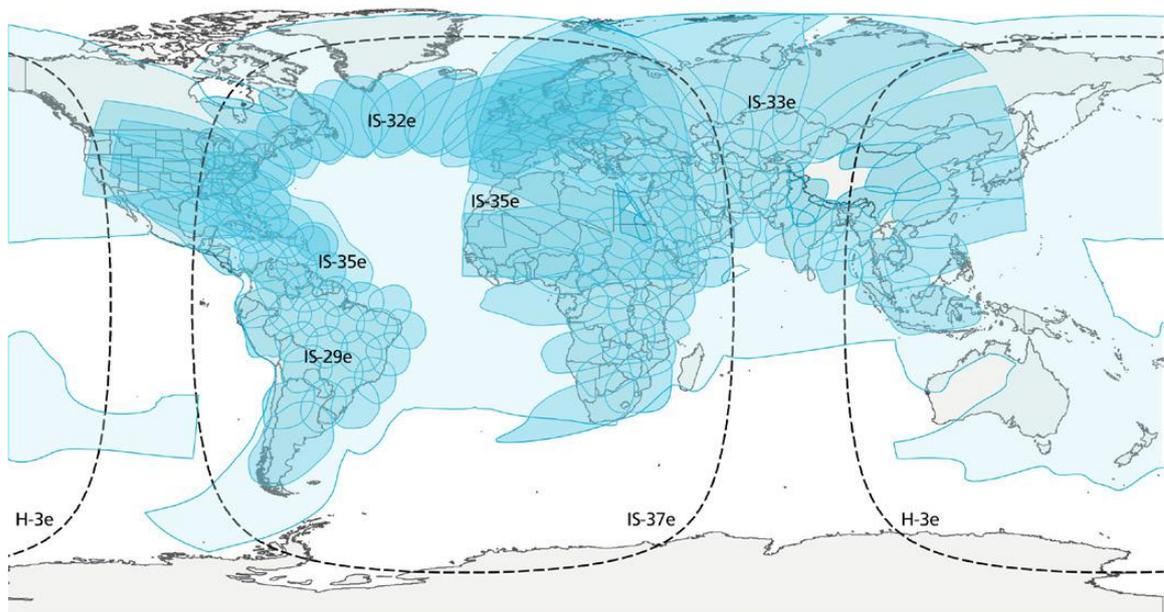
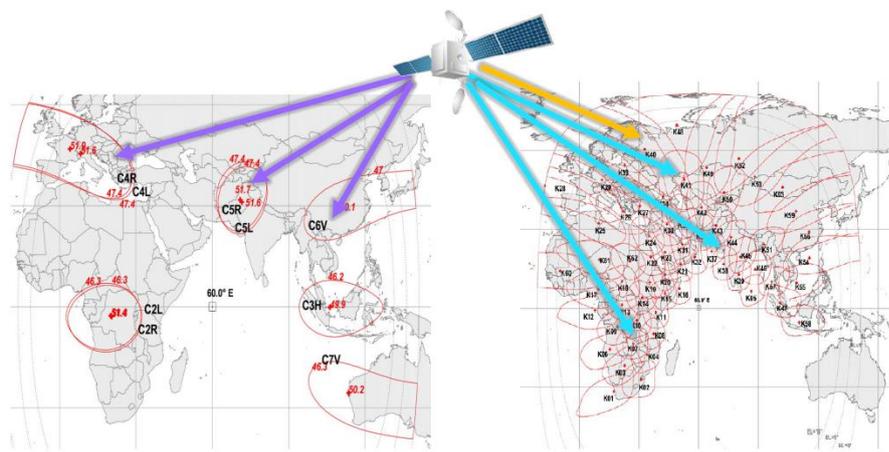


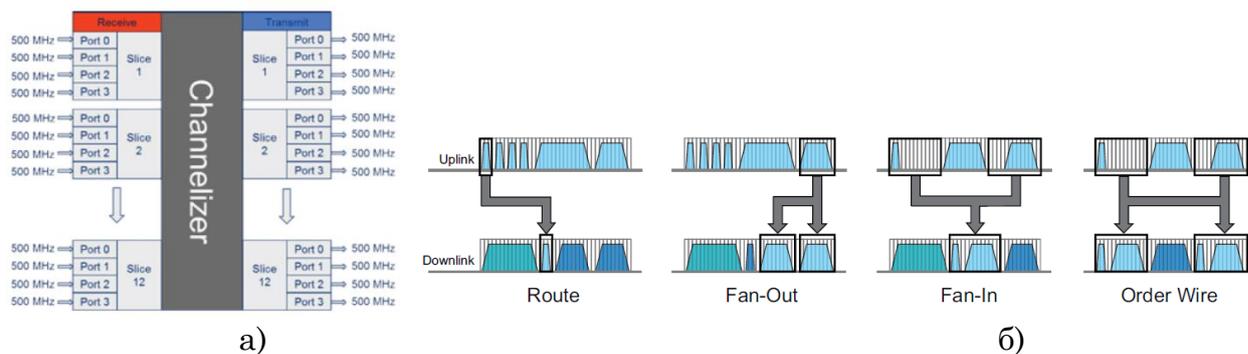
Рис. 13.7. Зона обслуговування системи Intelsat Epic<sup>NG</sup>



IS-33e C-band  
**Рис. 13.8.** Принцип організації системи Intelsat EPIC<sup>NG</sup>  
 IS-33e Ku-band

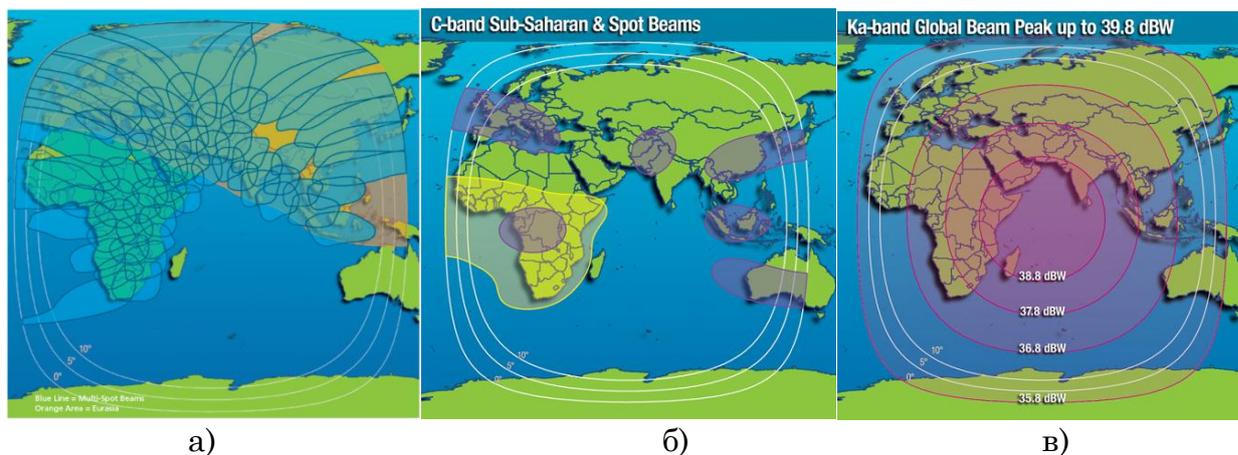
Особливістю системи Intelsat EPIC<sup>NG</sup> є можливість організації мереж зв'язку будь-якої конфігурації, включаючи мережі типу «зірка» та типу «повнозв'язна» в один стрибок. Мережі можуть включати земні станції, які розташовані в межах одного променя, станції, які розташовані в інших променях, станції, які працюють в спільному, або в різних частотних діапазонах. На рис. 13.8 показано принцип організації мереж супутником Intelsat-33e в двох частотних діапазонах: С та Ку.

Для забезпечення організації з'єднань в один стрибок корисне навантаження Intelsat EPIC<sup>NG</sup> оснащено обладнанням формування та комутації каналів, основу якого становить прозора цифрова комутаційна матриця (Transparent Digital Switch Matrix) (рис. 13.9, а). Комутаційна матриця здійснює комутацію підканалів шириною 2,6 МГц кожен в частотному діапазоні L в смузі частот 1,4...1,9 ГГц. Смуга частот 500 МГц розбита на 192 підканали. В залежності від потрібної ширини смуги пропускання, яка визначається шириною спектру комутуваного сигналу, обирається один або декілька сусідніх підканалів. Застосовуються такі типи з'єднань (рис. 13.9, б): Route – перенесення смуги частот одного або декількох сусідніх підканалів з лінії «земля-космос» до лінії «космос-земля», Fan-Out – дублювання смуги частот підканалу або сусідніх підканалів лінії «земля-космос» в дві смуги частот лінії «космос-земля», Fan-In – об'єднання в одній смузі частот в лінії «космос-земля» двох рознесених по спектру підканалів або груп сусідніх підканалів в лінії «земля-космос», Order Wire – одночасна паралельна передача в двох рознесених смугах частот лінії «космос-земля» рознесених підканалів або груп підканалів лінії «земля-космос».



**Рис. 13.9.** Принцип формування та комутації каналів в корисному навантаженні супутників в системі Intelsat EPIC<sup>NG</sup>: а) формування та комутація каналів, б) види комутації

Принциповою відмінністю супутників IS-29e та IS-33e є використання технології супутників великої пропускної здатності в Ku-діапазоні. Зокрема, супутник IS-33e має 63 надвузьких некерованих променів із круговою або еліптичною формою діаграми спрямованості (рис. 13.10, а). Додатково окремі промені виділені для шлюзових станцій. Крім того, супутники IS-29e та IS-33e мають вузькі промені в С-діапазоні та глобальний промінь в діапазоні Ка (див. рис. 13.10, б, в).

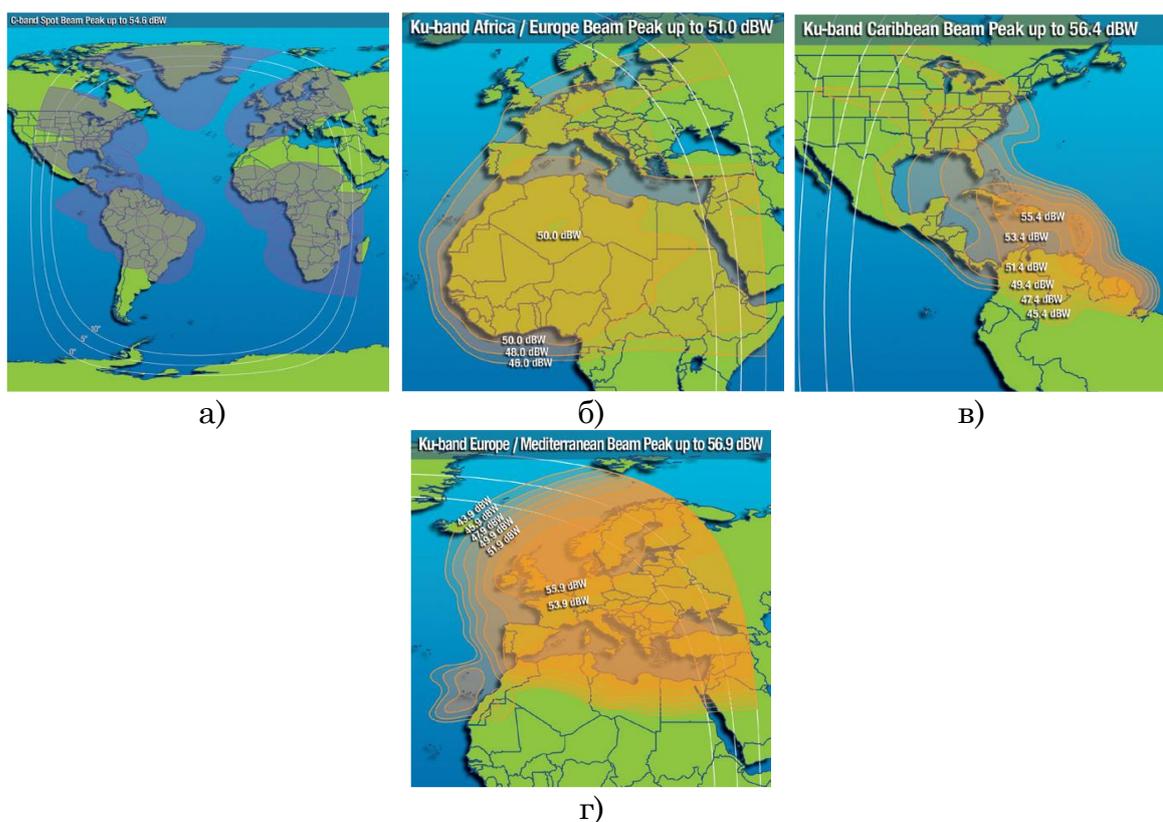


**Рис. 13.10.** Зони обслуговування супутника IS-33e: а) в діапазоні Ku 63 назвузьких променів користувачів та 7 променів шлюзових станцій, б) в діапазоні С 6 вузьких та 1 регіональний промінь, в) в діапазоні Ка один глобальний промінь

Особливістю супутника IS-33e (орбітальна позиція 34° с.д.) є використання технології супутників великої пропускної здатності в С-діапазоні. В цьому частотному діапазоні супутник має широкий промінь та 17 вузьких променів (рис. 13.11.а). В Ku-діапазоні супутник має три широкі регіональні промені (рис. 13.11, б, в, г).

До особливостей супутника IS-32e відноситься не тільки використання платформи європейського виробника для будівництва супутника, але й спільна власність ресурсу діапазону Ku та гостьове корисне навантаження діапазону Ка. Це відображене в назві супутника: Intelsat-32e/SKY Brasil-1. 60 транспондерів Ku-діапазону

призначені для надання послуг безпосереднього супутникового мовлення в Бразилії в одному широкому та 20 вузьких променях. Одночасно, частина з них можуть використовуватись для забезпечення роботи корисного навантаження Intelsat EPIC<sup>NG</sup> в 16 назвузьких променях [13]. За рахунок цього корисного навантаження супутника компанія Intelsat S.A. нарощує супутникову ємність для надання послуг широкосмугового супутникового доступу в регіоні морських та авіаційних шляхів в регіоні Північної Атлантики (рис. 13.12). Співвласниками корисного навантаження в діапазоні Ku є Intelsat S.A. та DirectTV Latin America - латиноамериканське відділення компанії AT&T/DirectTV. Власником корисного навантаження в діапазоні Ka є компанія YahSat, Об'єднані Арабські Емірати.



**Рис. 13.11.** Зони обслуговування корисного навантаження супутника IS-35e: а) в С-діапазоні, б), в), г) в Ku-діапазоні

**Система Eutelsat.** Особливістю супутників, які були запуснені протягом розглянутого періоду, є комбіноване корисне навантаження, яке містить корисне навантаження, характерне для HTS супутників, та корисне навантаження, характерне для традиційних супутників. Супутник Eutelsat 172 В (оператор: Eutelsat S.A.; виробник Airbus Defence and Space), запуснений 1 червня 2017 року за допомогою ракети-носія Ariane-5 (оператор запуску: Arianespace) і виведений в орбітальну позицію 172°с.д.. Супутник виготовлений на базі платформи Eurostar-3000EOR і обладнаний корисним навантаженням в двох частотних

діапазонах (рис.13.13, а). В діапазоні Ku супутник Eutelsat 172В буде надавати послуги із використанням 11 еліптичних променів для забезпечення літаків в польоті по магістральним трасам послугами широкосмугового доступу та базі технології HTS супутників (рис. 13.13, ж). На додаток до корисного навантаження HTS супутник обладнаний корисним навантаженням традиційної конфігурації, яке працює в частотних діапазонах С та Ku (рис. 13.13, б, в, г, д, е, з).

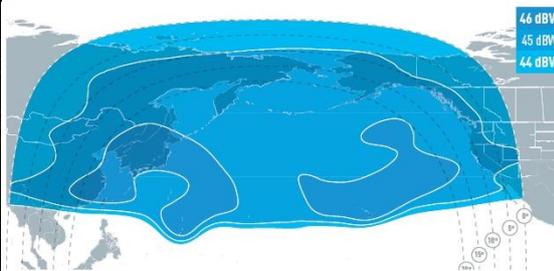
**Рис. 13.12.** Зона обслуговування корисного навантаження Intelsat EPIC<sup>NG</sup> супутника IS-32e



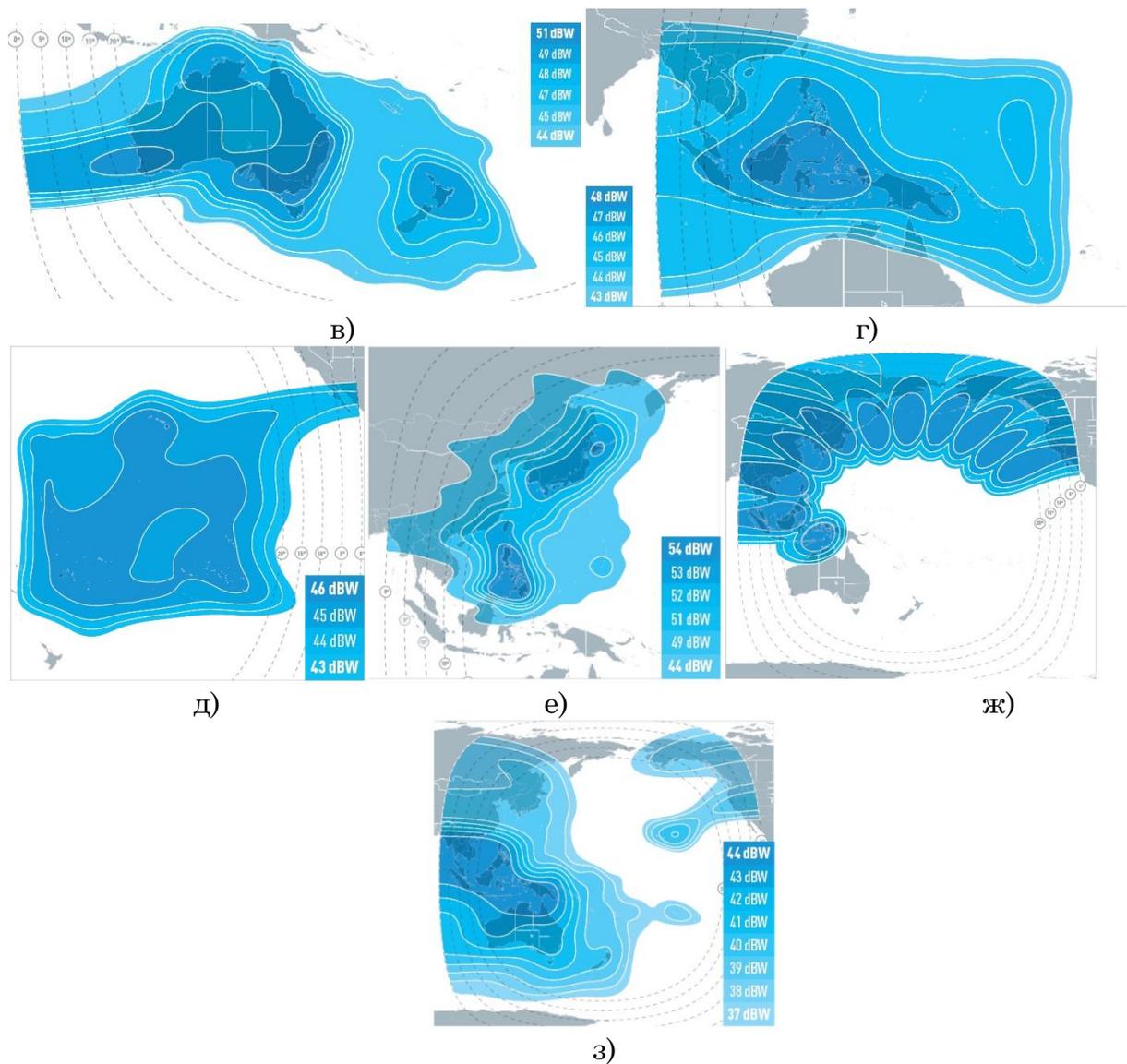
Трьох діапазонним комбінованим є супутник Eutelsat 65 West A (орбітальна позиція 65°з.д.) (базова платформа SSL-1300) (рис. 13.14, а). Супутник обладнаний 24 транспондерами Ka діапазону із надвзъкими променями еліптичної форми для впровадження послуг супутників високої пропускної здатності в Південній Америці (рис. 13.14, б). Крім того, супутник обладнаний корисним навантаженням в діапазонах С (10 транспондерів зі смугою 54 МГц кожен) та Ku (24 транспондери зі смугою 34 МГц кожен) традиційної конфігурації (із ретрансляторами «прозорого» типу та контурною діаграмою спрямованості антен (рис. 13.14, в, г, д).



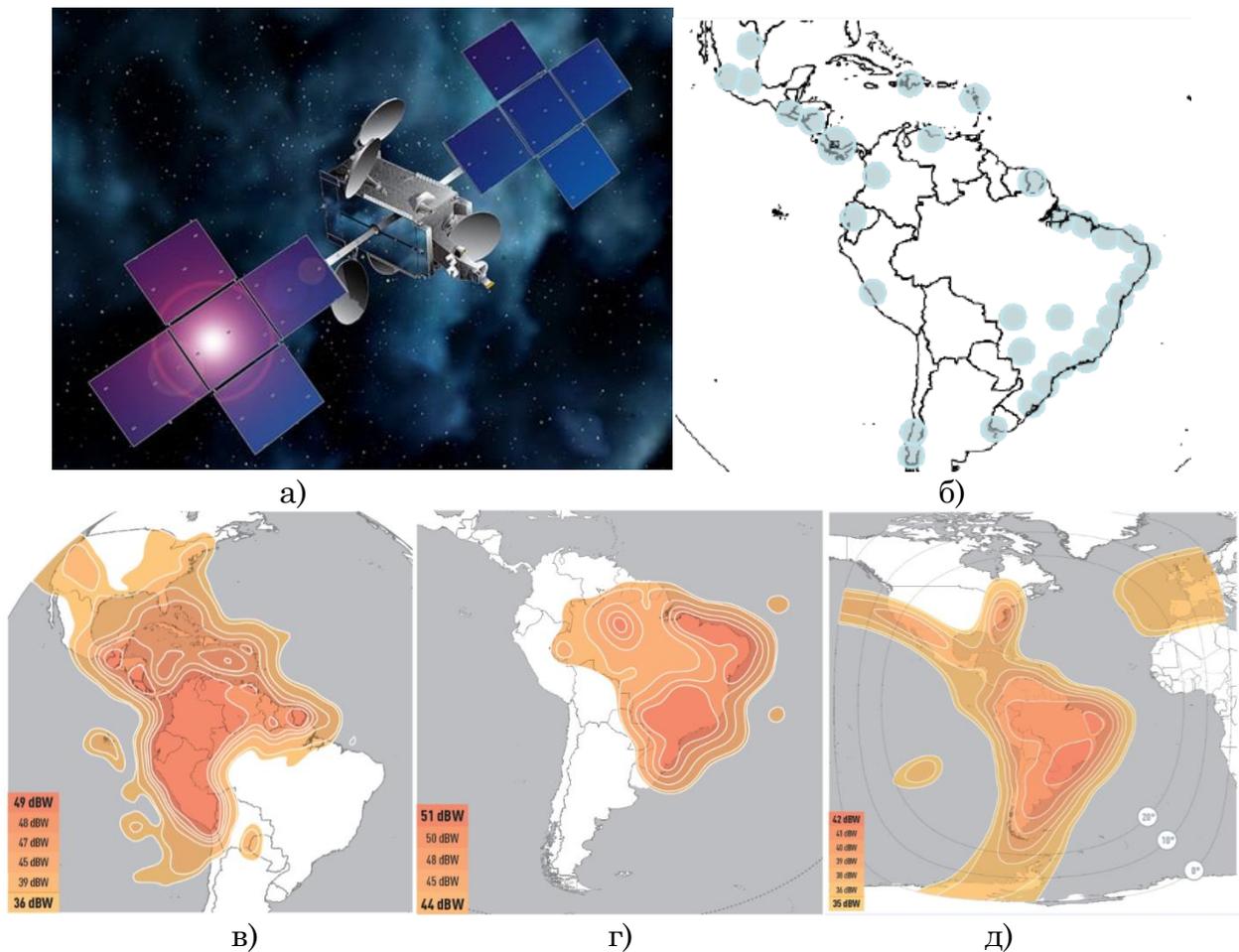
а)



б)



**Рис. 13.13.** Супутник Eutelsat 172 В: а) зовнішній вигляд супутника, б) промінь «Північна частина Тихого океану» в Ку-діапазоні, в) промінь «Південна частина Тихого океану» в Ку-діапазоні, г) промінь «Південно-західна частина Тихого океану» в Ку-діапазоні, д) промінь «Південно-Східна частина Тихого океану» в Ку-діапазоні, е) промінь «Північно-Східна Азія» в Ку-діапазоні, ж) промені великої пропускну здатності в Ку-діапазоні, з) промінь «Тихий океан» в С-діапазоні



**Рис. 13.14.** Супутник Eutelsat 65 West A: а) зовнішній вигляд супутника, в) вузькі промені в Ка-діапазоні, в) Американський промінь в Ку-діапазоні, г) Бразильський промінь в Ку-діапазоні

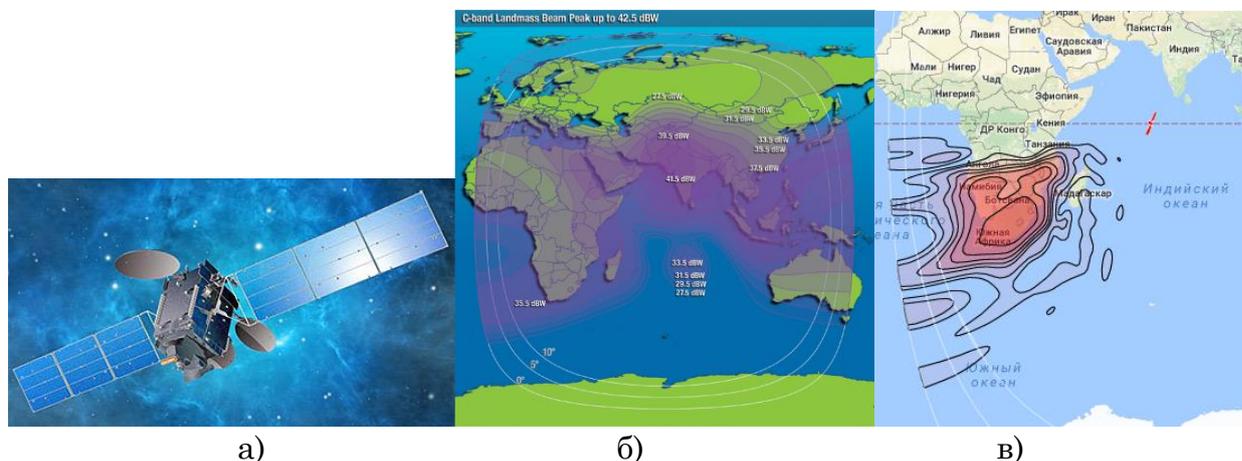
### 13.3. Геостационарні системи традиційної конфігурації

Зважаючи на накопичений частотно-орбітальний ресурс ГСО в С та Ку діапазонах провідні оператори продовжують запускати супутники традиційної конфігурації.

**Компанія Intelsat** продовжила запуски нових супутників із корисним навантаженням традиційної конфігурації, яке використовує декілька променів з контурною діаграмою спрямованості та напівглобальними променями і використання в діапазонах частот Ку та С. До цього класу відносяться супутники Intelsat 31/DLA-2 (орбітальна позиція  $95^\circ$  з.д.), який формує один промінь в діапазоні С та 12 променів в діапазоні Ку, Intelsat 36 (орбітальна позиція  $68,5^\circ$  с.д.), який формує промені з контурною діаграмою спрямованості в частотних діапазонах С та Ку.

Супутник Intelsat-36 (орбітальна позиція  $68,5^\circ$  с.д.) (базова платформа SSL-1300, рис. 13.15, а) відноситься до класу супутників із корисним навантаженням традиційної конфігурації, і призначений

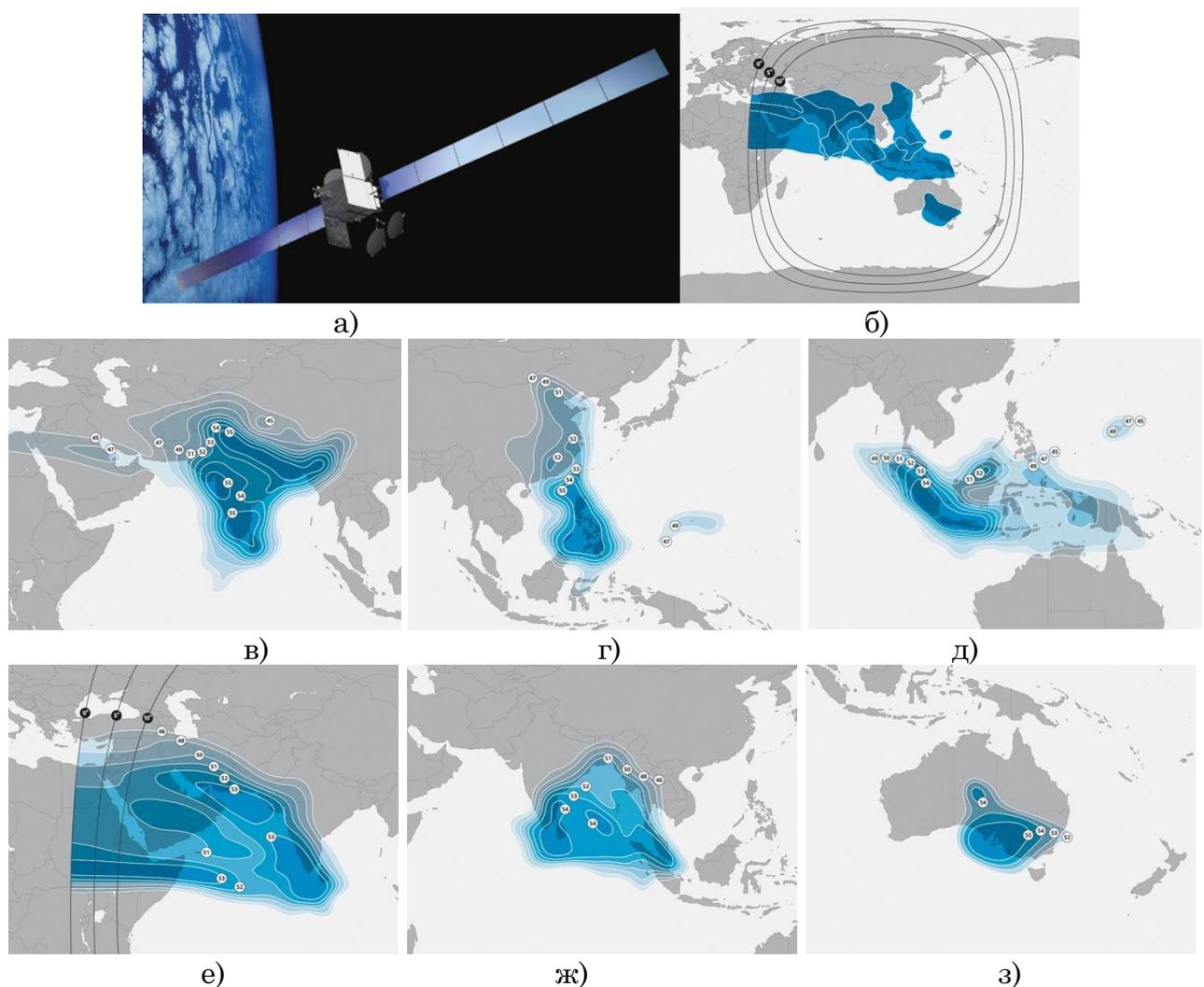
для надання послуг фіксованого супутникового зв'язку в регіоні Центральної та Південної Африки в двох частотних діапазонах: в частотному діапазоні С супутник має 10 транспондерів, а в частотному діапазоні Ku має 34 транспондери із рівнем ЕІВП в центрі зони обслуговування 54,7 дБВт (зони обслуговування в частотних діапазонах С та Ku наведені на рис. 13.15, б, в).



**Рис.13.15.** Супутник Intelsat-36: а) зовнішній вигляд, б) зона обслуговування в С-діапазоні, в) зона обслуговування в Ku-діапазоні

Компанія SES S.A. (Люксембург) продовжувала оновлення свого орбітального угруповання шляхом запусків супутників із традиційною для себе конфігурацією корисного навантаження в Ku діапазоні. Супутник SES-9 (орбітальна позиція 108,2°с.д.) (базова платформа Boeing-702HP) обладнаний 81 транспондером діапазону Ku і надає послуги в 7 променях з контурною діаграмою спрямованості (рис. 13.16).

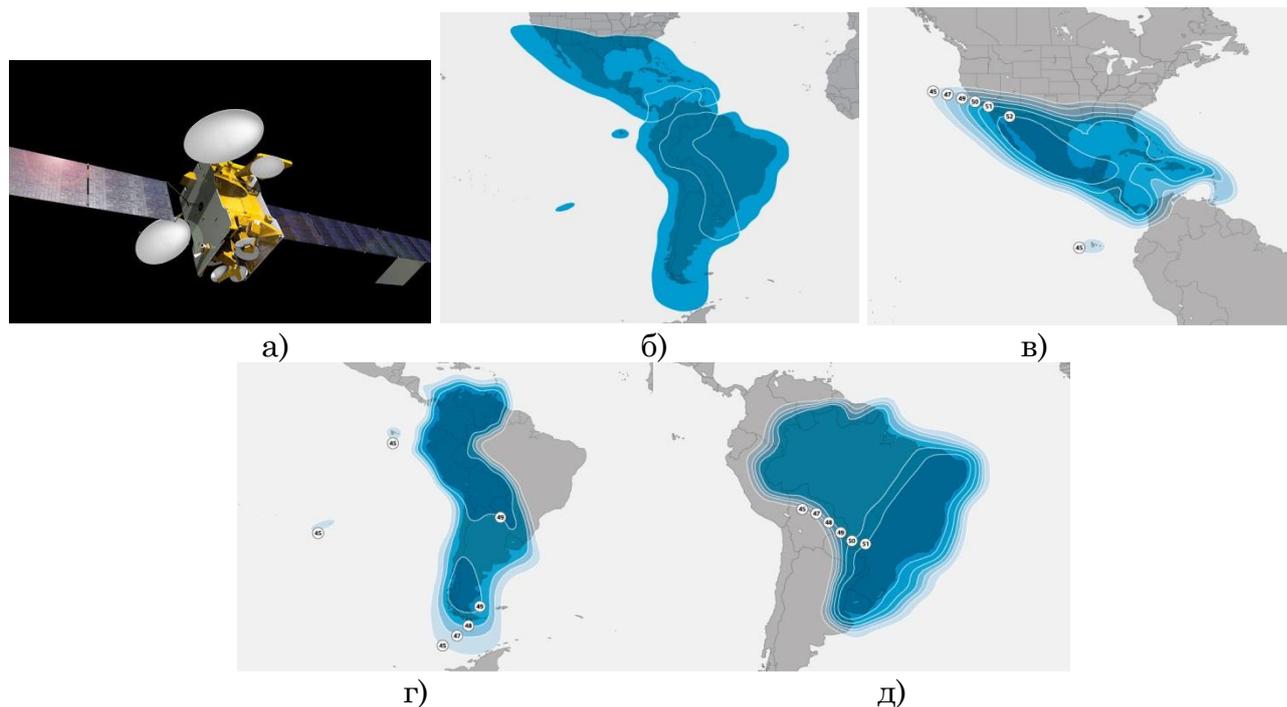
Супутник SES-10 (орбітальна позиція 67°з.д.) (базова платформа Eurostar-3000) (рис. 13.17) обладнаний 55 транспондерами діапазону Ku і надає послуги в 4 променях з контурною діаграмою спрямованості, супутник SES-15 (орбітальна позиція 129°з.д.) обладнаний 16 транспондерами діапазону Ku і надає послуги в 2 променях з контурною діаграмою спрямованості. Таким чином, компанія SES основну увагу приділяє використанню традиційних технологій супутникового зв'язку в Ku діапазоні.



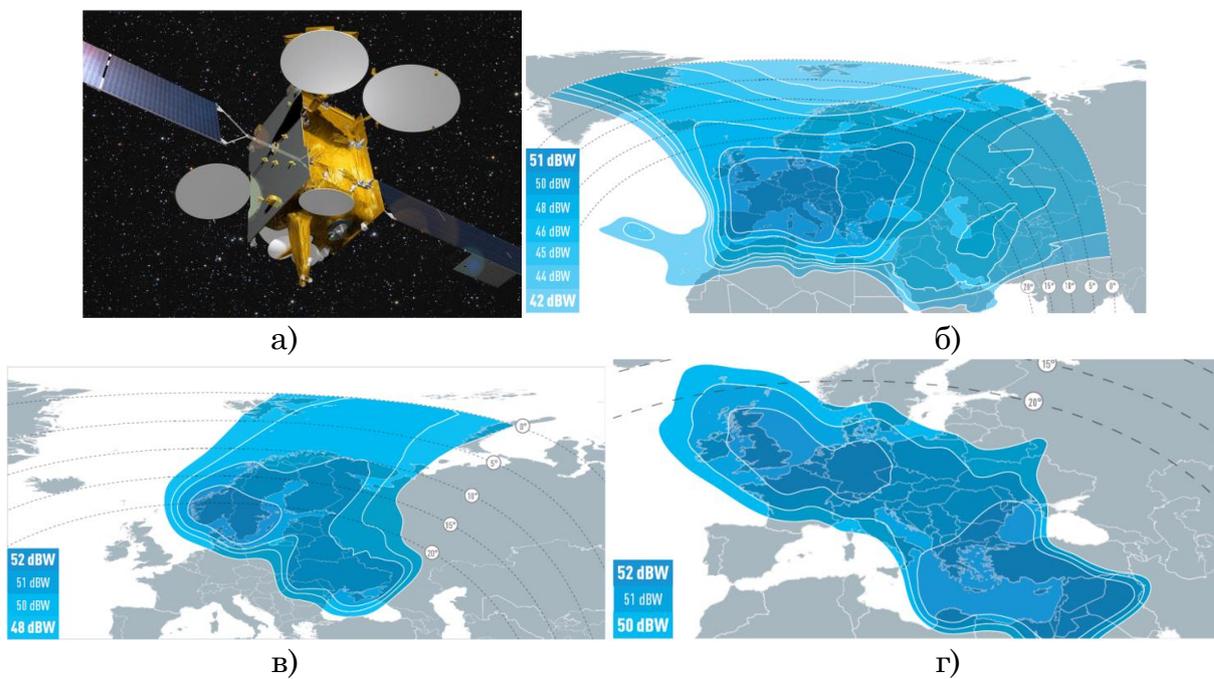
**Рис. 13.16.** Супутник SES-9: а) зовнішній вигляд супутника в робочому стані, б) покриття в Ku-діапазоні, в) промінь «Південна Азія» в Ku-діапазоні, г) північно-східний промінь в Ku-діапазоні, д) південно-східний промінь в Ku-діапазоні, е) промінь «Західна частина Індійського океану» в Ku-діапазоні, ж) промінь «Східна частина Індійського океану» в Ku-діапазоні, з) Австралійський промінь в Ku-діапазоні

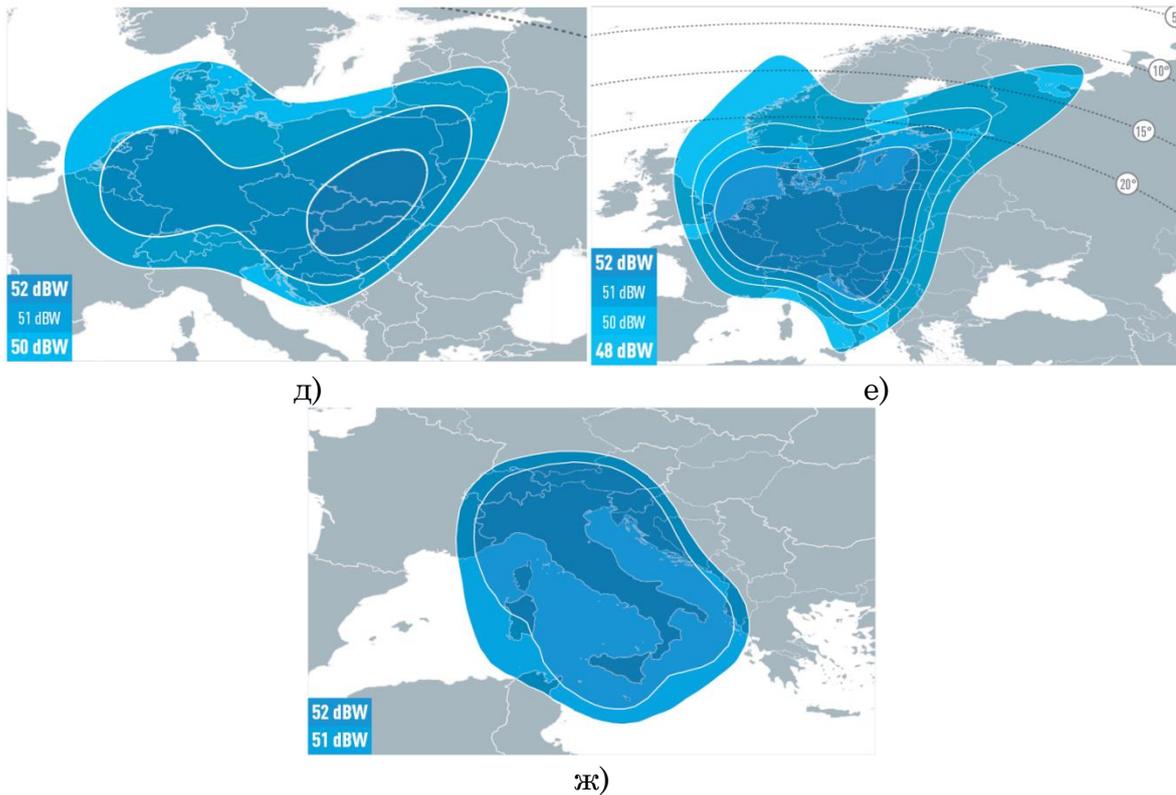
Компанія Eutelsat протягом 2016...2017 рр. здійснила запуск чотирьох супутників. Усі супутники призначені для надання послуг в частотному діапазоні Ku із застосуванням антен з контурною діаграмою спрямованості. Зокрема, супутник Eutelsat 9В (орбітальна позиція 9°с.д.) (базова платформа Eurostar-3000) має 50 транспондерів Ku діапазону і формує 6 променів (рис. 13.18). Особливістю надання послуг із використанням ресурсу супутника Eutelsat-9В є поєднання в одній орбітальній позиції потужних супутників Eutelsat-9В, який призначений для надання послуг супутникового мовлення в межах широких променів в частотному діапазоні Ku, та KA-SAT, який відноситься до класу супутників великої пропускнуої здатності і призначений для надання послуг ширококутового доступу в частотному діапазоні Ka (рис. 13.19). Додатково супутник Eutelsat-9В

обладнаний гостювим корисним навантаженням системи EDRS – Європейська система передачі даних.

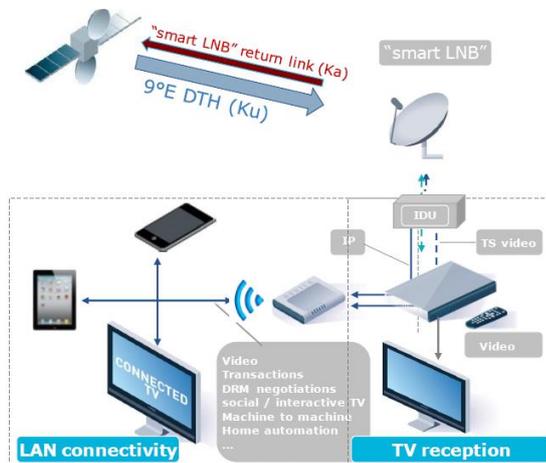


**Рис. 13.17.** Супутник SES-10: а) зовнішній вигляд супутника, б) промінь в Ku-діапазоні, в) промінь «Центральна Америка та Карибський регіон» в Ku-діапазоні, г) промінь «Південна Америка» в Ku-діапазоні, д) Бразильській промінь в Ku-діапазоні





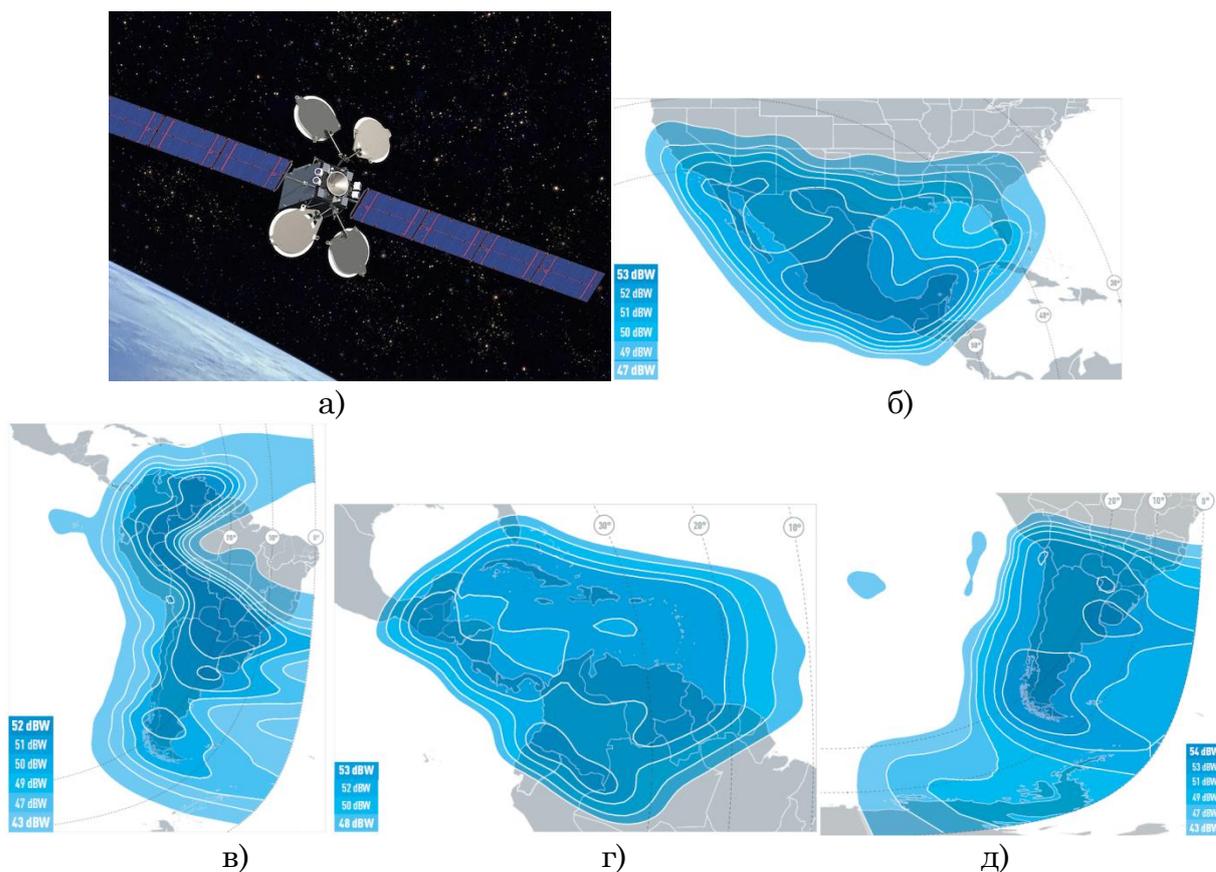
**Рис. 13.18.** Супутник Eutelsat-9B: а) зовнішній вигляд супутника в робочому стані, б) широкий промінь в Ku-діапазоні, в) промінь Північної та Західної Європи в Ku-діапазоні, г) подовжений Грецький промінь в Ku-діапазоні, д) Німецький промінь А в Ku-діапазоні, е) Німецький промінь Ge в Ku-діапазоні, ж) Італійській промінь в Ku-діапазоні



**Рис. 13.19.** Комбінація ресурсу супутників Eutelsat-9B та KA-SAT в орбітальній позиції 9°с.д. для надання пакету супутникових послуг ширококутового доступу та мовлення

Супутник Eutelsat 117 West B (орбітальна позиція 117°з.д.) побудований на платформі Hughes-702SP. Особливістю цієї платформи є відмова від хімічних двигунів для управління орбітою та підтримки орієнтації супутника і використання іонно-плазмових двигунів (англ. Ion-Xenon Propulsion System – XIP). Супутник Eutelsat 117 West B (рис. 13.20) відноситься до супутників фіксованої супутникової служби. Його

корисне навантаження становить 48 транспондерів Ku діапазону і формує 4 промені з контурною діаграмою спрямованості.



**Рис. 13.20.** Супутник Eutelsat 117 West B: а) зовнішній вигляд супутника, б) промінь 1 в Ku-діапазоні, в) промінь 3 в Ku-діапазоні, г) промінь 5 в Ku-діапазоні, д) промінь 6 в Ku-діапазоні

## Список літератури

1. Narytnyk T., Kapshytk S. Prospects for the Development of Geostationary Satellite Communications Systems in the World. Processing and Control in Information and Communication Systems. UKRMICO 2018. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 560. Springer, Cham, 2019 - P. 146-166.
2. Digital Video Broadcasting (DVB). Implementation guidelines for second generation system for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband Satellite Applications; Part 2-S2 Extensions (DVB-S2x). DVB Document A171-2.
3. JUPITER System Bandwidth Efficiency. HUGHES An EchoStar Company // White Paper. Nov-2015.
4. NEW Jupiter 3/Echostar 24 ultra high density satellite 500GB. <http://www.dslreports.com/forum/r31558626-NEW-Jupiter-3-Echostar-24-ultra-high-density-satellite-500GB>
5. With Ariane 5 launch of ViaSat-2 and Eutelsat-172b, Arianespace all caught up on protest-delayed missions // <http://spacenews.com/with-ariane-5-launch-of-viasat-2-and-eutelsat-172b-arianespace-all-caught-up-on-protest-delayed-missions>.
6. ViaSat's-2 'First of its Kind' Design Will Enable Broad Geographic Reach. Peter B. de Selding. Space News. Vol.24, Issue 20. May, 20, 2013.

7. Meet The World's Most Advanced Telecom Satellite. <http://aviationweek.com/connected-aerospace/meet-world-s-most-advanced-telecom-satellite>
8. VIASAT and EUTELSAT to Develop Consumer Broadband by Satellite Services for Europe. [http://www.eutelsat.com/news/compress/en/2007/pdf/PR0607\\_Viasat\\_Eutelsat.pdf](http://www.eutelsat.com/news/compress/en/2007/pdf/PR0607_Viasat_Eutelsat.pdf)
9. SpaceX Falcon 9 in flawless Inmarsat-5 F4 launch. <https://www.nasaspaceflight.com/2017/05/expendable-falcon-9-inmarsat-5-f4-launch>.
10. INMARSAT-5 GLOBAL XPRESS®: Secure, Global Mobile, Broadband. Stephen J. Gizinski III and Richard Manuel // [https://gobcss.com/wp-content/uploads/2015/06/gizinski.stephen.paper\\_.pdf.pdf](https://gobcss.com/wp-content/uploads/2015/06/gizinski.stephen.paper_.pdf.pdf)
11. SKY Brasil-1 Satellite. <http://spaceflight101.com/ariane-5-va235/sky-brasil-1/>
12. Capture New Growth with the World's Most Advanced Satellite Platform // <http://www.intelsat.com/media-resources/intelsat-32e-fact-sheet/>
13. Intelsat EpicNG Satellites. The Next-generation, Global High-performance Satellite Platform // [www.intelsat.com](http://www.intelsat.com).
14. Operating in an EpicNG Environment // [www.intelsat.com](http://www.intelsat.com).



---

**ТЕРАГЕРЦОВІ ТЕХНОЛОГІЇ В  
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ**

---

Авдеєнко Г.Л., Бунін С.Г., Наритник Т.М.

---

**TERAHERTZ TECHNOLOGIES IN  
TELECOMMUNICATION SYSTEMS**

---

Avdeyenko G.L., Bunin S.G., Narytnik T.M.

Наведено результати проведених досліджень щодо можливостей створення передумов вирішення фундаментальної проблеми побудови цифрових телекомунікаційних систем з використанням терагерцових технологій. Обґрунтовано необхідність переходу до використання терагерцового діапазону частот при розгортанні майбутніх телекомунікаційних систем надвисокої пропускної здатності. Виділено ділянки частот терагерцового діапазону, які найбільше за все придатні для використання в радіорелейних лініях зв'язку. Проведено фізичне моделювання надвисокошвидкісного формувача на основі багаточастотного мультиплексування промодульованих OFDM цифрових потоків. Створені програмно-апаратні засоби дозволили вперше досягнути загальну каналну швидкість при повному дуплексі до 1,2 Гбіт/с. Проведено проектування основних вузлів приймально-передавального тракту телекомунікаційної системи із гігабітною пропускною здатністю в діапазоні частот 130-134 ГГц. Досліджено параметри багатоканального сигналу цифрового телебачення стандарту DVB-C при його передаванні через макет приймально-передавального тракту діапазону 130 ГГц. Уперше наведено результати імітаційного моделювання з передавання та прийому IR-UWB сигналу у вигляді гаусівського моноциклу через прийомопередавач діапазону 130,4-131,5 ГГц.

The investigation results of possibilities of real prerequisites creation for solving the fundamental problem of constructing digital telecommunication systems with the use of terahertz technologies for the first time in Ukraine completed by the team of authors are presented. The necessity of transition to the use of the terahertz frequency range for the future telecommunication systems deployment with ultra high bandwidth is substantiated. Terahertz frequency range areas that are most suitable for use in radio relay communication lines are analyzed. The physical simulation of the ultra high-speed signal generator based on multifrequency multiplexing of the modulated OFDM digital streams was carried out. The developed software and hardware allowed for the first time to reach the overall channel speed with a full duplex up to 1.2 Gbit/s. The design of the main nodes of the receiving and transmitting path of a telecommunication system with a gigabit throughput in the frequency range 130-134 GHz was carried out. The parameters of DVB-C multichannel digital signal are investigated during its transmission through the 130 GHz transmitting path. For the first time, the results of the investigation in the transmission of the Gaussian monocycle IR-UWB signal by the transmission path and its reception by the receiving path of the terahertz range, designed for the frequency band 130.4-131.5 GHz are presented.

## 14.1 Вступ

Однією з тенденцій розвитку сучасних телекомунікацій є освоєння все більш високочастотних діапазонів. З початку 1980-х рр. і по теперішній час широку увагу дослідників привертає терагерцовий діапазон, який приблизно займає смугу радіочастот від 0,1 до 3ТГц (рис. 14.1).



**Рис.14.1.** Терагерцовий діапазон в електромагнітному спектрі

Освоєнню терагерцового діапазону сприяла серійна розробка напівпровідникових активних елементів для генерації і підсилення коливань на цих частотах завдяки використанню нанотехнологій, а також нових типів вакуумних приладів для роботи в цьому частотному діапазоні. Стабільний позитивний приріст кількості заявок на винаходи в досліджуваній області свідчить про те, що досліджувана тематика відноситься до області перспективних досліджень[1-6].

Один із найбільш перспективних напрямків застосування терагерцових технологій в телекомунікаціях пов'язаний з сучасними тенденціями розвитку транспортних розподільних мереж мобільного зв'язку п'ятого покоління[7], систем управління військовими місіями та протидії тероризму, які передбачають обмін великими обсягами даних. Послуги оптоволоконних мереж забезпечують мультигігабітний обсяг обміну даних не в усіх місцях, а супутниковий зв'язок не може повністю забезпечити пропускну здатність, необхідну для передачі великого обсягу даних.

Це дало імпульс до розробки нового покоління малогабаритних безпроводових систем, що використовують неліцензовані терагерцові частотні діапазони, не співпадаючі з ліцензованими частотними діапазонами, традиційно задіяними для транспортування трафіку макростільників.

Серед сучасних тенденцій розвитку інфокомунікацій переважають такі напрямки, як 5G, когнітивні мережі, оптичні мережі, терагерцового діапазону, розподільчі транспортні мережі мобільного зв'язку тощо.

Прогнози сучасних тенденцій підвищення швидкості бездротового передавання даних показують, що до 2020 р. швидкість повинна бути не менше десятків гігабіт за секунду. Ця проблема ставить питання про доступність частотного діапазону, спроможного відповідати таким вимогам. Основною можливістю є збільшення доступної смуги пропускання до декількох десятків гігагерців, що доступно в терагерцовому діапазоні. У останні роки декілька дослідницьких груп у всьому світі почали досліджувати системи бездротового

зв'язку на частоті понад 100 ГГц та вище. Прикладом є програми Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) зі створення технологій і приладів ТГц зв'язку.

Кафедра телекомунікацій ІТС та НДІ телекомунікацій КПІ ім. Ігоря Сікорського, яка традиційно займалася апаратно-програмними засобами в мікрохвильовому діапазоні, в останні роки розширили коло своїх наукових інтересів. Один з нових перспективних напрямків нашої роботи – створення, розвиток і впровадження терагерцових технологій в телекомунікаціях. Колективу вчених кафедри вдалося отримати значні результати в освоєнні так званої "терагерцової щілини" - області електромагнітного спектра, що лежить в діапазоні від 0,1 до 3 ТГц. Створення пристроїв, систем і мереж ТГц-діапазону здатне радикально змінити принципи і теоретичні підходи до побудови транспортних розподільних мереж мобільного зв'язку п'ятого покоління, систем управління військового призначення. Крім того, відкриваються величезні перспективи їх використання в інших різних областях – від аерокосмічної та метеорології до медицини і безпеки [2-7].

*Метою даного розділу є ознайомлення з результатами циклу досліджень, що проведені колективом вчених кафедри телекомунікацій КПІ ім. Ігоря Сікорського в галузі безпроводових систем зв'язку терагерцового діапазону, і які включають в себе наступні напрями:*

- дослідження особливостей поширення терагерцових хвиль в атмосфері;
- реалізація концепції створення програмно-визначених радіосистем терагерцового діапазону з використанням технології Wi-Fi;
- проектування передавального та приймального радіотрактів радіорелейних систем терагерцового діапазону;
- дослідження передавання телевізійних сигналів стандарту DVB-S через приймальнопередавальний тракт терагерцового діапазону;
- імітаційне моделювання передавання імпульсного надширокопasmового сигналу радіолінією терагерцового діапазону.

## 14.2. Дослідження особливостей поширення терагерцових хвиль в атмосфері

Для ефективного з точки зору фінансових витрат проектування високошвидкісних безпроводових телекомунікаційних систем терагерцового діапазону знання механізмів поширення терагерцових хвиль в атмосфері є надзвичайно важливим, оскільки вони дозволяють розробнику оцінити реальні технічні параметри, надійність та ступінь реалізованості радіосистеми. Однак узагальненого дослідження таких механізмів з врахуванням специфіки побудови безпроводових телекомунікаційних систем проведено не було. Останні дослідження в даній області були засновані на розгляді тільки окремих радіосистем (наприклад безпроводових локальних мереж WLAN (Wireless local Area Network) та радіорелейних систем зв'язку). Тому надзвичайно важливо в

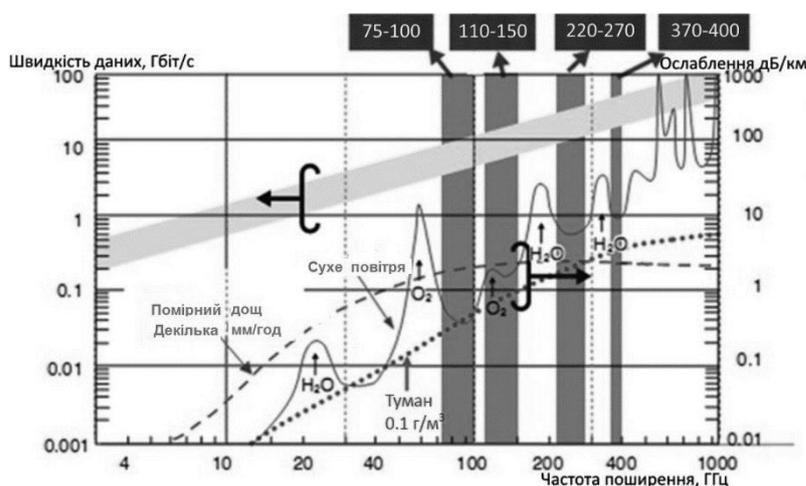
умовах сучасного бурхливого освоєння апаратури терагерцового діапазону провідними науково-технічними школами світу, провести такі дослідження, результати яких можна було б використати для розробки будь-якої безпроводової терагерцової телекомунікаційної системи.

Проведений аналіз показав, що в діапазоні частот 30-300 ГГц з відомих типів завмирань найбільш вагомими, які слід враховувати при проектуванні, є наступні :

- завмирання внаслідок послаблення сигналу атмосферними гідрометеорами;
- завмирання внаслідок поглинання енергії радіосигналу в газах (в першу чергу парах води та молекулярному кисні);
- завмирання внаслідок впливу діаграм спрямованості антен, обумовлених неточністю налаштування антен станцій, що кореспондують.

На рис. 14.2 зображено результати дослідження залежності величини затухання радіохвиль від частоти. Результати показали, що піки затухання внаслідок резонансної взаємодії радіохвилі з молекулою кисню утворилися в смузі частот 50-70 ГГц з максимумом на частоті 60 ГГц та на частоті 118 ГГц.

**Рис.14.2.** Залежність величини затухання від частоти з врахуванням впливу дощу



Піки затухання внаслідок взаємодії електричних моментів води та радіохвилі утворилися на частоті 22,2 ГГц та на частоті 183 ГГц. На інших частотах спостерігалися менші величини затухання, тому діапазони між піками і назвали радіовікнами. Іншими словами, вибираючи частоти, що знаходяться у радіовікні, можна суттєво зменшити вплив параметрів атмосфери на радіолінію.

Проаналізувавши залежності на рис.14.2 можна зробити логічний висновок, що при збільшенні частоти терагерцових хвиль, затухання в дощі також монотонно збільшується, досягаючи десятків децибел на кілометр.

Результати обчислень коефіцієнтів ослаблення у дощах різної інтенсивності при температурі 20°C, які зроблені на основі функції розподілу, що враховує наявність дрібних дощових крапель, представлено в таблиці 14.1. Затухання терагерцових хвиль в сухому снігу є малим. У декілька разів зростає величина затухання в мокрому снігу або дощі тієї ж інтенсивності. Висновок з цього наступний: внесок снігу в порівнянні з дощем тієї ж інтенсивності нехтовно малий. У випадку з туманом затухання терагерцових хвиль до частот 300 ГГц

незначні. Значення коефіцієнтів послаблення для різних параметрів атмосфери наведено у таблиці 14.1.

Табл.14.1 Коефіцієнт послаблення  $\gamma$  (дБ/км) для різних параметрів атмосфери

Вид атмосфери	Частота радіосигналу, ГГц							
	30	60	90	120	140	165	250	300
1. Дощ слабкий (1 ÷ 5 мм/год)	0,9	2,1	3,4	4,7	5,4	7,1	9,8	14,3
2. Дощ помірний (5 ÷ 20 мм/год)	3,5	8,0	9,5	13,2	15,1	18,3	27,5	33,6
3. Дощ сильний (20 ÷ 40 мм/час)	7,0	14,0	15,2	16,3	17,0	20,2	30,5	42,3
4. Дощ зливовий(40 ÷ 100 мм/час)	17,0	28,0	30,6	33,3	35,0	38,7	45,0	53,2
5. Сухий сніг (10 мм/час)	0,06	0,13	0,21	0,28	0,32	0,41	0,59	0,74
6. Мокрий сніг (10 мм/час)	1,7	4,9	7,7	10,7	12,4	15,3	22,8	28,7
7. Хмари потужні купчасті (1,2 г/м <sup>3</sup> )	3,5	8,0	9,5	12,9	15,1	18,9	27,5	33,2
8. Газ (кисень)	-	15,0	0,05	1,8	0,5	0,02	0,02	0,03
9. Газ (водяна пара)	0,07	0,1	0,2	0,5	0,8	2	2,5	5,5

Виходячи із результатів проведених досліджень, можна вважати найбільш придатними і перспективними при проектуванні високошвидкісних надширококутних безпроводових телекомунікаційних систем частотні діапазони 110...150 ГГц і 220...270 ГГц [8], де можна використовувати великі смуги частот шириною 40...50 ГГц для суттєвого збільшення інформаційної ємності, підвищення скритності та захисту від виявлення і несанкціонованого доступу інформації, що передається.

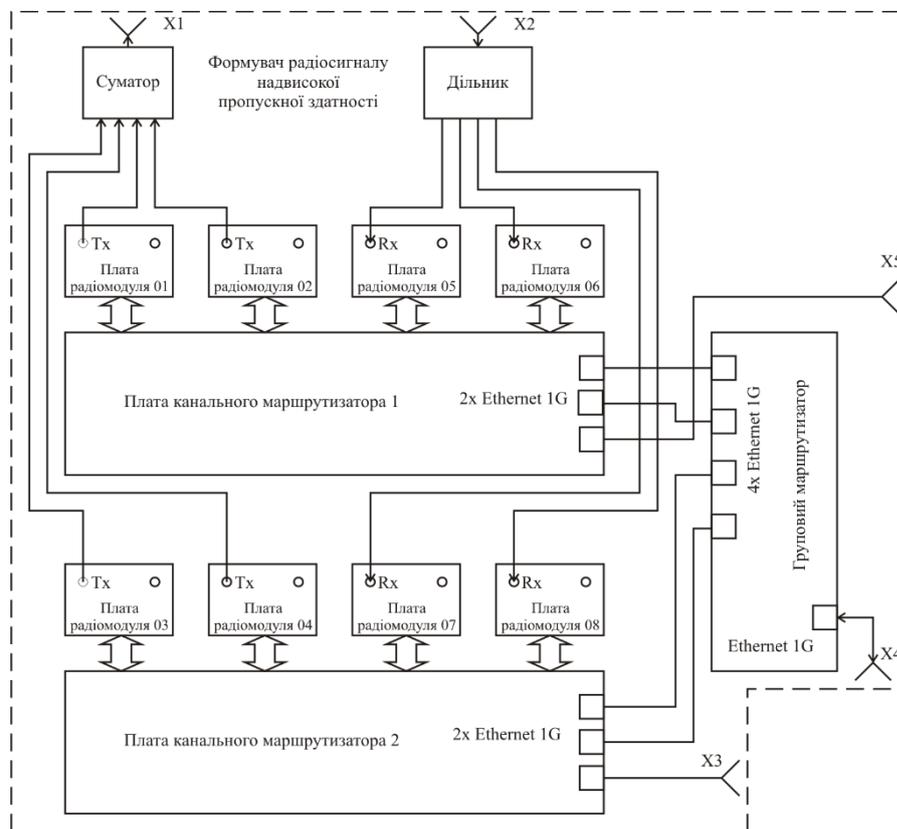
### 14.3. Реалізація концепції створення програмно-визначених радіосистем терагерцового діапазону з використанням технології WI-FI

Побудова значної частки пристроїв безпроводового зв'язку в межах сучасних тенденцій розвитку інфокомунікацій здійснюється на основі концепції програмно-визначених радіосистем (SDR). Відомими на сьогоднішній день прикладами реалізації концепції SDR є пристрої для мереж GSM, UMTS, Wi-Fi, WiMAX тощо [9].

З метою реалізації концепції SDR у телекомунікаційній системі терагерцового діапазону на основі технології Wi-Fi створений гігабітний модем G1 (рис.14.3), який може бути використаний для з'єднання територіально рознесених сегментів мереж Ethernet 10/100/1000-BaseTx.

Основні складові гігабітного модему – каналні маршрутизатори 1 і 2, а також груповий маршрутизатор. Вхідний потік автоматично розподіляється на

всі канали і далі обробляється для формування радіочастотного спектру в смузі пропускання радіорелейного каналу. Гігабітний модем G1 (рис. 14.3) виконаний у металевому корпусі, дозволяє встановлювати його в стійку або використовувати настільне розташування. Основні технічні характеристики модему приведені в табл. 14.2.



**Рис.14.3.** Функціональна схема гігабітного модему

У модемі застосовується режим «dual stream» на обладнанні Mikrotik, що використовує для створення одного дуплексного радіоканалу два приймачі R52n-M, один на прийом, інший на передачу. Для досягнення сумарної каналної швидкості 1,2 Гбіт/с пропонується чотири дуплексних канали по 150 Мбіт/с у кожному напрямку. При формуванні «dual stream» каналів, що необхідно для організації дуплексних каналів та підвищення ефективності кожного каналу, використовуються маршрутизатори Mikrotik RB800 з чотирма mini-PCI слотами із встановленими прийомопередавачами Mikrotik R52n-M. Доступ до кожного радіоканалу забезпечується окремим інтерфейсом Ethernet маршрутизатора RB800.

Для об'єднання всіх каналів використовується маршрутизатор Mikrotik RB1100Hx2, який надає єдиний інтерфейс для зовнішнього підключення. Дана конфігурація модему забезпечує високу продуктивність і заявлені характеристики, маючи при цьому відносно низьку вартість побудови гігабітного модему.

На основі гігабітного модему G1 із встановленими прийомопередавачами Mikrotik R52n-M та розробленого передавального та приймального трактів з

використанням технології Wi-Fi запропоновано гігабітну телекомунікаційну систему на основі технології Wi-Fi в діапазоні 130-134 ГГц з досягненням канальної швидкості до 1,2 Гбіт/с.

Табл.14.2. Загальні технічні характеристики гігабітного модему

Найменування	Значення
Напруга живлення, В	220
Інтерфейс управління режимами модуляції-демодуляції	Ethernet 10/100 Base-Tx, роз'єм RJ-45
Інтерфейс управління маршрутизатором	Ethernet 10/100/1000 Base-T, роз'єм RJ-45
Інтерфейс даних	Ethernet 10/100/1000 Base-T, роз'єм RJ-45
Інтерфейс тракту ПЧ	Коаксіальний, тракт 50Ом, роз'єми N-type
Центральна частота тракту ПЧ, МГц	2400
Ширина смуги частот, займана модульованим сигналом в режимі максимальної пропускної спроможності, МГц, не більше	40
Вид модуляції	QAM-64
Потужність сигналу ПЧ на виході модулятора, дБм	0 ... -3
Чутливість по входу ПЧ демодулятора, дБм	-70
Максимально допустимий рівень сигналу ПЧ на вході демодулятора, дБм, не більше	-45
Маса модему, кг, не більше	4

#### 14.4. Проектування передавального і приймального радіотрактів радіорелейних систем терагерцового діапазону

Ключовими елементами радіорелейної системи зв'язку терагерцового діапазону є радіоелектронні приймальнопередавальні тракти [10-14], які здатні формувати і передавати модульовані сигнали необхідної потужності для цього частотного діапазону зі швидкістю від 1 Гбіт/с і приймати сигнали з прийнятною високою чутливістю.

Ці тракти побудовані за гетеродинною схемою і забезпечують передачу сигналів на трасі в терагерцовому діапазоні частот в межах 130...134 ГГц. Діапазон проміжних частот становить 2...4 ГГц.

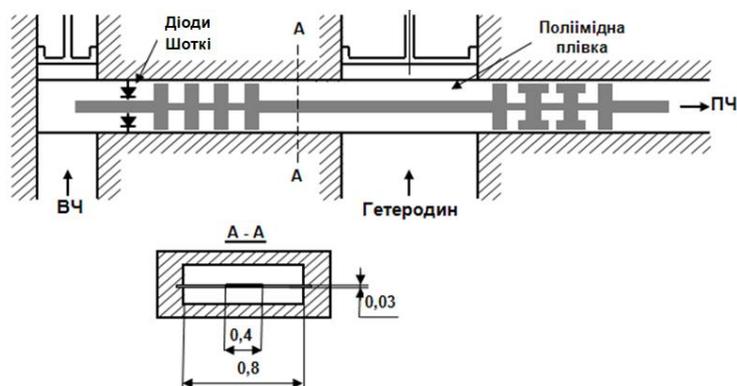
На вхід передавального тракту сигнал надходить від гігабітного модему G1. Реалізація малошумливого підсилювача на вході приймального тракту становить таку ж проблему, як і підсилювача потужності на виході передавача. становить на сьогодні серйозну проблему

Частотні перетворювачі побудовані на базі безкорпусних арсенід-галієвих діодів Шоттки з балочними виводами вітчизняного виробництва (НПП «Сатурн», м. Київ). За електричними і конструктивними параметрами

розроблені діоди, які не поступаються закордонним сучасним аналогам, наприклад, арсенід-галієвим діодам фірми Hewlett Packard.

З метою реалізації субгармонійної схеми перетворювача з накачуванням на половинній частоті (рис. 14.4) в якості нелінійного елемента застосовані два включених зустрічно-паралельно діоди Шоттки.

**Рис.14.4.** Конструктивна схема частотного перетворювача



Конструкція змішувача містить в своєму складі попередній підсилювач сигналу проміжної частоти. Потужність гетеродина, яка необхідна для нормальної роботи змішувача, не перевищувала 15 мВт. Вимірне значення втрат перетворення становить - 11 дБ, що відповідає найкращим досягненням зарубіжних аналогів.

Підсилювач потужності (ПП) на виході передавача і малошумний підсилювач (МШП) на вході приймача є тими функціональними вузлами, які головним чином визначають енергетичний потенціал всієї системи.

Проблеми реалізації таких підсилювачів в терагерцовому діапазоні обумовлені високими робочими частотами. Успіхи напівпровідникової технології в останні роки і створення відповідної елементної бази відкривають перспективи для реалізації високочастотних якісних підсилювачів в терагерцовому діапазоні. Використання цих підсилювачів в схемі прийомопередавача забезпечить надійну і якісну передачу інформаційного сигналу на великих відстанях зв'язку.

Гетеродин виявляється найбільш складним пристроєм при розробці цифрових телекомунікаційних систем в терагерцовому діапазоні частот. Це пояснюється як труднощами досягнення достатнього рівня потужності на досить високих частотах, так і необхідністю забезпечення високої стабільності гетеродина і низького рівня його фазових шумів. Субгармонічна схема частотних перетворювачів дозволяє знизити необхідну частоту гетеродина, що в деякій мірі полегшує розробку гетеродинного ланцюга, проте зберігаються жорсткі вимоги до стабільності гетеродина і рівня фазових шумів, особливо в цифрових системах передачі даних зі складними видами модуляції.

Для цифрової радіорелейної системи діапазону частот 130...134 ГГц було спроектовано ланцюг гетеродина на частоту 64,8 ГГц. Побудова гетеродина заснована на використанні високостабільного задаючого кварцового генератора з наступним ланцюгом помножуючих і підсилюючих каскадів. Рівень підсилення

встановлювався таким, щоб забезпечити оптимальний режим роботи помножуючих каскадів і необхідну потужність на виході гетеродина.

Даний принцип побудови гетеродина набагато дешевше розробки частотного синтезатора, а фільтрація сигналу після кожного помножуючого каскаду усуває наявність паразитних гармонік і комбінаційних частот.

В якості задаючого був використаний кварцовий генератор на 100 МГц типу ССНД-950Х-25-100 фірми Crystek Crystals з рівнем фазових шумів не вище -143 дБ при відстоюванні від центральної частоти на 1 кГц. Параметри генератора, що задає частоту в основному і визначають стабільність частоти і фазові шуми гетеродина.

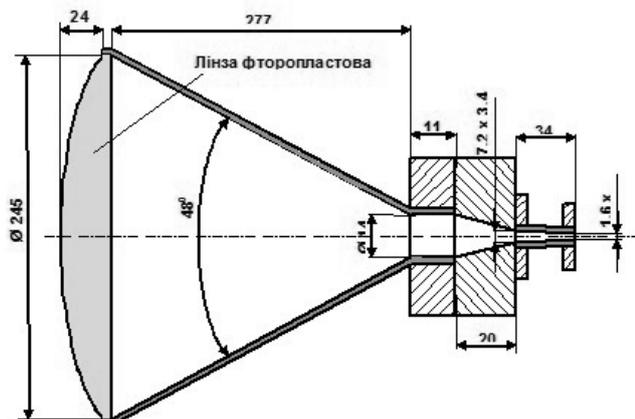
Виміряні значення вихідних потужностей гетеродина для трактів прийому і передачі перевищували 15 мВт, що цілком достатньо для нормальної роботи частотних перетворювачів приймального і передавального трактів.

Таким чином, в результаті проведених досліджень спроектовано, виготовлено та випробувано гетеродин, який за своїми показниками, зокрема, по вихідній потужності, не поступається закордонним аналогам.

Схема підсилювача проміжної частоти (ППЧ) включає в себе попередній підсилювач, побудований на мікросхемі TQR3M9037, а також головний підсилювач, розроблений на базі транзистора FPD6836P70 і мікросхеми НМС313. Крім підсилюючих мікросхем схема ППЧ містить монолітні керамічні фільтри верхніх і нижніх частот для формування необхідної смуги пропускання тракту проміжної частоти, резистивний аттенюатор для узгодження вихідного фільтра з передавальною лінією, Попередній підсилювач конструктивно інтегрований зі змішувачем, щоб мінімізувати втрати слабого сигналу перед посиленням. Шумова температура цього підсилювача складає близько 50 К і в значній мірі визначає чутливість всього приймача. Саме тут здійснюється головне посилення сигналу. Повний коефіцієнт підсилення ППЧ становить 47 дБ.

Високочастотні смугопропускаючі фільтри (СПФ) на виході передавального і вході приймального трактів повинні забезпечити розв'язку сигналів даних трактів, а також достатнє придушення дзеркальних каналів і сигналів гетеродинів. Мала величина проміжної частоти ( $f_{пч} = 2...2,5$  ГГц) обумовлює жорсткі вимоги до високочастотних СПФ за вибірковістю.

Рис.14.6. Конструкція рупорної антени



Найбільш прийнятними в 2 мм діапазоні довжин хвиль з точки зору малих втрат і високої вибірконості є хвильові septum-фільтри. Саме такий фільтр був розроблений в рамках даного проекту.

Отримані експериментальні результати показують, що фільтр задовольняє вимогам вибірконості, з метою забезпечення достатнього (на 20 дБ) придушення дзеркального каналу і другої гармоніки сигналу гетеродина (129,6 ГГц).

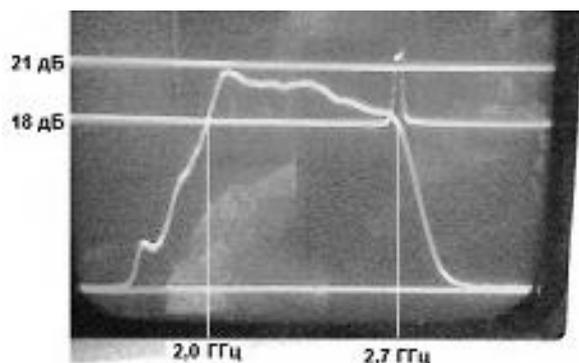
Втрати фільтра в терагерцовому частотному діапазоні передавача не перевищують 4 дБ, що є задовільним результатом для таких високих частот. Нерівномірність АЧХ по плоскій частині не перевищує 2 дБ.

Як в передавальному, так і в приймальному трактах була використана конічна рупорна антена з діелектричним лінзовим концентратором (рис. 14.6). Апертура антени становить 245мм. Як концентратор використана фторопластова лінза.

Розрахунки дають наступні характеристики антени: діапазон робочих частот 130...134 ГГц; вхід хвильового каналу з перетином 1,6 x 0,8 мм 2 ( $\lambda = 2$  мм); коефіцієнт підсилення не менше 47 дБ; ширина діаграми спрямованості не більше 0,60; КСХН входу в межах 1,15.

## 14.5. Дослідження радіорелейної системи терагерцового діапазону 130-134 ГГц

На базі розроблених функціональних вузлів були побудовані приймальний та передавальний тракти радіорелейної системи терагерцового діапазону. Для забезпечення якісної роботи приймача і передавача були розроблені вторинні джерела живлення, які формують необхідні високостабільні напруги для всіх вузлів трактів.



**Рис.14.7.** Наскрізна частотна характеристика коефіцієнта передачі приймально-передавального тракту



**Рис.14.8.** Приймально-передавальний тракт радіорелейної системи

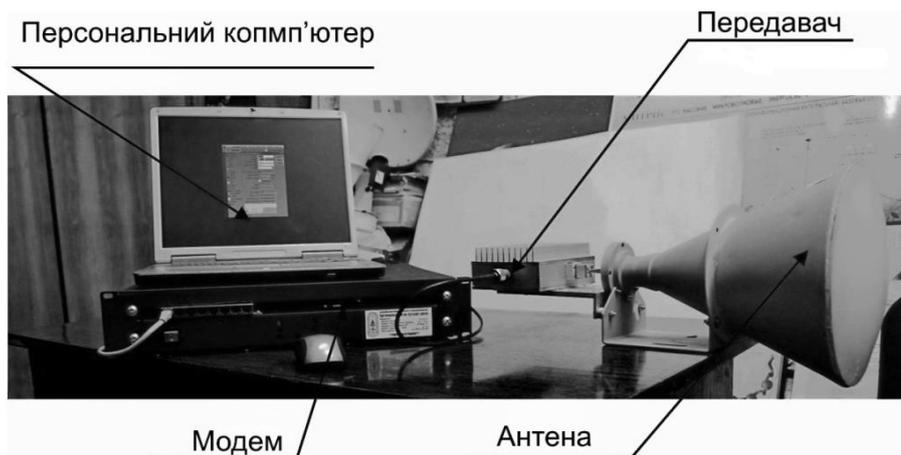
Виміряна наскрізна частотна характеристика коефіцієнта передачі  $K(f)$  приймально-передавального тракту показана на рис. 14.7. Як видно з вимірної частотної залежності  $K(f)$ , приймально-передавальний тракт терагерцового діапазону має сумарний коефіцієнт передачі не менше 18 дБ, при цьому

нерівномірність коефіцієнта передачі в робочому діапазоні частот не перевищує 3 дБ.

Проведено експериментальні дослідження коефіцієнта передачі приймально-передавального тракту радіорелейної системи в цілому (рис. 14.8).

Крім того, було проведено експериментальні дослідження лабораторного зразка цифрової симплексної радіорелейної системи терагерцового діапазону (рис. 14.9) у складі: приймальний і передавальний радіотракти в діапазоні частот 130...134 ГГц, цифрові модеми. Випробування системи було проведено відповідно до схеми, показаної на рис. 14.10.

**Рис. 14.9.**  
Зовнішній вигляд лабораторного зразка цифрової симплексної радіорелейної системи терагерцового діапазону



**Рис. 14.10.** Схема випробуваної телекомунікаційної системи

Експериментальні дослідження трактів радіорелейної системи показали наступні значення основних показників в робочому діапазоні частот:

- Шумова температура приймального тракту  $T_{ш.прм}=5000$  К;
- Вихідна потужність передавального тракту  $P_{вих}=40$  мкВт.

Отримані наступні результати:

- Пропускна канална здатність до 1200 Мбіт/с;
- Значення ймовірних бітових помилок BER не більше  $10^{-6}$ ;
- Дальність зв'язку в нормальних умовах в межах 1 км;
- Коефіцієнт посилення системи на рівні 50 дБ;
- Вид модуляції - КАМ-64.

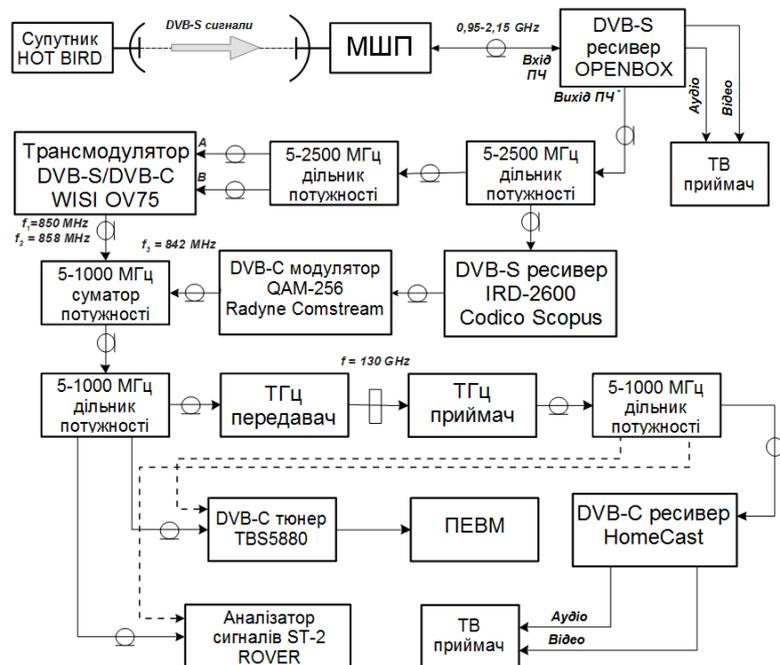
Уперше в практичному плані проведені експериментальні дослідження лабораторного зразка цифрової симплексної радіорелейної системи

терагерцового діапазону в складі приймального і передавального радіотракту в діапазоні частот 130...134 ГГц і цифрового модему з пропускною каналною здатністю до 1200 Мбіт/с. Відмінною рисою експериментального зразка прийомопередавача ТГц діапазону і, відповідно, безпроводової системи зв'язку терагерцового діапазону на його основі, які описані в першій частині циклу досліджень, є відсутність будь-яких оптичних пристроїв, що по-перше, спрощує структурну схему прийомопередавача та системи, а по-друге – здешевлює її розробку та налаштування.

## 14.6. Дослідження передачі телевізійних сигналів стандарту DVB-C по приймальнопередавальному тракту терагерцового діапазону

Метою дослідження є оцінка зміни параметрів багатоканального сигналу цифрового телебачення стандарту DVB-C при його передачі через макет приймальнопередавального тракту діапазону 130 ГГц. Стандарт DVB-C для проведення досліджень було обрано через можливість формування сигналів з різною позиційністю модуляції (від QAM-64 до QAM-256), що дозволило дослідити вплив параметрів окремих вузлів макету на параметри сигналів, що передавалися через нього.

**Рис. 14.11.** Структурна схема експериментальної установки для дослідження багатоканальних сигналів цифрового телебачення стандарту DVB-C



Для дослідження було зібрано експериментальну установку, до складу якої увійшли прийомопередавач, підсистема формування телевізійних сигналів стандарту DVB-C, підсистема вимірювання параметрів сигналів стандарту DVB-C. Дослідження проводилось поетапно: було використано одноканальний, двоканальний та трьохканальний сигнали DVB-C [15].

Для дослідження зміни параметрів багатоканальних сигналів цифрового телебачення стандарту DVB-C при їх передаванні по приймальнопередавальному тракту терагерцового діапазону було зібрано експериментальну установку, структурну схему якої наведено на рис. 14.11.

Як можна побачити з рис. 14.11, заміри параметрів сигналів DVB-C виконувались на вході тракту передавача та на виході тракту приймача терагерцового діапазону. При цьому вихід передавача з'єднується з входом приймача хвилеводною лінією. Спрощена структурна схема прийомопередавача терагерцового діапазону та його фотографія відповідно зображені на рис. 14.12 і рис. 14.13.

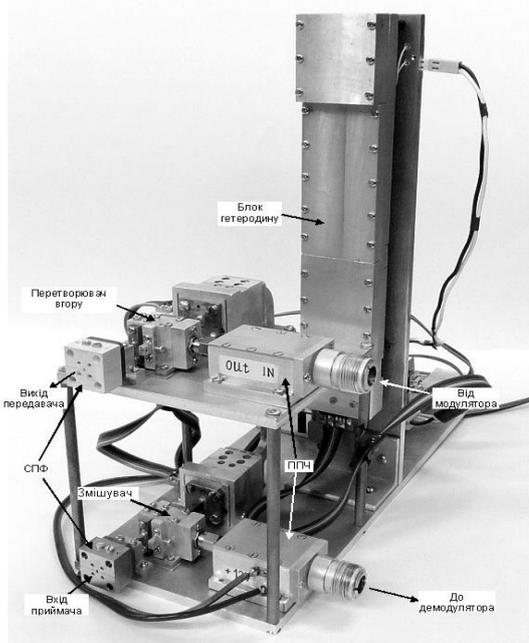
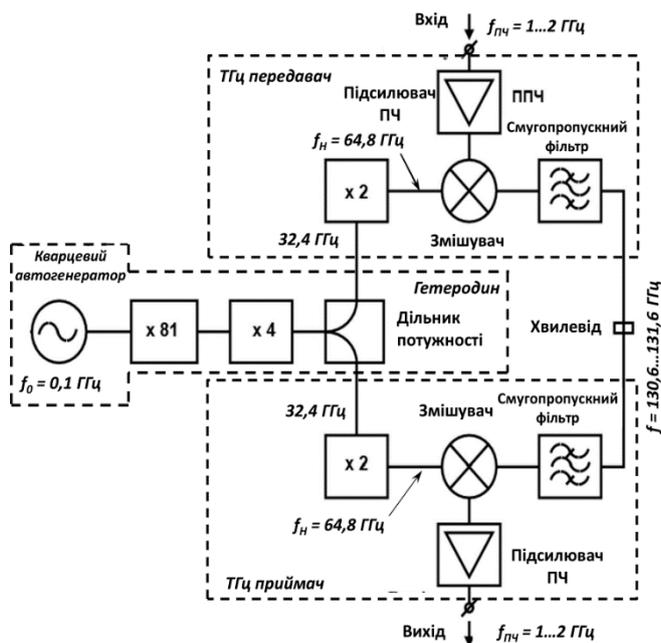


Рис. 14.12. Спрощена структурна схема прийомопередавача терагерцового діапазону

Рис. 14.13. Фотографія прийомопередавача терагерцового діапазону

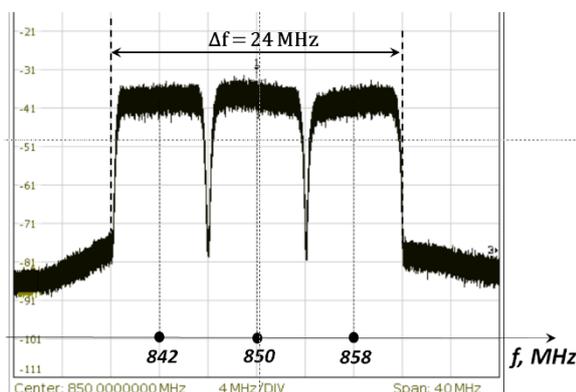


Рис. 14.14. Спектр 3-х каналного ТВ сигналу стандарту DVB-C

Дослідження зміни параметрів багатоканального сигналу цифрового телебачення стандарту DVB-C при його передачі по приймальнопередавальному тракту терагерцового діапазону проводилось для трьохканального сигналу DVB-C (рис. 14.14). Формування сигналів стандарту DVB-C здійснювалося за

допомогою трансмодулятора WISI OV75 та модулятора QAM-256 Radyne Comstream з сигналів телевізійного мовлення стандарту DVB-S, параметри яких також вказано в табл. 14.3.

Табл.14.3. Вхідні параметри сигналів цифрового телебачення стандарту DVB-S від супутника HOT BIRD

Номер каналу	Вхідний сигнал, МГц	Проміжна частота, МГц	Символьна швидкість, Ксим/сек	Бітова швидкість, Мбіт/сек	Модуляція	FEC		Інформаційна швидкість, Мбіт/сек	Ширина спектру, МГц
						Conv	R.S.		
1	11179	1429	27500	55	QPSK	3/4	188/204	38,015	36
2	11137	1387	27500	55	QPSK	3/4	188/204	38,015	36
3	11334	1584	27500	55	QPSK	3/4	188/204	38,015	36

Вказані сигнали стандарту DVB-S були прийняті на дзеркальну антену з конвертором від супутника HOT BIRD (13 E).

За допомогою трансмодулятора та модулятора можна було змінювати наступні параметри сигналу DVB-C: модуляцію (QAM-16, QAM-32, QAM-64, QAM-128, QAM-256), швидкість (символьна, бітова в залежності від модуляції та завадостійкого кодування), проміжну частоту (в діапазоні 47...862 МГц).

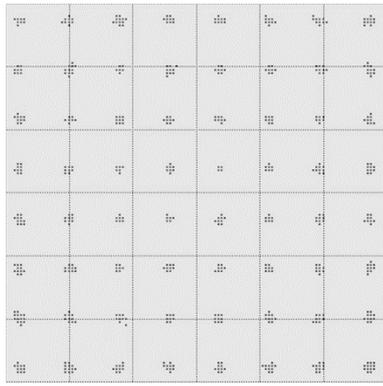
Кожен з трьох зображених на рис. 14.14 телевізійних сигналів стандарту DVB-C в свою чергу містить в собі транспортний потік MPEG, в якому передаються 5-6 ТВ програм стандартної чіткості у відкритому доступі.

На рис. 14.15 та рис. 14.16 наведено констеляційні діаграми сигналів DVB-C, притаманні для всіх етапів проведення дослідження.

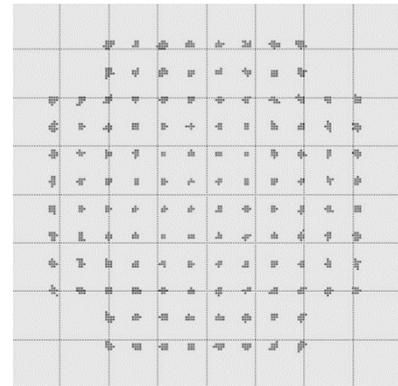
З виходу QAM модулятора RADYNE COMSTREAM QAM-256 та виходу трансмодулятора WISI OV75 (рис. 14.11) телевізійні канали поступають на суматор, на виході якого сформований багатоканальний (3-х каналний) телевізійний сигнал надходить на вхід приймальнопередавального тракту терагерцового діапазону. Результати вимірювання параметрів 3-х каналного телевізійного сигналу стандарту DVB-C наведені в табл. 14.4.

Аналізуючи результати, можна зробити висновок, що параметри сигналів на виході приймального тракту в середньому погіршилися на 4-5 дБ в порівнянні з параметрами сигналів на вході передавального тракту, при цьому в найгіршому випадку при модуляції QAM-256 параметр BER за вимірюваннями супутникового тюнеру TBS5880 зменшився, а якість сигналу стала на рівні 33...53%.

Результати дослідження параметрів багатоканального сигналу цифрового телебачення стандарту DVB-C по приймальнопередавальному тракту терагерцового діапазону показали, що використання нижньої частини терагерцового діапазону частот (130 ГГц) зі смугою 24 МГц дозволяє передати три канали телевізійного мовлення стандарту DVB-C з загальною швидкістю транспортного потоку на рівні 125 Мбіт/с з високою суб'єктивною якістю відтворення ТВ програм.



**Рис. 14.15.** Констеляційна діаграма сигналу DVB-C при модуляції QAM-64



**Рис. 14.16.** Констеляційна діаграма сигналу DVB-C при модуляції QAM-128

Табл. 14.4. Параметри трьох телевізійних каналів сигналу цифрового телебачення стандарту DVB-C, які виміряні тюнером TBS8550

Показники каналу		Значення замірів на вході передавача терагерцового діапазону			Значення замірів на виході тракту терагерцового діапазону		
Частота, МГц	Модуляція	LEV, dBm	SNR, dB	BER	LEV, dBm	SNR, dB	BER
842	QAM-64	-51	38,6	$<10^{-8}$	-60	33,71	$<10^{-8}$
	QAM-128	-54	42,12	$<10^{-8}$	-57	39,43	$<10^{-8}$
	QAM-256	-32	38,6	$<10^{-8}$	-54	36,8	$<10^{-8}$
850	QAM-64	-38	38,6	$10^{-4}$	-57	37,6	$7 \cdot 10^{-4}$
	QAM-128	-54	43,43	$<10^{-8}$	-54	39	$<10^{-8}$
	QAM-256	-32	38,6	$<10^{-8}$	-54	37,4	$<10^{-8}$
858	QAM-64	-38	38	$<10^{-8}$	-57	34,57	$<10^{-8}$
	QAM-128	-54	42,12	$<10^{-8}$	-54	39,43	$<10^{-8}$
	QAM-256	-32	38,6	$10^{-3}$	-54	36,8	$1,5 \cdot 10^{-3}$

## 14.7. Імітаційне моделювання передавання імпульсного надширокосмутового сигналу радіолінією терагерцового діапазону

Враховуючи, що на даний момент федеральною комісією США в галузі зв'язку для забезпечення електромагнітної сумісності встановлено допустимі норми на спектральну щільність випромінення UWB сигналів на рівні – 41,3 дБм/МГц в смузі частот 3,1...10,6 ГГц, максимальна дальність дії систем зв'язку на базі UWB як правило не перевищує декілька десятків метрів. Отже, кардинально збільшити дальність дії систем радіозв'язку на базі UWB сигналів можна лише шляхом використання вільних ділянок радіоспектру. Тому саме діапазон терагерцових частот (0,1...3 ТГц) через свою велику частотну ємність та незайнятість є перспективним для розробки та розгортання UWB систем зв'язку задля дослідження всіх їх переваг та недоліків [6]. Важливо відмітити, що задача генерації UWB коливань терагерцовому діапазоні є надто складною

задачею, тому, найбільш доцільним і перспективним шляхом побудови систем UWB зв'язку є генерація UWB сигналів в діапазоні деци- або сантиметрових хвиль з подальшим їх перенесенням в терагерцовий діапазон методом гетеродинування в передавальному тракці системи зв'язку та зворотного перенесення сигналу з терагерцового діапазону в діапазон деци- або сантиметрових хвиль в приймальному тракці цієї системи. Тому метою данного пункту є дослідження характеру зміни часової форми імпульсного надширококутового сигналу (IR-UWB) при його передаванні через ідеалізовану імітаційну модель радіолінії терагерцового діапазону з відомими параметрами.

В якості середовища імітаційного моделювання обрано програмний пакет Visual System Simulator САПР AWR Microwave Office ver.10 компанії National Instruments, яка має зручний інтерфейс та необхідний функціонал для проведення досліджень на схемотехнічному рівні.

Ідеалізована імітаційна модель радіолінії терагерцового (ТГц) діапазону будується на базі параметрів та структурної схеми діючого макета прийомопередавача ТГц [7, 8].

Структурна схема симплексної системи радіозв'язку ТГц діапазону, імітаційна модель якої була побудована в AWR Microwave Office, показана на рис. 14.17.

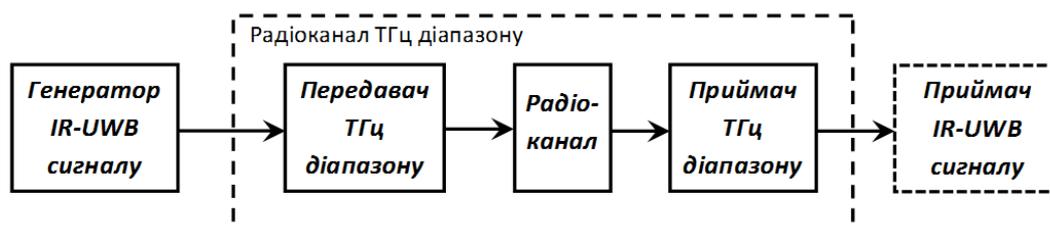


Рис. 14.17. Структурна схема симплексної системи радіозв'язку ТГц діапазону

В якості IR-UWB сигналу оберемо так званий гаусівський моноцикл, який досить широко використовується в якості випромінювального сигналу в техніці UWB. Імітаційна модель генератору IR-UWB сигналів, яка побудована за допомогою інструментарію САПР Microwave Office, зображена на рис. 14.18. До складу моделі входять генератор прямокутних імпульсів, гаусівський фільтр нижніх частот, диференційний ланцюг.

Параметри джерела надкоротких імпульсних сигналів (блок PPULSE): частота повторення імпульсів (RATE)  $f=20$  МГц; період повторення імпульсів:  $T = 50$  нс; тривалість переднього фронту імпульсу (RT):  $TR = 50$  пс; тривалість заднього фронту імпульсу (FT)  $TF=50$  пс; тривалість імпульсу (DUTY)=1% або 500 пс.

Осцилограма гаусівського моноциклу на виході диференційного ланцюга зображена на рис. 14.19,*а* а його спектр зображений на рис. 14.19,*б*.

Отриманий моноцикл далі надходить на вхід передавального тракту терагерцового діапазону, імітаційна модель якого в САПР Microwave Office відповідно зображена на рис. 14.20.

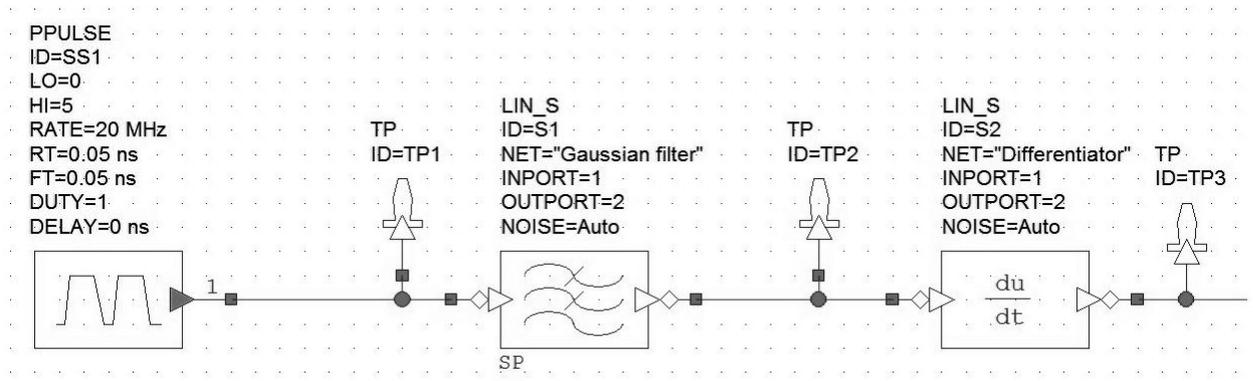


Рис. 14.18. Структурна схема імітаційної моделі генератору IR-UWB

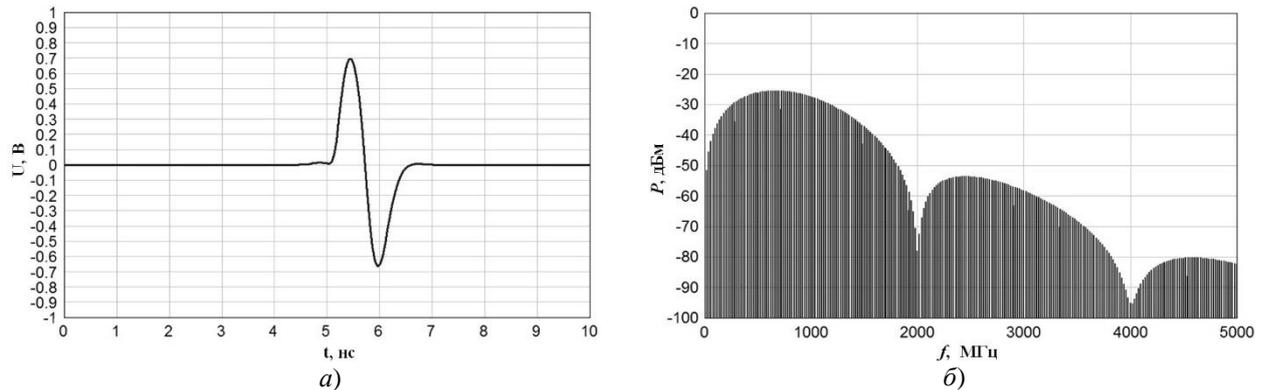


Рис. 14.19. Осцилограма гаусівського моноциклу (а) та його спектр (б) на виході диференційного кола

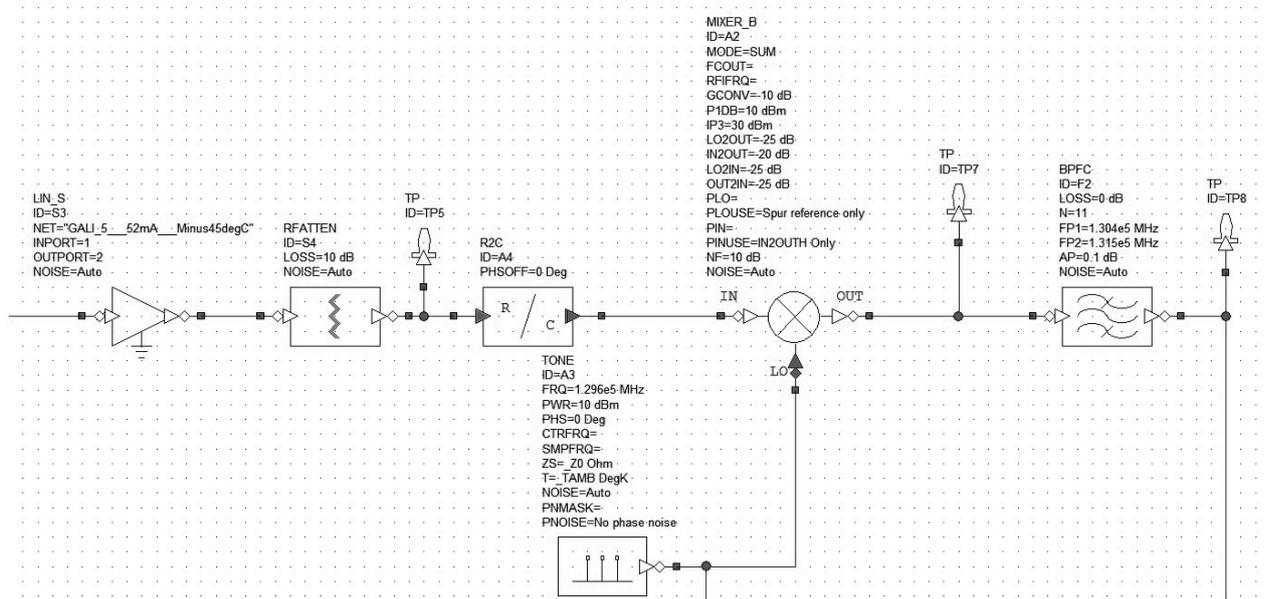
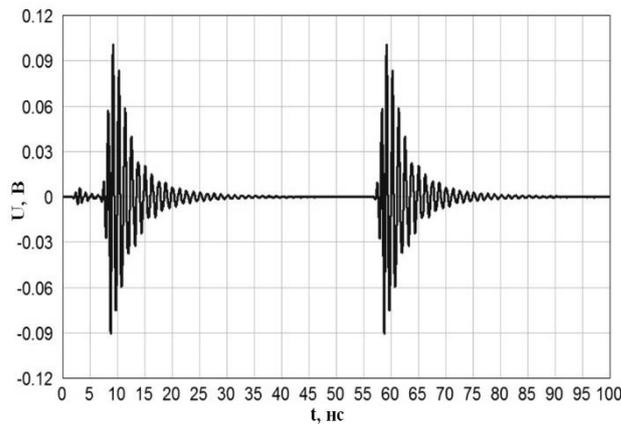


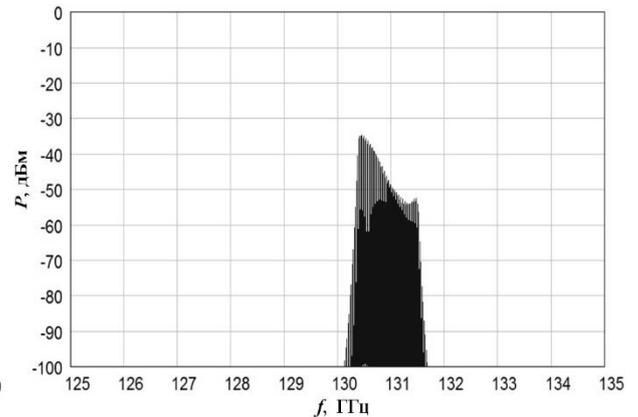
Рис. 14.20. Імітаційна модель передавального тракту терагерцового діапазону

Відповідно до рис. 14.20, до складу імітаційної моделі входять: ідеалізована модель широкосмугового підсилювача радіочастоти на базі ІМС GALI-5, модель атенюатора (ATTEN), модель широкосмугового змішувача радіочастот (MIXER\_B), модель гетеродина (TONE), модель смугового фільтру (BPF2).

Часова форма радіоімпульсу на виході смугового фільтру передавального тракту показана на рис.14.21 та рис. 14.22.

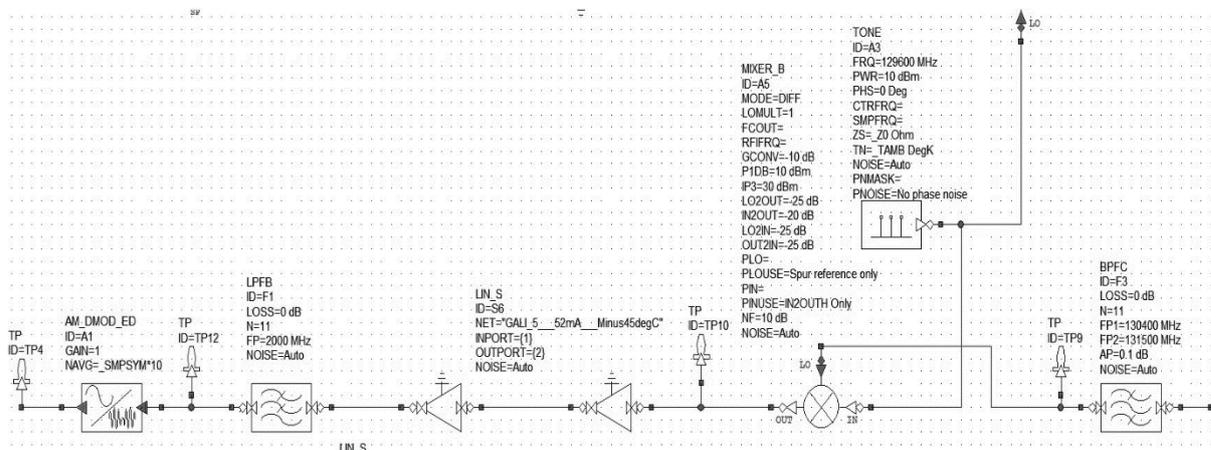


**Рис. 14.21.** Часова форма UWB сигналу на виході смугового фільтру передавального тракту радіолінії ТГц діапазону



**Рис. 14.22.** Спектр UWB сигналу на виході смугового фільтру передавального тракту радіолінії ТГц діапазону

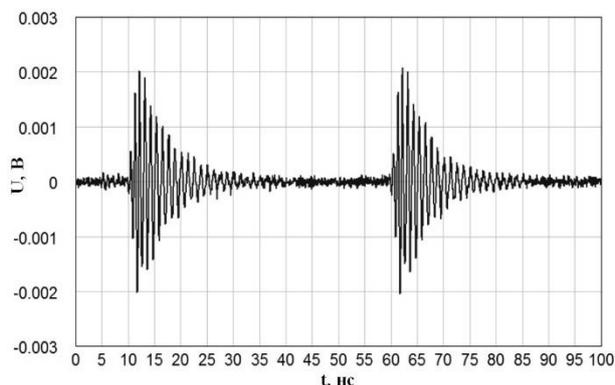
Приймальний тракт терагерцового діапазону з'єднується з передавальним трактом терагерцового діапазону через атенуатор номіналом 20 дБ, який імітує безпроводову лінію передачі (втрати в середовищі поширення та коефіцієнти підсилення передавальної та приймальної антен) без шумів. Структурна схема ідеалізованої імітаційної моделі приймального тракту показана на рис. 14.23.



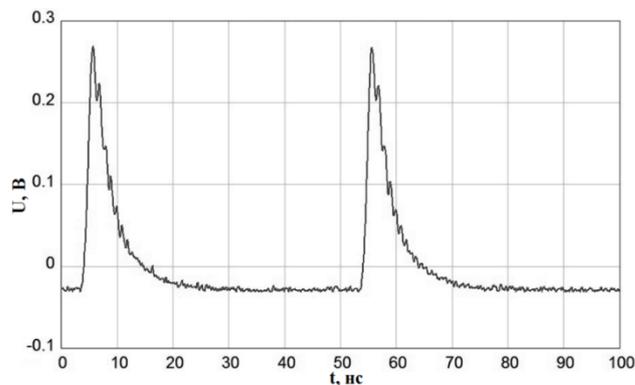
**Рис. 14.23.** Структурна схема приймального тракту терагерцового діапазону

Приймальний тракт (рис. 14.23) складається з: гетеродину на частоту 129,6 ГГц (його параметри такі ж самі, що й для передавального тракту) з вихідною потужністю +10 дБм; змішувача радіочастоти «вниз» (його параметри такі ж самі, що й для передавального тракту) з втратами перетворення 10 дБ; двокаскадний широкосмуговий підсилювач радіочастоти на базі ІМС GALI-5 з коефіцієнтом підсилення 40 дБ; фільтру нижньої частоти 11-го порядку з характеристикою Батерворта на частоту зрізу 2000 МГц; детектору обвідної сигналу.

Часову форму сигналу IR-UWB на виході змішувача частоти «униз» показано відповідно на рис.14.24, а часову форму обвідної UWB сигналу на виході детектору обвідної – на рис. 14.25.



**Рис. 14.24.** Осцилограма UWB сигналу на виході змішувача «вниз» в приймальному тракті радіолінії терагерцового діапазону (в масштабі 100 нс)



**Рис. 14.25.** Часова форма інформаційного сигналу на виході детектору обвідної

Продетектований сигнал можна подати на цифрову частину приймального тракту для демодуляції та перетворення в необхідний цифровий код.

Результати імітаційного моделювання підтверджують можливість передачі IR-UWB сигналу методом гетеродинування через макет прийомопередавача терагерцового діапазону в діапазоні частот 130,4-131,5 ГГц.

Таким чином, перенесення IR-UWB сигналу в діапазон терагерцових частот в передавачі та зворотній перенос в приймачі при розробці радіолінії ТГц діапазону ставить нові завдання, суть яких полягає в розробці:

- широкосмугових змішувачів терагерцового діапазону «вгору» та «вниз» відповідно для передавального та приймального трактів радіолінії терагерцового діапазону,
- смугових фільтрів з широкою смугою пропускання,
- широкосмугових підсилювачів потужності передавального тракту ,
- широкосмугових малощумливих підсилювачів приймального тракту.

## 14.8 Загальні висновки

За результатами проведених досліджень до Плану використання радіочастотного ресурсу України Постановою Кабміну України №838 від 05.09.2012 р. внесена радіотехнологія радіорелейного зв'язку в діапазонах частот 94,1-100 ГГц; 102-105 ГГц; 106,5-109,5 ГГц; 111,8-113 ГГц; 130-134 ГГц; 141-148,5 ГГц. Для розробки радіолінії терагерцового діапазону для транспортних розподільчих мереж вибрано частотний діапазон 130-134ГГц.

Створена нова продукція і вперше отримано експериментальний зразок цифрової радіолінії із гігабітною пропускнуою здатністю, що функціонує в

терагерцовому діапазоні і який може бути використаний в надвисокошвидкісних розподільчих мережах мобільного зв'язку нового покоління для забезпечення передавання та приймання цифрової інформації зі швидкістю до 1 Гбіт/с в діапазоні частот 128 – 134 ГГц на дальності зв'язку в межах 1 км.

Розробка немає прямих аналогів на даний час, що може забезпечити суттєвий прорив у розвитку галузі телекомунікацій. Отримані результати досліджень також сприятимуть розвитку суміжних з телекомунікаціями галузей, зокрема: радіоастрономії, міжсупутникового зв'язку, медицини, безпеки.

Наукова новизна роботи полягає в узагальненні та розвитку теорії поширення, формування та вимірювання терагерцових сигналів, в розробленні методу багаточастотного мультиплексування та формування промодульованих OFDM цифрових потоків в терагерцовому діапазоні частот та розвитку принципів функціонального проектування приймальнопередавального тракту телекомунікаційної системи із гігабітною пропускнуою здатністю в терагерцовому діапазоні частот.

Основою для досягнення таких значних успіхів нашого інституту стали ідеї, знання і талант його вчених зі світовим ім'ям, професіоналів найвищого рівня. Поряд з ними внесок в розвиток терагерцових технологій телекомунікацій надвисокочастотної напівпровідникової електроніки вносить молодь - студенти та аспіранти. Це є багатообіцяючим фактором для кафедри телекомунікацій науково-дослідного вузу, що стоїть на порозі якісного прориву в області надвисокочастотних терагерцових технологій.

## Список літератури

1. Ильченко М.Е., Нарытник Т.Н., Шелковников Б.Н., Христенко В.И. Радиотелекоммуникационные системы терагерцового диапазона //Электроника и связь.– 2011.– №3.– с.205-210.
2. Kurner T. Towards future THz communications systems // Terahertz Science and Technology. 2012. V. 5. №1. P. 11–17.
3. І. М. Майборода, І. П. Стороженко, В. П. Бабенко, М. В. Кайдаш. Огляд досягнень в терагерцових комунікаційних системах // Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України. – 2016.– Вип.1 (27) – с.45-48.
4. Narytnyk T. The Ways of Creation and Use of Telecommunication Systems in the Terahertz Band Transport Distribution 5G Mobile Networks//2016 Third International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T), 2016. – P. 36–39.
5. Ilchenko, M. Ye. Terahertz range telecommunication systems / M. Ye Ilchenko, T. N. Narytnik, A. I. Fisun, O. I. Belous. // Telecommunications and Radio Engineering. – 2011.– № 70(16). – P.1477-1487.
6. Нарытник Т. М., Кравчук С.О. Телекомунікаційні системи терагерцового діапазону// Монографія.– Житомир: ФОП «Євенок О.О.», 2015.–394с.
7. Авдєєнко Г.Л., Нарытник Т.М. Використання бездротових телекомунікаційних систем терагерцового діапазону в транспортних розподільчих мережах наступних поколінь/ Матеріали V Всеукраїнської науково-практичної конференції «Наукові дослідження:Перспективи інновацій у суспільстві і розвитку технологій»,14-15 березня 2017 року, С.13-19.-м. Харків.

8. Авдєєнко Г.Л., Бунін С.Г., Наритник Т.М. Терагерцові технології в телекомунікаційних системах. Частина 1. Обґрунтування частотного діапазону, проектування функціональних вузлів телекомунікаційних систем терагерцового діапазону/ Научно-технический журнал «Авиационно-космическая техника и технология» .Харьков.-ХАИ.-2018.-№4 (148).-С.72-89.
9. Наритник Т.М., Осипчук С.О. Уривський Л.О. Реалізація концепції створення програмно-визначених радіосистем терагерцового діапазону на основі технології Wi-Fi//Цифрові технології . №18- 2015.-с.7-20.
10. Ільченко М.Ю. Цифрова радіорелейна система терагерцового діапазону з використанням наноелектронних компонентів [Електронний ресурс] / Київ. КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2012. – Режим доступу: <http://report.kpi.ua/uk/0111U002470> – Дата звернення 21.05.2018р.
11. Наритник Т.М. Розробка радіолінії із гігабітною пропускнуою здатністю терагерцового діапазону для надвисокошвидкісних розподільчих мереж доступу [Електронний ресурс] / Київ. КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2016. – Режим доступу: <http://report.kpi.ua/uk/0115U002330>. – Дата звернення 21.05.2018р.
12. Ільченко М.Ю., Наритник Т. М., Радзіховський В.М.,Кузьмін С.Є., Лутчак О.В. Передавальний та приймальний радіотракти радіорелейних систем терагерцового діапазону //Цифрові технології . – 2015. – № 17. – С.16-29.
13. Ильченко М.Е., Нарытник Т.Н., Радзиховский В.Н., Кузьмин С.Е., Лутчак А.В. Проектирование передающего и приемного радиотрактов радиорелейных систем терагерцового диапазона //Электросвязь.-№2.-2016.-С.42-49.
14. Pchenko, M. Ye. Transceiver for 130-134 GHz band and digital radiorelay system / M.Ye. Pchenko, T.N. Narytnik, S.Ye. Kuzmin, A.I. Fisun, O.I. Belous, V. N. Radzikhovsky// Telecommunications and Radio Engineering, Vol.72, Number 17, 2013. – P.1623-1638.
15. Наритник Т.Н., Набока Б.Ю., Авдєєнко Г. Л. Дослідження передавання радіосигналу цифрового телебачення стандарту DVB-S з використанням радіоканалу терагерцового діапазону// Матеріали Десятої Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми телекомунікацій.–К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського. – 2016. – с.198-200.

# **Пристрої та елементна база**

---

**ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ ТА ЛАЗЕРНІ ДАТЧИКИ**

Іванов С. В.

---

**FIBER-OPTIC AND LASER SENSORS**

Ivanov S. V.

---

Волоконно-оптичні та лазерні датчики (гоніометри) – датчики для вимірювання кута повороту об'єкту, що можуть мати застосування в багатьох галузях науки і техніки, а також у телекомунікації (вимірювання кута повороту антен).

Створення даного класу приладів стало можливим лише з розвитком і вдосконаленням елементної бази квантової електроніки. Принцип дії оптичних гоніометрів заснований на вихровому ефекті Саньяка.

Інтерес зарубіжних фірм до оптичних гоніометрів базується на їхніх потенційних можливостях застосування в багатьох галузях науки і техніки. Ці прилади в ряді випадків можуть повністю замінити складні дорогі електромеханічні прилади.

Інститутом телекомунікаційних систем розроблено кілька типів датчиків різної точності на основі оригінальних технічних рішень.

Fiber-optic and laser sensors – goniometers are sensors for measurement of rotation angle of an object. Those sensors can be used in many areas of science and technology, including telecommunications (measurement of rotation angle of an antenna).

Creation of this class of devices became possible only with the development and improvement of the elemental basis of quantum electronics. The principle of operation of optical goniometers is based on the vortical effect of Sagnac.

The interest of foreign firms in optical goniometers is based on their potential applications in many fields of science and technology. These devices can in some cases completely replace difficult expensive electromechanical decision.

The Institute of Telecommunication Systems has developed some types of such sensors based on the original engineering solutions.

## 15.1. Вступ

У багатьох галузях науки і техніки, зокрема і в телекомунікаціях, важливою задачею є точне вимірювання кутів. Для вимірювання кутів використовують спеціально розроблені прилади – гоніометри. Одним з перспективних напрямків розвитку є оптична гоніометрія на основі ефекту Саньяка.

Оптичні гоніометри мають ряд переваг:

- 1) високу точність вимірювання кута;
- 2) малі габарити, масу та енергоспоживання (волоконно-оптичні гоніометри);
- 3) високу надійність за рахунок відсутності рухомих частин.

В даному розділі описано досягнення кафедри телекомунікацій в розробці таких датчиків.

## 15.2. Чотиричастотний лазерний гоніометр

Класичний лазерний гоніометр – це кільцевий газовий лазер, в якому генеруються дві зустрічні хвилі з лінійною поляризацією. Після обходу контуру в протилежних напрямках хвилі виводяться з контуру лазера на фотоприймач, де вони інтерферують. Фотоприймач гоніометра має дві світлочутливі площадки, зміщені одна відносно одної на чверть періоду інтерференційної картини. При обертанні об'єкта, на якому встановлено гоніометр, ця картина рухається зі швидкістю, пропорційною різниці частот зустрічних хвиль, і в результаті на виході фотоприймача з'являються два сигнали, зсунуті по фазі на чверть періоду. Вихідним сигналом такого датчика є кількість імпульсів, зареєстрованих за певний час, пропорційна куту повороту об'єкта; напрямком обертання об'єкту визначають за зсувом фази сигналів з площадок фотоприймача.

Лазерний гоніометр через явище «захоплення частот» (синхронізація частот випромінювання у зустрічних напрямках) має суттєвий недолік, а саме зону нечутливості при малих швидкостях повороту об'єкта, що значно знижує точність вимірювання кута повороту. Для вирішення цієї проблеми, як правило, застосовують т.зв. вібропідвіс: моноблок датчика встановлюють на механічний підвіс, за допомогою якого моноблок коливається з невеликою амплітудою навколо осі чутливості датчика. Недоліком такого рішення є ускладнення конструкції гоніометра та поява в ньому рухомих частин, що знижує надійність приладу.

Чотиричастотний лазерний гоніометр дає змогу позбавитися від зон нечутливості без використання рухомих частин (вібропідвісу), і підвищити точність та надійність датчика. Для цього запропоновано в гоніометрі використати чотиричастотний режим роботи на модах з круговою поляризацією.

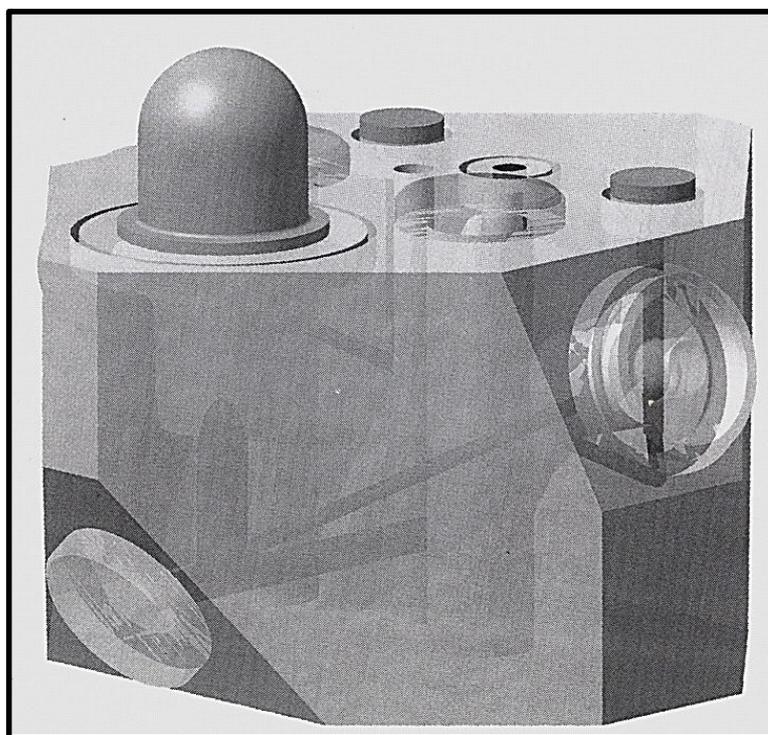
В контурі гоніометра одночасно збуджують дві пари зустрічних хвиль, поляризації яких ортогональні (у одній парі поляризація права, у іншій – ліва). В результаті в одному контурі працює два віртуальних лазерних гоніометри. Для

виводу обох цих гоніометрів із зони захоплення використовується елемент Фарадея. Оскільки поляризації для згаданих віртуальних гоніометрів різні, то елемент Фарадея створює в кожному з них зміщення частоти однакове за частотою, але протилежне за знаком. В результаті у вихідному сигналі чотиричастотного датчика початкові розноси частот, створені елементом Фарадея, віднімаються і компенсують один одного, а різниці частот, викликані обертанням (корисний сигнал) – додаються і підсилюють одна одну. Така схема дає змогу в лінійному наближенні виключити похибки, внесені за рахунок використання елемента Фарадея, знизити вимоги до точності частотної підставки, зменшити вплив зовнішнього магнітного поля. Крім того, в гоніометрі з'являється можливість застосування постійних магнітів для створення початкового розносу частот замість змінної частотної підставки, що дозволяє виключити внесені такою підставкою шуми і підвищити лінійність вихідної характеристики. Слід зазначити, що саме по собі використання кругової поляризації зменшує зв'язок зустрічних хвиль через зворотне розсіювання, і в результаті зменшується зона нечутливості.

Іншими перевагами чотиричастотного лазерного гоніометра є:

- підвищення чутливості приладу в два рази;
- зниження шумів за рахунок взаємної компенсації похибок;
- швидший прогрів і менший час готовності;
- менша чутливість датчика до умов зовнішнього середовища.

Кафедрою телекомунікацій розроблено конструкцію такого датчика, створено модель похибок, розроблено та виготовлено електроніку та розроблено програмне забезпечення. Загальний вид приладу показано на рис. 15.1.



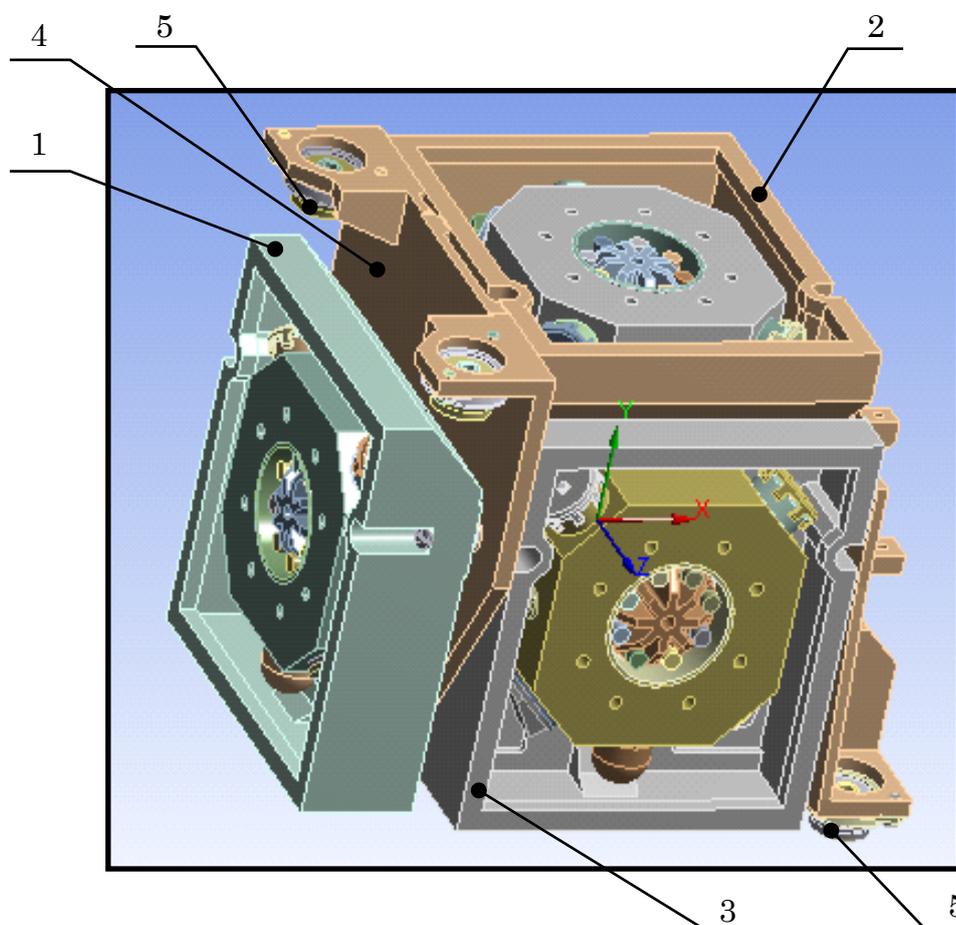
**Рис. 15.1.** Чотиричастотний лазерний гоніометр

Зсув нуля такого гоніометра складає 0,005 °/год.

### 15.3. Блок лазерних гоніометрів для авіаційної інерціальної навігаційної системи

Лазерний гоніометр вимірює кут повороту об'єкту, на якому встановлений, відносно інерціального простору. Це дає змогу за допомогою блока з трьох таких гоніометрів визначати орієнтацію об'єкта, на якому він встановлений, та використовувати ці дані в інерціальній навігаційній системі цивільного літака.

На рис. 15.2 показано розрахункову схему для моделювання такого блоку в середовищі Ansys.



**Рис. 15.2.** Блок лазерних гоніометрів для авіаційної інерціальної навігаційної системи (схема)

Як видно з рис. 15.2, блок гоніометрів містить власне самі прилади 1,2 та 3, а також раму 4, на якій вони встановлені. Амортизатори 5 призначені для забезпечення розв'язки приладів від вібрацій та ударів літака (наприклад, під час зльоту та посадки). Крім того, для забезпечення розташування центра ваги блоку в розрахунковій точці доводиться використовувати противаги (на рис. 15.2 не показані).

Суттєвою проблемою при використанні такого блоку з трьох гоніометрів є

те, що через взаємодію їх вібропідвісів виникає конусний рух осей чутливості приладів і, як наслідок, падає точність визначення орієнтації об'єкта. Створенню моделі взаємовпливу вібропідвісів присвячено роботу співробітників інституту [1].

Автори [1] отримали математичну модель переміщень, які відбуваються в блоці чутливих елементів БНС через взаємовплив вібропідвісів трьох лазерних гоніометрів та провели ідентифікацію параметрів даної моделі. Застосований підхід дозволив створити аналітичну модель, що описує внутрішні коливальні процеси, та окремо досліджувати кожен з них як причину погіршення точності роботи блоку чутливих елементів.

Отримана модель значно зменшує затрати часу на моделювання, що в подальшому дозволить значно полегшити дослідження роботи БНС при варіюванні її параметрів, в тому числі параметрів рами та керуючого сигналу вібропідвісу, а також розробити ефективне керування для мінімізації похибок, викликаних взаємовпливом вібропідвісів приладів.

На основі цього дослідження розроблено та виготовлено електроніку та програмне забезпечення блока трьох гоніометрів. Зокрема, було розроблено алгоритм керування вібропідвісом, який дозволяє покращити дрейф нуля приладу на нерухомій основі до  $0,005$  °/год.

Зсув нуля такого блоку складає  $0,01$  °/год, що є достатнім для практичного використання в цивільній авіації.

## 15.4. Тривісний лазерний гоніометр

Тривісний лазерний гоніометр призначений для вимірювання кутів повороту об'єкта в системі орієнтації. Перевагами такого гоніометра порівняно з традиційним блоком трьох датчиків є: чутлив

- менша маса, оскільки немає потреби у рамі та важких противагах;
- менші габарити;
- менше енергоспоживання, ніж у блока з трьох гоніометрів;
- у приладі є лише один вібропідвіс, що виключає проблеми з конусним рухом осей чутливості та взаємодією вібропідвісів.

Макет моноблока такого гоніометра показано на рис. 15.3; канали частин приладу, що відповідають різним осям чутливості, позначено різними кольорами. Суттєвою особливістю тривісного гоніометра є те, що на відміну від класичного і чотиричастотного гоніометрів, контури, чутливі до обертання, є пасивними. Це означає, що лазерне випромінювання не генерується безпосередньо в замкнутих контурах, а вводиться в них ззовні з єдиного лазера. Це дає змогу не лише зменшити енергоспоживання приладу (один газовий лазер замість трьох), а й позбавитися від зони нечутливості, оскільки в пасивних контурах явище «захоплення частот» відсутнє. Аналогічний принцип дії використано у волоконно-оптичних гоніометрах, які розглянуто нижче.

Слід зазначити, що тривісний гоніометр має також і ряд недоліків, а саме:

- складний у виготовленні моноблок;

- складний алгоритм обробки даних вимірних даних кута , оскільки осі чутливості трьох частин датчика не перпендикулярні.

Розроблено конструкцію приладу і підготовано комплект технічної документації для його виготовлення.



**Рис. 15.3.** Моноблок тривісного лазерного гоніометра (макет)

Зсув нуля тривісного гоніометра – 0,02 °/год.

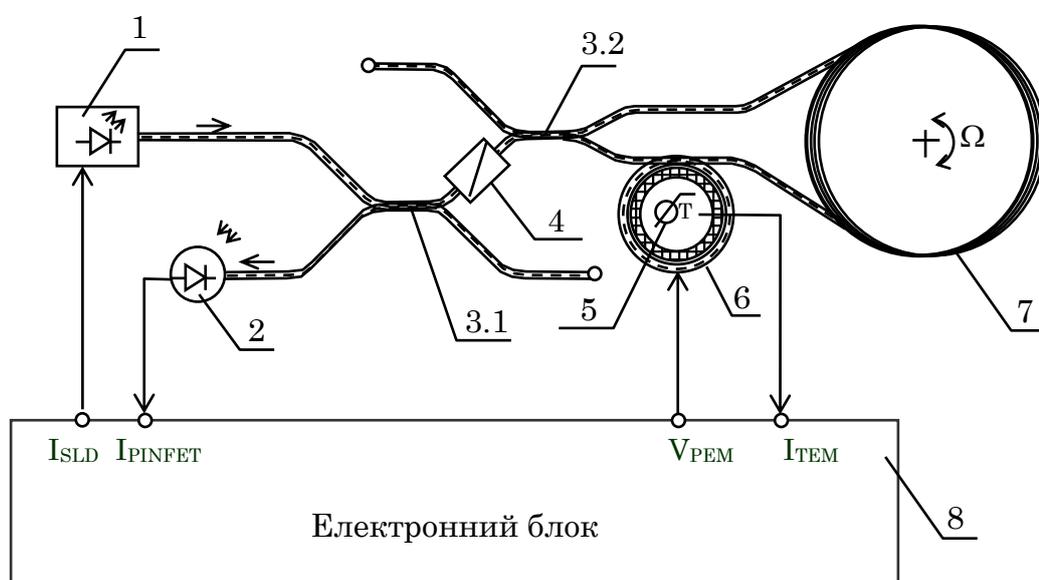
## 15.5. Інтерферометричні волоконно-оптичні гоніометри

Хоча за принципом дії інтерферометричний волоконно-оптичний гоніометр подібний до лазерного, між ними є суттєві відмінності. У волоконно-оптичних гоніометрах чутливим елементом завжди є пасивний замкнутий контур з оптичного волокна, випромінювання в який вводиться з зовнішнього джерела. Суттєвою перевагою такого технічного рішення є відсутність явища «захоплення частот», характерного для лазерного гоніометра. Оскільки чутливість волоконно-оптичного гоніометра прямо пропорційна площі контуру, то для її підвищення використовують багатовиткову котушку, причому довжина намотаного волокна складає від 100 м до кількох км у прецизійних датчиках (для порівняння: у лазерному гоніометрі периметр контуру лазера складає десятки см).

Як джерело світла у інтерферометричному гоніометрі застосовують не лазер, а суперлюмінесцентний діод (SLD). Це пов'язано з тим, що у лазера довжина когерентності складає кілька метрів, а у SLD – долі мм. Внаслідок цього у

вихідному сигналі шуми, що виникають внаслідок Релеєвського зворотного розсіювання, поляризаційні шуми та інші оптичні шуми дають вклад у інтерференційну картину у виді сталої складової, яку можна виключити при обробці сигналу (використання лазера призводить до появи шуму, який дуже складно відфільтрувати). Щоб забезпечити заданий діапазон швидкостей обертання, в якому гоніометр може вимірювати кут повороту, довжину когерентності SLD вибирають порівняно з максимальною різницею оптичних довжин обходу контуру гоніометра в протилежних напрямках, яка пропорційна кутовій швидкості обертання об'єкту.

Інтерферометричні волоконно-оптичні гоніометри працюють за двома схемами: прямого перетворення та компенсаційній (з замкнутим контуром керування датчиком). Схему датчика прямого перетворення наведено на рис. 15.4.



**Рис. 15.4.** Схема волоконно-оптичного гоніометра прямого перетворення  
 1 – суперлюмінесцентний лазерний діод (SLD); 2 – фотоприймач; 3 – направлений волоконний відгалужувач; 4 – поляризатор; 5 – термодатчик; 6 – п'єзoeлектричний фазовий модулятор; 7 – волоконно-оптичний контур; 8 – електронний блок

Джерелом світла в такому гоніометрі є SLD 1, а вихідне випромінювання реєструється спектрально і поляризаційно нечутливим фотоприймачем 2, фотострум якого пропорційний інтенсивності випромінювання.

Волоконні відгалужувачі 3 використано для змішування/поділу світлових потоків, що розповсюджуються у волокнах. Перший відгалужувач призначений для передачі на фотоприймач 2 випромінювання, що пройшло через оптичний контур. Перед входом в контур випромінювання джерела розділяється другим відгалужувачем на два пучки, які вводяться в оптичний контур 7 у зустрічних напрямках. Після повного обходу контуру світлові пучки зводяться на другому відгалужувачі та інтерферують на фотоприймачі.

Поляризатор 4 зменшує зсув нуля, зумовлений нерегулярностями оптичного контуру; він визначає рівень паразитного сигналу на виході.

Фазовий зсув між зустрічними хвилями створюється п'єзоелектричним модулятором б, розташованим на одному з кінців контуру. На модулятор подається синусоїдальна напруга на частоті радіального резонансу модулятора, при цьому фаза модуляції однієї хвилі відрізняється від фази модуляції зустрічної на величину  $2\pi\nu_m\tau$  (тут і далі  $\tau$  – час обходу контуру електромагнітною хвилею).

Електронний блок управляє фазовим модулятором датчика, струмом живлення SLD, а також забезпечує приймання електричного сигналу з фотоприймача, подальшу його обробку і видачу інформації про кут повороту датчика в цифровому виді. Суть алгоритму обробки інформації гоніометра прямого вимірювання – вимірювання кута Саньяка, який виникає через обертання датчика, і видача на його основі оцінки кута повороту об'єкту.

Схема прямого перетворення проста і зручна для реалізації, не потребує значної обчислювальної потужності електронного блоку внаслідок простого алгоритму роботи.

В ході розробки інтерферометричного волоконно-оптичного гоніометра, побудованого за схемою прямого вимірювання, було проаналізовано вплив елементів з відкритою петлею зворотного зв'язку на точність вимірювання [2]. В ході досліджень було показано, що найбільший вплив на точність приладу мають поляризатор і модулятор. Особливу увагу при розробці приладу слід приділити вдосконаленню модулятора, оскільки внесена внаслідок його недосконалості похибка має мультиплікативний характер і може досягати неприйнятно великих значень. Також дослідження показали, що для зменшення похибки вимірювання, слід вибирати SLD зі стабільними параметрами поляризації та еліптичності випромінювання.

Недоліками схеми з прямим перетворенням є:

- вузький діапазон кутових швидкостей, при яких гоніометр працездатний;
- низька роздільна здатність (чим грубіше датчик, тим ширше діапазон кутових швидкостей і навпаки);
- нелінійність масштабного коефіцієнту за межами певного діапазону швидкостей повороту об'єкту.

Внаслідок цього ця схема придатна лише для використання в датчиках кута низької точності. Для побудови датчика середньої точності як правило використовують схему з замкнутим контуром керування.

Гоніометр з замкнутим контуром керування – компенсаційний прилад, тобто в основі принципу його діє лежить не вимірювання кута Саньяка, що виникає за рахунок обертання, а компенсація його впливу на вихідний сигнал шляхом модуляції випромінювання SLD. В результаті датчик весь час працює в околі робочої точки, яку вибирають на лінійній частині вихідної характеристики, що дає такі переваги:

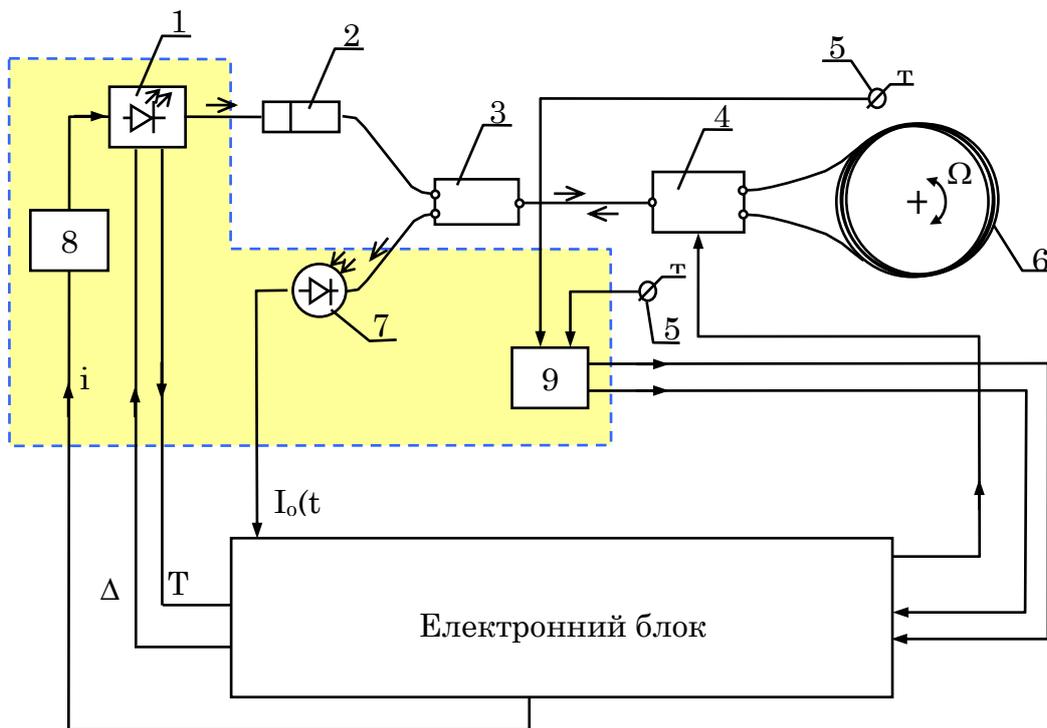
- високу стабільність масштабного коефіцієнту і, як наслідок – високу лінійність вихідної характеристики датчика;
- значне (в рази) розширення діапазону кутових швидкостей, у якому може працювати гоніометр, бо при компенсації кута Саньяка зникає обмеження у виді нелінійності характеристики та переходу кута Саньяка через  $2\pi$ ;

- високу роздільну здатність, оскільки немає обмежень на діапазон кутових швидкостей і можна значно збільшити чутливість приладу.

Недоліками схеми з замкнутим контуром керування є:

- відносна складність алгоритму обробки даних;
- потрібна більша, ніж у гоніометра прямого вимірювання, обчислювальна потужність приладу;
- якщо на момент увімкнення датчика кут Саньяка уже перейшов через  $2\pi$ , то без додаткового датчика неможливо визначити, відбувся такий перехід чи ні, і гоніометр стає непрацездатним.

Схему волоконно-оптичного гоніометра з замкнутим контуром керування наведено на рис. 15.5.



**Рис. 15.5.** Схема волоконно-оптичного гоніометра із замкнутим контуром керування: 1 – суперлюмінесцентний діод (SLD), 2 – деполаризатор Лайота, 3 – відгалужувач, 4 – інтегрально-оптичний модулятор, 5 – термодатчик, 6 – волоконний контур, 7 – фотоприймач, 8 – підсилювач системи керування робочим струмом SLD, 9 – перетворювач сигналів термодатчиків

Джерело світла в гоніометрі – SLD 1, його випромінювання через деполаризатор Лайота 2, призначений для зменшення зсуву нуля датчика, та відгалужувач 3 потрапляє на інтегрально-оптичний модулятор 4.

Інтегрально-оптичний модулятор виконує три функції:

1) поляризація світла з метою зменшення нестабільності зсуву нуля внаслідок поляризаційної невзаємності;

2) розщеплення світлових хвиль на ті, що поширюються в волоконному контурі з рівними потужностями за і проти годинникової стрілки, з подальшою рекомбінацією на відгалужувачі;

3) внесення фазового зсуву між зустрічними хвилями за допомогою електрооптичного фазового модулятора.

Вихідний сигнал датчика реєструється спектрально і поляризаційно нечутливим фотоприймачем 7, фотострум якого пропорційний інтенсивності випромінювання.

Електронний блок забезпечує живлення датчика, обробку сигналів з фотодетектора и керування фазовим модулятором. Також електронний блок через підсилювач 8 забезпечує керування струмом SLD, стабілізацію його вихідної потужності та температури.

Керуючий сигнал з електронного блока коригує роботу модулятора таким чином, щоб компенсувати зсув фази, що виникає в результаті обертання датчика. При повній компенсації різницю рівнів негативної і позитивної півхвиль напруги, що надходить з фотоприймача на АЦП електронного блока, дорівнює нулю. Корекція режимів роботи волоконно-оптичного гоніометра здійснюється на основі показів датчиків температури 5.

Для роботи гоніометра з замкнутим контуром зворотного зв'язку важливим є метод керування модулятором [3]. У класичному варіанті напруга на модуляторі – послідовність прямокутних імпульсів (рис. 15.6), кожен з яких при напрузі  $U_{\pi/2}$  додає до хвилі зсув фази  $\pi/2$ .

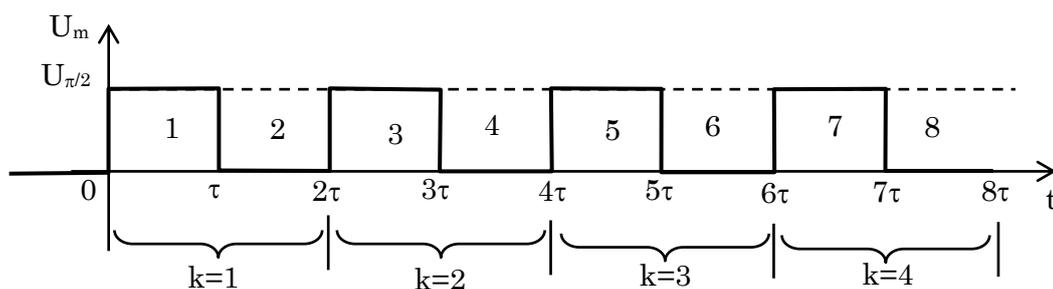
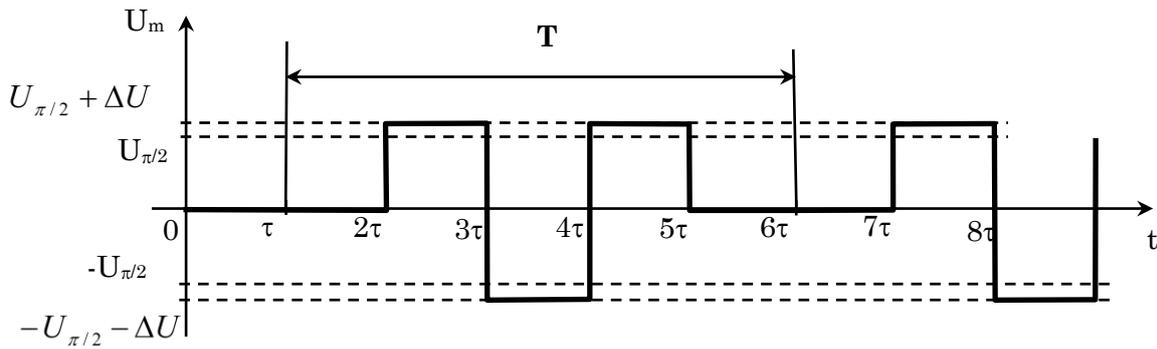


Рис. 15.6. Класичне керування модулятором

Такий метод керування модулятором дозволяє виміряти кут Саньяка за час у два обходи контуру ( $2\tau$ ). Недоліком методу є обмеження діапазону кутових швидкостей, у якому працює гоніометр, величиною

$$|\Omega| < \frac{\pi}{2K_0}, \quad (15.1)$$

де  $K_0$  – оптичний масштабний коефіцієнт гоніометра. В роботі [2] описано керування модулятором за допомогою періодичного сигналу складної форми, показаного на рис. 15.7.



**Рис. 15.7.** Керування модулятором за допомогою періодичного сигналу складної форми

Застосування методу керування з використанням періодичного сигналу складної форми дозволило при тій же конфігурації інтерферометра розширити динамічний діапазон вимірювання кутових швидкостей в порівнянні з класичним методом, до величини

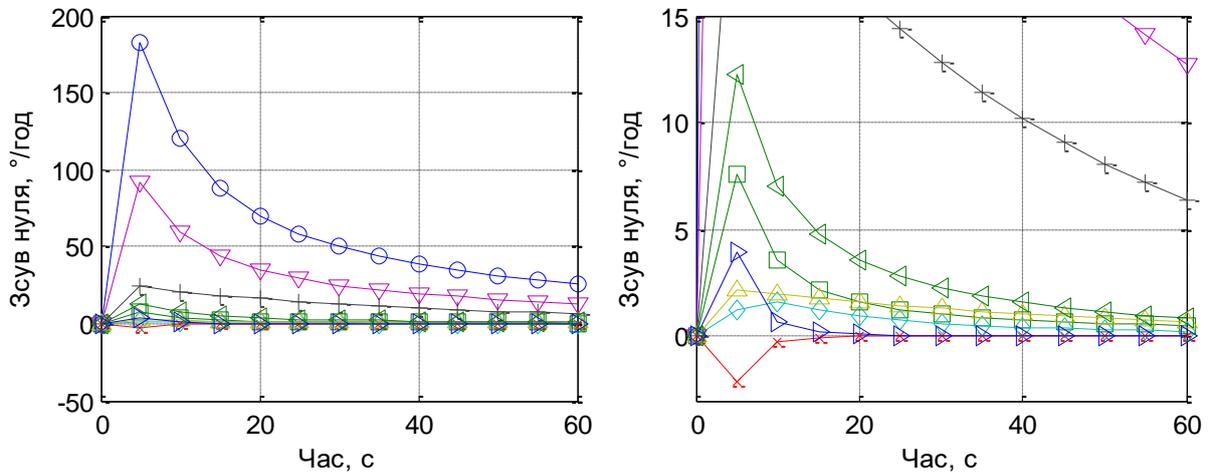
$$|\Omega| < \frac{2\pi}{K_0}. \quad (15.2)$$

Крім того, використання керування за допомогою складного періодичного сигналу дало змогу зменшити вплив температурного і часового дрейфів інтенсивності джерела випромінювання на визначення фазового зсуву. Недоліком такого керування є погіршення чутливості датчика за рахунок збільшення часу вимірювання кута Саньяка з  $2\tau$  до  $5\tau$  (період модуляційного сигналу).

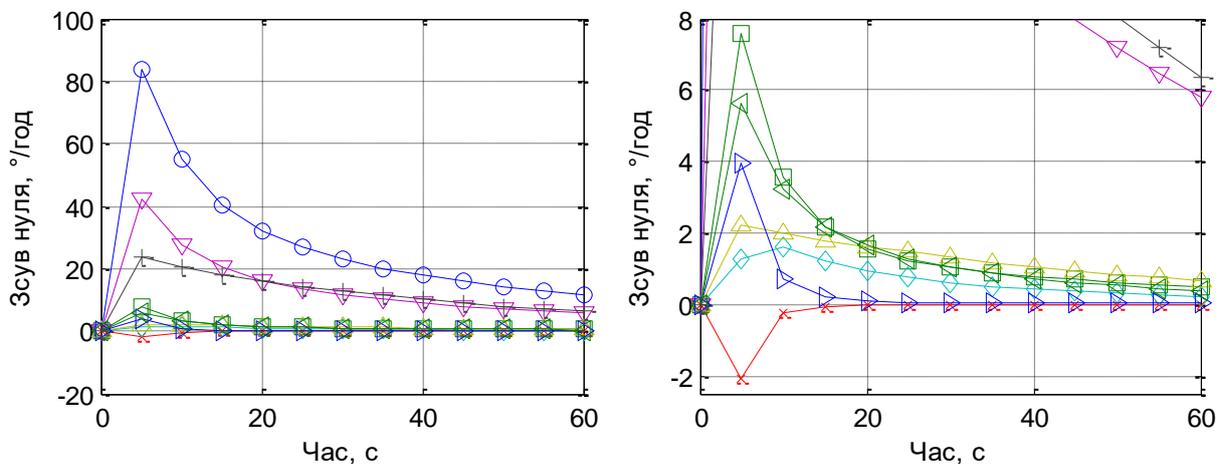
Найважливішим джерелом похибки інтерферометричного гоніометра є ефект Шупе. Причина ефекту полягає в тому, що при зміні температури волоконна котушка нагрівається поступово (наприклад від зовнішніх шарів до внутрішніх при збільшенні зовнішньої температури). Як наслідок, при обході контуру зустрічні хвилі проходять одні й ті ж ділянки волокна в різний час і при різних значеннях температури, тобто при різних довжинах ділянок (за рахунок теплового розширення) і різних коефіцієнтах заломлення. Це й призводить до ефекту Шупе: при обході контуру накопичується різниця фаз зустрічних хвиль, яка ніяк не пов'язана з його обертанням, і яку неможливо виділити з вихідного сигналу датчика та дуже важко компенсувати.

Для боротьби з цим ефектом крім конструктивних заходів (теплоізоляція) та термостатування застосовують спеціальні види намотки, зокрема дипольну та квадрупольну. Аналіз ефективності різних видів намоток проведено в [4] на основі математичного моделювання ефекту Шупе в гоніометрі з різними видами намотки. Як приклад, на рис. 15.8 показано графік зміни з часом зсуву нуля приладу при дії на котушку з різними видами намотки одночасно радіального і осьового градієнтів при застосуванні котушки, намотаної на каркас, а на рис 15.9 – графік зміни з часом зсуву нуля приладу при дії на котушку з прокладкою (або безкаркасну котушку) з різними видами намотки.

З результатів проведеного в [4] аналізу можна зробити висновок, що загалом оптимальним з точки зору забезпечення точності приладу є використання квадрупольних намоток. Для датчиків низької точності можна рекомендувати центровану однополюсну намотку як більш просту і дешеву у виготовленні, але лише за умови забезпечення хорошої тепло- та віброізоляції котушки.

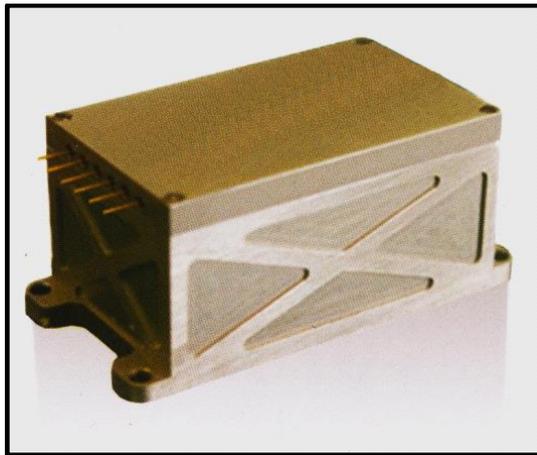


**Рис. 15.8.** Зсув нуля при дії радіального і осевого градієнту на котушку, намотка якої: —○— проста (однополюсна), —□— дипольна, —×— квадрупольна, —◇— модифікована квадрупольна, —▽— біфілярна, —△— центрована квадрупольна, —+— центрована однополюсна, —▷— октупольна, —◁— без перехрещування витків.

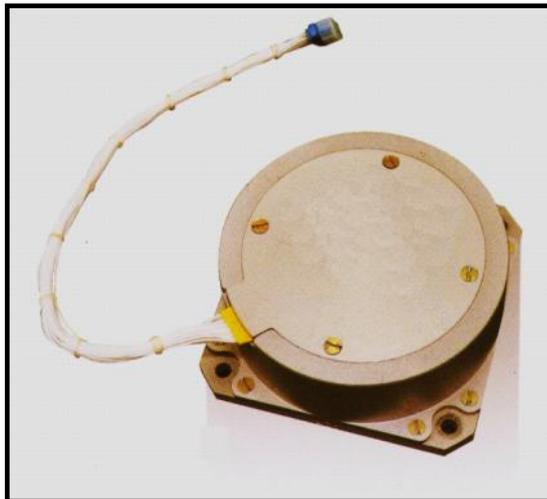


**Рис. 15.9.** Зсув нуля при дії радіального і осевого градієнтів на котушку з прокладкою (або безкаркасну котушку), намотка якої: —○— проста (однополюсна), —□— дипольна, —×— квадрупольна, —◇— модифікована квадрупольна, —▽— біфілярна, —△— центрована квадрупольна, —+— центрована однополюсна, —▷— октупольна, —◁— без перехрещування витків.

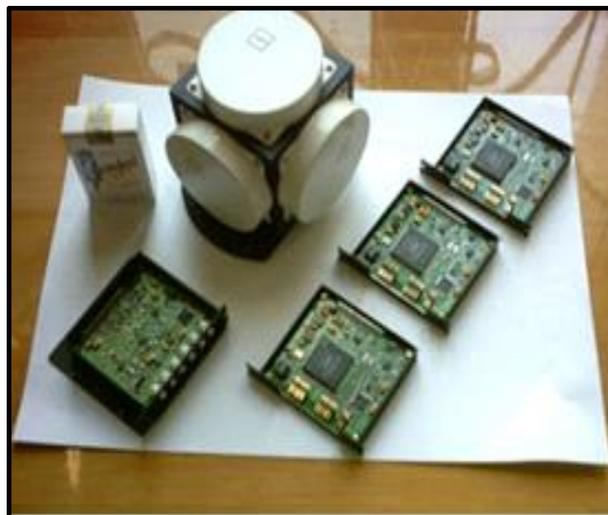
Також з порівняння рис. 15.8 та 15.9 видно, що для простої намотки, біфілярної намотки та намотки без перехрещування витків зсув нуля при використанні прокладки або безкаркасної котушок зменшується приблизно вдвічі; для інших видів намотки зменшення незначне.



а)



б)



в)

**Рис. 15.10.** Гоніометри, розроблені Інститутом телекомунікаційних систем:  
а) низької точності; б) середньої точності; в) тривісний.

Отже, використання прокладок або безкаркасної котушки виправдане при виготовленні гоніометрів низької точності (проста або біфілярна намотка) або при використанні намотки без перехрещування витків. Для інших симетричних відносно впливу радіального та осевого градієнтів намоток використання

прокладки призводить лише до незначного зменшення зсуву нуля, тому використання комбінації складної намотки і спеціальних прокладок виправдане лише для високоточних приладів.

Розроблено волоконно-оптичні датчики (гоніометри) низької (Рис. 15.10, а) та середньої (Рис. 15.10, б) точності, а також тривісний датчик (Рис. 15.10, в). Тривісний датчик – три незалежні оптичні контури, випромінювання в які вводиться з одного джерела, виконаний за схемою прямого вимірювання.

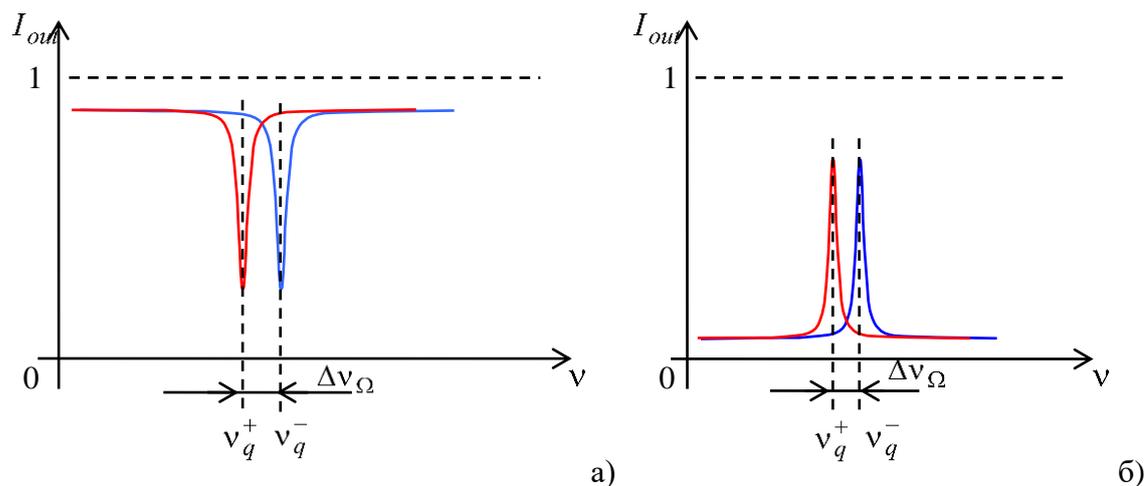
Зсув нуля для гоніометра середньої точності – не гірше  $0,05^\circ/\text{год}$ , а для інших датчиків складає  $0,3..0,8^\circ/\text{год}$ .

## 15.6. Резонансні волоконно-оптичні гоніометри

Резонансний цифровий волоконно-оптичний гоніометр так само працює на ефекті Саньяка, як і інтерферометричний. Різниця між датчиками полягає у принципі реєстрації обертання, конструкції та методах керування датчиком і обробки сигналів.

Чутливим елементом приладу є резонатор – замкнений волоконний контур, в який вводиться випромінювання лазера; частина цього випромінювання після багатократного обходу контуру виводиться з нього на фотоприймач. Принцип дії резонансного гоніометра полягає в тому, що при обертанні такого контуру його резонансні частоти для хвиль, що розповсюджуються в ньому в протилежних напрямків, зміщуються одна відносно одної на величину, пропорційну кутовій швидкості обертання. Знаючи значення частот резонансу такого контуру, можна оцінити кутову швидкість обертання і кут повороту об'єкту.

На рис. 15.11 показано резонансні криві при обертанні гоніометра для резонатора відбивного типу (а) та для резонатора прохідного типу (б).

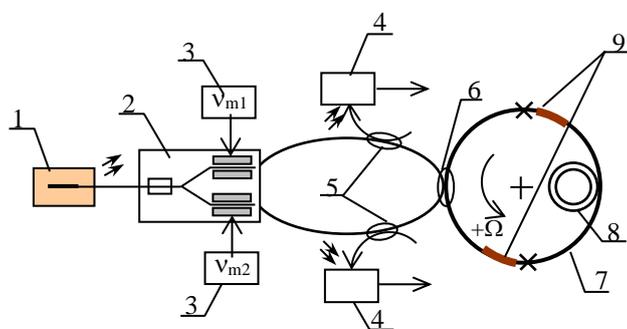


**Рис. 5.11.** Резонансні криві при обертанні гоніометра: а) для резонатора відбивного типу; б) для резонатора прохідного типу

В резонаторі відбивного типу випромінювання вводиться в резонатор і виводиться з нього у одній точці, хвилі компенсують одна одну, і тому при

відповідності частоти випромінювання резонансній інтенсивність сигналу на виході контуру мінімальна (рис. 5.11, *a*). В резонаторі прохідного типу випромінювання вводиться і виводиться з нього в різних точках, хвилі додаються, і тому при відповідності частоти випромінювання резонансній інтенсивність сигналу на виході контуру максимальна (рис. 5.11, *б*). Синю криву на рис. 5.11 побудовано для хвилі, що розповсюджується в контурі за годинниковою стрілкою, червону – для хвилі, що розповсюджується проти годинникової стрілки; видно, що при обертанні хвилі розходяться від певного середнього положення.

Для вимірювання різниці резонансних частот контуру гоніометра для зустрічних хвиль доводиться підлаштовувати частоту випромінювання лазера окремо для кожного напрямку і підтримувати рівень вихідного сигналу на мінімальному чи максимальному рівні відповідно. При цьому, оскільки вимірювання проводяться в околі антирезонансу (або резонансу, залежно від того, відбивна це схема чи прохідна), то для отримання прийнятної точності дуже важливою є ширина лінії випромінювання джерела світла. Для використання в резонансному волоконно-оптичному гоніометрі SLD непридатні внаслідок великої ширини спектра випромінювання (до десятків нм). Як джерел світла в такому гоніометрі використовують лазерні діоди, лазери з розподіленим зворотнім зв'язком (Distributed Feedback Laser) та інші висококогерентні джерела світла з шириною спектра випромінювання 1...100 кГц. При цьому, чим кращим є резонансний контур (чим вище його різкість, і, відповідно, потенційна чутливість приладу), тим вужче повинен бути спектр випромінювання джерела. Схему резонансного гоніометра відбивного типу показано на рис. 5.12.



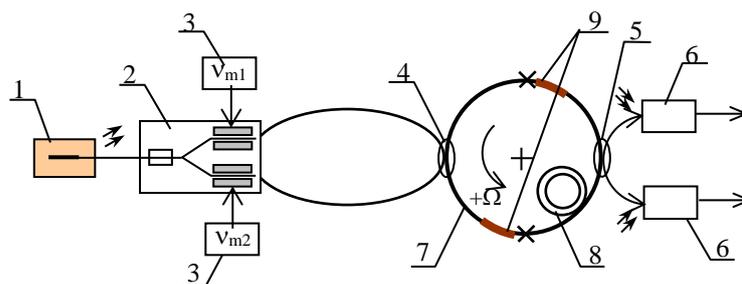
**Рис. 5.12.** Оптична схема гоніометра відбивного типу:

1 – волоконний лазер; 2 – інтегрально-оптичний модулятор; 3 – генератор спеціальних функцій; 4 – фотоприймач; 5 – відгалужувач 50 %; 6 – направлений відгалужувач; 7 – волоконний резонансний контур; 8 – п'єзокоректор; 9 – поляризатори

Випромінювання волоконного лазера 1 вводиться в інтегрально-оптичний модулятор 2, де розділяється на два пучки з рівними інтенсивностями, фази світлових хвиль цих пучків модулюються на частотах  $V_{m1}$  та  $V_{m2}$ . Після проходження модулятора 2 і відгалужувачів 5 промені за допомогою направленного відгалужувача 6 потрапляють у волоконний резонансний контур 7, виготовлений з фотонно-кристалічного волокна, після багаторазових обходів у

зустрічних напрямках світлові пучки виходять з контуру через той же направлений відгалужувач 6 і через відгалужувачі 5 потрапляють на фотоприймачі 4. Сигнали фотоприймачів 4 використовуються для налаштування частоти випромінювання волоконного лазера 1 на резонанс контуру 7 і визначення кута повороту. Для зменшення поляризаційного шуму в двох діаметрально протилежних точках контуру 7 волокно розрізано і з'єднано з поворотом осей анізотропії на  $90^\circ$  та встановлено два поляризатори 9. П'єзокоректор 8 використовується для мінімізації температурного впливу на гоніометр.

Схему резонансного гоніометра прохідного типу показано на рис. 5.13.



**Рис. 5.13.** Оптична схема гоніометра прохідного типу:

1 – волоконний лазер; 2 – інтегрально-оптичний модулятор; 3 – генератор спеціальних функцій; 4 – направлений відгалужувач; 5 – направлений відгалужувач; 6 – фотоприймач; 7 – волоконний резонансний контур; 8 – п'єзокоректор; 9 – поляризатори

Функціонування цієї схеми аналогічне до схеми з рис. 5.12, за винятком того, що світло тут знімається з другого направленного відгалужувача.

Перевагами резонансних гоніометрів над традиційними інтерферометричними датчиками є мала довжина чутливого контуру (резонатора) – від кількох см до 10...12 метрів, що в перспективі дозволяє зменшити розміри датчик аж до рівня мікрооптичного, з оптичним пасивним резонатором на кремнієвому чіпі.

Як недоліки слід вказати відносну складність системи керування, яка повинна відслідковувати частоти резонансу для хвиль зустрічних напрямків, які суттєво залежать не лише від обертання приладу, а й від температури.

Дослідження цього типу датчиків зараз перебувають в активній стадії, тож про кінцевий результат говорити ще зарано. Однак, проведені дослідження дають змогу зробити певні висновки

За даними досліджень, основними проблемами при розробці резонансного гоніометра є:

1. Великі втрати в оптичному резонансному контурі, що знижує його добротність, різкість і, як результат, чутливість приладу. Для вирішення цієї проблеми доводиться використовувати спеціально виготовлені волокна та оптичні елементи.

2. Значні втрати в оптичних елементах поза резонатором, що суттєво зменшує чутливість приладу і вимагає підвищення потужності лазера.

3. Хоча через малу довжину контуру ефектом Шупе в резонансних гоніометрах можна знехтувати, чутливість резонансної частоти контуру до температури через теплове розширення є одним з основних факторів, що знижує точність вимірювання кута.

4. Для використання у приладі придатні високо когерентні джерела випромінювання, частоту випромінювання яких можна регулювати. Варіантом вирішення цієї проблеми є застосування серродинної модуляції фази випромінювання.

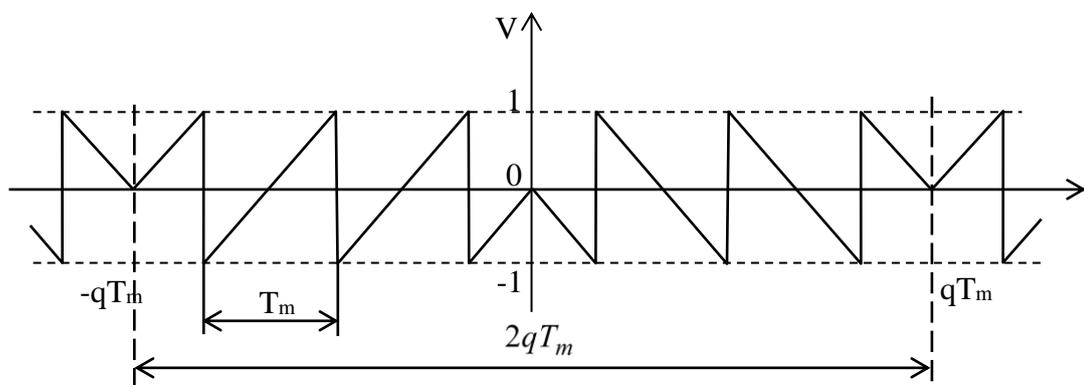
5. Прилад потребує використання складної цифрової системи керування, яка серед іншого повинна керувати частотою джерела випромінювання, відслідковувати зміни резонансних частот контуру для зустрічних хвиль та температури волоконного контуру і т.п.

6. Крім температури, на точність приладу суттєво впливають зворотне розсіювання та поляризаційний шум.

Вирішення описаних вище проблем в даний момент проводиться на кафедрі телекомунікацій.

Важливою проблемою в резонансному гоніометрі є використання різних видів модуляції.

Як правило, в резонансних гоніометрах використовують синусоїдальну, пилкоподібну, трикутну та гібридну серродинну (рис. 15.14) модуляцію.



**Рис. 15.14.** Гібридна серродинна модуляція

Застосування пилкоподібної модуляції дозволяє забезпечити зсув частоти лазера, трикутна та гібридна серродинна дають змогу спростити визначення резонансних частот контуру для зустрічних хвиль та алгоритм обробки вимірних даних.

Моделювання приладу з різними типами модуляції показало, що застосування синусоїдальної та гібридної серродинної модуляції вимагає точного витримування індексу модуляції, а найбільш ефективною з точки зору простоти реалізації вимірювальної системи є трикутна модуляція.

Також за результатами аналізу сучасних світових тенденцій та власних досліджень можна стверджувати, що перспективним є застосування в

резонансних волоконно-оптичних гоніометрах повністю цифрової модуляції та цифрових систем керування.

На даний час розробляється резонансний волоконно-оптичний гоніометр на основі отриманих результатів досліджень. Зсув нуля такого резонансного гоніометра складатиме 0,1 °/год.

## Список літератури

1. Ivanov S. Fiber-Optic and Laser Sensors-Goniometers. UKRMICO 2018. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 560. Springer, Cham, 2019 - P. 262-277.
2. Іванов С. В. Метод керування волоконним інтерферометром із замкнутим контуром зворотного зв'язку / С. В. Іванов, М. І. Ільків. // Інформаційні системи, механіка та керування : науково-технічний збірник. – 2013. – Вип. 9. – С. 113–124. – Бібліогр.: 2 назви.
3. Іванов, С. В. Вплив параметрів елементів волоконно-оптичного гіроскопа з відкритою петлею зворотного зв'язку на точність вимірювання / С. В. Іванов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. - 2016. - № 1(9). - С. 16-24.
4. Іванов С. В. Порівняльний аналіз ефективності видів намотки волокна чутливого елемента волоконно-оптичного гіроскопа в умовах зміни температури / С. В. Іванов // Наукові вісті НТУУ «КПІ» : міжнародний науково-технічний журнал. – 2016. – № 1(105). – С. 99–107.

---

## ФІЛЬТРИ НВЧ НА БАЗІ СТРУКТУР З РЕЗОНАТОРАМИ В ПАРАЛЕЛЬНИХ КАНАЛАХ ЯК КОМІРКИ МЕТАМАТЕРІАЛІВ

Ільченко М.Ю., Живков О.П.

---

### MICROWAVE FILTER BASED ON STRUCTURES WITH RESONATOR IN PARALLEL CHANNELS AS METAMATERIAL CELLS

Ilchenko M.Y., Zhivkov O.P.

More than 25 years ago, the authors theoretically obtained and experimentally confirmed the analytical and circuit models of these devices - resonance directional couplers, bandpass and rejection filters. After a long time, in 2016, an analogy was found between the patented authors' dual-channel notch filters and metamaterial cells known as Split Ring Resonators (SRRs).

It turned out that the models proposed and investigated earlier by the authors not only describe the known characteristics of SRR, but also allow explaining a number of their properties, which were considered as "anomalous." Therefore, the main task of the section is to demonstrate the effectiveness of our approaches in modeling microwave devices based on metamaterial cells.

The possibilities of the models proposed by the authors in one of the most promising areas of research in the microwave range-creation of frequency-selective surfaces with controlled characteristics are also considered. A bibliography of the works of the authors concerning this subject is given.

Більше 25 років тому авторами були теоретично отримані і експериментально підтверджені аналітичні та схемотехнічні моделі цих пристроїв - резонансних спрямованих відгалужувачі, смугових і режекторних фільтрів. Через багато років, в 2016 році, була виявлена аналогія між запатентованими авторами дворезонаторними режекторними фільтрами і осередками метаматеріалів, відомими як Split Ring Resonators (SRR).

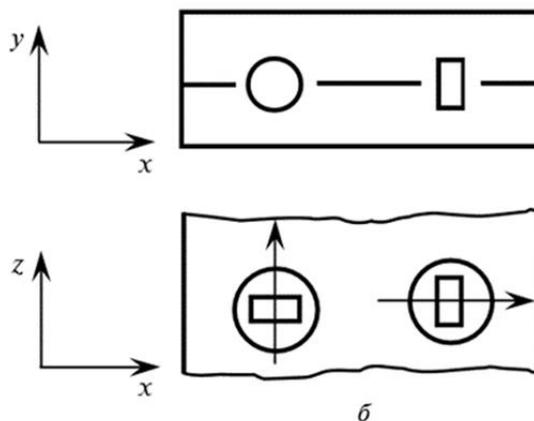
Виявилось, що моделі, запропоновані і досліджені раніше авторами, не тільки описують відомі характеристики SRR, а й дозволяють пояснити цілий ряд їхніх властивостей, які розглядалися як "аномальні". Тому головним завданням розділу є демонстрація ефективності наших підходів при моделюванні мікрохвильових пристроїв на базі осередків метаматеріалів.

Розглянуто також можливості запропонованих авторами моделей в одному з найбільш перспективних напрямків досліджень в мікрохвильовому діапазоні - створенні частотно-селективних поверхонь з керованими характеристиками. Наведено бібліографію праць авторів, що стосуються даної тематики.

## 16.1. Базова модель 8-полюсника (4-port) з резонаторами в паралельних каналах

Дослідження смугових і режекторних фільтрів на резонаторах різного типу було проведено на базі узагальненого 8-полюсника. У статті [1] розглянуто 8-полюсник (рис. 16.1), утворений двома пов'язаними лініями передачі (наприклад, хвилеводами), в яких може поширюватися хвиля з еліптичної поляризацією.

**Рис. 16.1.** 8-полюсник, утворений двома сполученими по широкій стінці прямокутними хвилеводами. В отворах, виконаних в стінці між хвилеводами, розташовані діелектричні резонатори: *a* - вид з торця; *б* - вид зверху



Хвилеводи пов'язані отворами у загальній широкій стінці, в перетині, перпендикулярному поширенню електромагнітної хвилі, розташовані діелектричні резонатори (ДР), один з яких збуджується поперечної складової магнітного поля  $h_x$ , другий - поздовжньої складової  $h_z$ . Комплексні амплітуди полів, що перевипромінюють резонатори в двох хвилеводах в різних напрямках, розраховуються виходячи зі співвідношення

$$C_i^{\pm} = j\omega m h_i^{\pm} / 2, \quad (16.1)$$

де  $m$  – магнітний момент, обумовлений збудженням відповідного ДР,  $\omega$  – кругова частота НВЧ поля. В [1] показано, що

$$C_1^+ = K_{x1} / (1 + K_{x1} + K_{x2}) + K_{z1} / (1 + K_{z1} - K_{z2}); \quad (16.2)$$

$$C_1^- = K_{z1} / (1 + K_{z1} + K_{z2}) - K_{x1} / (1 + K_{x1} + K_{x2}); \quad (16.3)$$

$$C_2^+ = \sqrt{[K_{x1}K_{x2}]} / (1 + K_{x1} + K_{x2}) + \sqrt{[K_{z1}K_{z2}]} / (1 + K_{z1} + K_{z2}); \quad (16.4)$$

$$C_2^- = \sqrt{[K_{z1}K_{z2}]} / (1 + K_{z1} + K_{z2}) - \sqrt{[K_{x1}K_{x2}]} / (1 + K_{x1} + K_{x2}), \quad (16.5)$$

де  $K_{qi} = j\omega M_q h_{qi}^+ h_{qi}^- / 2$ ,  $M_q$  – параметр, який визначається типом коливань ДР. Знаючи комплексні амплітуди полів випромінювання резонаторів (16.2) - (16.4), визначаємо коефіцієнти передачі та відбиття у вигляді

$$T_{12} = 1 + C_1^+; \quad T_{13} = C_2^+; \quad T_{14} = C_2^-; \quad \Gamma_{11} = C_1^- . \quad (16.6)$$

Розглянутий 8-полюсник є взаємним, тому коефіцієнти проходження та відбиття при підключенні генератора до інших плеч визначаються виразами, аналогічними (16.6).

Слід зазначити, що конструкція 8-полюсника, розглянута вище, запатентована авторами як спрямований фільтр [2].

## 16.2. Аналітичні моделі фільтрів

**Смугові фільтри.** В [1] показано, що коефіцієнти передачі  $T$  та відбиття  $\Gamma$  хвилевідного смугового фільтра на діелектричних резонаторах з різними типами коливань можуть бути легко отримані з виразів (16.1) - (16.6) у вигляді:

$$T = C_1^+; \quad (16.7)$$

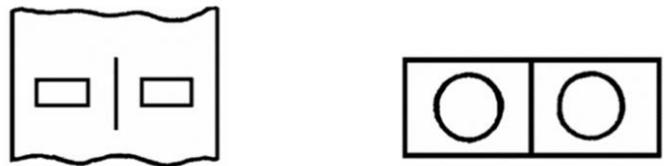
$$\Gamma = 1 + C_1^-; \quad (16.8)$$

$$T = K_2 / (1 + K_2) - K_1 / (1 + K_1); \quad (16.9)$$

$$\Gamma = 1 - K_1 / (1 + K_1) - K_2 / (1 + K_2), \quad (16.10)$$

де  $K_1, K_2$  – відповідно коефіцієнти зв'язку «магнітного» і «електричного» типу коливань з лініями передачі (в даному випадку - регулярними хвилеводами).

**Рис. 16.2.** Хвилеводний смуговий фільтр з діелектричними резонаторами, що збуджуються на різних типах коливань



Мікрохвильові дворезонаторних фільтри на базі резонаторів з різними типами коливань були досліджені експериментально і теоретично на підставі виразів (16.9) та (16.10) в роботах [3-6]. Також авторами були отримані авторські свідоцтва на цілий ряд конструкцій дворезонаторних смугових фільтрів на базі діелектричних і мікрострічкових резонаторів з різними типами коливань [7-10].

Інша можливість визначення параметрів смугових дворезонаторних фільтрів на взаємно розстроєних резонаторах (рис. 16.2) розглянута в [11].

Вони визначаються на основі параметрів матриці розсіювання:

$$\hat{S} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{K_M}{1+K_M} - \frac{K_3}{1+K_3} & \frac{K_3}{1+K_3} - \frac{K_M}{1+K_M} \\ \frac{K_3}{1+K_3} - \frac{K_M}{1+K_M} & 1 + \frac{K_M}{1+K_M} - \frac{K_3}{1+K_3} \end{bmatrix} \quad (16.11)$$

Тут коефіцієнтам зв'язку  $K_1$  і  $K_2$  з виразів (16.9) - (16.10) відповідають коефіцієнти зв'язку  $K_e$  електричного і  $K_m$  магнітного типів коливань.

На практиці зазвичай використовуються смугові фільтри з симетричними щодо центральної частоти амплітудно-частотними характеристиками ( $K_1 = K_2 = K$ ). Якщо резонансні частоти коливань не збігаються, залежність коефіцієнтів передачі та відображення від частоти можна представити у вигляді

$$T = j2K \cdot a / [(1 + K + j\xi)^2 + a^2] \quad (16.12)$$

$$G = [(1 + j\xi)^2 - K^2 + a^2] / [(1 + K + j\xi)^2 + a^2] \quad (16.13)$$

де  $\xi$  – узагальнене розстроєння частоти відносно  $f_0$  – центральної частоти фільтру,  $a$  – узагальнене розстроєння частот «магнітного»  $f_m$  и «електричного»  $f_e$  коливань відносно  $f_0$ ,

$$f_0 = (f_m + f_e) / 2. \quad (16.14)$$

$$a = 2(f_e - f_m) / (f_e + f_m) \times Q_0 \quad (16.15)$$

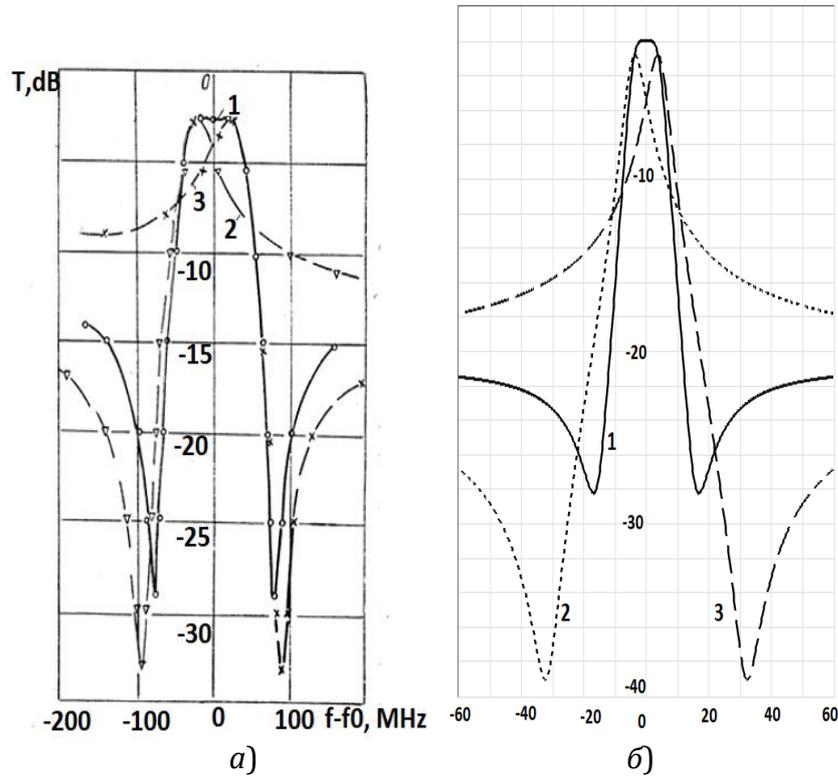
де  $Q_0$  – власна добротність резонаторів (вважаємо, що обидва резонатора мають однакову добротність на різних типах коливань).

В роботі [3] детально розглянуто вплив позасмугової розв'язки між входами (вона відповідає коефіцієнту передачі фільтра за відсутності резонаторів) і продемонстровано її вплив на формування полюсів загасання. На рис.16.3 наведені експериментальні [3] (експеримент проведений 30 років тому) і розрахункові характеристики дворезонаторних смугових фільтрів на взаємно розстроєних коливаннях в паралельних каналах. Гарний збіг форми експериментальних і розрахункових показників свідчить про адекватність обраної аналітичної моделі смугового фільтра.

Слід зазначити, що отримані в термінах коефіцієнтів зв'язку про узагальнених розладнаннях вирази (16.12) і (16.13) справедливі не тільки для діелектричних резонаторів (і збуджуємих в них різних типів коливань). Вони придатні для аналізу різних типів резонаторів (і їх коливань) - мікροстрічкових, хвилевідно-щілинних і т.п.

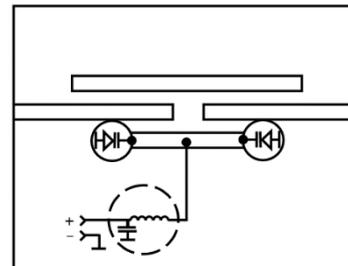
Аналіз виразів коефіцієнтів передачі та відбиття дворезонаторного фільтра на взаємно розладнаних резонаторах (коливаннях) показав, що вони повністю аналогічні подібним виразам для традиційних дворезонаторних фільтрів на каскадно включених, пов'язаних між собою резонаторах. Роль узагальненого коефіцієнта зв'язку між резонаторами (застосовується при аналізі каскадного включення пов'язаних резонаторів) грає взаємне розстроєння « $a$ » (формула (16.15)) між їх резонансними частотами. Звідси випливає одне з найістотніших відмінностей і переваг фільтрів на взаємно розстроєних резонаторах (коливаннях) - можливість керування смугою пропускання фільтра зміною не зв'язку між резонаторами, а їх резонансних частот. На рис. 16.4 представлений

мікстрічковий фільтр [8], в якому резонансна частота одного з резонаторів змінюється при зміні керуючої напруги, що подається на підключені до нього варикапи.



**Рис. 16.3.** Експериментальні *a)* і розрахункові *б)* характеристики дворезонаторних смугових фільтрів на взаємно розстроєних коливаннях в паралельних каналах. Криві: *1* - сумарна характеристика фільтра з двома резонаторами, криві *2* - «протифазне» або «магнітне» коливання, криві *3* - «синфазне» або «електричне» коливання. Частота на *б)* у відносних одиницях

**Рис.16.4.** Дворезонаторний мікстрічковий смуговий фільтр з керованою смугою пропускання

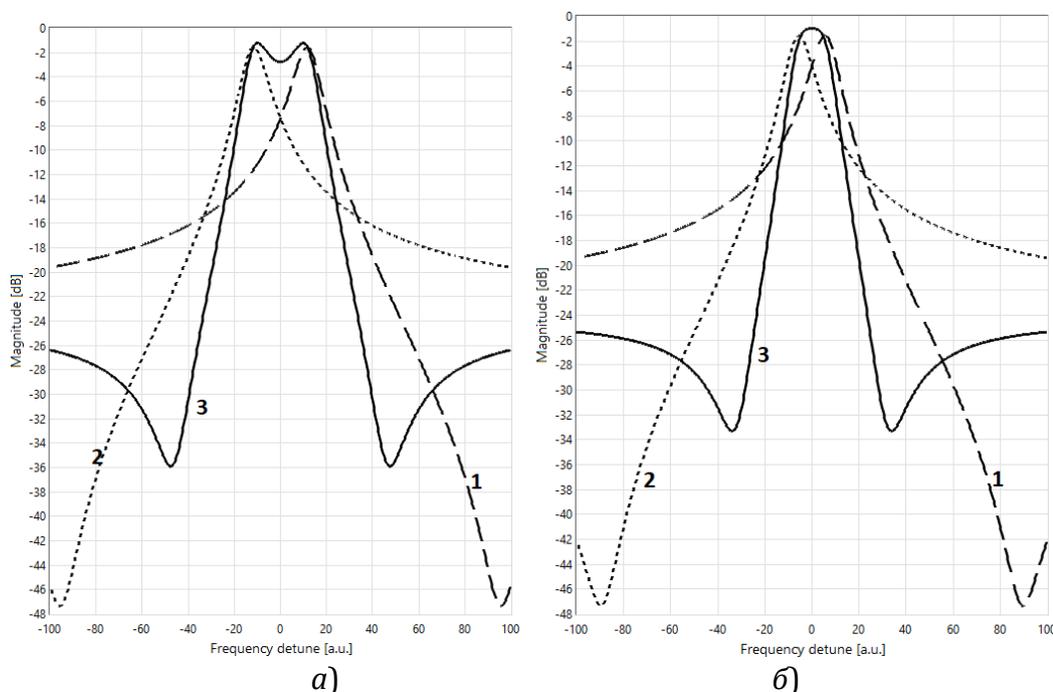


На рис. 16.5 представлені характеристики дворезонаторних смугових фільтрів з коливаннями різних типів в паралельних каналах при однакових коефіцієнтах зв'язку резонаторів  $K$  зі входом-виходом фільтра ( $K = 5$ ) та різного взаємного розстроєння «*a*» між їх резонансними частотами. Видно, що при зміні «*a*» від 12 (рис.16.5 *a*) до 6 (рис.16.5 *б*) смуга пропускання фільтра за рівнем -3 дБ зменшується майже вдвічі. В обох випадках рівень позасмугової розв'язки становить -25 дБ.

Координати  $\xi_p$  полюсів загасання на рис. 16.5 *a)* і *б)* відповідають розрахованим за формулою (16.16) з [3] (з урахуванням відповідності розладнання «*a*» коефіцієнту зв'язку  $K_c$ )

$$\xi_p = \sqrt{(2K_c * a/D)} \quad (16.16)$$

де  $D$  - рівень позасмугової розв'язки. Для значень  $K$ ,  $a$  й  $D$ , використаних при розрахунках характеристик, наведених на рис. 16.5 *а)* и *б)*,  $\xi_p \sim 44$  и  $32$  відповідно.



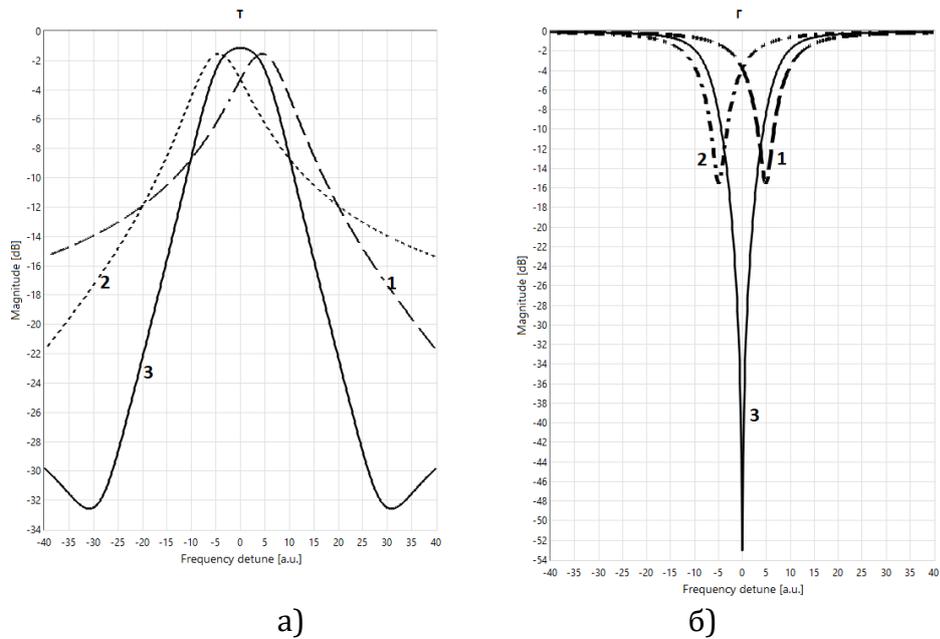
**Рис. 16.5.** Коэффициенти передачи дворезонаторных полосовых фильтров с колебаниями разных типов в параллельных каналах. Кривые: 1 - характеристики коэффициента передачи фильтра только при возбуждении «электрического» типа колебаний, кривые 2 - характеристики коэффициента передачи фильтра только при возбуждении «магнитного» типа колебаний, кривые 3 - характеристики коэффициента передачи фильтра при возбуждении обоих типов колебаний одновременно. Частота на *а)* та *б)* у відносних одиницях.

Відзначимо ще одну цікаву властивість смугових фільтрів з резонаторами різного типу в паралельних каналах. З формули (16.13) випливає, що на центральній частоті смуги пропускання фільтр може бути ідеально узгоджений ( $\Gamma = 0$ ) при виконанні співвідношення

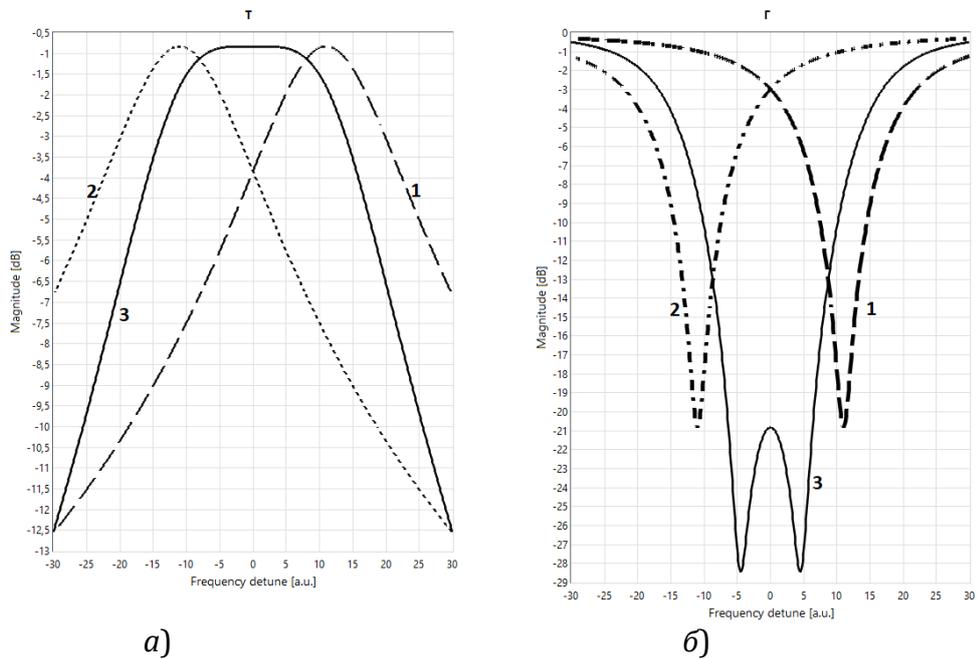
$$a = \pm \sqrt{(K^2 - 1)} \quad (16.17)$$

Важливим параметром дворезонаторних фільтрів на пов'язаних резонаторах є так зване «критичне» значення коефіцієнта зв'язку, при якому характеристика коефіцієнта передачі стає максимально плоскою (при зв'язку, більшому критичного в смугі пропускання фільтра з'являється провал на центральній частоті). З (16.12) випливає, що для дворезонаторних фільтрів на взаємно розстроєних резонаторах подібному коефіцієнту зв'язку відповідає значення «критичної» розстройки « $a$ », рівне

$$a_{кр} = K + 1 \quad (16.18)$$



**Рис. 16.6.** Коефіцієнти передачі а) та відбиття б) дворезонаторних смугових фільтрів з коливаннями різних типів в паралельних каналах. Криві 1 - характеристики коефіцієнта передачі фільтра тільки при збудженні «електричного» типу коливань, криві 2 - характеристики коефіцієнта передачі фільтра тільки при збудженні «магнітного» типу коливань, криві 3 - характеристики коефіцієнта передачі фільтра при збудженні обох типів коливань одночасно.  $K = 5$ ,  $a = 4.9$

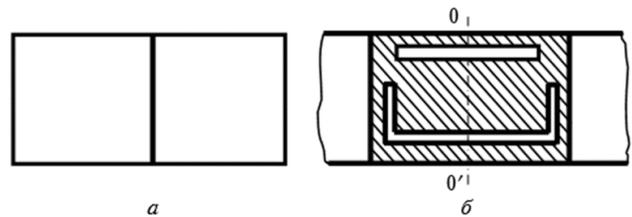


**Рис. 16.7.** Коефіцієнти передачі а) та відбиття б) дворезонаторних смугових фільтрів з коливаннями різних типів в паралельних каналах. Криві 1 - характеристики коефіцієнта передачі та відбиття фільтра тільки при збудженні «електричного» типу коливань, криві 2 - характеристики коефіцієнта передачі та відбиття фільтра тільки при збудженні «магнітного» типу коливань, криві 3 - характеристики коефіцієнта передачі та відбиття фільтра при збудженні обох типів коливань одночасно.  $K = 10$ ,  $a = 11$  (критичний зв'язок). Частота на рис. а) та б) у відносних одиницях

Оскільки значення "а", що визначаються відповідно з формулами (16.17) і (16.18), не збігаються, дворезонаторний фільтр з максимально плоскою характеристикою не буде ідеально узгоджений на центральній частоті, однак при значеннях К, багато більших одиниці, досягається, тим не менш, гарне узгодження в смузі пропускання, як це показано на рис. 16.7.

В [9] запропонований смуговий фільтр на хвилевідно-щілинних резонаторах, конструкція фільтра представлена на рис. 16.8.

**Рис. 16.8.** Хвилевідно-щілинний фільтр з паралельним включенням резонаторів: а - вид з торця; б - вид збоку



Фільтр містить відрізок прямокутного хвилеводу, уздовж поздовжньої осі якого в Е-площині розміщена металева пластина. В пластині виконані резонансні щілини лінійної (повздовжньої) та П-подібної форми. П-образна щілина орієнтована кінцями в бік поздовжньої резонансної щілини. Завдяки розташуванню, вибору довжини і конфігурації щілини П-подібної форми забезпечується зменшення поздовжньої довжини фільтра. Наявність паразитного смуги пропускання, обумовленою впливом нижчого типу коливань щілини П-подібної форми, може бути скомпенсовано за рахунок вибору частоти відсічення прямокутного хвилеводу вище резонансної частоти зазначеного небажаного виду коливань.

**Режекторні фільтри.** У роботах [1-6] розглядалися смугові фільтри і основна увага приділялася саме їх фільтруючим властивостям. Майже через 30 років в [12] було показано, що режекторні фільтри на взаємно розладнаних резонаторах в паралельних каналах є нічим іншим, як комірками метаматеріалів. Тому підвищений інтерес до такого роду режекторних фільтрів цілком виправданий.

В [12] приведена структура елементарної комірки метаматеріала з розмірами зовнішнього і внутрішнього резонаторів і проміжком між ними (рис. 16.9).

Фільтр рис. 16.10 а) утворений резонаторами, довжини яких кратні  $n\lambda / 2$  і  $(n + 1)\lambda / 2$  ( $\lambda$  - довжина хвилі на резонансній частоті фільтра), при  $n = 1$  - відповідно «напівхвильовим» і «хвильовим» резонаторами, а резонатори фільтра 16.10 б) - «напівхвильовий» і «хвильовий» (зрозуміло, що вони також можуть мати кратність  $n$  і  $(n + 1)$ ).

В [1] показано, що резонансні частоти цих резонаторів можуть і не збігатися, а бути близькі до центральної частоті фільтра (це залежить від коефіцієнтів зв'язку резонаторів з лінією передачі). Якщо порівняти довжини резонаторів рис. 16.9 (для коректності - по лініях, що проходить посередині резонаторів, то отримаємо наступний результат - довжина меншого ( «внутрішнього») резонатора - 5.7 мм, а більшого ( «зовнішнього») - 11.1 мм. Виходить, що ці два резонатора (з урахуванням сказаного в [1] і похибки, що вноситься ємнісний зв'язком між ними) можна також вважати «напівхвильовим» і «хвильовим», а тому до них застосовуються ті ж моделі, що і до фільтрів [13, 14].

Рис. 16.9.  $l = 3$  мм,  $d = t = w = 0,3$  мм

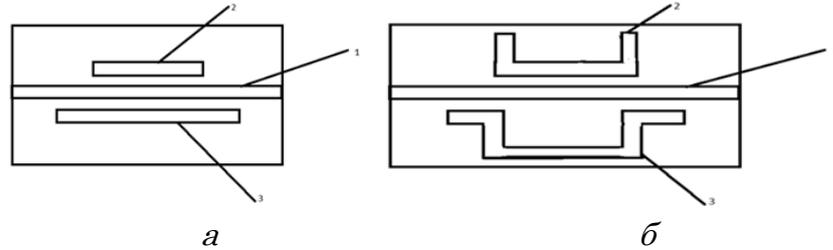
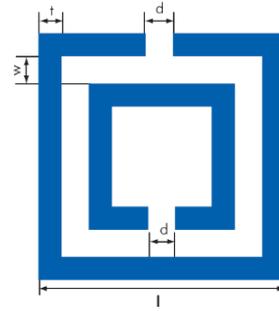


Рис. 16.10. Режекторні мікрохвильові фільтри *a* – [13], *б* – [14]:  
1 - мікстрічкова лінія передачі, 2 - «напівхвильовий» резонатор, 3 - «хвильовий» резонатор

Можна показати (див. [1], формула (6), та розділ 16.4), що вирази для коефіцієнтів передачі та відбиття смугового і режекторного фільтрів на взаємно розстроєних резонаторах "дуальні", тобто, враховуючи формули (16.7) і (16.8), отримаємо для режекторного фільтра:

$$\Gamma = K_2 / (1 + K_2) - K_1 / (1 + K_1); \quad (16.19)$$

$$T = 1 - K_1 / (1 + K_1) - K_2 / (1 + K_2), \quad (16.20)$$

Представляючи  $K_1$  и  $K_2$  у вигляді

$$K_1 = K_1 / [1 + K_1 + j(\xi + \mathbf{a})] \quad (16.21)$$

$$K_2 = K_2 / [1 + K_2 + j(\xi - \mathbf{a})] \quad (16.22)$$

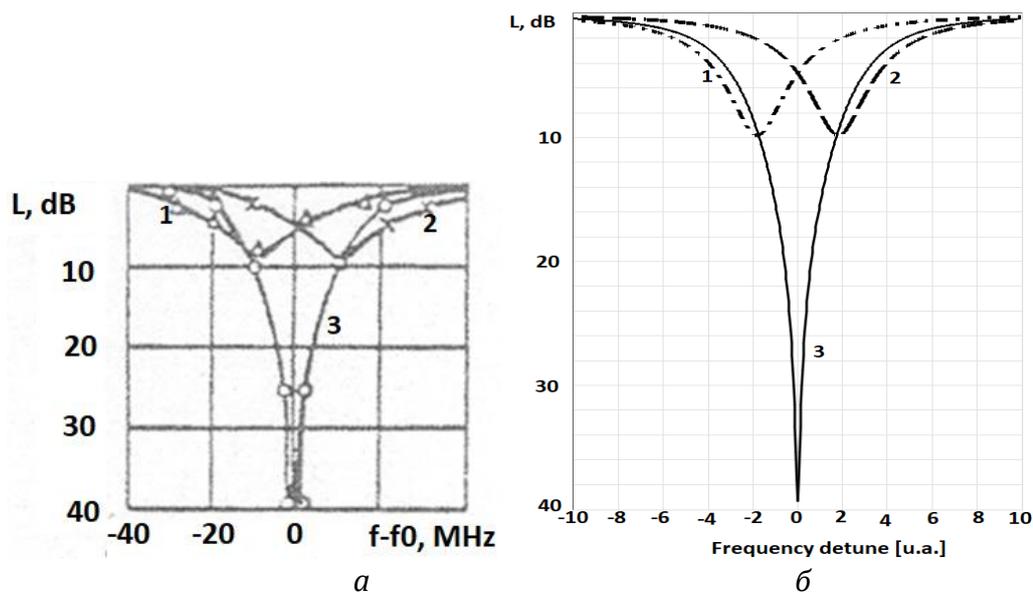
можна показати, що при взаємному розстроєнні " $\mathbf{a}$ " між резонансними частотами використовуваних коливаних резонаторів, яке визначається за формулою

$$\mathbf{a} = \pm \sqrt{(K_1 * K_2 - 1)} \quad (16.23)$$

коефіцієнт передачі режекторного фільтра  $T$  (формула (16.20)) дорівнює нулю, тобто досягається повна, 100-відсоткова режекція сигналу. Зауважимо, що в фільтрах, побудованих на базі каскадно включених або пов'язаних між собою резонаторів, такий ефект неможливий.

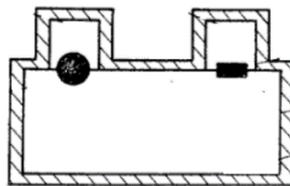
Для рівних коефіцієнтів зв'язку  $K_1 = K_2$  формула (16.23) була отримана раніше в [1]. На рис. 16.11 а) представлені розрахункові (суцільні криві) і

експериментальні (значки на кривих) характеристики хвилевідного режекторного фільтра на діелектричних резонаторах, конструкція якого представлена в [15] (рис.16.12). Криві 1 і 2 - характеристики окремих резонаторів, крива 3 - сумарна характеристика дворезонаторного режекторного фільтра. На рис. 16.11 б) представлені розраховані на підставі співвідношення (16.20) коефіцієнти передачі аналогічного фільтра, коефіцієнти зв'язку  $K_1$  і  $K_2$  і взаємне розстроєння «а» якого підбиралися спеціально, щоб характеристики були аналогічні наведеним на рис.16.9 а). Як видно, гарний збіг отримано при  $K_1 = K_2 = 2.1$ ,  $a = 1.81$ .



**Рис. 16.11.** Експериментальні а) і розрахункові б) характеристики хвилевідного режекторного фільтра на діелектричних резонаторах. Криві 1 - характеристики коефіцієнта передачі фільтра тільки при збудженні «магнітного» типу коливань, криві 2 - характеристики коефіцієнта передачі фільтра тільки при збудженні «електричного» типу коливань, криві 3 - характеристики коефіцієнта передачі фільтра при збудженні обох типів коливань одночасно. Частота на б – у відносних одиницях.

Резонатори в фільтрі рис.16.10 збуджуються на різних типах коливань - «електричному» і «магнітному», їх резонансні частоти близькі, але не збігаються, коефіцієнти зв'язку резонаторів з хвилеводом можуть регулюватися за рахунок зміни глибини їх «занурення» з відрізків поза межних хвилеводів, в яких вони розміщені, в регулярний хвилевід.



**Рис. 16.12.** Хвилевідний режекторний фільтр на діелектричних резонаторах

На рис. 16.13, а представлені експериментальні характеристики хвилевідного режекторного фільтра на діелектричних резонаторах з різними типами коливань, резонансні частоти яких практично збігаються (конструкція фільтра аналогічна

представленої на рис. 16.12). Криві 1 і 2 - амплітудно-частотні характеристики (АЧХ) кожного з резонаторів окремо, крива 3 - АЧХ коефіцієнта передачі фільтра з двома резонаторами. На рис. 16.13, б представлені розраховані на підставі співвідношення (16.20) коефіцієнти передачі аналогічного фільтра, коефіцієнти зв'язку  $K_1$  і  $K_2$  якого підбиралися спеціально, щоб характеристики були аналогічні наведеним на рис. 16.13, а). Як видно, гарний збіг отримано при  $K_1 = 2$ ,  $K_2 = 0.51$ ,  $a = 0$  (резонансні частоти резонаторів, як зазначалося вище, збігаються). Відзначимо, що при обраних коефіцієнтах зв'язку виконується, як і очікувалося, співвідношення (16.23).

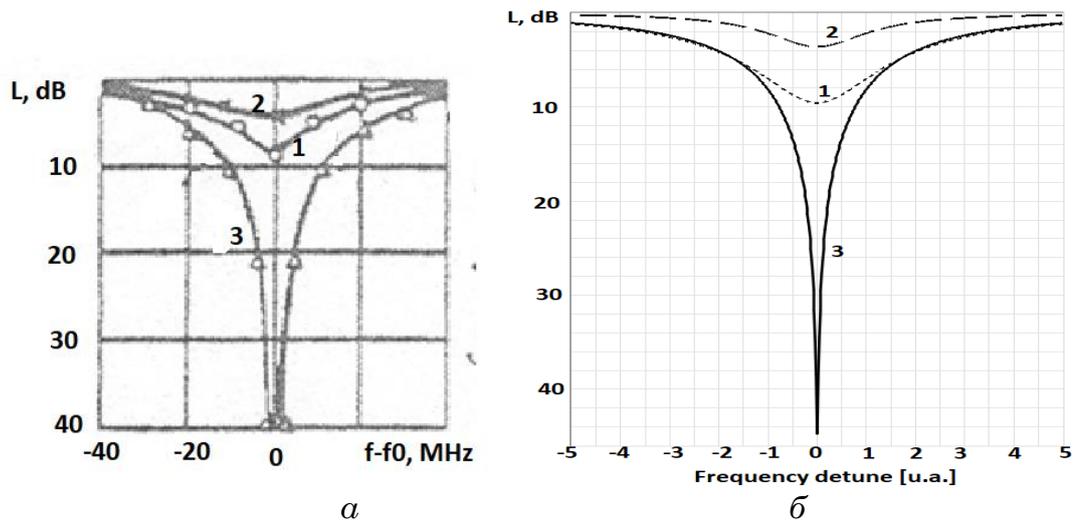


Рис. 16.13. Експериментальні а і розрахункові б - характеристики хвильоводного режекторного фільтра на діелектричних резонаторах. Частота на б - в узагальнених одиницях

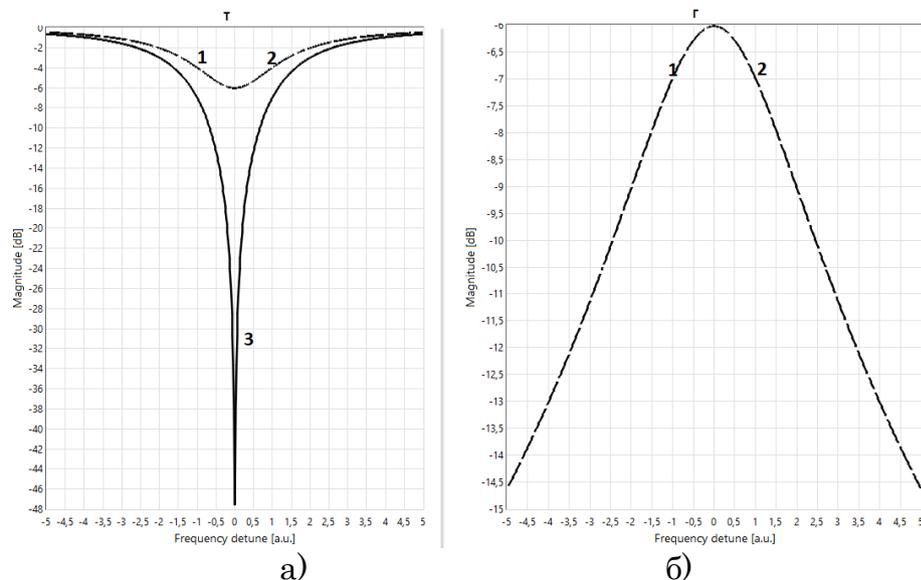


Рис. 16.14. Коефіцієнти передачі а) і відбиття б) режекторного фільтра на резонаторах різного типу. Криві 1 і 2 - характеристики окремих резонаторів (збігаються), крива 3 на рис. а) - характеристика дворезонаторного фільтра. Частоти на рис. а) і рис. б) - в узагальнених одиницях.

В [1] відзначається, що найбільш вузька АЧХ коефіцієнта передачі режекторного фільтра буде досягатися при коефіцієнтах зв'язку  $K_1 = K_2 = 1$  ( $a = 0$ , резонатори збуджуються на одній і тій же частоті). При цьому навантажена добротність резонаторів для кожного з типів коливань дорівнює подвоєною власної добротності. Смуга режекції за рівнем -3 дБ всього лише вдвічі ширше смуги пропускання ненагруженого діелектричного резонатора. Крім того, такий фільтр буде ідеально узгоджений ( $\Gamma = 0$ ), тобто режекція сигналу здійснюється за рахунок повного поглинання потужності на резонансній частоті. Розглянутий фільтр може бути виконаний на основі конструкції зі сферичним діелектричним резонатором, розташованим на стику регулярного і поза межного хвелеводів в області кругової поляризації електромагнітного поля. На рис 16.14 представлені характеристики «ідеального» режекторного фільтра ( $K_1 = K_2 = 1$ ,  $a = 0$ ), розраховані відповідно за формулами (16.19) - (16.20). Відсутність кривої 3 на рис. б), відповідної коефіцієнту відбиття фільтра, пояснюється тим, що  $\Gamma = 0$ .

**Суперлинза.** У численних роботах, присвячених метаматеріалам, діелектрична і магнітна проникності середовища розглядаються як деякі інтегральні характеристики діелектричної та магнітної проникності  $\epsilon$  і  $\mu$ . У той же час в [17] фігурують параметри  $Kq_i$ , які тлумачаться як коефіцієнти зв'язку певного типу коливань (електричного або магнітного) з лініями. Ми можемо записати їх як коефіцієнти зв'язку електричного і магнітного типів коливань у вигляді  $K_e$  і  $K_m$  відповідно і зіставити з інтегральними характеристиками метаматеріалів  $\epsilon$  і  $\mu$ . Тоді в термінах роботи [17] нескінченне загасання в структурі буде досягатися при взаємному розстроєнні частот ортогональних коливань «а»

$$a = \pm \sqrt{(K_e * K_m - 1)} \quad (16.24),$$

що повністю відповідає (16.23), якщо взяти до уваги, що коефіцієнтам зв'язку  $K_1$  і  $K_2$  з виразів (16.9) - (16.10) відповідають коефіцієнти зв'язку  $K_e$  електричного і  $K_m$  магнітного типів коливань.

Можна з високим ступенем ймовірності припустити, що співвідношення  $K_e = K_m = 1$ , яке, як показано, притаманне режекторному фільтру з максимально вузькою смугою режекції (рис. 16.12), відповідає умові «суперлинзовості» метаматеріалів:

$$\epsilon = \mu = -1 \quad (16.25),$$

що, в свою чергу, призводить до припущення про те, що елементарна комірка метаматеріала для «суперлінзи» є «ідеальним» дворезонаторним режекторним фільтром з коливаннями різного типу, співпадаючими по частоті.

На жаль, експериментального підтвердження ця гіпотеза авторів поки не отримала.

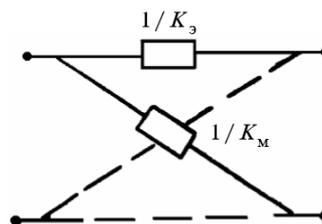
### 16.3. Схемотехнічні моделі фільтрів - мостові схеми заміщення

В роботі [12] вперше показано, що елементарна комірка метаматеріалів є дворезонаторною системою, при цьому коливання окремих резонаторів не пов'язані між собою. Виродження коливань в осередку метаматеріалів, властивості окремих коливань і пов'язані з цим всілякі ефекти детально досліджені авторами в роботах [17-20]. При цьому показано, що широко поширена в літературі думка про надзвичайну добротність ( $Q$  – quality) осередків метаматеріалів, зокрема так званих Split Ring Resonators (SRR), є не зовсім коректною, так як  $Q$  - це параметр, що характеризує окреме коливання, а не резонансну характеристику чотириполосника. Показано, що надзвичайно велике  $Q$  комірок метаматеріалів проявляється в районі двох різних значень взаємного розстроєння коливань, що визначені у відповідності з (16.23), а «метаматеріальність» - тільки в тій області, в якій частота синфазних коливань вище частоти протифазних [17]. Наведені в [18-20] результати експериментальних досліджень демонструють наявність вироджених коливань, можливість зняття виродження при розладі коливань і досягнення екстремальних значень режекції на двох різних частотах.

Дослідження осередків метаматеріалів в термінах коливань і коефіцієнтів зв'язку є актуальним в мікрохвильовій техніці ще й тому, що в більшості відомих робіт використовується не «схемотехнічна», а, скоріше, чисто фізична термінологія, зокрема, негативні діелектрична і магнітна проникності. Крім того, подібний підхід дозволяє найбільш коректно визначити схему заміщення елементарної комірки метаматеріала.

В [11] для смугових мікрохвильових фільтрів на базі взаємно розстроєних резонаторів в паралельних каналах (рис. 16.2) вперше була використана мостова схема заміщення (рис. 16.15).

**Рис. 16.15.** Мостова схема заміщення смугового фільтра на взаємно розладнаних електричному і магнітному типах коливань.



Відповідно матриця розсіювання такого фільтра описується виразами (16.11). Мостові схеми заміщення смугових і режекторного фільтрів представлені на рис 16.16.

Якщо взяти до уваги, що при переході від еквівалентної схеми смугового фільтра рис. 16.16, а) до еквівалентної схеми режекторного фільтра рис. 16.16 в) відбувається «заміна» послідовного резонаторного коливального контуру на паралельний і коефіцієнту зв'язку  $K_e$  буде відповідати коефіцієнту зв'язку  $1/K_e$ ,

то, зробивши відповідну заміну в (16.9), отримаємо параметри матриці розсіювання режекторного фільтра у вигляді

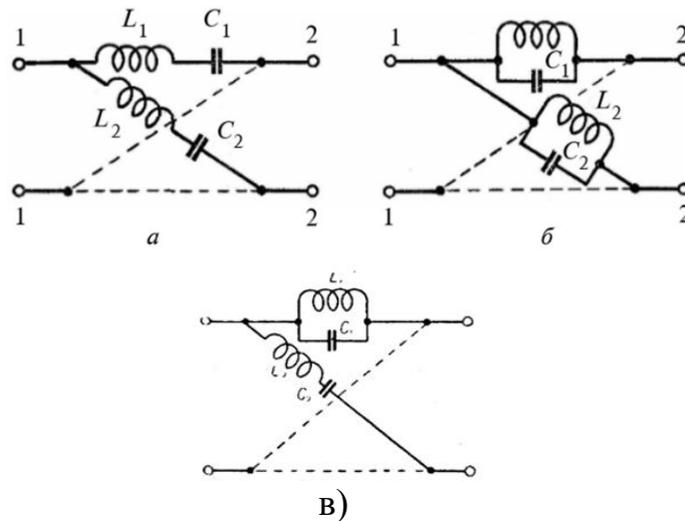


Рис. 16.16. а), б) - мостові схеми заміщення смугових фільтрів, в) - режекторного фільтра

$$S_{11} = K_3/(1 + K_3) - K_M/(1 + K_M) \quad (16.26)$$

$$S_{21} = 1 - K_3/(1 + K_3) - K_M/(1 + K_M) \quad (16.27)$$

тобто, як зазначалося в підрозділі 16.2, коефіцієнти передачі смугових і режекторного фільтрів на взаємно розстроєних резонаторах в паралельних каналах (без урахування позасмугової розв'язки в смугових фільтрах) дуальні. Коефіцієнту передачі смугового фільтра відповідає коефіцієнт відбиття режекторного фільтра і навпаки.

Відзначимо, що знайдені значення елементів матриці розсіювання чотириполусника (коефіцієнти передачі та відбиття) аналогічні значенням коефіцієнтів передачі та відображення 8-полусника, отриманими в [1].

В [12] відзначаються основні причини вибору мостових схем в якості прототипів для фільтрів на взаємно розстроєних резонаторах:

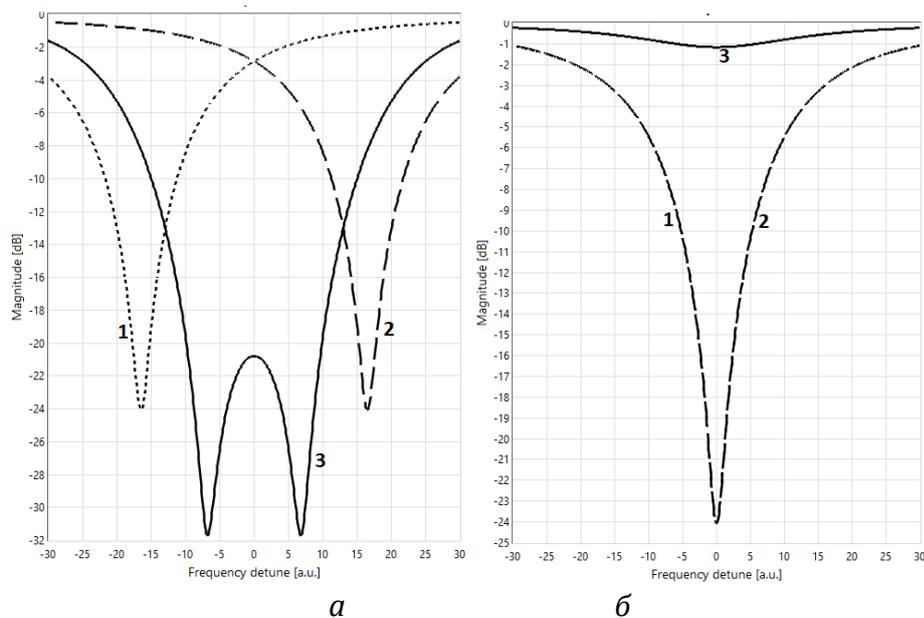
- як в мостових фільтрах-прототипах, так і в фільтрах на взаємно розстроєних резонаторах передача енергії здійснюється по двох незалежних каналах;
- резонатори в мостових фільтрах-прототипах (для смугових фільтрів) також розладнані по частоті, інакше сигнали в навантаженні «віднімаються» (тобто будуть рівні по амплітуді і протилежні по фазі), компенсують один одного, тобто ніякої передачі сигналу з входу на вихід не буде;
- при певному співвідношенні реактивностей в плечах фільтрів (як і при правильному виборі порядку взаємного розташування «магнітних» і «електричних» коливачів в фільтрах зі взаємно розладнаними резонаторами) можлива реалізація «полусів загасання» [1], в іншому випадку «полусів загасання» не буде.

- і, нарешті, найважливіше - мостові фільтри відносяться до так званих немінимальнофазових.

Мостові схеми дозволяють отримувати в рази більше широкую смугу пропускання і синтезувати амплітудно-частотну характеристику фільтра незалежно від фазочастотної.

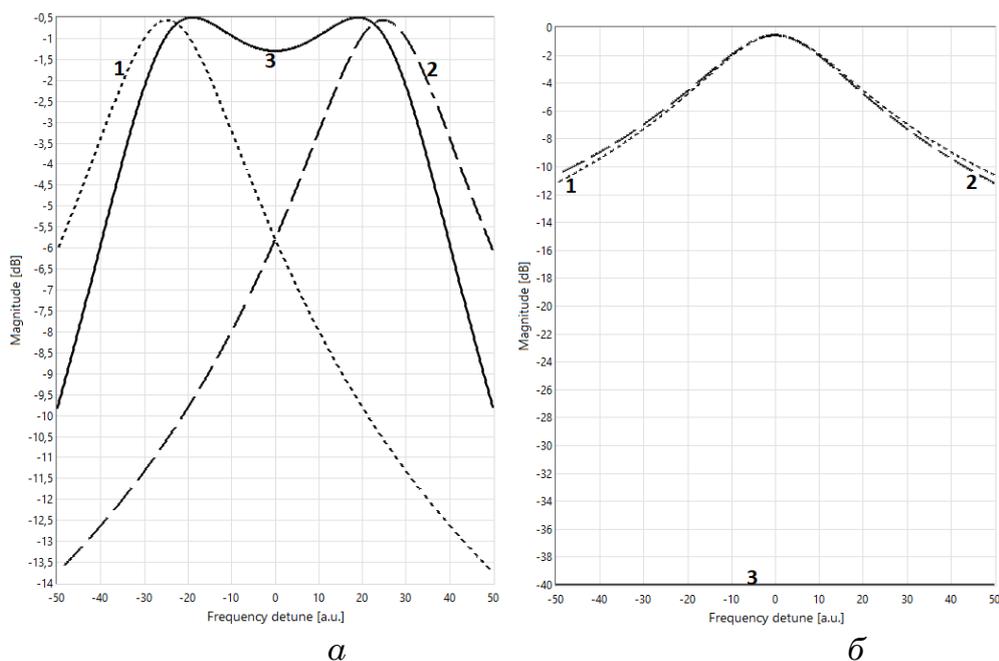
## 16.4. Моделювання поведінки фільтрів як осередків структур частотно-селективних поверхонь.

Частотно-селективні поверхні (ЧСП) містять в якості основного елемента мікрохвильові резонатори різного типу, в даний час в якості подібних резонаторів використовуються елементарні комірки метаматеріалів. Тому до них застосовні методи досліджень полосового і режекторного фільтрів, викладені в розділі 16.2. Розглянемо лише одне з важливих завдань управління параметрами ЧСП - «вмикання» і «вимикання» їх селективних властивостей. На рис. 16.17 *а* і *б* представлені характеристики режекторних фільтрів, що складаються з двох взаємно розладнаних резонаторів різного типу коливальних. Криві 1 і 2 - коефіцієнти передачі окремих резонаторів, криві 3 - сумарна характеристика дворезонаторного фільтра. На рис 16.17, *а* (узагальнене розладнання  $\alpha = 16.5$ ) смуга режекції по рівню -20 дБ у вісім разів ширше смуги режекції однорезонаторних фільтрів за тим самим рівнем -20 дБ. На рис 16.17, *б* (коливання збігаються за частотою, узагальнене розладнання  $\alpha = 0$ ) дворезонаторний режекторний фільтр має загасання порядку -1 дБ, тобто практично перестає бути режекторним.



**Рис. 16.17.** Характеристики режекторного фільтрів при коефіцієнтах зв'язку  $K_1 = K_2 = 15$ , узагальнене розладнання на *а*)  $\alpha = 16.5$ , *б*)  $\alpha = 0$

На рис. 16.18 *а* і *б* представлені характеристики смугових фільтрів, що складаються з двох взаємно розладнаних резонаторів різного типу коливань. Криві 1 і 2 - коефіцієнти передачі окремих резонаторів, криві 3 - сумарна характеристика дворезонаторного фільтра. На рис 16.18 *а* (узагальнене розладнання  $a = 25$ ) смуга пропускання по рівню -3 дБ як мінімум удвічі ширше смуг пропускання однорезонаторних фільтрів за тим самим рівнем. На рис 16.18 *б* (коливання збігаються за частотою, узагальнене розладнання  $a = 0$ ) дворезонаторний смуговий фільтр має загасання порядку -40 дБ (заданий рівень позасмугової розв'язки), тобто практично перестає бути смуговим.



**Рис. 16.18.** Характеристики смугових фільтрів при коефіцієнтах зв'язку  $K_1 = K_2 = 15$ , узагальнене розладнання на *а*:  $a = 25$ ; *б*:  $a = 0$

І в смугових, і в режектрних фільтрах керування взаємним розстроєнням резонаторів може здійснюватися електронно, наприклад, за допомогою варикапов, як це виконується в фільтрі рис. 16.4.

**Висновки.** Мікрохвильові пристрої на базі комірок метаматеріалів традиційно моделюються чотириполусниками з каскадним включенням елементів і резонаторів, широко використовуються поняття негативних діелектричної та магнітної проникності. Використання в якості прототипів мостових схем заміщення дозволяє не тільки описати унікальні властивості метаматеріалів, а й істотно оптимізувати їх характеристики на основі отриманих аналітичних моделей. В даний час авторами проводяться дослідження властивостей частотно-селективних поверхонь і датчиків на основі метаматеріалів, вивчається можливість застосування зазначених підходів до акустичних метаматеріалів. Також в сферу наших наукових інтересів входять фізичні процеси, які характеризуються термінами «повільне світло» і

«електромагнітно індукована прозорість». Тривають дослідження з розробки смугових і режекторного фільтрів на базі осередків метаматеріалів.

Слід зазначити, що розглянутий у розділі 16.1 восьмиполіусник є "базовим" не тільки для смугових і режекторного фільтрів, але і для цілого ряду елементарних випромінювачів. Прикладом тому може служити хвилеводні випромінювачі на діелектричних резонаторах с різними модами коливань [21-22]. На базі подібних елементарних випромінювачів можуть бути побудовані антенні решітки з "метаматеріальними" властивостями, зокрема, з можливістю сканування променем в просторі без використання фазообертачей.

## Список літератури

1. Pchenko M., Zhivkov A. Bridge Equivalent Circuits for Microwave Filters and Fano Resonance. UKRMICO 2018. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 560. Springer, Cham, 2019 - P. 277-298.
2. А. с. № 1343469 СССР, МКИ Н 01 Р1/207.
3. Ильченко М.Е., Живков А.П. Полоса затухания в полосовых фильтрах на диэлектрических резонаторах // Изв. высш. учеб. заведений. Радиоэлектроника. – 1987. – Т. 30, № 10. – С. 41–44.
4. Ильченко М.Е., Живков А.П., Шеламов Г.Н. Фильтры СВЧ на взаимно расстроенных резонаторах в параллельных каналах // Изв. высш. учеб. заведений. Радиоэлектроника. – 1990. – Т. 33, № 5. – С. 92–94.
5. Ильченко М.Е., Живков А.П. Полосовые фильтры на диэлектрических резонаторах // IV Нац. конф. по микроволновой технике с зарубежным участием «Митеко-87». – ЧССР, Братислава, 1987. – Т. 2. – С. 131 – 132.
6. Ильченко М.Е., Живков А.П. Микроволновые фильтры повышенной избирательности на диэлектрических резонаторах // VIII Краевая микроволновая конф. «Микон-88», 3–7 октября 1988. – ПНР, Гданьск, 1988. – С. 162–166.
7. А. с. № 1451787 СССР, МКИ Н 01 Р1/20.
8. А. с. № 1518837 СССР, МКИ Н 01 Р1/20.
9. А. с. № 1529322 СССР, МКИ Н 01 Р1/207.
10. А. с. № 1569920 СССР, МКИ Н 01 Р1/207.
11. Ильченко М.Е., Живков А.П. Двухканальный полосовой фильтр СВЧ // Электронная техника, Электроника СВЧ, вып. 9, 1989, с. 12—14.
12. Ильченко М.Е., Живков А.П., Орлов А.Т. Фильтры на базе резонаторов с близкими по частоте модами как ячейки метаматериалов.// Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2016. – № 1 (104). – С. 7–14.
13. А. с. 1529321 СССР, МКИ Н 01 Р1/20
14. А. с. 1739408 СССР, МКИ Н 01 Р 1/203
15. А. с. 1417082 СССР, МКИ Н 01 Р1/20
16. А. с. 1518836 СССР, МКИ Н 01 Р1/20
17. Ильченко М.Е. Инверсия мод колебаний в ячейках метаматериалов / М.Е. Ильченко, А.П. Живков // Tenth International Scientific Conference “Modern Challenges in Telecommunications” (Київ, 19-22 квітня 2016 р.). м. Київ, 2016. Стр.20 – 23.
18. Ильченко М.Е., Живков А.П. Свойства метаматериалов в терминологии колебаний // Міжнародна конференція з інформаційно-телекомунікаційних технологій та радіоелектроніки (УкрМіКо'2016/UkrMiCo'2016, 11–15 вересня 2016 р.) стр. 170-173

19. Ильченко М.Е. Вырожденные колебания в ячейках метаматериалов / М.Е. Ильченко, А.П. Живков // Eleventh International Scientific Conference “Modern Challenges in Telecommunications” (Київ, 18-21 квітня 2017 р.). м. Київ, 2017. Стр.414 – 416.
20. М. Е. Ilchenko and A. P. Zhivkov, “Areas of degeneration oscillations in metamaterial cells,” in 2017 International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo), 2017, pp. 1–4.
21. А. с. 1429202 СССР, МКИ Н 01 Q 15/24
22. А. с. 1538204 СССР, МКИ Н 01 Q 15/24