

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Інститут телекомунікаційних систем  
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра телекомунікацій  
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»  
УДК \_\_\_\_\_

До захисту допущено  
В.о. завідувача кафедри

\_\_\_\_\_ Явіся В.С. \_\_\_\_\_  
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ ” \_\_\_\_\_ 2018\_р.

## Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка,  
(код і назва)

спеціалізація Апаратно-програмні засоби електронних комунікацій

на тему: «Когнітивна архітектура системи 5G на базі взаємодії наземної та супутникової складових»

Виконав: студент \_6\_ курсу, групи T3-71мп  
(шифр групи)

Дробіна Олег Сергійович \_\_\_\_\_ (підпис)  
(прізвище, ім'я, по батькові)

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор Кравчук С.О.  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант \_\_\_\_\_ (підпис)  
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

Рецензент \_\_\_\_\_ (підпис)  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Засвідчую, що у цій магістерській  
дисертації немає запозичень з праць інших  
авторів без відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_ (підпис)

Київ – 2018\_ рік

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Інститут телекомунікаційних систем

( повна назва )

Кафедра телекомунікацій

( повна назва )

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка

(код і назва)

Спеціалізація Апаратно-програмні засоби електронних комунікацій

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

Явіся В.С.

(підпис)

(ініціали, прізвище)

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 р.

### ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Дробіні Олегу Сергійовичу \_\_\_\_\_

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації «Когнітивна архітектура системи 5G на базі взаємодії наземної та супутникової складових» \_\_\_\_\_

науковий керівник дисертації д.т.н. професор Кравчук Сергій Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «\_06\_» «\_11\_» 2018р. № \_4095-с

2. Строк подання студентом дисертації 17.12.2018 \_\_\_\_\_

3. Об'єкт дослідження: телекомунікаційні системи безпроводового зв'язку 5G

4. Предмет дослідження: гібридна когнітивна архітектура типу наземна станція-супутник та дослідження її роботи \_\_\_\_\_

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: описати пропоновану архітектуру системи 5G, провести практичний розрахунок параметрів цієї мережі, описати когнітивну природу данної архітектури і розрахувати енергоефективність супутникової частини.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу: 16 \_\_\_\_\_

7. Орієнтовний перелік публікацій \_\_\_\_\_

8. Дата видачі завдання 20.12.2017

#### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Аналіз наявних архітектур LTE та WiMAX. Історія розвитку архітектур	12.01.18-01.04.18	виконано
2	Ознайомлення та опис різних сценаріїв можливого використання пропонованої архітектури	01.04.18-06.05.18	виконано
3	Ознайомлення та опис когнітивного аспекту супутникової складової	08.07.18-25.08.18	виконано
4	Розрахунок основних параметрів супутникової та наземної складових, а також розрахунок параметрів сигналу, який передається	03.11.18-05.11.18	виконано
5	Оформлення пояснювальної записки про виконану роботу	05.11.18-08.12.18	виконано

Студент

\_\_\_\_\_ (підпис)

\_\_\_\_\_ (ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

\_\_\_\_\_ (підпис)

\_\_\_\_\_ (ініціали, прізвище)

## АНОТАЦІЯ

Текстова частина магістерської дисертації: 94 с., 17 рис., 8 табл. та 32 джерела.

Мета роботи – аналіз наявних систем бездротової передачі інформації, описання шляхів використання пропонованої мережі, опис когнітивності архітектури, розрахунок енергоефективності супутникової складової та основних параметрів наземної складової на прикладі розгортання пропонованої мережі на території України.

На сьогоднішній день світ зіткнувся з проблемами в еволюції використання наземних мобільних мереж і зіткнувся з проблемою ефективності доступних мереж. Найближчим часом всі доступні моделі розгортання мереж не будуть відповідати потребам людей у завантаженні та підкачці інформації за допомогою бездротового зв'язку, оскільки вимоги до цих мереж стрімко зростають у міру потреби в більш високій швидкості та пропускну здатності. Пропонована робота включає в себе ідею нової архітектури, яка забезпечить необхідну потужність з низьким енергоспоживанням і без величезних грошових витрат.

**Ключові слова:** 5G, супутник, когнітивний зв'язок, наземна станція - супутник.

## ABSTRACT

Paper includes 94 pages, 17 images, 8 tables and 32 sources of information.

The purpose of this paper: analysis of available wireless transmission systems, description of ways to use the proposed network, description of cognitive architecture, calculation of energy efficiency of the satellite component and basic parameters of the terrestrial component on the example of the deployment of the proposed network in Ukraine.

Nowadays the world faced some troubles with the evolution in using of terrestrial mobile networks and faced the problem of efficiency of available networks. In the nearest future all available models of network deployment won't fit human needs in downloading and uploading of information using wireless connection as requirements to those networks are growing rapidly as needs in higher speed and capacity of those networks. The proposed work includes an idea on new architecture that will provide humanity with needed capacity with low power consumption and without huge money costs.

**Key words:** 5G, satellite, cognitive connection, terrestrial – satellite connection.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	10
1. СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПІДТРИМКИ МОБІЛЬНИХ МЕРЕЖ.....	15
1.1. Сучасний стан в Україні та світі.....	15
1.1. WiMAX та LTE мережі.....	16
1.2. Аналіз стану технології WiMAX.....	17
1.3. Аналіз стану технології LTE.....	19
1.4. Протокол OFDMA.....	23
1.5. Порівняння двох технологій та підбиття підсумків.....	25
2. ЗАГАЛЬНА КОНЦЕПЦІЯ ПРОПОНОВАНОЇ МОБІЛЬНОЇ МЕРЕЖІ.....	28
2.1. Переваги, які надасть пропонована мережа.....	28
2.2. Архітектура мережі.....	29
2.3. Сценарії використання гібридної мережі.....	32
2.3.1 Надання ширококомовних сервісів.....	32
2.3.2 Послуги мережі доступу до мережі Telesom.....	36
2.3.3 Магістральна технологія: транкінг та зворотний трафік.....	39
2.3.4 Для послуг доставки контенту.....	40
2.4. Функції гібридної архітектури 5G.....	43
2.4.1 Handover між наземним та супутниковим сегментами.....	43
2.4.2 Конвергенція протоколу передачі між наземними та супутниковими сегментами.....	44
2.4.3 Балансування навантаження.....	44
2.4.4 Якість сервісу (QoS).....	45
2.5. Наявні і майбутні тенденції в гібридних супутникових та наземних системах.....	46
Висновки.....	48

					КПІ ім. Ігоря Сікорського 4095-с 10.ТЗ-71мп.2018.ПЗ			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Дробіна О.С.			Когнітивна архітектура системи 5G на базі взаємодії наземної та супутникової складових  Пояснювальна записка	Літ.	Арк.	Акрюшів
Перевір.		Кравчук С.О.					6	114
Реценз.								
Н. Контр.		Петрова В.М.						
Затверд.		Явіся В.С.						

3. КЛАСИФІКАЦІЯ МЕТОДІВ СЛІПОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ ДЛЯ КОГНІТИВНОГО СУПУТНИКА В СПЕКТРАЛЬНОМУ КОНТЕКСТІ. СУТЬ КОГНІТИВНОСТІ АРХІТЕКТУРИ .....	49
3.1 АМС і супутниковий зв'язок .....	49
3.2 Постановка проблеми .....	51
3.2.1 Модель системи та сценарії втручання .....	51
3.2.2 Математична модель включеної супутникової суміші.....	54
3.2.3 Припущення про параметри в реалістичному контексті .....	55
Висновки .....	58
4. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРАХУНКУ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЕКТОВАНОЇ МЕРЕЖІ.....	60
4.1 Розрахунок енергоспоживання та швидкості встановлення сеансу зв'язку для двох сценаріїв розгортання супутника.....	60
4.2 Розрахунок параметрів супутника та підключення до нього.....	62
4.2.1 Розрахунок геометричних співвідношень.....	62
4.2.2 Розрахунок втрат сигналу при передачі через супутникову лінію.....	64
4.2.2.1 Втрати у вільному просторі .....	65
4.2.2.2 Втрати енергії сигналу у атмосфері.....	65
4.2.2.3 Втрати сигналу у опадах .....	67
4.2.2.4 Розрахунок втрат енергії сигналу .....	71
4.3 Визначення основних вимог до наземної складової.....	71
4.3.1 Оцінка трафіку мережі .....	71
4.3.2 Оцінка радіусу сот для наземної складової.....	74
4.3.3 Обґрунтування математичної моделі побудови наземної мережі .....	75
4.4 Оцінка якісних показників .....	79
4.5 Результати енергетичного розрахунку.....	83
4.5.1 Розрахунок відношення сигнал/шум «лінія вниз» .....	83
4.5.2 Розрахунок відношення сигнал/шум «лінія вверх» .....	84
Висновки до розділу .....	84
ВИСНОВКИ .....	86
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ .....	88

						Арк.
					КПІ ім.Ігоря Сікорського _4095-с 10.ТЗ-71мп.2018.ПЗ	7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

**ГСР** – геостаціонарний супутник-ретранслятор

**ННМ** – найбільше навантаження мережі

**НС** – наземна складова

**РЧР** – радіочастотний ресурс

**СК** – середовище користувачів

**СС** – супутникова складова

**СУ** – середовище управління

**ШІ** – штучний інтелект

**ADSL** (*Asymmetric Digital Subscriber Line*) – асиметрична цифрова лінія передачі даних

**АМС** (*Automatic Modulation Classification*) – класифікація автоматичної модуляції

**АМРТ** (*Analytical study of the Mth-Power Nonlinear Transformation*) – аналітичне дослідження нелінійної трансформації.

**CDN** (*Content Delivery Network*) – мережа доставки контенту

**EAP-TLS** (*Extensible Authentication Protocol — Transport Layer Security*) – протокол забезпечення захисту інформації транспортного рівня

**eNB** (*Evolved Node B*) – базова наземна станція

**GEO** (*Geostationary Earth Orbit*) – геостаціонарна орбіта

**HSS** (*home subscriber server*) – домашній абонентський сервер

**ITU** (*International Telecommunication Union*) – міжнародний союз електрозв'язку

**LEO** (*Low Earth Orbit*) – супутник низької навколоземної орбіти

**МІН** (*Media Independent Handovers*) – медіа-незалежний хендовер

**ММЕ** (*mobile management entity*) – вузол управління мобільністю



**OFDMA** (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing Advanced*) – протокол частотного мультиплексування

**PLMN** (*Public Land Mobile Network*) – наземна мобільна мережа загального доступу

**PSTN** (*Public Switched Telephone Network*) – телефонна мережа загального користування

**RAN** (*Radio Access Network*) – мережа радіодоступу

**SNIR** (*Signal to Noise plus Interference Ratio*) - сигнал-шум плюс коефіцієнт інтерференції

**SoI** (*Signal of Interest*) – сигнал інтересу (сигнал, який цікавить систему під час сеансу зв'язку)

**S-RAN** (*Satellite Radio Access Network*) – мережа супутникового радіодоступу

**UE** (*User Equipment*) – обладнання користувача

## ВСТУП

### ПРОБЛЕМАТИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

**Об'єктом дослідження** є телекомунікаційні системи безпроводового зв'язку 5G.

**Предметом дослідження** гібридна когнітивна архітектура типу наземна станція-супутник та дослідження її роботи.

**Проблема, що вирішується** - забезпечення абонентам мобільного зв'язку сучасного набору високошвидкісних телекомунікаційних послуг та підвищення енергоефективності безпроводової системи, що надає дані послуги.

### МЕТА І ОСНОВНІ ЗАВДАННЯ ПРОЕКТУ

**Мета** - аналіз наявних систем бездротової передачі інформації, описання шляхів використання пропонованої мережі, опис когнітивності архітектури, розрахунок енергоефективності супутникової складової та основних параметрів наземної складової на прикладі розгортання пропонованої мережі на території України.

#### **Практичні задачі, на вирішення яких спрямовано проект:**

- 1) детальний аналіз ефективності роботи сучасних LTE та WiMAX систем;
- 2) розробка нової структурної та алгоритмічної бази когнітивної системи 5G на базі взаємодії наземної та супутникової складових;
- 3) дослідження ефективності використання пропонованої системи 5G та проведення розрахунків основних параметрів пропонованої мережі.

## **Значимість проекту для розв'язання економічних і соціальних проблем**

Підвищення енергоефективності роботи систем бездротового радіозв'язку, при збільшенні швидкості передачі даних, для використання в приватних компаніях — провайдерах мобільного зв'язку. Можливе використання для цілей державного та воєнного зв'язку.

## **Сучасний стан проблеми**

На сьогоднішній день в сучасних системах безпроводного зв'язку (LTE, LTE-Advanced, WiMAX) процес передачі даних ділиться на три основні етапи: етап сигналізації між клієнтом, який ініціює передачу, та базовою станцією, етап сигналізації між базовою станцією та клієнтом, якому повинні передаватися дані та етап безпосередньої передачі даних між двома клієнтами, шляхом ретрансляції даних через базову станцію.

Даний підхід являється затратним по часу та енергозатратним, оскільки процеси сигналізації та ретрансляції даних здійснює одна (або декілька) базових станцій, які повинні бути увімкнені у будь який момент часу. При цьому, кожна базова станція повинна відслідковувати користувачів, які знаходяться в зоні покриття даної базової станції, та реєструвати їх присутність у локальних таблицях маршрутизації та додавати і видаляти записи про користувача у випадку появи або зникнення користувача в зоні дії базової станції. Це також призводить до високих даремних затрат енергії системи в цілому. Крім того, наявні системи безпроводного зв'язку дуже погано показують себе, при використанні на місцевостях з рель'єфом, який унеможливорює пряму передачу даних між базовою станцією і користувачем або між двома базовими станціями (гори, міста з великою кількістю забудов).

Все вищесказане свідчить про те, що необхідно провести реорганізацію сучасних архітектур безпроводового зв'язку, у тому числі шляхом гібридизації та інтелектуалізації систем.

### **Методи, засоби, підходи, ідеї, робочі гіпотези, які пропонуються для вирішення завдань проекту**

Для покращення енергоефективності та швидкості передачі даних у безпроводовій системі пропонується використовувати новий тип з'єднання наземна станція — супутник для розділення процесів сигналізації та передачі інформації між складовими нової системи. При цьому супутник, окрім процесу сигналізації, виконує також координуючі функції, тим самим звільняючи наземні базові станції від енергозатрат на підтримку актуальності таблиць маршрутизації, які буде підтримувати супутник.

Система також буде зарекомендована, як когнітивна, оскільки при ініціалізації з'єднання між двома абонентами, супутник буде самостійно приймати рішення про маршрут з'єднання між двома абонентами, а потім буде передавати сигнал активації на ті наземні базові станції, які будуть використовуватися для встановлення сеансу зв'язку. У всі інші моменти часу наземні базові станції будуть знаходитися у режимі очікування, що значно знизить енергозатрати системи, у порівнянні з наявними, які потребують, щоб базові станції були активні у будь який момент часу.

Якщо ж під час ініціалізації сеансу зв'язку супутник буде приймати рішення про неможливість прямого з'єднання між абонентами через проміжні базові станції (наприклад у горах), то супутник буде самостійно відкривати резервний канал зв'язку, де сам він буде виступати ретранслятором. При цьому якість зв'язку буде нижча, ніж при безпосередньому з'єднанні за допомогою наземної базової станції, але система буде надати високу

гарантію можливості встановлення зв'язку між абонентами при наявності перешкод будь якого типу.

### **Очікувані результати світового рівня:**

- а) інтеграція запропонованої архітектури по всьому світу;
- б) використання даної архітектури провайдерами мобільного зв'язку в розвинутих країнах;
- в) покращення наявних систем зв'язку за отриманою технічною документацією;
- г) створення підручника для технічних ВУЗів на різних мовах для вивчення принципу роботи заданої архітектури.

### **Очікуване використання отриманих результатів**

Розроблена когнітивна архітектура системи 5G на базі взаємодії наземної та супутникової складових може бути використана в навчальному процесі:

- 1) при підготовці **1** магістра;
- 2) при підготовці **2** публікацій у виданнях з Переліку ВАК України;
- 3) при оформленні **1** охоронного документу на об'єкт права інтелектуальної власності;
- 4) при розробці та впровадженні **1** нової лабораторної роботи:  
«Моделювання когнітивної архітектури системи 5G на базі взаємодії наземної та супутникової складових»
- 5) при розробці та впровадженні **2** нових лекцій:
  - 5.1) вивчення наявних безпроводних систем передачі даних та висвітлення їх переваг та недоліків;

5.2) навчання новій, розробленій архітектурі, яка відрізняється від попередніх новим типом з'єднання наземна станція — супутник, когнітивністю та новими алгоритмами маршрутизації.

## 1. СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПІДТРИМКИ МОБІЛЬНИХ МЕРЕЖ

### 1.1. Сучасний стан в Україні та світі

На сьогоднішній день світова спільнота переживає пік розвитку мобільних мереж та мобільних засобів передачі інформації. Як показує дослідження [1] у 2018 році трафік передачі даних через мобільні мережі являється більшим, ніж він був у 2013-ому році у 6.3 рази. А згідно з дослідженням [2] викиди газу  $CO_2$  в атмосферу у секторі мобільних технологій зростуть до 178 Мегатон до 2020 року. Це являється одним із основних факторів розвитку способів покращення існуючих мобільних мереж, або розробки абсолютно нових методів побудови мобільних мереж.

На кінець 2014 року по мобільних підключеннях широкосмугового доступу Україна займала 101 місце у світі [3]. Як бачимо дана статистика не надає позитивного впливу на всі аспекти повсякденного життя у країні. У лютому 2015 року відбувся тендер з отримання ліцензій на користування радіочастотним ресурсом (РЧР) для 3G в смугах радіочастот 1920–1935/2110–2125 МГц; 1950–1965/2140–2155 МГц; 1965–1980/2155–2170 МГц, які отримали ТОВ «Астеліт», ПрАТ «МТС Україна» та ПрАТ «Київстар» [4].

Ця подія стала поштовхом до поступового впровадження технологій 4-го покоління (4G), початком якого було проведення тендеру на отримання ліцензій на частоти для LTE і впровадження даного покриття на території держави у 2017 році. Відомо, що до 4-го покоління (4G) відносять технології, які забезпечують швидкість передачі даних на рівні 100 Мбіт/с у русі (від 120 км/год) та на рівні 1 Гбіт/с у стаціонарному положенні. У 2012 році Міжнародний союз електрозв'язку (ITU) офіційно визнав технологію LTEAdvanced (стандарт 3GPPRelease10) і технологію Mobile WiMAX

Release2.0 (стандарт IEEE802.16m), відому ще як Wireless-MAN-Advanced, WiMAX2 або WiMAX-Advanced, бездротовими стандартами зв'язку 4G, присвоївши сертифікат «IMT-Advanced (вдосконалена система міжнародного рухомого зв'язку)» — офіційний статус мереж четвертого покоління [5].

### 1.1. WiMAX та LTE мережі

Технології WiMAX та LTE настільки стрімко розвиваються, що їх стандарти розробляються в часі майже паралельно.

Основним джерелом інформаційного забезпечення є результати аналізу документів та новин сайтів WiMAX Forum (організації, створеної на основі робочої групи IEEE) та 3GPP (партнерської телекомунікаційної асоціації), а також міжнародні та вітчизняні фахові періодичні видання.

Були проаналізовані документи: WMF-T31-132-v02 (технічні вимоги для підтримки співіснування широкосмугових бездротових мереж WiMAX на базі продуктів WiMAX Forum Certified з бездротовими мережами LTE широкосмугового доступу на основі 3GPP специфікацій с точки зору мережевих операторів); WMF-T31-136R022v02 (вимоги до версії WiMAX2.2, які визначають особливості співіснування з попередніми версіями та додаткові функції у розвитку технології WiMAX-Advanced); WMF-T21-003-R020v02 (вимоги до радіоінтерфейсу WiMAX-Advanced).

На глобальному рівні інформаційно-комунікаційні технології досягли великого успіху, однак, зберігається розрив в області широкосмугового зв'язку між розвиненими країнами і країнами, що розвиваються. Наприклад, Південна Корея на кінець 2014 року мала 100% охоплення населення і використання технологій 4G. В 2015 році рівень проникнення рухомого



широкопasmугового зв'язку становив 87 % в розвинених країнах у порівнянні з 39 % в країнах, що розвиваються [6–9].

Хоча по цій тематиці було написано багато наукових праць, у вітчизняних виданнях недостатньо відстежений сучасний розвиток технології Mobile WiMAX. Це пояснюється тим, що в Україні, де вона не набула широкого розповсюдження, оскільки було взято курс на розвиток LTE.

## 1.2. Аналіз стану технології WiMAX

Технологія WiMAX більш проста в архітектурному плані і має вищий рівень захисту у порівнянні з мережами LTE. Ці дві архітектури використовують два різні протоколи захисту даних і аутентифікації: WiMAX використовує протокол EAP-TLS (Extensible Authentication Protocol — Transport Layer Security) на основі сертифікатів, які були видані заздалегідь, а архітектура LTE використовує ідентифікаційні карти USIM.

Mobile WiMAX більш старіша, ніж LTE на 2-3 роки. Вперше мережі Mobile WiMAX були запущені в комерційну експлуатацію в Домініканській республіці (ONEMAX) і в Чилі (Telmex) у кінці 2007 року, в той час як запуск в експлуатацію першої у світі мережі на базі технології LTE відбувся у Швеції (TeliaSonera) у грудні 2009 року [10].

На момент появи мереж LTE, WiMAX була вже розпоширеною мережею з високошвидкісним широкопasmуговим доступом, а її мережі були розгорнуті 476 операторами у 149 країнах світу.

WiMAX використовує технологію TDD з агрегацією несучих, методом модуляції і кодування сигналу 256QAM, 8x8MIMO, балансуванням навантаження з метою досягти мобільної швидкості 1 Гбіт/с. Оператори

мобільного ринку запозичили цей підхід і почали розгортання LTE TDD архітектури. Зростає швидкими темпами і ринок пристроїв TDD LTE [11]. Також пристрої, які використовують, технологію WiMAX, можуть підтримувати зв'язок при переміщенні на максимальній швидкості 120 Км/Год.

Японський оператор UQ Communications забезпечив 100% покриття території Японії і на разі являється провідним постачальником WiMAX у світі. Компанія розробила власний проект UQ WiMAX і розширяє модельний ряд абонентських пристроїв, включаючи WiMAX-Advanced-смартфони, ноутбуки, збільшивши швидкість завантаження смуги пропускання WiMAX-Advanced (Release2.1, Release2.2) до 220 Мбіт/с. У травні 2014 року підтримка смартфонів, які використовують цю технологію, була збільшена, а у травні 2015 року кількість контрактів компанії перевищила 10 млн. [12].

Говорячи про перспективи технології WiMAX, можна відмітити, по-перше, що WiMAX-Advanced буде й далі розвиватися, підтримуючи різні радіотехнології в рамках єдиної мережі, по-друге, WiMAX-форум буде розвивати технології WiMAX для інтелектуальних енергетичних мереж (Smart Grid), він розробив новий стандарт — WiGRID, який орієнтований виключно на завдання комунальних енергетичних мереж, по-третє, одне із значущих напрямків — стандарт AeroMACS (Aeronautical Mobile Airport Communications System) для побудови інтегрованих систем зв'язку аеропортів. Новий стандарт ґрунтується на стандарті IEEE 802.16, він має забезпечувати зв'язок в зоні аеропорту між літальними апаратами, спеціальним наземним транспортом, персоналом і різними фіксованими точками зв'язку. Для систем AeroMACS спеціально виділений діапазон 5,0–5,1 ГГц [13] [14].

### 1.3. Аналіз стану технології LTE

LTE (Long term evolution) розглядається як еволюція технології UMTS, є стандартом високошвидкісного бездротового зв'язку передачі даних розроблений групою 3GPP визначеного специфікаціями у Релізі 8 від 2008 року (3GPP Release 8) та доповненого у Релізі 9 від 2009 року (3GPP Release 9).

Формально LTE відноситься операторами мобільного зв'язку та виробниками до стандарту 4G, хоча не належить до нього фактично, оскільки не відповідає, на відміну від LTE-Advanced (3GPP Release 10) або скорочено LTE-A, технічним критеріям мобільного зв'язку 4-го покоління визначеного вимогами «IMT-Advanced» Сектором радіозв'язку Міжнародного телекомунікаційного союзу.

Для просування технології на ринках північної Америки торговою асоціацією 4G Americas, яка популяризує технології групи 3GPP, було впроваджено термін «4G LTE». Сама аббревіатура «LTE» є зареєстрованою торговою маркою і знаходиться в розпорядженні Європейського інституту стандартів телекомунікації, як і логотипи «LTE», «LTE-Advanced», «LTE-Advanced Pro». [15]

Мережі 4G на основі стандарту LTE працюють у всіх чинних діапазонах частот, що виділені для стільникового зв'язку по всьому світу. У Північній Америці 700, 750, 800, 850, 1900, 1700/2100 (AWS), 2500 та 2600 MHz (Rogers Communications, Bell Canada), відповідно діапазони 4, 7, 12, 13, 17, 25, 26, 41; 2500 MHz у Південній Америці; 800, 900, 1800, 2600 MHz у Європі, відповідно діапазони 3, 7, 20; 1800 та 2600 MHz у Азії, відповідно діапазони 1, 3, 5, 7, 8, 11, 13, 40; 1800 MHz та 2300 MHz у Австралії та Новій Зеландії відповідно

діапазони 3, 40. Також мережі LTE можуть підтримувати зв'язок з пристроями, які знаходяться на швидкості 450-500 Км/Год.

Табл.1.1. Категорії користувацького обладнання LTE

<b>Категорія користувацького обладнання LTE</b>	<b>Максимальна швидкість завантаження (Мбіт/с)</b>	<b>Максимальна швидкість вивантаження (Мбіт/с)</b>	<b>Специфікація 3GPP (Номер релізу)</b>	<b>Стандарт 3GPP</b>
NB1	0.25	0.25	Rel 13	NB-IoT
M1	1	1		LTE Cat M1 (eMTC)
0	1	1	Rel 12	LTE Cat 0
1	10.3	5.2	Rel 8	LTE Cat 1
2	51	25.5		LTE
3	102	51		
4	150.8	51		
5	299.63	75.4		
6	301.5	51.0		Rel 10
7	301.5	102		
8	2998.5	1 497		
9	452.2	51	Rel 11	
10	452.2	102		
11	603	51		

12	603	102		
13	391.7	150	Rel 12	
14	3917	9 585		
15	750	226		
16	979	-		
17	25 065	-	Rel 13	LTE-Advanced Pro
18	1174	-		
19	1566	-		(LTE-A Pro)

Швидкість завантаження за стандартом 3GPP LTE в теорії досягає 326,4 Мбіт/с (download), і 172,8 Мбіт/с на вивантаження (upload). Практично забезпечує швидкість передавання даних від базової станції до пристрою абонента до 100 Мбіт/с і швидкість від абонента до базової станції — до 50 Мбіт/с [33].

LTE еволюціонувала з сімейства технологій 3GPP і використовує технологію 3G UMTS як базову архітектуру та UTRAN (Universal Terrestrial Radio Access Network) як технологію забезпечення коректної маршрутизації. На рисунку 1.1. представлено загальну архітектуру LTE на базі UNTRAN.

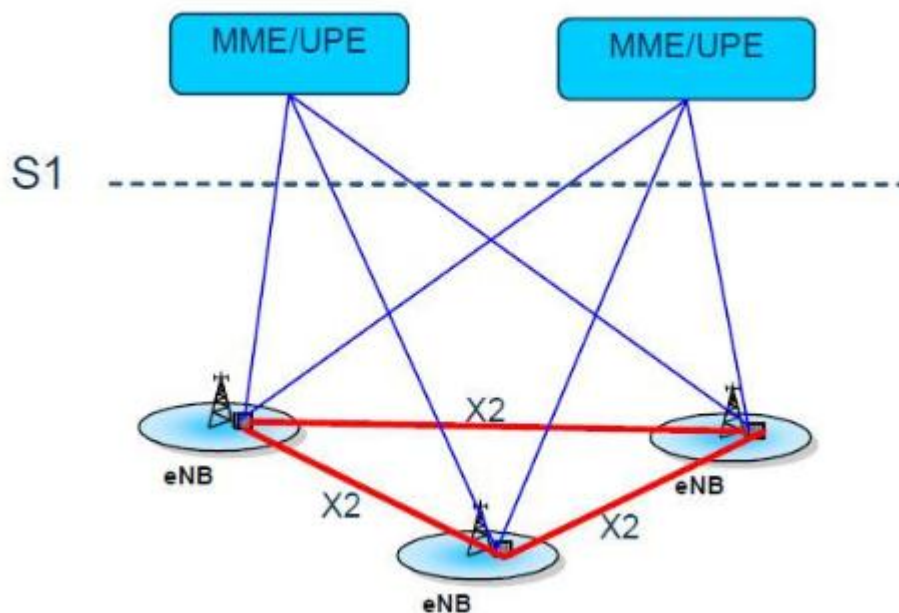


Рис.1.1 Загальна архітектура мережі LTE на базі UNTRAN

Базово LTE складається з Mobility Management Entity (MME) – складова управління мобільною мережею, User Plane Entity (UE) – середовище користувача, evolved Node B (eNB) – базова станція. Базові станції з'єднані між собою новим інтерфейсом під назвою X2, який дає змогу здійснювати зв'язок швидше і надає змогу обійтися без передачі даних на Radio Network Controller (RNC) – контролер радіомережі, який був присутній в технології 3GPP і який збільшував час на встановлення з'єднання.

Інтерфейс S1 використовується у службових цілях для з'єднання БС з MME.

Базові станції (eNB) виконують наступні функції:

- Контроль радіочастотного ресурсу
- Компресія та кодування IP – заголовку

- Планування та розсилання широкомовного трафіку та пейджингових повідомлень
- Проведення замірів та перевірки конфігурацій і відправка по ним звітів

MME виконує наступні функції:

- Пересилання пейджингових повідомлень між eNB
- Контроль безпеки
- Регулювання мобільного стану в режимі очікування
- Захист шифрування та захист цілісності сигналів без доступу

#### **1.4. Протокол OFDMA**

Протокол OFDMA походить від протоколу OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), метод мультиплексування (поєднання кількох потоків даних в один спільний простір), який під-розподіляє даний радіо спектр на набір ортогональних під-частот, через які передається інформація.

Кожен під-потік передається на окремій під-частоті і модулюється, наприклад, квадратуро-амплітудною модуляцією. Окрім того, кожен промодульований цифровий під-потік є ортогональним один до одного. Це виключає взаємні завади між під-потоками та дозволяє використовувати частотний спектр максимально щільно без потреби додаткового простору між під-частотами. На рис. 1.2 зображено протокол OFDMA у просторово-часовому представленні.

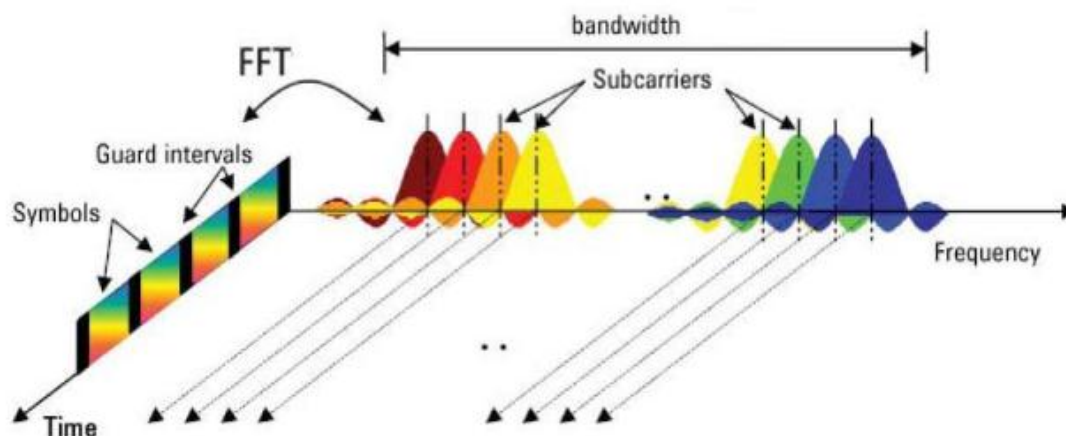


Рис.1.2 Протокол OFDMA у проторово-часових координатах

Замість того щоби передавати високопоточковий інформаційний сигнал на одній несучій радіо частоті, цей сигнал мультиплексується на декілька низькопоточкових сигналів на різних піднесучих за допомогою зворотнього швидкого перетворення Фур'є, кодується і до кожної піднесучої додається заголовок (захисний інтервал), для ідентифікації піднесучої, а потім передаються в рамках несучої частоти, але на різних піднесучих.

На прийомній стороні сигнал демультимплексується на допомогою швидкого перетворення Фур'є і відновлюється по заголовкам інформації внесених у піднесучі.

Цей протокол використовується обома технологіями LTE та WiMAX, але в технології LTE він використовується тільки на завантаження, у той час як на підкачку використовується протокол SC-FDMA, який відрізняється тим, що піднесучі займають виділений діапазон не рівномірно (як це працює в класичному OFDMA) і це дає змогу підвищити стійкість до Гаусовського шуму та до інших перешкод.



### 1.5. Порівняння двох технологій та підбиття підсумків

По-перше технології LTE та WiMAX відрізняються допустимою пропускною здатністю: LTE може надати пропускну здатність до 100 МГц, в той час як технологія WiMAX може дати лише 40 МГц. По-друге обидві архітектури базуються на архітектурі flat-ip. Ця архітектура надає можливість ідентифікувати пристрої у мережі використовуючи символні імена, на відміну від ієрархічної архітектури, яка використовує IP-адреси і розділити трафік на розрізнені складові. Про flat-ip детальніше піде розмова пізніше. По-третє пристрої, які підтримують технологію LTE можуть працювати у русі на швидкості 450-500 км/год при безперебійному зв'язку, у той час як пристрої технології WiMAX можуть розраховувати на безперебійні сеанси зв'язку на максимальній швидкості 120 км/год. Обидва стандарти підтримують MIMO конфігурації. Технології WiMAX та LTE підтримують технології доступу OFDMA на завантаження, у той час як WiMAX використовує технологію доступу OFDMA на підкачку, а LTE використовує в цей же час технологію SC-FDMA. Радіус сот у цих технологій різняться: у WiMAX соти мають радіус 20.7 км при полосі пропускання (ПП) 3.5 – 7 МГц і 8.4 км при ПП 5 – 10 МГц, у той час як LTE має радіус сот 5 км. Технологія WiMAX може підтримувати одночасне з'єднання 100-200 користувачів в границях однієї соти, а LTE в цей же час надає одночасне з'єднання для більше 200 користувачів при ПП до 5 МГц і для більше 400 користувачів при більшій ПП. Ці дві архітектури використовують два різні протоколи захисту даних і автентифікації: WiMAX використовує протокол EAP-TLS (Extensible Authentication Protocol — Transport Layer Security) на основі сертифікатів, які були видані заздалегідь, а архітектура LTE використовує ідентифікаційні карти USIM.

Результати порівняння цих двох технологій наведено у таблиці 1.2.

Табл. 1.2. Порівняння технологій WiMAX та LTE

<b>Характеристика</b>	<b>LTE</b>	<b>WiMAX</b>
Пропускна здатність (МГц)	100	40
Архітектура, яка використовується	Flat-ip	Fla-ip
Протокол, який використовується на завантаження	OFDMA	OFDMA
Протокол, який використовується на підкачку	SC-FDMA	OFDMA
Максимальна швидкість користувачів	450-500	120
Радіус покриття сотами (км)	5	20.7 при ПП 3.5 – 7 МГц 8.4 при ПП 5 – 10 МГц
Кількість абонентів, яких може підтримати одна БС (пристр.)	200-400	100-200
Протокол захисту даних	USIM	EAP-TLS

Як бачимо, технологія WiMAX суттєво виграє лише у радіусі покриття сотами, але суттєво програє по пропускній здатності, допустимій швидкості

переміщення користувачів та кількості абонентів, яких може підтримувати одна БС.

Було б непогано розвинути наявну технологію LTE або розробити абсолютно нову технологію, яка б містила в собі всі переваги і LTE і WiMAX, а також показувала б кращі результати за наявними показниками і була енергетично ефективною. У даній роботі пропонується ввести супутникову когнітивну складову і розробити гібридну систему, яка б повністю замінила наявні технології, або стала б їх наступним еволюційним кроком.

## 2. ЗАГАЛЬНА КОНЦЕПЦІЯ ПРОПОНОВАНОЇ МОБІЛЬНОЇ МЕРЕЖІ

### 2.1. Переваги, які надасть пропонована мережа

Основною концепцією є розділ середовища управління (СУ) та середовища користувачів (СК), розвиток когнітивності (автономності та самонавчачемості) СУ у мережі радіодоступу (RAN). СУ повинно надавати покриття через макро-соти на низьких частотах, у той час як СК може працювати на високих частотах, забезпечуючи покриття через мікро-соти. СУ може працювати на частотах від 3.5 до 10 ГГц, оскільки на сьогоднішній день ці частоти широко не використовуються і у майбутньому передбачається виділення ліцензій на використання даного діапазону. Використання такого діапазону частот може надати покращення у пропускній здатності, бо такі частоти можуть дати полосу пропускання до 100 МГц [16].

В спектральному плані ця мережа також являється ефективною, оскільки *СУ та СК оперують в різних частотних діапазонах, що не буде призводити до накладення трафіку різних середовищ один на одного*. СУ та СК можуть підтримуватися відділеними нодами, а не одним і тим же нодом. Також розподіл на СУ та СК надає операторам мобільного зв'язку більше гнучкості, оскільки керування мережею повністю відділене від середовища безпосередньої взаємодії між користувачами мережі [17].

В цій роботі запропоновано розділити СК та СУ на дві частини, в яких роль СУ буде виконувати супутникова частина, а роль СК буде виконувати наземна частина, яка представлена БС. Супутникова частина буде використовувати так званий L-діапазон дециметрових хвиль (1-2ГГц), так як це запропоновано в системі BGAN system компанії Inmarsat [18].

Супутникова частина також має когнітивність, тобто штучний інтелект (ШІ), який може бути використаний для *підвищення ефективності з'єднання* та покращити використання наявного радіоресурсу.

Когнітивність також включатиме в себе *обізнаність супутниковою частиною про топологію розміщення БС в зоні покриття супутника*, а також можливість побудови оптимальних шляхів передачі трафіку. Також в цілому супутники будуть надавати більшу зону покриття у порівнянні з традиційними LTE та WiMAX мережами, в яких супутникове покриття відсутнє. Один супутник може надавати покриття для усієї країни, цим самим зменшуючи затрати на підтримку контролювання трафіку на кожній з БС та зменшуючи витрати на підтримку інфраструктури.

Окрім цього, трафік сигналізації та трафік безпосередньої передачі інформації між абонентами буде розподілено, що *збільшить ефективність використання радіочастотного ресурсу (РЧР) та збільшить загальну швидкість обігу інформації*.

## 2.2. Архітектура мережі

Міжнародний союз електрозв'язку (ITU) визначає «*гібридну наземно-супутникову систему*», як систему, в якій присутні наземна та супутникова складові, які пов'язані між собою, але оперують незалежно один від одного [19]. В таких системах наземна та супутникова складові використовують різні системи мережевого управління і можуть працювати в різних частотних діапазонах.

На рис. 2.1 представлено загальну архітектуру пропонованої когнітивної мережі 5G на базі взаємодії наземної та супутникової складових, в якій user equipment (UE) – обладнання користувачів працює в двох режимах, зв'язуючись одночасно з супутником та з eNB.

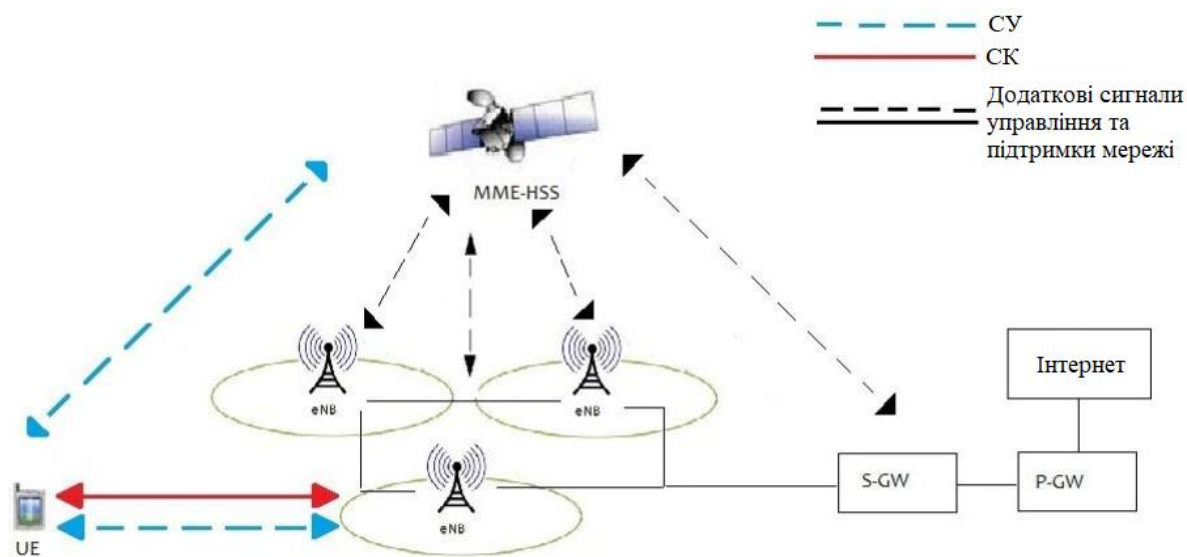


Рис. 2.1 – Архітектура пропонованої мережі 5G

З вискоархітектурної точки зору, оскільки *супутник* може надати покриття усїєї наземної мережі, він також *використовується як Home Subscriber Server (HSS)* – сервер інформації про користувачів і, як видно з назви, містить в собі інформацію по всім користувачам і БС в зоні покриття.

Також, оскільки *супутник* може з'єднуватись з магістральною мережею (S-GW) і як для отримання/передачі даних, так і з метою сигналізації, то супутник може також *використовуватися як Mobility Management Entity (MME)* – вузол управління мобільністю, який відповідає за управління мобільністю абонентів.

Наземна складова, у свою чергу, складається з сот, в центрі яких знаходяться БС, які між собою з'єднанні через опто-волоконні кабелі. Також опто-волокно використовується для з'єднання БС з S-GW. Цей підхід дозволяє отримати швидку і надійну передачу даних між складовими наземної мережі, а також дозволяє мінімізувати помилки при передачі і латентність (інтервал

затримки після закінчення передачі однієї порції інформації та перед початком передачі нової порції).

По причині того, що для деяких успішних операцій UE необхідно мати одночасне з'єднання і з СУ і з СК, наземна та супутникова складові розділені та оперують незалежно один від одного. Наприклад, координація використовуваної енергії та процедура handover (процес перепідключення від однієї БС до іншої у випадку переходу UE з однієї соти до іншої) потребують точних вимірювань, які не можуть бути забезпечені через супутникову складову через високу латентність. Отже взаємодія СУ та СК є невід'ємною частиною успішної роботи UE.

*Основними рушійними силами гібридної системи, у порівнянні з LTE та WiMAX, є, як зазначено нижче:*

- 1) Розширення площі покриття послугами;
- 2) Розширення спектру надаваних послуг та/або нижча ціна для користувачів і операторів;
- 3) Покращення Quality of Service (QoS), які надаються користувачам та операторам;
- 4) Оптимізація використання РЧР шляхом оптимального вибору відповідної мережі для передачі того чи іншого виду інформації у рамках надання певного виду послуг (наприклад багатоадресна або широкопasmова адресація може бути забезпечена супутником, у той час, як послуги передачі голосового трафіку та передача типу точка-точка, можуть бути забезпечені наземною складовою), а також шляхом мінімізації навантаження на наземну мережу в найбільш завантажених районах шляхом передачі частини трафіку через супутник з відповідним механізмом балансування навантаження, який буде підтримуватися супутником через природу його когнітивності;

- 5) Збільшення спектру надаваних послуг та/або підвищення стійкості уже наявних;
- 6) Оптимізація операційної / загальної інвестиційної вартості під час розгортання нової послуги;
- 7) Оптимізація енергії, необхідної для передачі інформації користувачам, шляхом використання можливості використання супутника, який може використовувати ширококомовний режим передачі даних та може бути підпитаний за допомогою сонячних батарей під час таких операцій.

### **2.3. Сценарії використання гібридної мережі**

Нижче обговорюються різні сценарії, які можуть бути передбачені для використання гібридної архітектури. Ці сценарії засновані на стандарті ETSI TR 103124.

#### **2.3.1 Надання ширококомовних сервісів**

Однією з головних, традиційних ролей супутникових систем була і, ймовірно, залишиться багатоадресна передача одного і того ж трафіку користувачам, які розкидані по великій географічній зоні. Цей сценарій полягає в поєднанні супутникового та наземного компонента для трансляції медіа-контенту, включаючи радіо і телевізійні програми, на пристрої, які знаходяться у русі (наприклад в автомобілі) або на портативні пристрої.

Служби мовлення зазвичай вимагають надання однонаправленої супутникової лінії між мережевим компонентом і сегментом супутника, головним чином тому, що споживання високої пропускної здатності в такій реалізації здійснюється по низхідній лінії зв'язку (тобто від мережі до обладнання користувача), тоді як вимога про пропускну здатність на висхідній



лінії менша і, отже, може бути реалізована наземним компонентом гібридної архітектури. На рис.2.2 представлено приклад реалізації такого сценарію, коли користувач мобільного пристрою запросив відеозапис з мережі Інтернет або інший сервіс, який вимагає високої пропускної здатності.



Рис.2.2 - Однонаправлений супутниковий зв'язок, реалізований в наземній мережі для мобільного обладнання користувача

З точки зору частотного спектру, переважним є частотний діапазон, призначений для мобільних супутникових послуг Mobile Satellite Services (MSS) і це так званий L-діапазон (1.5-1.6 ГГц) або S-діапазон (1.9-2 ГГц). Це дозволяє працювати з термінальним пристроєм, обладнаним всенаправленою антеною, наприклад пристроєм на автомобілі або портативним терміналом.

Кожен кінцевий термінал користувача повинен мати можливість отримувати як супутникові, так і наземні сигнали, щоб забезпечити плавну безперервність роботи над покриттям, а також дозволяти комбінування наземних та супутникових сигналів, коли обидва мають прийнятну якість сигналу.

Подібна реалізація може існувати для стаціонарних терміналів, де користувач, підключений до широкосмугової мережі ADSL, може отримувати послуги з високою пропускною спроможністю, такі як IPTV або Video on

Demand через супутниковий сегмент мережі, тоді як інші низькочастотні сервіси можуть обслуговуватися наземною складовою ( в даному випадку - мережею ADSL). Служби запитів від користувачів також обслуговуються лише наземним компонентом.

ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line*) — технологія широкопasmового доступу, яка забезпечує передачу швидкісного цифрового сигналу звичайною аналоговою телефонною лінією, та дозволяє одночасно користуватися телефоном і Інтернетом [20]. Кращим спектром є діапазони частот, які виділяються на послуги фіксованого або трансляційного супутникового зв'язку (FSS або BSS) в спектральному діапазоні Ku або Ka.

Ku-діапазон— діапазон частот сантиметрових хвиль. Використовується в супутниковому телебаченні. Частоти Ku-діапазону розміщені в межах від 10.7 до 12.75 ГГц. Для супутникового телебачення використовуються два основних діапазону: Ku-діапазон (10.7 — 12.75 ГГц) і C-діапазон (3.5 — 4.2ГГц). Європейські супутники транслюють переважно в Ku-діапазоні. Російські та азійські супутники зазвичай транслюють в обох діапазонах.

*Ku-діапазон умовно поділений на три піддіапазони:*

- Перший діапазон (10.7-11.8ГГц) — FSS-діапазон;
- Другий діапазон (11.8-12.5ГГц) — DBS-діапазон;
- Третій діапазон (12.5-12.75ГГц) — використовується французькою фірмою «Telecom».

Ka-діапазон - діапазон частот сантиметрових і міліметрових довжин хвиль, використовуваних в основному для супутникового радіозв'язку та радіолокації. За визначенням IEEE, цей діапазон простирається від 26,5 до 40

ГГц електромагнітного спектра (що відповідає довжинам хвиль від 1,13 до 0,75 см).

На Рис. 2.3 представлений такий сценарій. Перевагою такої реалізації може бути збереження вартості розгортання інфраструктури, тобто антеною та іншими системами підтримки прийому супутникових послуг, оскільки канал Ku вже використовується для телевізійної передачі, а отже вже розгорнута інфраструктура може бути використана для надання послуг широкосмугового доступу з невеликою кількістю змін у конфігурації.

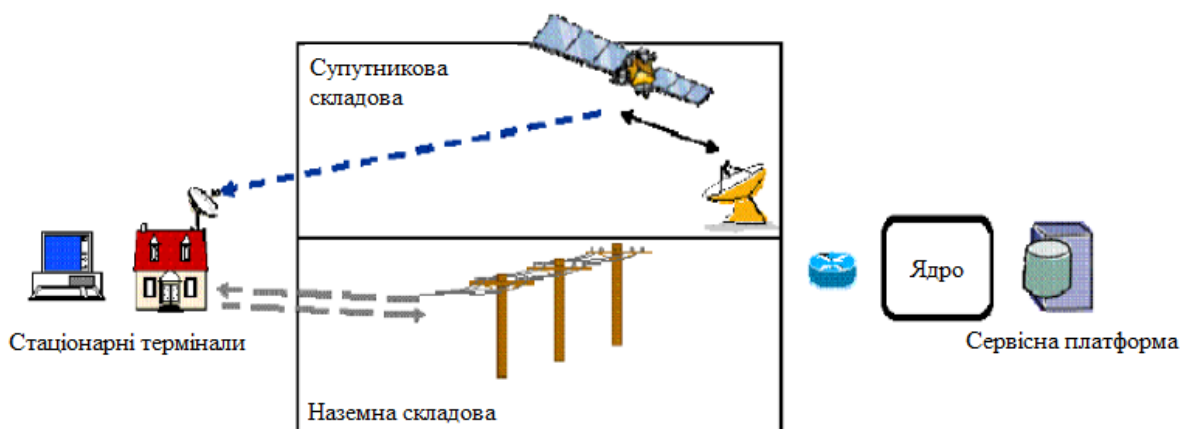


Рис 2.3 - Однонаправлений супутниковий зв'язок, реалізований в наземній мережі для стаціонарного обладнання користувача

### 2.3.2 Послуги мережі доступу до мережі Telecom

Для цілей географічного розширення послуг та для обміну трафіком у мережах 5G супутникові системи можуть переважно використовуватися як додаткова мережа супутникового радіодоступу (S-RAN). S-RAN - це спільне розширення класичного наземного стільникового 2G / 3G RAN. Коли S-RAN доступний, найбільш очевидним посиленням є можливість значно розширити охоплення класичних стільникових бездротових мереж, які не покривають віддалені райони. У цьому випадку може бути здійснено балансування навантаження або диференціацію трафіку.

Розміщення трафіку може враховувати або критерії якості послуг (розмовний трафік через наземну мережу, потокове передавання через супутник) або тип програми (застосування точка-точка через наземні мережі, мультимедійні трансляції / багатоадресні сервіси (MBMS) через супутник) при прийнятті рішення який сегмент зв'язку, супутник або наземний, призначений для надання послуг. Нижче, на рис. 2.4 показано таке впровадження мережі з мобільним обладнанням користувача, яке обслуговується двонаправленою супутниковою лінією, а також традиційною наземною мережею.

Супутникова мережа працює як у прямому, так і в зворотному напрямках, щоб забезпечити альтернативну мережу доступу для мобільного обладнання користувача. Таке ж обладнання може також під'єднатись до наземної стільникової мережі, щоб отримати доступ до тих самих або інших послуг. Спектр супутникового компонента в такій гібридній архітектурі - це смуга частот, що призначена для мобільних супутникових послуг (MSS) в L- (1,5 ГГц і 1,6 ГГц) або S-діапазоні (1,9 ГГц і 2 ГГц).



Рис. 2.4 - Двосторонній супутниковий зв'язок, реалізований у наземній мережі для мобільного обладнання користувача

Ці діапазони частот є кращими, тому що одне й те саме обладнання користувача може працювати без будь-яких переривань послуг на супутнику, а також наземному сегменті гібридної архітектури. Це дозволяє працювати з термінальним пристроєм, обладнаним всенаправленою антеною; наприклад, автомобільні або портативні термінали. Як правило, перевагу надають наземному компоненту, якщо він доступний, через дефіцит ресурсів супутникового компонента.

Ідея полягає в оптимізації використання ресурсів та використання наземної інфраструктури для послуг / додатків, що потребують меншої пропускної спроможності. Для конкретних інтерактивних служб Multicast / Broadcast супутник може бути кращим для прямої лінії зв'язку, тоді як наземний компонент використовується для видачі запитів на обслуговування.

Подібна реалізація може бути зроблена для стаціонарного термінального обладнання, де двосторонній супутниковий зв'язок може бути використаний спільно з існуючою наземною мережею, скажімо, в цьому

випадку, широкопasmовою мережею ADSL, як показано на рис. 2.5. Служби запитів від користувачів можуть бути подані на наземному каналі з метою оптимального використання супутникових ресурсів, а сервіси, що споживають високу пропускну здатність, такі як IPTV або відео за запитом, можуть бути ефективно обслуговуватися за допомогою сегмента супутникового зв'язку. Кращим спектром є діапазони частот, які виділяються на послуги фіксованого або трансляційного супутникового зв'язку (FSS або BSS) у групі Ku або Ka. Знову ж таки, у цьому випадку, попередньо розгорнута інфраструктура може бути використана для збільшення рентабельності системи.



Рис. 2. 5 - Двосторонній супутниковий зв'язок, реалізований в наземній мережі для фіксованого терміналу

Додавання двостороннього посилання на супутник забезпечує більшу гнучкість у маршрутизації трафіку між обома компонентами, в той же час це забезпечує більшу стійкість до можливого переривання служби наземного каналу доступу (як правило, до декількох днів або тижнів збоїв). Супутниковий зв'язок також може бути двонаправленим, оскільки вимога до

пропускної здатності для завантаження також зростає, оскільки все більше і більше користувачів завантажують відео тощо.

### 2.3.3 Магістральна технологія: транкінг та зворотний трафік

У віддалених районах або ворожих середовищах, таких як військово-морські сили, військові операції або розвідувальні місії, коли проникнення наземної мережі майже незначне, можна використати гібридну мережу, яка може використовуватись як супутниковий сегмент мережі для зв'язку двох або більше наземних сегментів мережі, які можуть бути PSTN, PLMN або будь-які інші дротові / бездротові мережі.

Цей тип налаштування, тобто використання сегменту супутника для з'єднання різних сегментів однієї або різних мереж, також може бути використаний для надання послуг, особливо в разі надзвичайних ситуацій, коли група користувачів, таких як рятувальні команди або розвідувальні команди, повинна бути обслуговувана в віддалених районах, як показано на рис. 2.6.



Рис. 2.6 - Резервне обслуговування мобільних послуг із використанням супутникового сегмента в гібридній системі

Ще одне широке використання супутникових систем в гібридних мережах полягає у взаємозв'язку приватних, локальних мереж (LAN) чи мобільних Ad-hoc мереж (MANETs), як показано на рис. 2.7. Вузли мережі MANETs, як правило, рухаються в районах без видимості між сусідніми вузлами і тому мають обмежені можливості з'єднання. Гібридна архітектура зосереджена на широкосмуговому інтер-MANET-з'єднанні, використовуючи у кожному сегменті MANET певний центральний вузол для зв'язку з іншими сегментами MANET. Доступ до мережі Інтернет для конкретних програм, наприклад, для завантаження цифрових карт місцевості, також можливий за такої архітектури.

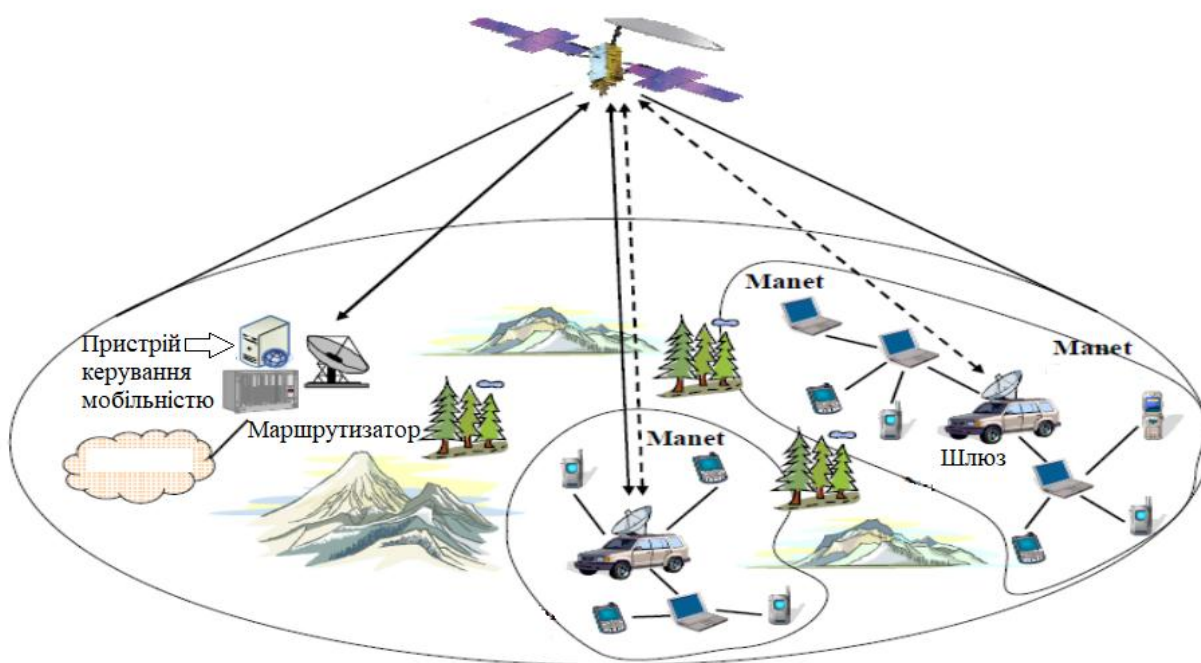


Рис. 2.7 - Гібридна супутникова наземна архітектура з MANETs

### 2.3.4 Для послуг доставки контенту

Мережа доставки контенту (CDN) спрямована на поширення / реплікацію мультимедійного вмісту до центрів обробки даних у транспортній



мережі, з тим щоб вміст було надано кінцевим користувачам з більш високим рівнем доступності та продуктивності служб, уникаючи випадків недоступності веб-сайту, через надто велику кількість запитів на доступ до веб-сторінки. Також знижується загальне навантаження на сервери веб-сайтів, що також підвищує доступність. Це також зменшує вимоги до мережевої магістралі та зменшує інвестиції в інфраструктуру.

CDN сьогодні надає велику частку інтернет-контенту, включаючи веб-об'єкти (текст, графіку, URL-адреси та скрипти), завантажуванні об'єкти (мультимедійні файли, програмне забезпечення, документи), програми (електронна комерція, портали), живі передачі даних за запитом та соціальні мережі. Зі збільшенням числа центрів обробки даних, економічно ефективна багатоканальна/трансляційна передача даних, на яку здатен супутник, стає більш актуальною для CDN. Супутникові системи можуть бути ефективно використані в мережах CDN для передачі даних на сервери CDN та запис цих даних в кеші завдяки багатоадресній передачі даних.

Переваги використання супутників включають в себе транспортування великих об'ємів даних, між будь-якими CDN-вузлами, розташованими в межах супутникового охоплення в одному супутниковому хопі, а також розвантаження наземних мереж, з тим щоб вони могли легше працювати з короткочасними з'єднаннями, що потребують малих затримок (time-чутливі послуги).

Наземний компонент гібридної архітектури, що використовується для CDN, можна створити з мереж проводового / бездротового доступу з центрами обробки даних для поширення вмісту безпосередньо до фіксованих та мобільних кінцевих користувачів. Супутниковий компонент засновується

на геостаціонарних супутниках і з'єднує центри обробки даних з сервісними платформами, як показано на рис. 2.8.

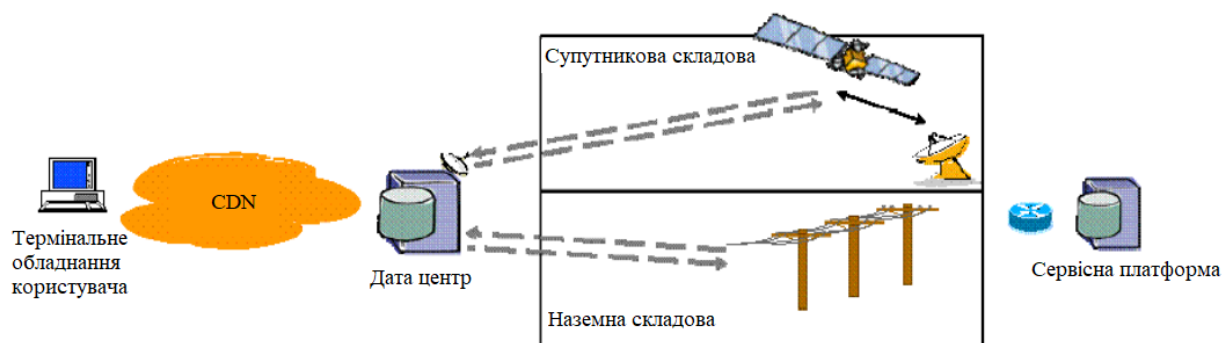


Рис.2.8 – Гібридна мережа з використанням CDN

## 2.4. Функції гібридної архітектури 5G

Нижче наводяться деякі параметри гібридної архітектури, які регулюють належне та ефективне функціонування цієї системи.

### 2.4.1 Handover між наземним та супутниковим сегментами

У гібридних системах передача послуг від наземного сегмента до супутникового сегменту мережі складна. В класичних системах стільникового бездротового зв'язку передача між двома різними сусідніми сотами здійснюється з урахуванням вимірювань SNIR, термінального місцезнаходження та статистики навантаження.

У гібридній супутниковій архітектурі також повинно бути здійснено передачу між складовими, однак може бути важко досягти м'якого та безперешкодного передавання. Крім того, ініціація передачі може впливати на балансування навантаження або навіть на більш складні фактори, такі як різні функції витрат, стан мережі та спеціальні процедури контролю доступу до підключення з примусовою передачею.

Оскільки, у випадку гібридної архітектури, передача повинна відбуватися між різними технологіями радіодоступу, це підходить для випадку вертикальної передачі або MІН (Media Independent Handovers), зазначеної в IEEE 802.21 (2008), що дозволяє встановлювати сеанси зв'язку з одного типу технології доступу до другого типу. Однак, відповідно до специфікації MСE M.1850, реалізація передач в гібридних мережах залишається на операторі відповідно до його вимог.

### **2.4.2 Конвергенція протоколу передачі між наземними та супутниковими сегментами**

Оскільки існує різниця між протоколами, особливо на каналі передачі даних та фізичному рівні між супутниковим та наземним сегментами у гібридній архітектурі, збіжність протоколів є найвищою необхідністю для належного взаємодії цих двох сегментів. Звіт МСЕ S.2222 розроблений для полегшення конвергенції протоколів для ефективного впровадження гібридних систем. У звіті визначено супутникові та супутнико-незалежні рівні та забезпечується взаємодія між ними через інтерфейс, що називається Satellite Independent - Service Point Access Point (SI-SAP).

### **2.4.3 Балансування навантаження**

У гібридних супутникових / наземних телекомунікаційних системах, як правило, є більш ніж один шлях, за яким може бути прокладено трафік. Вибір шляху в таких випадках здійснюється за різними критеріями, такими як вартість, QoS, тип трафіку тощо, які використовуються як вхідні параметри за певною функцією вартості.

У гібридних системах передбачено, в основному, три різні можливості для балансування навантаження:

- 1) на пакет, який гарантує рівне навантаження на кожне з'єднання, але який має недолік у необхідності переупорядкування пакетів на стороні прийому,
- 2) на пункт призначення, який має недолік у нерівному розподілі трафіку між різними доступними каналами;

- 3) на кожний потік, який використовує інформацію про вищий рівень (наприклад, рівень TCP), для визначення мережі, яка буде використовуватися.

Оскільки в технології потоку використовуються алгоритми хешування, він страждає недоліками динамічних та статичних методів хешування. Крім того, складність алгоритму хешування діє як обмежувальний чинник для цієї техніки.

#### **2.4.4 Якість сервісу (QoS)**

Взаємодія механізмів QoS наземних і супутникових сегментів є важливою проблемою в гібридних системах, з тим щоб можна було ефективно забезпечувати підтримку QoS на обох кінцях.

ETSI випустила стандарт на основі режиму DiffServ для полегшення вимог QoS у гібридних мережах. Цей стандарт розрізняє супутниковий залежний (SD) від супутникового незалежного (SI) рівня, які з'єднані між собою через стандартний агностичний інтерфейс, який називається супутниково-незалежною точкою доступу до послуг (SI-SAP).

Стандарт покладається на керування абстрактними чергами, що називаються ідентифікаторами черги (QID). Кожнен QID асоціюється з наперед відомим класом якості обслуговування. IP-датаграми, збережені в цих чергах, обробляються відповідно до їх класу QoS рівнями SD, відповідальними за розподіл потужності супутника та конкретної поведінки пересилання.

## 2.5 Наявні і майбутні тенденції в гібридних супутникових та наземних системах

Майбутні і наявні тенденції у розвитку гібридних супутникових та наземних системах можна подати у вигляді таблиці 2.5.1.

Табл. 2.5.1 - Майбутні і наявні тенденції у розвитку гібридних супутникових та наземних системах

<b>Дослідження і розробки на сьогоднішній день</b>	<b>Поточна робота</b>	<b>Майбутні розробки</b>
Дослідження, проведені різними організаціями по всьому світу, такими як MCE, ETSI, IST, 3GPP для стандартизації гібридної супутниково-земної системи, а також інтегрованої супутникової-наземної системи.	Розробка та остаточна розробка стандартів для параметрів мережі, таких як QoS, балансування навантаження, передачі даних та інших, важливих значень для правильного функціонування гібридної системи	Основна увага приділяється аспектам технічного обслуговування гібридних систем.
Розробка стандартів архітектури на базі S-UMTS.	Стандартизація інтерфейсів, що полегшує як супутникові залежні так і незалежні протоколи.	Повноцінне розгортання S-UMTS, а також інших гібридних систем.

<p>Проекти, такі як SATIN, GAUSS, ATB "Тестовий майданчик для сучасних S-UMTS" ESA, ROBMOD, IST VIRTUOUS, які допомагали забезпечити стандарти інтеграції систем S-UMTS та T-UMTS. У цих проектах використовуються емулятори для вивчення ключових параметрів мережі, задіяних в ефективній роботі обох систем разом.</p>	<p>Розгортання гібридної супутникової наземної системи як географічної, так і додаткової служби деякими супутниковими компаніями, такими як THURAYA, TERRESTAR, SKYTERRA та ін.</p>	<p>Застосування гібридних систем для надання нового спектру послуг, таких як автомобільні рішення.</p>
<p>Розробка прототипів багатомодового обладнання для використання в гібридній мережі</p>	<p>Розгортання невеликих пілотних проектів на базі системи S-UMTS.</p>	<p>Застосування гібридних систем у інформаційних центричних мережах за рахунок використання їх високої доступності та стійкості до розбиття.</p>

Розробка проміжних модулів Repeater стандартів.	Інтеграція комунікаційних та навігаційних послуг за допомогою S-UMTS.	Використання гібридних систем у мережах Content Delivery, розширених та розподілених обчислювальних мережах тощо.
---	---	---

## Висновки

Оскільки ми рухаємося в напрямку інформаційного суспільства, надзвичайно важливим є розвиток конвертованої комунікаційної та сервісної інфраструктури. Головною мотивацією є використання гібридної архітектури для конвергентної сервісної спроможності через гетерогенний доступ до широкосмугових послуг, інтеграція дротових та бездротових, фіксованих та мобільних технологій.

Тому важливо домогтися портативності та безперервності служб через складні мережі з повсюдним доступом, включаючи будь-яку мережу, будь-яку технологію, будь-який домен та будь-який адміністративний домен. Пропонована архітектура в майбутньому повинна бути орієнтована на послуги; мережа повинна бути всеосяжною, щоб ефективно підтримувати програми, такі як однорангові програми, відео за запитом та багатоадресне передавання.



### **3. КЛАСИФІКАЦІЯ МЕТОДІВ СЛІПОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ ДЛЯ КОГНІТИВНОГО СУПУТНИКА В СПЕКТРАЛЬНОМУ КОНТЕКСТІ. СУТЬ КОГНІТИВНОСТІ АРХІТЕКТУРИ**

#### **3.1 АМС і супутниковий зв'язок**

Наступні покоління систем супутникового зв'язку (SatComs) в основному спрямовані на посилення пропускну здатності глобальної мережі при забезпеченні якості обслуговування (QoS) [21]. Поява багатосмугових і гібридних мереж, що використовують багатоядерні технології, призвело до численних методів використання спільної смуги частот [22]. Таким чином, між первинним (супутникова складова) і вторинними (наземна складова) ланками як по висхідній лінії зв'язку, так і по низхідній лінії можуть відбуватися сильні супутникові перешкоди. Наприклад, такий сценарій спостерігається, коли два або більше багатобічних супутників мають однакову географічну область [23] або коли стільникова мережа побудована на подвійній супутниковій системі [24].

З точки зору когнітивності можна динамічно обирати декілька параметрів сигналів-перешкод таким чином, щоб ефективність спектра була максимізована [25]. Щоб скоротити накладні витрати, ці параметри не передаються, і стає обов'язковим оцінка їх у приймачі [26].

Класичні методи сліпої обробки сигналу, що застосовуються до суміжної супутникової суміші сигналів, на жаль, обмежені. Їх нездатність правильно визначити сигнал інтересу (SoI) тим більша, чим більша змішана потужність перешкод. Насправді, в той час як SINR (Співвідношення сигнал-плюс-шум) посилюється, доступні статистичні властивості перешкод не використовуються як корисна інформація для висновку невідомих особливостей сигналів, які передаються.

Отже, класичні методи класифікації автоматичної модуляції (АМС), застосовані на сумішах сигналів, погано працюють. Цей факт останнім часом спонукав наукове співтовариство вивчити проблему багатокористувацької АМС (МАМС).

Таким чином, було запропоновано дуже мало методів МАМК, незалежно від того, розглядалися вони як в одному вузлі, так і в розподілених мультинодних контекстах. Останнє було б кращим у взаємоз'єднованих мережах, призначених для військової сфери, де обмін даними між вузлами не є проблемою. Проте, в контексті наземно-супутникового зв'язку, заощадження з точки зору накладних витрат будуть пом'якшені шляхом наступної сигналізації між вузлами, необхідними для злиття зібраної інформації.

Протягом всього цього розділу ми насправді зацікавлені в сліпому МАМК асинхронно змішаних сигналів спільного каналу, які одержуються однією антеною, яка розташована на супутнику. Точніше, ми схильні розглядати сценарій (майже) повністю повного спектрального перекриття, який часто зустрічається у супутниковому зв'язку, де час і частота мають прорізи для полегшення управління ресурсом.

Алгоритм МАМС, який ми розглянемо, спирається на аналітичне дослідження нелінійної  $M^{th}$  трансформації потужності (АМРТ) [27]. Це перетворення було обрано через його здатність «сліпо» визначити сузір'я одноканальних сигналів за невеликих обчислювальних витрат і з високою стійкістю по відношенню до невідомих параметрів. Весь метод базується навколо дворівневої архітектури, складеної з блоку попередньої обробки сигналів та алгоритму розпізнавання, як показано на Рис 3.1.

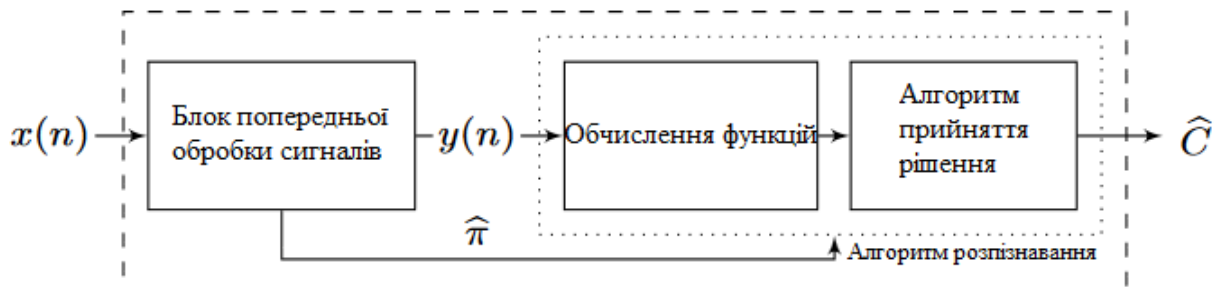


Рис.3.1 - Загальна архітектура АМС на основі функцій

## 3.2 Постановка проблеми

Далі ми опишемо сценарії, що передбачають асинхронне взаємне втручання супутникових сигналів, і їх буде проілюстровано. Тоді буде отримана відповідна математична модель та припущення в контексті сліпої обробки сигналів.

### 3.2.1 Модель системи та сценарії втручання

Маленькі супутникові антени (наприклад ті, що використовуються у VSAT) все більше використовуються у кінцевих споживачів через невисоку вартість та мінімальні просторові потреби. Через не дискретизацію вони охоче допускають багатоканальні комунікації, але вони також по суті викликають небажані перешкоди як у прямому, так і в зворотному напрямках сеансу зв'язку [28]. Тим самим ми розглядаємо геостаціонарні (GEO) трубопровідні супутники, що використовуються для фіксованих супутникових послуг (FSS).

Сценарій А – перешкода на стороні кінцевого користувача (посилення на переадресацію). Розглянемо сценарій, викликаний передачею даних декількома шлюзами через тісно розташовані супутники. Інтерференція

виникає, коли їхні сліди та план частот накладаються на низхідну лінію (Рис 3.2).

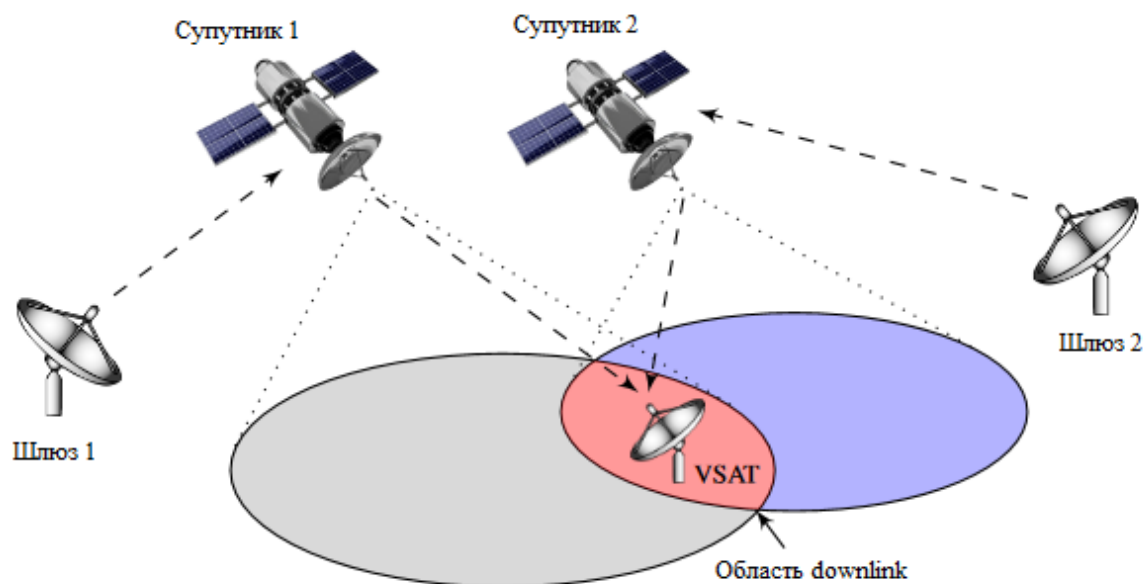


Рис. 3.2 - Перехресні пересилки на VSAT через перекривання слідів

Сценарій Б - перешкоди на одному або кількох супутниках з кількох VSAT (зворотна лінія). У контексті когнітивного супутникового зв'язку, кілька VSAT можуть спільно з'єднуватись з первинними та додатковими супутниками. Коли ці VSAT всі розташовані в одному місці, вони можуть перешкоджати висхідній лінії зв'язку, як показано на Рис. 3.3.

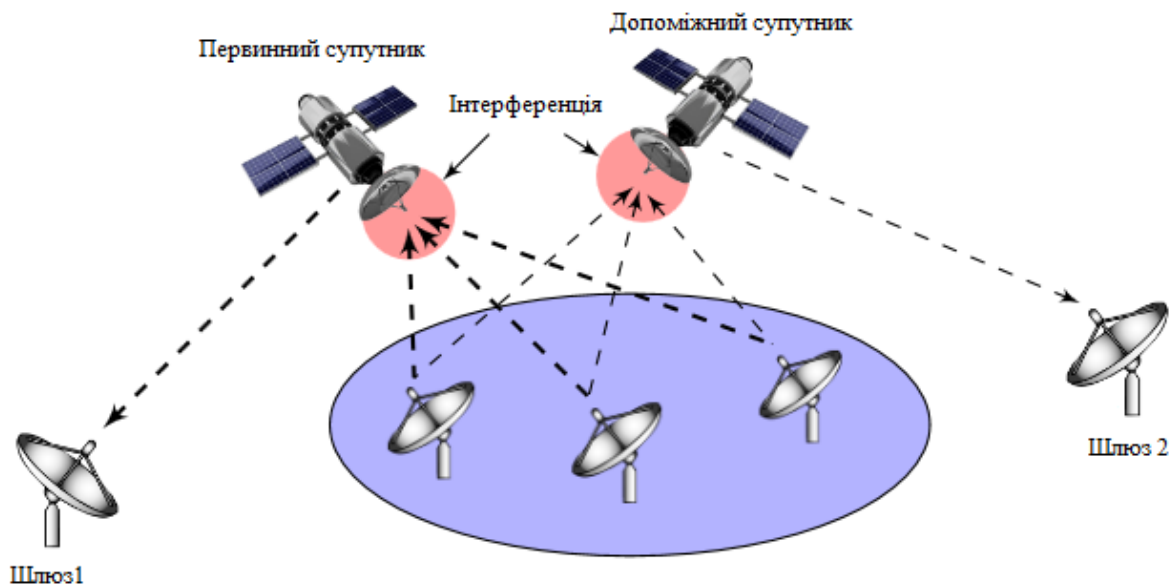


Рис.3.3 - Перешкоди зворотного з'єднання на супутниках з кількох VSAT

Тематичні дослідження сценаріїв А та Б в літературі: Сценарій А фіксує випадок співіснуючих багатопробневих супутників GEO в групі Ка, як показано в [23] та [24]. У цих статтях пропонується пом'якшити перешкоди для спільного каналу за допомогою координації між шлюзами. Це припущення на практиці дуже суворе, і його рекомендується якось послабити.

Сценарій Б точно моделює перешкоди, що створюються пізнавальними SatComs у зворотному каналі, як показано в сценаріях D та E підходу CoRaSat [25]. Таким чином, деякі частини С і Ku діапазонів використовуються FSS на первинній основі. Термінали, не пов'язані з завадами на основний супутник, можуть спричинити значне втручання завдяки їхньому опортуністичному зв'язку із вторинним супутником.

### 3.2.2 Математична модель включеної супутникової суміші

Одержимо вираз суміші на VSAT для прямої лінії зв'язку (Сценарій А). Похідна для сценарію В аналогічна і призводить до аналогічної моделі з тією ж математичною структурою. По-перше, сигнал висхідної лінії зв'язку на шлюзі  $U$  виражається в основній смузі як:

$$x_u(t) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} s_u(k) \cdot h_u(t - kT_u), \quad (1)$$

Де  $S_u$  – символний потік,  $h_u$  - функція формування імпульсу,  $T_u$  – час передачі символів.

Фізичний зв'язок між кожним шлюзом  $U$  і приймачем VSAT (включаючи висхідну лінію, супутник та низхідну лінію зв'язку) класично моделюється для фіксованих супутникових систем у вигляді затримки одного каналу  $h_u^p(t)$  як:

$$h_u^p(t) = a_u \cdot e^{i(2\pi f_u t + \phi_u)} \cdot \delta(t - \tau_u), \quad (2)$$

Де  $a_u$  – амплітуда,  $f_u$  – частота несучої,  $\phi_u$  – початкова фаза,  $\tau_u$  – затримка. Виразивши  $x(t) = [x_1, \dots, x_u]$  та  $h_u^p(t) = [h_1^p, \dots, h_u^p]^T$  з кількістю сигналів, які знаходяться на одній полосі,  $U$ , на приймачі ми отримуємо таку змішану послідовність сигналів:

$$x(t) = \mathbf{x}(t) \cdot \mathbf{h}_u^p(t) + \nu(t), \quad (3)$$

Де  $\nu(t)$  – визначає адитивний білий Гаусівський шум з невідомою дисперсією  $\sigma_\nu^2$ . На приймачі сигнал відбирається сигнал  $x(t)$  (для виведення  $x(n)$ ) і попередньо «сліпо» обробляється (для виведення  $y(n)$ ), як описано на Рис 3.1.

Зразки дискретного часу  $y(n)$ , отримані на виході блоку попередньої обробки, потім еквівалентно задаються формулою:

$$y(n) = \sum_{u=1}^U y_u(n) + \nu(n), \quad (4)$$

де  $y_u(n)$  відповідає за  $u^{th}$  сигнальний компонент:

$$y_u(n) = a_u \cdot e^{i(2\pi f_{ru}n + \phi_u)} \sum_{k \in \mathbb{Z}} s_u(k) h_u(nT_e - kT_u - \tau_u), \quad (5)$$

де  $T_e$  задає період дискретизації, а  $f_{ru}$  – залишковий зсув частот носіїв сигналу  $U$ .

### 3.2.3 Припущення про параметри в реалістичному контексті

Супутникові канали, крім відсутності синхронізації на шлюзах і супутниках, по суті породжують ушкодження між сигналами низхідної лінії зв'язку на приймачі такі, як ефекти, викликані локальними осциляторами (ЛО). ЛО впливають на частоту несучої та символний час.

Фактично, позначаючи сукупні неточності ЛО ланки  $C_u$ , прийнята несуча частота у VSAT становить  $f_u = (1 + C_u) * f_c$ , де  $f_c$  - цільова несуча частота. В той же час маємо  $T_u = (1 + C_u) * T$ , де  $T$  – цільовий символний період.

Зважаючи на стандартну величину близько 0,1 ppm для  $C_u$  за [30], пропускну здатність в МГц та використання смуги  $C$ ,  $K_u$  або  $K_a$  призводять до наступних математичних властивостей:

1) для всіх замірів вважається, що  $u$  і  $T_u$  майже рівні  $T$ ;

2) для всіх  $u$  залишковий зсув частот носіїв  $f_{ru}$  набагато менший у порівнянні з  $T$  і таким чином зберігається сценарій практичного накладення сигналів один на одного.

Графічне зображення цих ефектів показано на Рис. 3.4 для суміші з 3 сигналів. Для наглядності, залишковий зсув несучих частот було трішки завищено. Пунктирна лінія показує форму фільтру низьких частот у блоці попередньої обробки сигналів. Також,  $P_u$  означає потужність сигналу  $u$  і  $P_y$  для підсумкової потужності в смузі  $B$ , так що  $P_u - P_y = 1$ .

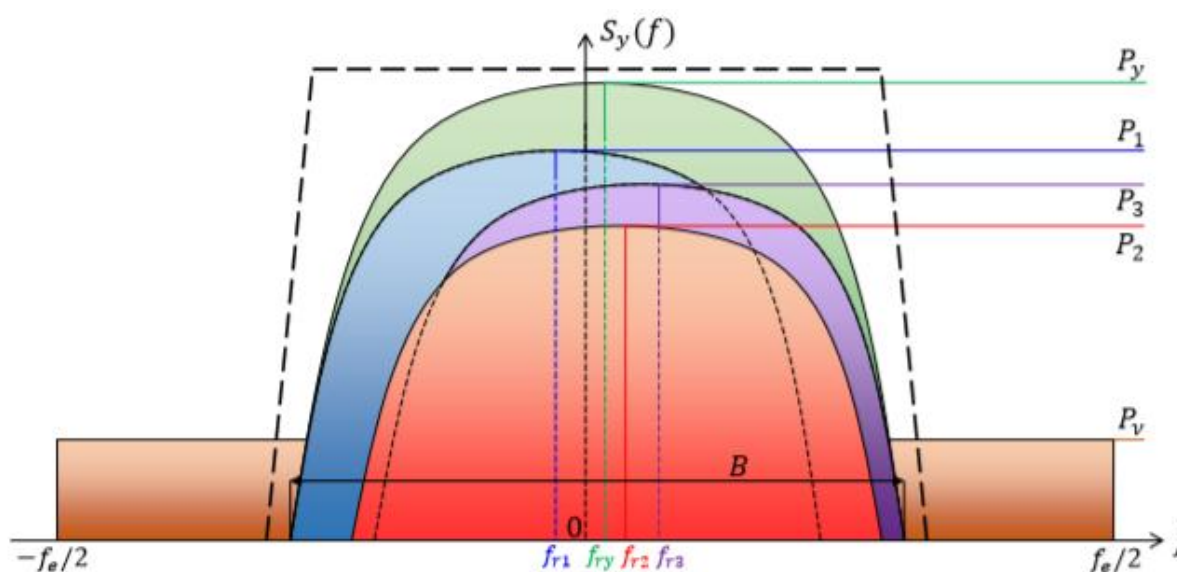


Рис.3.4 – Спектральна густина частот одноканальних сигналів

На приймачі ми припускаємо, що правильний алгоритм, такий як у [16], оцінює  $T$ . Залишкові зсуви несучих вважаються невідомими: вони оцінюються за запропонованим методом МРТ.



Інші припущення щодо сигналу  $y_u$ : у формулі (5) припускається, що  $\varphi_u$  та  $\tau_u$  розподілені рівномірно у межах  $[0; 2\pi]$  та  $[0; T]$ . Також не допускається, що  $T_e = T$  (іншими словами не допускається ніяка синхронізація за часом на приймачі, що могла би спричинити наслідки з точки зору інтерференції). Замість цього допускається, що  $y(n)$  старанно продискретизовано множителем  $p = \frac{T}{T_c}$  який відображається теоремою дискретизації Шенона, тобто  $T_e^{-1} \geq B$ .

Що ж до  $S_u$  та  $C$ : набір символів  $S_u$  являється незалежним і рівномірно розподіленим і, відповідно, переносяться сузір'ями  $C_u \in C$ . Сузір'я  $C_u$  можуть бути абсолютно різними, з одиничною дисперсією і рівні нулю. Набір же сигналів  $C$ , навпаки відомий. Як показано на Рис 3.5, розглядаються PSK, QAM та "гібридні" сузір'я заради достатнього різноманіття. Більше того, ці сузір'я, як правило, використовуються в SatComs (див., Наприклад, IESS-310 та ETSI EN 301 210).

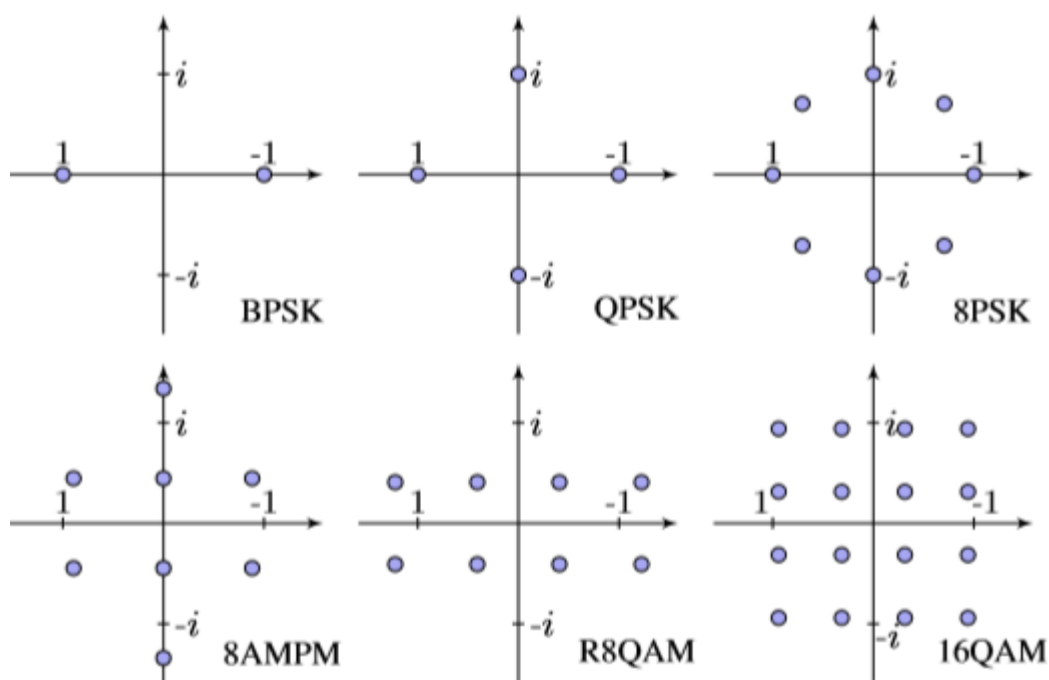


Рис. 3.5 - Представлення використовуваних сузір'їв

**Висновки**

У таблиці 3.1 підсумовуються припущення, запропоновані в поточному розділі, а також сліпі аспекти пропонованого методу. Зверніть увагу, що "Оцінка за АМРТ" означає, що пропонується алгоритм сліпого оцінювання розглянутого параметра. "\*" означає, що не приймається жодного конкретного припущення.

Таблиця 3.1 – Припущення та параметри сліпої обробки пропонованим методом

Параметр	Допущення	Аспекти сліпої обробки
$U$	$U \geq 0$	Невідомий, обчислюється АМТР
$T_u$	$T_u \approx T$	Невідомий, обчислено у [31]
$\tau_u$	*	Невідомий
$f_{ru}$	$f_{ru} \ll T^{-1}$	Невідомий, обчислюється АМТР
$\varphi_u$	*	Невідомий
$S_u$	Набори символів	Невідомий

$C_u$	$C_u \in C$	Набір сигналів $C$ – відомий
$a_u$	*	Невідомий, обчислюється АМТР
$h_u$	Функція формування символів	Відомий (за коефіцієнтом зсуву)
$\nu$	Адитивний білий Гаусівський шум	Невідома $\sigma_\nu^2$ , обчислюється за допомогою [27]
$y$	Нормалізований і продискретизований сигнал	Пронормалізовано за [11]

Цей метод має основну перевагу: не робиться припущення щодо синхронізації часу та частоти на приймачі. Отже, немає необхідності у схемі демодуляції, а розпізнавання сузір'я виконується сліпим чином майже безпосередньо на прийнятому сигналі. Даний метод досить простий у реалізації і може бути використаний у когнітивній архітектурі «земля - супутник» для швидкого декодування отриманого сигналу та мінімізації шумового компоненту.

## 4. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРАХУНКУ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЕКТОВАНОЇ МЕРЕЖІ

### 4.1 Розрахунок енергоспоживання та швидкості встановлення сеансу зв'язку для двох сценаріїв розгортання супутника

Для того, щоб забезпечити результати роботи запропонованої мережі, у Mathcad було проведено тематичне дослідження забезпечення високошвидкісної передачі даних по всій території України. Для обчислення енергоспоживання супутника використовувалась формула Фрііса:

$$P_t = \frac{P_r}{G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2} \quad (4.1)$$

де  $G_t = 10dB$  та  $G_r = 1.5dB$  – типові коефіцієнти виграшу антен передавача та приймача відповідно,  $P_r = -80dBm$  – мінімальна потужність на приймачі,  $\lambda$  – довжина хвилі,  $d$  – дистанція супутника від кінцевого користувача (36 000 км для геостаціонарної орбіти і 800 км для низькоорбітальних супутників).

Це ж рівняння було використано для розрахунку використовуваної потужності наземної частини, беручи до уваги загальну потребу енергії eNB - суму потужностей, необхідних для безперебійних потреб бездротової передачі даних між кожним активним eNB та кінцевим користувачем, який обслуговується даним eNB.

Оскільки супутник є виключно відповідальним за забезпечення функцій СУ, загальна продуктивність гібридної мережі в основному ґрунтується на виборі супутникової орбіти. Технічні характеристики супутника

геостаціонарної земної орбіти (GEO) та супутника низької земної орбіти (LEO) представлені в таблиці 4.1. Як видно, супутник який розташовано на LEO демонструє кращу продуктивність в плані споживання енергії та затримки передачі сигналів у порівнянні з супутником GEO. Однак супутник, який розташовано на геостаціонарній орбіті, може надати більшу площу покриття, аніж супутник, який знаходиться на низькій навколосемній орбіті.

Також з результатів слідує, що супутник, який розташовано на низькоорбітальній відстані дає вигоду у використуванні потужності на кілометр квадратний у 2021 раз. В цей же час, низькоорбітальний супутник, має менший час встановлення з'єднання, оскільки розташований на відстані 800 км від наземної складової, аніж геостаціонарний супутник, який розташовано на відстані 36 000 км, у 46 раз, а з цього і слідує, що низькоорбітальний супутник швидше переходить зі стану RRC\_IDLE до RRC\_CONNECTED майже у 3 рази.

Табл. 4.1 - Специфікації різних сценаріїв розгортання супутника

<b>Орбіта супутника</b>	<b>Споживання потужності [мВт/км<sup>2</sup>]</b>	<b>Затримка у передачі інформації між супутниковою і наземною складовими [мс]</b>	<b>Час зміни статусу RRC_IDLE на RRC_CONNECTED [мс]</b>
<b>Геостаціонарна орбіта (36 000 км)</b>	151.597	120	800
<b>Низькоорбітальний супутник (800 км)</b>	0.075	2.6	280.8

## 4.2 Розрахунок параметрів супутника та підключення до нього

### 4.2.1 Розрахунок геометричних співвідношень

Для вирішення ряду завдань, що виникають при проектуванні супутникової лінії зв'язку, необхідно знати геометричні співвідношення, що визначають взаємне розташування земної станції і супутника. Наприклад, для правильної орієнтації антени земної станції необхідно знати її кут місця  $\beta$  і азимут  $\alpha$ . Однією з важливих переваг геостаціонарної орбіти є можливість забезпечення значної області обслуговування. Розміри області обслуговування обмежуються наступною умовою. В межах області обслуговування кут піднесення, або кут повороту антен базових станцій, не повинен бути менше деякого порогового значення, яке визначається призначенням мережі. Малі кути піднесення призводять до можливості затінення ГСР (геостаціонарний супутник-ретранслятор) предметами або географічними явищами, оточуючими ЗС, а також може призвести до збільшення втрат корисного сигналу в атмосфері і через радіошуми самої Землі. Для мереж фіксованого супутникової служби, в яких затінення можна виключити шляхом вибору місця установки БС, кут піднесення обмежується знизу величиною  $10^{\circ}$ - $12^{\circ}$ . Для мереж ж персональної рухомої служби кут піднесення ГСР над горизонтом повинен бути не менше  $30^{\circ}$ .

У будь-якій точці області обслуговування при заданих параметрах ЗС на лінії зв'язку повинні забезпечуватися енергетичні співвідношення не гірше заданих.

Азимут - це кут, відлічуваний в горизонтальній площині за годинниковою стрілкою від напрямку на Північний полюс до напрямку від земної станції на супутник. Кут місця - це кут, відлічуваний у вертикальній

площині по дотичній до обрїю до напрямку від земної станції на супутник. Похила дальність - це відстань від земної станції до супутника.

Для визначення похилої дальності користуються формулою:

$$d = R_3 * \frac{\sqrt{1 + \gamma_0^2 - 2 * \gamma_0 * \cos \psi}}{\gamma_0} \quad (4.2.1)$$

де  $R_3$  – радіус Землі = 6 378 км.

Проміжний коефіцієнт 1:

$$\gamma_0 = \frac{R_3}{R_3 + H} \quad (4.2.2)$$

Проміжний коефіцієнт 2:

$$\cos \psi = \cos \varphi_{\text{БС}} * \cos \Delta \lambda \quad (4.2.3)$$

де  $\varphi_{\text{БС}}$  – широта БС.

Проміжний коефіцієнт 3:

$$\Delta \lambda = \lambda_{\text{БС}} - \lambda_{\text{СП}} \quad (4.2.4)$$

де  $\lambda_{\text{БС}}$  - довгота БС,  $\lambda_{\text{СП}}$  – довгота підсупутникової точки.

Значення куту місцевості знаходиться як:

$$\beta = \arctg\left(\frac{\cos \psi - \gamma_0}{\sqrt{1 - \cos^2 \psi}}\right) \quad (4.2.5)$$

Значення азимуту розраховується як:

$$A = 180^{\circ} + \arctg\left(\frac{tg\Delta\lambda}{\sin\varphi_{BC}}\right) \quad (4.2.6)$$

Параметри азимут і кут місця є головними відомостями, які використовуються під час налаштування параболічної антени на супутник. Параметри похила дальність і кут місця необхідні для інженерних розрахунків, які передують практичним питанням монтажу і мають на меті вибір оптимальних параметрів приймальної наземної супутникової станції.

Розрахуємо всі вищезгадані параметри для БС, яка розташована у місті Києві (50°27'00" пн. ш. 30°31'25" сх. д.), беручи до уваги, що геостаціонарний супутник буде розташовано над центром України (49°01'39" пн. ш. і 31°28'58" сх. д.). Лістинг розрахунків можна знайти у Додатку А (п.4.2.1). Представимо результати розрахунків у вигляді таблиці (див. Табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Результати геометричних співвідношень

	Пн.Ш.	Сх.Д.	Азимут	Кут місця	Похильна дальність
ПБС	50.27	30.31	181.5	1.405	42638

#### 4.2.2 Розрахунок втрат сигналу при передачі через супутникову лінію

У загальному випадку додаткові втрати в реальних умовах будуть виглядати наступним чином:

$$L_{\text{додатк}} = L_{\text{атм}} + L_{\text{д}} + L_{\text{н}} + L_{\text{п}} \quad (4.2.7)$$



де,  $L_{атм}$  – втрати у атмосфері,  $L_{д}$  – втрати в опадах,  $L_{н}$  – втрати через неточності наведення антен (приймемо 1 дБ),  $L_{п}$  – поляризаційні втрати (приймемо 1 дБ).

#### 4.2.2.1 Втрати у вільному просторі

Визначальним фактором, що впливає на рівень сигналу на вході приймача, є втрати енергії при поширенні сигналу по супутниковому радіолінії. Загасання енергії сигналу у вільному просторі, викликане зменшенням щільності потоку потужності при відаленні від випромінювача, визначається за формулою:

$$L_0 = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2 \quad (4.2.8)$$

де  $\lambda$  – довжина хвилі,  $d$  – похильна дальність.

#### 4.2.2.2 Втрати енергії сигналу у атмосфері

Поглинання радіохвиль в атмосфері кількісно визначається коефіцієнтом  $L_a$ . Встановлено, що в діапазонах частот вище 500 МГц основне поглинання визначається тропосферою, точніше, газами тропосфери киснем і водяними парами, а також дощем і іншими гідрометеорами (іоносфера і інші гази тропосфери, наприклад двоокис вуглецю або азот, відіграють малу роль). Для кількісної оцінки зручно скористатися наступним поданням втрат в атмосфері (дБ):

$$L_a = L_0 * I_1 + L_{h2o} * I_2 \quad (4.2.9)$$

де  $L_0$  і  $L_{H_2O}$  - коефіцієнти погонного поглинання (дБ / км) в кисні і водяних парах;  $l_1$  і  $l_2$  - еквівалентна довжина шляху сигналу в цих середовищах відповідно. Поглинання має яскраво виражений частотно-залежний характер; спостерігаються резонансні піки на частотах 22 і 165 ГГц (для водяної пари), а також 60 і 120 ГГц (для кисню). Еквівалентна довжина шляху сигналу в стандартній атмосфері (км), очевидно, залежить не тільки від еквівалентної товщини атмосфери, але і від кута місця земної антени  $\beta$  і висоти БС над рівнем моря  $h_3$ :

$$l_1 = \frac{h_0 - h_3}{\sin B}, \quad l_2 = \frac{h_{H_2O} - h_3}{\sin B} \quad (4.2.10)$$

де  $h_0$  - еквівалентна товщина шару кисню в стандартній атмосфері;  $h_{H_2O}$  - еквівалентна товщина шару водяної пари в стандартній атмосфері.

При розрахунках загасання сигналу в стандартній атмосфері еквівалентну висоту шару кисню приймають рівною  $h_0 \approx 6$  км, а еквівалентну товщину шару водяної пари (км) можна обчислити за емпіричною формулою:

$$h_{H_2O} = \left[ \frac{1}{(F-183.3)^2} + \frac{1}{(F-323.8)^2 + 1} + 2.2 + \frac{3}{(F-22.3)^2 + 3} \right], \quad (4.2.11)$$

де  $F$  – частота в ГГц.

Результати обчислень за цими формулами визначають поглинання в спокійній атмосфері без гідрометеорів, яке представляє собою постійну складову втрат, що мають місце протягом 100% часу.

Питоме поглинання киснем і водяною парою залежить від тиску, вологості, температури і частоти. Для кількісного визначення складових втрат можна скористатися наступними співвідношеннями.

Питоме поглинання киснем (дБ/км):

$$L_0 = 3.855 * 10^{-4} * F^2 * \left[ \frac{0.05}{\left(2 + \frac{F}{30}\right)^2 + 0.0025} + \frac{0.018}{0.000324 + \frac{F^2}{900}} + \frac{0.05}{\left(2 - \frac{F}{30}\right)^2 + 0.0025} \right] \quad (4.2.12)$$

Питоме поглинання водяним паром (дБ/км):

$$L_{H_2O} = 2.944 * 10^{-4} * F^2 * \left[ 4.23 * 10^{-5} + \frac{0.094}{\left(0.741 + \frac{F}{30}\right)^2 + 0.008836} + \frac{0.094}{\left(-0.741 + \frac{F}{30}\right)^2 + 0.008836} \right] \quad (4.2.13)$$

Частотна залежність складових загасання сигналів в спокійній атмосфері, розрахована за наведеними вище співвідношенням для стандартних параметрів  $T = 290 \text{ }^\circ\text{K}$ ,  $P = 101 \text{ кПа}$ ,  $\rho = 8 \text{ г / м}^3$  атмосфери,  $\Delta_1$ ,  $\Delta_2$ ,  $\Delta_3$  - постійні коефіцієнти для стандартних параметрів.

$$\Delta_1 = 0,000229, \Delta_2 = 0,0006367, \Delta_3 = 0,000932$$

#### 4.2.2.3 Втрати сигналу у опадах

Свій внесок в загальне ослаблення радіосигналів в атмосфері можуть вносити частинки різних речовин води у вигляді гідрометеорів (дощ, сніг,

туман, град, хмари), а також пилу і диму. Ослаблення в даному випадку обумовлено розсіюванням і поглинанням частини енергії електромагнітних коливань.

Загасання радіосигналів пропорційно відносного розміру часток по відношенню до довжини хвилі, їх концентрації та діелектричної проникності. Частинки пилу і диму, завдяки їх малим відносним розмірам і низькою діелектричної проникності, практично ніякого впливу на ослаблення сигналів в розглянутому діапазоні частот не роблять. Вплив кристалів льоду у вигляді крижаних хмар, сухого снігу і граду не відчувається, оскільки діелектрична проникність льоду істотно нижче, ніж води. Вплив водяних хмар і туману так само малий через малий розмір і концентрацію частинок в цих утвореннях (діаметр крапель менше 0,2 мм).

Втрати сигналу в дощі розраховуються за емпіричною формулою:

$$L_d = a * I^b * l \quad (4.2.14)$$

де  $I$  – інтенсивність випадів осадів (мм/год),  $l$  – довжина шляху сигналу в слої дощу (км),  $a$  і  $b$  – допоміжні коефіцієнти.

Коефіцієнти  $a$  і  $b$  сильно залежать від частоти, вплив інших факторів (розміру і температури дощових крапель, поляризації сигналу) проявляється набагато слабкіше. Хорошим наближенням значень  $a$  і  $b$  є вираз:

$$a = 4.21 * 10^{-5} * F^{2.49} \text{ при } 2,9 \leq F \leq 54 \text{ ГГц}, \quad (4.2.15)$$

$$b = 1.41 * F^{-0.0779} \text{ при } F \leq 25 \text{ ГГц}, \quad (4.2.16)$$

Довжина шляху сигналу у слої дощу (км):

$$l = \frac{h_d - h_s}{\sin(\beta)} \quad (4.2.17)$$

де  $h_s$  – висота БС над рівнем моря,  $h_d$  – ефективна висота слою дощу,  $\beta$  – кутя місця антени БС. Ефективна висота дощового шару при  $I > 10$  мм / год пов'язана з висотою нульовий ізотерми  $h_i$  в такий спосіб:

$$h_d = h_i + \log\left(\frac{I}{10}\right) \quad (4.2.18)$$

Нарешті, висота нульовий ізотерми  $h_i$  (км) дорівнює (типове значення для літнього часу):

$$h_i = 7.8 - 0.1 * \varphi_{зс} \quad (4.2.19)$$

Інтенсивність дощу має статистичний характер і багато в чому визначається місцем розташування ЗС. У відповідності із середнім рівнем опадів на поверхні Землі виділено 14 різновидів кліматичних зон. Для кожної зони на підставі статистики багаторічних метеоспостережень визначено максимальне (з деякою довірчою ймовірністю Кд) значення, яке і є вихідним при розрахунку втрат сигналу в дощі. Вихідні значення інтенсивності дощу для різних кліматичних зон наведені в таблиці 4.2. Також на Рис.4.1

представлено кліматичні зони і значення інтенсивності дощу для кожного з регіонів.

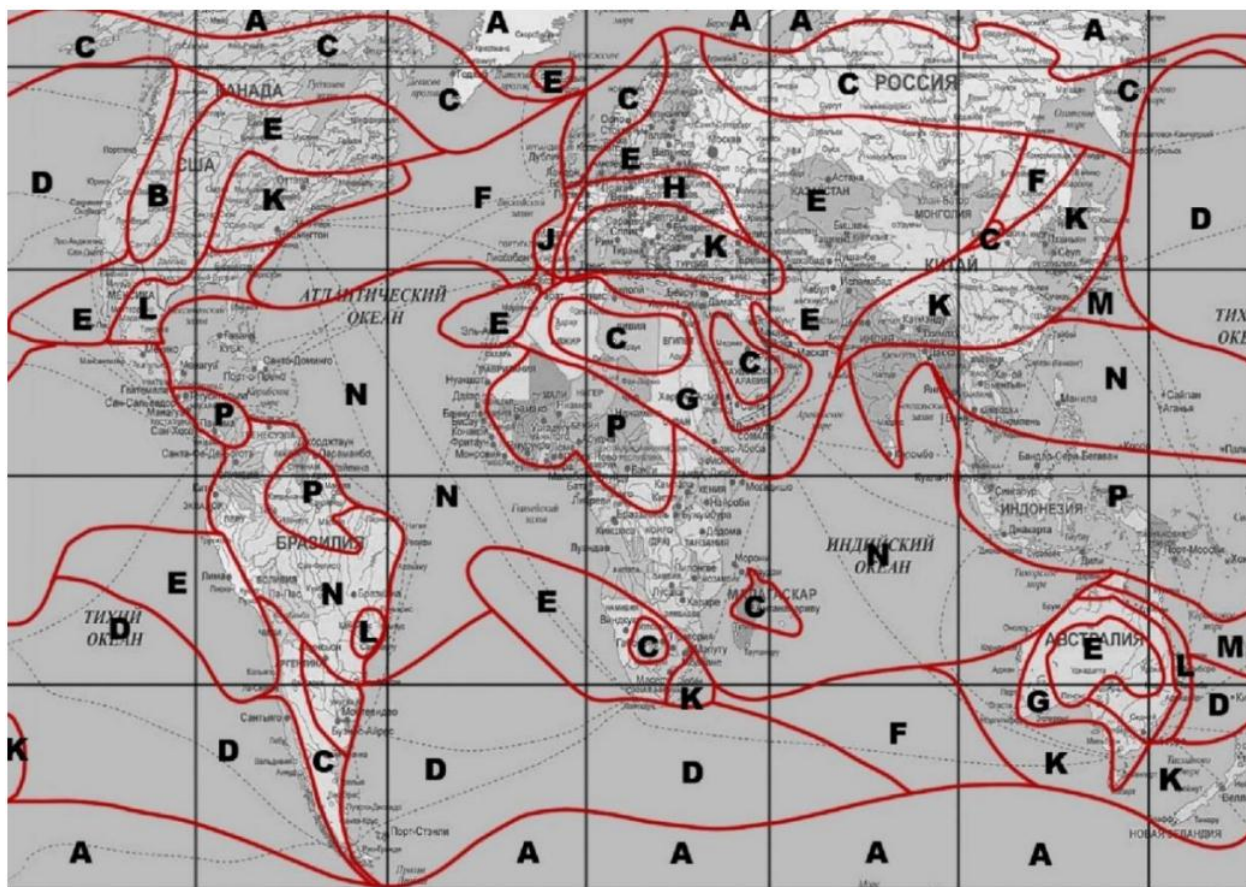


Рис.4.1 – Кліматичні зони та рівень інтенсивності дощу

Таблиця 4.2 - Вихідні значення інтенсивності дощу I (мм / год) для різних кліматичних зон

Кд	Кліматична зона													
	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	P
0,99	-	1	-	3	1	2	-	-	-	2	-	4	5	12
0,997	1	2	3	5	3	4	7	4	13	6	7	11	15	34

0,999	2	3	8	9	6	8	12	10	20	12	15	22	35	65
0,9997	5	6	13	15	12	15	20	18	28	23	33	40	65	105
0,9999	8	12	19	26	22	28	30	<b>32</b>	35	42	60	63	95	145
0,99997	14	21	29	29	41	54	45	55	45	70	105	95	140	200
0,99999	22	32	42	42	70	78	65	83	65	100	150	120	180	250

#### 4.2.2.4 Розрахунок втрат енергії сигналу

Лістинг розрахунків приведено у Додатку А (п.4.2.2). У даному розділі буде представлено лише результати. Крім того необхідно взяти до уваги, що для розрахунків використовувалась частота 10ГГц, а також використовувалась кліматична зона Н для якої значення  $I = 32$  мм/год:

- 1) Затухання енергії сигналу в вільному просторі – 145 дБ
- 2) Затухання енергії сигналу у атмосфері – 0.19 дБ
- 3) Затухання енергії сигналу в дощі – 1.32 дБ
- 4) Загальне затухання енергії сигналу – 146.54 дБ

### 4.3 Визначення основних вимог до наземної складової

#### 4.3.1 Оцінка трафіку мережі

На основі статистичних даних, отриманих у 2017 році, населення України складає приблизно 44.5 млн. жителів. Максимальних об'єм ринку по кількості абонентів, які використовують послуги бездротового зв'язу, оцінюють у 30% від загальної кількості населення. Тобто:

$$N_{ab} = N_{ukr} * 0.3 \quad (4.3.1)$$

На основі всього вище сказаного та згідно з (4.3.1), потенційна кількість абонентів, які матимуть потребу у послугах проектованої мережі, складе 13 350 000 абонентів.

Розрахуємо число абонентів, які можуть одночасно використовувати мережу для передачі інформації різного типу (голосовий трафік, відеоконференція, підкачка даних):

$$A = A_{ser} * N_{ab} \quad (4.3.2)$$

де  $A_{ser} = 0.05$  Ерл – навантаження одного абонента в момент піку навантаження мережі. Згідно з (4.3.2) та з отриманою кількістю абонентів з (4.3.1), отримуємо 667 500 Ерл – пікове навантаження пропонованої архітектури, яка в свою чергу представляє 667 500 абонентів, які зможуть використовувати мережу одночасно при піку її навантаження.

Згідно з табл. 1.1 – середня теоретична швидкість передачі даних для LTE на прийом складає 350 Мбіт/с, а на передачу – 180 Мбіт/с. Візьмемо ці показники, як стандарт при проектуванні нової гібридної архітектури, а також приймемо тестові дані 100 Мбіт/с на прийом і 40 Мбіт/с на передачу. Як уже було зазначено, проектована мережа також повинна підтримувати такі сервіси, як HD-video та VoIP і IPTV. VoIP потребує мінімальної швидкості передачі даних у 39.7 кбіт/с, а кожен канал HD-video потребує швидкості 10-11 Мбіт/с, тобто маючи ширину полоси 10 МГц і використовуючи тестові дані 100 Мбіт/с



на прийом, проектована мережа матиме змогу передавати файли одразу декільком десяткам користувачів.

Проведемо розрахунок загального навантаження мережі, а також загальної кількості одночасних користувачів пропонованої мережі.

Розрахунок проведено на основі наступних параметрів:

- середнє число викликів на одного абонента у період найбільшого навантаження мережі (ННМ)  $C_{\text{сер}}$  [вик/год] – 0.7;
- середня тривалість сеансу зв'язку  $t_{\text{сер}}$  [с] – 90;
- обсяг повідомлення при передачі  $I_{\text{сер}}$  [кбіт] – 2500;
- навантаження на одного абонента в період ННМ,  $y_0$  [мЕрл] - 17.5;
- середній час передачі інформації [с] – 71;
- величина середнього навантаження в період ННМ на одного абонента,  $y_0^*$ [мЕрл] – 108;
- значення середнього сумарного навантаження на одного абонента  $Y_0$ [мЕрл] – 126;

Усі розрахунки приведено у Додатку Б.

Значення середнього навантаження на одного абонента в період ННМ склала 126 мЕрл. Число абонентів у мережі 13 350 000, тому середнє навантаження по передачі інформації у пропонованій мережі для території України складе 1 682 192 Ерл. (Див. Додаток Б п. 4.3.1).

Отримане навантаження по каналу додамо до кількості абонентів, які одночасно використовують мережу. Отримаємо 2 349 692 Ерл або 2 349 692 абонентів, які одночасно можуть використовувати мережу для передачі

голосового трафіку. Це високий показник, враховуючи, що мережа покриватиме усю площу країни, тому дане навантаження є логічним.

#### 4.3.2 Оцінка радіусу сот для наземної складової

Площа України складає 603.7 тисяч квадратних кілометрів. Визначимо густину абонентів, які одночасно використовуватимуть пропоновану мережу. Згідно з розрахунком в Додатку Б, приймаючи  $S_{\text{Ukraine}} = 603700$ , а  $N_{\text{odn}} = 2\,349\,692$  з пункту 4.2.1, отримуємо густину абонентів рівну  $n_a = 4$  люд/км<sup>2</sup>.

Найбільший радіус соти при такій площі покриття і навантаженні визначимо з формули (4):

$$R_{0\_max} = 0.62 * \sqrt{\frac{N_c}{n_a}} \quad (4.3.3)$$

де  $n_a$  – густина абонентів, які одночасно використовують пропоновану мережу, а  $N_c$  – загальне число каналів зв'язку у соті. Прийmemo, що одна БС має максимальну пропускну здатність – 100 Мбіт/с, а середня швидкість, яка надається одному абоненту – 5 Мбіт/с. Цей підхід дасть змогу організувати 20 каналів зв'язку.

Згідно з лістингом розрахунків у Додатку Б (п. 4.3.2) отримуємо максимальний радіус соти рівний 1.4 км.

### 4.3.3 Обґрунтування математичної моделі побудови наземної мережі

На сьогоднішній день однією з найсучасніших і точних моделей бездротових мереж є так звана променева модель (англ. - ray tracing) або модель трасування променів. Цей підхід вимагає точних даних про область покриття і великих обчислювальних ресурсів, проте дає максимальну точність розрахунків. Розглянемо основні принципи побудови променевої моделі [32].

Променева модель заснована на детерміністському підході і базується на методах геометричній оптики, геометричної теорії дифракції та дзеркального зображення. Суть запропонованої моделі полягає в тому, що електромагнітні хвилі розглядаються, як світлові промені, що відбиваються і розсіюються на перешкодах місцевості з деякими коефіцієнтами розсіювання і відображення.

Алгоритм променевої моделі визначає зону охоплення досліджуваної бездротової мережі, як набір модулів. Кожен з таких модулів називається кластером. У кожному кластері здійснюється попередній опис умов, які формують область тіні для променів різноманітних структур. Це дає можливість не розраховуючи траєкторію променя визначити достовірність його існування в аналізованій точці. Дана перевага дозволяє значно скоротити час обчислень на етапі трасування і в процесі розрахунку енергетичних характеристик променів.

Трасування променів в кластері проводять базовими алгоритмами, які класифікуються на наступні групи:

- 1) Алгоритми, які реалізують співвідношення аналітичної геометрії.

До цієї категорії входять процедури для визначення:

- коефіцієнтів рівняння площин, заданих різними методами;
- коефіцієнтів рівняння ліній перетину площин;
- координат векторів нормалей до площин;
- координат точки перетину прямих і площин;
- координат точок перетину прямих;
- кутів перетину площин;
- кутів перетину прямої і площини;
- кутів між двома прямими;
- нормальної і тангенціальної складових векторів відносно площини;
- координат дзеркального зображення точок щодо площини.

2) Алгоритми, за допомогою яких визначають розташування точок (передавача, приймача) і перешкод.

3) Алгоритми, які формують в області простору, зайнятої тінню перешкоди щодо променя обраної структури.

Алгоритми цієї групи визначаються через процедуру побудови тіні за будь-якої фігурою, за якою формується поверхня перешкоди. У тому випадку, коли перешкода буде моделюватися многогранником, грань поверхні являє собою плоский багатокутник.

Зробимо розрахунок середньої пропускної здатності соти:

$$R_{TDD} = S_{FDDAverage} * W * T_{\%} = 1.69 * 20000 * 0.54 = 18.25 \text{ Мбіт/с} \quad (4.3.4)$$

де  $S_{FDDAverage}$  – значення середньої спектральної ефективності,  $W$  – ширина каналу,  $T_{\%}$  – тривалість кадру на лінії.

Мінімальна потужність сигналу на вході приймача базової станції визначається за формулою:

$$P_{\text{прбс}} = P_{\text{ш}} + \left(\frac{Eb}{No}\right)_{\text{треб}} - G_{\text{обр}} \quad (4.3.5)$$

де  $\left(\frac{Eb}{No}\right)_{\text{треб}}$  – необхідне значення відношення сигнал/шум;

$G_{\text{обр}}$  – вииграш від обробки сигналу;

$P_{\text{ш}}$  – потужність шумів приймача.

Коефіцієнт шуму приймача базової станції приймається меншим або рівним 3 дБ. Для розрахунку приймемо коефіцієнт  $K_{\text{ш}} = 3$  дБ.

Потужність шумів приймача базової станції:

$$P_{\text{ш}} = K_{\text{ш}} + N(\text{дБмВт}) \quad (4.3.6)$$

Мінімальне значення  $Eb / N_0$  на вході приймача базової станції становить 1.7 дБ.

Вииграш від обробки складе:

$$G_{\text{обр}} = 10 * \lg\left(\frac{R_{\text{чип}}}{R_{\text{кор}}}\right) \quad (4.3.7)$$

де  $R_{\text{чип}}$  – чіпова швидкість стандарту UMTS, чіп/с,

$R_{\text{кор}}$  – швидкість передачі даних користувача, кбіт/с.

Також слід враховувати вииграш, що отримується в результаті м'якого хендовер, а також запас, що враховує внутрісистемні перешкоди. Величину

виграшу приймаємо  $G_{\text{виг}} = 2$  дБ. Допустиме значення відносного завантаження соти - 50%.

Величина запасу на внутрішньосистемні завади:

$$M_{\text{int}} = -10 \cdot \lg(1-\eta) \quad (4.3.8)$$

Розрахуємо допустиму потужність сигналу на вході приймача БС, задавшись при цьому вихідними даними для досліджуваної мережі (таблиця 4.2).

Табл.4.2 – Вихідні параметри для наземної складової проектованої мережі

$E_b/N_0$ [дБ]	1.7
$10^6 * R_{\text{чип}}$ [чіп/с]	1.44
$R_{\text{кор}}$ [кбіт/с]	144
$273^\circ + T^\circ$	15
$B$ [МГц]	1.44
$K_{\text{ш}}$ [дБ]	2.5
$N$	0.5
$k$ [Дж/К]	$1.38 * 10^{-23}$

Потужність теплового шуму в прийомній частині  $N = 0.572 * 10^{-14}$  Вт. Якщо перевести в дБмВт отримаємо значення -112.4 дБмВт. Потужність шумів приймача БС рівна -109.9 дБмВт, вигреш від обробки складає 10 дБ. Запас на внутрішньосистемні завади рівний 3 дБ, а допустима потужність сигналу на вході приймача БС рівна -117.2 дБмВт. Лістинг усіх розрахунків приведено у Додатку Б (п. 4.3.3).

#### 4.4 Оцінка якісних показників

Коефіцієнт підсилення антени (дБі) при відсутності великих неоднорідностей поверхні дзеркала розраховується за формулою:

$$G = 10 \lg(k * (\pi * D/\lambda)^2) \quad (4.4.1)$$

де  $D$  – діаметр антени,  $\lambda$  – довжина хвилі сигналу на прийомі,  $k = 0.6$  – коефіцієнт використання площі розкриву.

Значення еквівалентної ізотропно-випромінюваної потужності (дБ) для БС визначається за формулою:

$$EIVП = P_{пд} + G_{бс} \quad (4.4.2)$$

де  $P_{пд}$  – потужність передавача (дБ),  $G_{бс}$  – підсилення антени (дБі).

Значення еквівалентної ізотропно-випромінюваної потужності на радіоканал (Вт) для ШСЗ визначається за формулою:

$$EIVП_{р.к.} = \frac{EIVП_{тр} * \Delta F_{р.к.}}{\Delta F_{т.р.}} \quad (4.4.3)$$

де  $EIVП_{тр}$  – еквівалентна ізотропно-випромінювана потужність транспондера, Вт,  $\Delta F_{р.к.}$  – полоса пропускання радіоканала МГц,  $\Delta F_{т.р.}$  – полоса пропускання транспондера МГц.

Полоса пропускання радіоканалу розраховується за формулою:

$$\Delta F_{р.к.} = 1.2 * \frac{B}{(\log_2 M) * r} \quad (4.4.4)$$

де  $r = 3/4$  – швидкість кодування,  $M$  – позиційність модуляції,  $B$  – швидкість передачі, Мбіт / с.

Потужність сигналу на вході приймача (дБВт) визначається виразом:

$$P_{с.вх} = EIVП - L_{сум} + G_{пр} \quad (4.4.5)$$

де ЕІВП - ефективна ізотропна випромінювана потужність передавальної станції ШСЗ, дБВт;  $G_{\text{ПР}}$  – коефіцієнт підсилення приймальної антени, дБі;  $L_{\text{сум}}$  - сумарні втрати, дБ;

Повна потужність шуму на вході приймача земної станції визначається як:

$$P_{\text{ШСЗ}} = k * T_{\Sigma} * \Delta f_{\text{ш}} \quad (4.4.6)$$

де  $k$  – стала Больцмана рівна  $1.38 * 10^{-23}$  ВТ/Гц\*К,  $\Delta f_{\text{ш}}$  – еквівалентна шумова полоса приймача Гц,  $T_{\Sigma}$  – сумарна еквівалентна шумова температура прийомної станції, приведена до випромінювача антени К.

Еквівалентна шумова полоса приймача розраховується за:

$$\Delta F = 1.2 * \frac{B}{(\log_2 M)} \quad (4.4.7)$$

де  $M$  - позиційність модуляції,  $B$ -швидкість передачі, Мбіт / с.

Значення сумарної еквівалентної шумової температури приймального пристрою визначається шумами антени, хвилеводного тракту приймальної станції і власними шумами приймача. Для практичних розрахунків всі складові сумарної шумової температури зручно перерахувати до опромінювача прийомної антени:

$$T_{\Sigma} = T_A + T_0 \left( \frac{1}{\eta_{\text{ПР}}} - 1 \right) + \frac{T_{\text{ПР}}}{\eta_{\text{ПР}}} \quad (4.4.8)$$

де  $T_A$  - результуюча шумова температура антени, К;  $T_0 = 290$  К - фізична температура навколишнього середовища;  $\eta_{\text{ПР}}$  - коефіцієнт передачі (по потужності) волноводного тракту приймальної станції від опромінювача антени до входу приймача (приймається рівним 0,8);  $T_{\text{ПР}}$  - власна шумова температура приймача, К.



У свою чергу для прийомної антени БС:

$$T_A = T_{ATM}(\beta) + c * T_3 + T_{косм}(\beta) \quad (4.4.9)$$

де  $T_{ATM}(\beta)$  - шумова температура, обумовлена шумами атмосфери і залежить від кута місця  $\beta$ ;  $T_3$  - шумова температура, обумовлена тепловим випромінюванням Землі = 290 К;  $T_{косм}(\beta)$  – шумова температура, обумовлена шумами космічного походження;  $c$  – коефіцієнт, який враховує усереднений рівень бокових і задніх пелюсток діаграми направленості антени. Коефіцієнт  $c = 0.2$  для антент БС.

Шумова температура атмосфери  $T_{ATM}(\beta)$  визначається випромінюванням спокійної атмосфери і впливом опадів. Це явище пояснюється законом термодинамічної рівноваги, згідно з яким середовище (атмосфера, опади) випромінює стільки ж енергії, яке поглинає. Таким чином, ця складова носить статистичний характер, пов'язаний з втратами в спокійній атмосфері і дощах, залежить від частоти і кута місця. Шумову температуру атмосфери визначаємо по рис. 4.2 - залежність шумової температури атмосфери (з урахуванням опадів) від частоти і кута місця (в дБ).

Шумова температура Землі, строго кажучи, теж залежить від кута місця, проте в практичних випадках може бути покладена рівною 290 К. Шуми космічного походження визначаються в основному випромінюваннями Галактики, Сонця і Місяця.

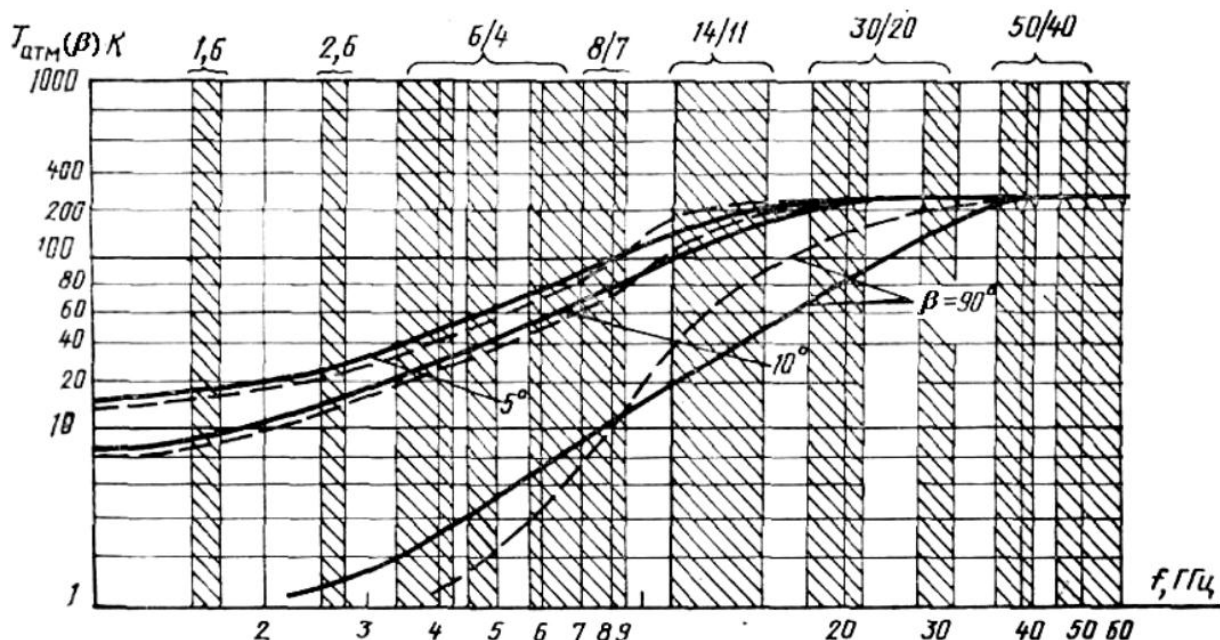


Рис. 4.2 – Шумова температура атмосфери Татм

Відношення сигнал / шум можна знайти за формулою:

$$\frac{C}{Ш} = P_{\text{с.вх}} - P_{\text{т.ш.}} \quad (4.4.10)$$

Розрахунок відносини сигнал / шум для лінії вгору ґрунтується на параметрі добротність транспондера для ШСЗ.

В процесі енергетичного розрахунку потрібно зв'язати енергетичні параметри лінії з якістю зв'язку, яке зручно звести до відношення сигнал-шум через параметр добротність:

$$\frac{C}{Ш} = \text{ЕІВП} - L_{\text{сум}} + \frac{G}{T} + 228.6 - 10\lg(\Delta f) \quad (4.4.11)$$

## 4.5 Результати енергетичного розрахунку

### 4.5.1 Розрахунок відношення сигнал/шум «лінія вниз»

Коефіцієнт посилення антени розраховується за формулою (4.4.1):

$$G = 10 \lg(0.6 * (3.14 * 1.2 / 0.02727)^2) = 40.59 \text{ дБ}$$

Для визначення ЕІВП необхідно розрахувати смугу пропускання радіоканалу за формулою (4.4.4):

$$\Delta F_{P.K.} = 1.2 * \frac{B}{(\log_2 M)^{*r}} = \Delta F_{P.K.} = 1.2 * \frac{2}{(\log_2 4)^{* \frac{3}{4}}} = 1.6 \text{ МГц}$$

Значення еквівалентної ізотропно-випромінюваної потужності на канал визначається за формулою (4.4.3):

$$EIVP_{P.K.} = \frac{EIVP_{TP} * \Delta F_{P.K.}}{\Delta F_{T.P.}} = \frac{144543 * 1.6 * 10^6}{36 * 10^6} = 64201.92 \text{ Вт} = 58.1 \text{ дБВт}$$

Потужність сигналу на вході приймача визначається виразом (4.4.5):

$$P_{C.VX} = EIVP - L_{\text{сум}} + G_{\text{ПР}} = 51.6 - 210.65 + 41.8 = -117.25 \text{ дБВт}$$

Результуюча шумова температура антени для лінії по формулі (4.4.9):

$$T_A = T_{ATM}(\beta) + c * T_3 + T_{\text{косм}}(\beta) = 100 + 0.2 * 290 + 10 = 168 \text{ К}$$

Сумарна еквівалентна шумова температура приймальної станції розраховується за формулою (4.4.8):

$$T_{\Sigma} = T_A + T_0 \left( \frac{1}{\eta_{\text{ПР}}} - 1 \right) + \frac{T_{\text{ПР}}}{\eta_{\text{ПР}}} = 168 + 290 * \left( \frac{1}{0.8} - 1 \right) + \frac{45}{0.8} = 296.75 \text{ К}$$

Еквівалентна (енергетична) шумова смуга приймача для ліній ШСЗ-ЗС визначається за формулою (4.4.7):

$$\Delta F = 1.2 * \frac{B}{(\log_2 M)} = \Delta F = 1.2 * \frac{2}{(\log_2 4)} = 1.2 \text{ МГц}$$

Повна потужність шуму на вході визначається за формулою (4.4.6):

$$P_{\text{ШСЗ}} = k * T_{\Sigma} * \Delta f_{\text{ш}} = 1.38 * 10^{-23} * 296.75 * 1.2 * 10^6 = 4.92 * 10^{-15} \\ = -126.16 \text{ дБВт}$$

Відношення сигнал / шум визначається за формулою (4.4.10):

$$\frac{C}{\text{Ш}} = P_{\text{С.ВХ}} - P_{\text{Т.Ш.}} = -117.25 - (-126.1) = 8.85 \text{ дБ}$$

#### 4.5.2 Розрахунок відношення сигнал/шум «лінія вверх»

Коефіцієнт посилення антени розраховується за формулою (4.4.1):

$$G = 10 \lg(0.6 * (3.14 * 1.2 / 0.02143)^2) = 42.68 \text{ дБ}$$

Значення еквівалентної изотропно-випромінюваної потужності для визначається за формулою (4.4.2):

$$E_{\text{ІВП}} = P_{\text{пд}} + G_{\text{бс}} = 10 \lg 25 + 42.68 = 57.27 \text{ дБ}$$

Відношення сигнал / шум розраховується за формулою (4.4.11):

$$\frac{C}{\text{Ш}} = E_{\text{ІВП}} - L_{\text{сум}} + \frac{G}{T} + 228.6 - 10 \lg(\Delta f) \\ = 57.27 - 217.3 + 6 + 228.6 - 10 \lg 4.8 * 10^6 = 7.76 \text{ дБ}$$

#### Висновки до розділу

В даному розділі було отримано практичні розрахунки енергоефективності пропонованої архітектури системи 5G на базі взаємодії наземної та супутникової складових для супутникової складової. Окрім того було проведено розрахунки затухання сигналу, який передається з супутника на наземну станцію, та вплив атмосфери на потужність передаваного сигналу. Розрахунки були проведені для БС, яка розташована у місті Київ, беручи до уваги, що супутник розташовано над географічним центром

України (для отримання оптимальної площі покриття для надання послуг різного типу). Опісля було проведено розрахунок основних параметрів назеної складової пропонованої архітектури з урахуванням усіх потенційних абонентів на території України. Отримані дані можна буде використати при практичному розгортанні пропонованої мережі і вони можуть бути взяті за основу для розробки архітектури. Були отримані статистичні дані для БС, яка буде використана для надання абонентських послуг при розгортанні мережі.

## ВИСНОВКИ

На сьогоднішній день спостерігається швидке поширення мобільних додатків, стрімке збільшення трафіку бездротової передачі даних та посилення інтеграції бездротового зв'язку у багатьох аспектах повсякденного життя. Це викликає необхідність розгортання мобільних мереж, які можуть підтримувати експоненціально зростаючий трафік бездротової передачі даних.

У роботі пропонується гібридна супутниково - наземна мережа, яка забезпечує більш високу швидкість передачі даних та менше енергоспоживання порівняно з сучасними стільниковими архітектурами LTE та WiMAX. Крім того, у роботі представляється техніко-економічне обґрунтування запропонованої архітектури з точки зору її відповідності технічним специфікаціям в існуючих стандартах. Це підтверджено технічними розрахунками, виконаними у п.4 для наземної та супутникової складових відповідно.

Окрім того, найбільш енергоефективною стане використання супутника, який розташовано на низько-орбітальній геостаціонарній орбіті, який буде розміщено над центральною точкою України для забезпечення найбільш швидкого та оптимального процесу передачі даних.

Також запропонована модель буде використовувати сліпий метод обробки сишгалів, описаний у п.3 для боротьби з колізіями на приймачі на супутниковій стороні, що являє собою когнітивність запропонованої архітектури: можливість супутника самостійно приймати рішення про валідність отриманих сигналів та їх параметри на основі прийнятого

змішаного сигналу, який являється сумою усіх сигналів, переданих на супутник.

Можна не розгортати пропоновану мережу з нуля, а використати наявну в Україні архітектуру LTE і модифікувати її, додавши супутникову складову. Це значно знизить економічні витрати при розгортанні.

Запропонована архітектура надасть змогу 2 349 692 абонентам одночасно використовувати дану архітектуру для передачі інформації та для її підкачки при середній пропускну здатності 18.25 Мбіт/сек при максимальному часі затримки при передачі даних рівним 2.6 сек – затримка при передачі від супутника. Соти можуть мати максимальний радіус покриття – 1.4 км, при видачі в обробці сигналу у 10 дБ, що є конкурентним для наявних мереж LTE та WiMAX.

Отримані дані можна буде використати при практичному розгортанні пропонованої мережі і вони можуть бути взяті за основу для розробки архітектури. Дана архітектура націлена в першу чергу на використання у цивільному зв'язку, але при необхідності дану архітектуру можна буде розгорнути для цілей воєнного зв'язку, якщо встановити відповідний прийомо-передавач на автомобіль або на корабель.

У пропонованої архітектури є один недолік: буде важко і затратно по часу і матеріальним запасам запуснути у космос достатню кількість супутників для розгортання даної мережі глобально, а також даний факт ще ускладнюється космічним сміттям, який обертається на геостаціонарній орбіті навколо Землі. Але, можливо, з плином часу людство поборе дану проблему і тоді реалізація пропонованої архітектури стане можливою.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- 1) W.Rupert, (21 October 2013). Mobile data will grow 6.3 times between 2013 and 2018 and growth will be strongest outside Europe and North America.[Online]  
Available:<http://www.analysismason.com/AboutUs/News/Insight/Mobile-data-Oct2013/>[Accessed:18 August 2014]
- 2) M. Gruber, O. Blume, D.Ferling,D. Zeller, M.A Imran, E.C.Strinati.: EARTH—EnergyAware Radio and Network Technologies IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, pp. 1-5, Sept. 2009
- 3) Кукса, В. Национальний план широкополосного доступу: екзамен на зрілість державної політики [Текст] / В. Кукса // Wireless Ukraine. — 2014. — № 18/17. — С. 21–23
- 4) В Україні розгортається мережа 3G зв'язку [Електронний ресурс] // Український державний центр радіочастот. — Режим доступу: \www/URL: <http://www.ucrf.gov.ua/pressluzhba/v-ukrayini-rozgortayetsya-merezha-3g-zv-yazku/>
- 5) <http://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/1319-ITU-R-Confers-IMT-Advanced-4G-Status-to-3GPP-LTE>
- 6) Requirements for WiMAX Coexistence with LTE Networks [Electronic resource]: WMF-T31-132-v02 // WiMAX Forum. — 2012. —
- 7) Available at: \www/URL: [http://resources.wimaxforum.org/sites/wimaxforum.org/files/technical\\_document/2012/12/WMF-T31132-v02\\_WiMAX-LTE-Coexistence.pdf](http://resources.wimaxforum.org/sites/wimaxforum.org/files/technical_document/2012/12/WMF-T31132-v02_WiMAX-LTE-Coexistence.pdf) 5. Requirements for WiMAX Forum®Release 2.2 [Electronic resource]: WMF-T31-136-R022v02 // WiMAX Forum. — 2014. —
- 8) Available at: \www/URL: [http://resources.wimaxforum.org/sites/wimaxforum.org/files/technical\\_document/2014/05/WMF-T31-136-R022v02.pdf](http://resources.wimaxforum.org/sites/wimaxforum.org/files/technical_document/2014/05/WMF-T31-136-R022v02.pdf) 6. WiMAX Forum®Air Interface Requirements. Requirements for WiMAX Air Interface. System Profile Release 2 [Electronic resource]: WMF-T21-003-R020v02 // WiMAX Forum. — 2010. —
- 9) Available at: \www/URL: [http://resources.wimaxforum.org/sites/wimaxforum.org/files/technical\\_document/2013/04/WMF-T21-003-R020v02\\_Air-Interface-Requirements.pdf](http://resources.wimaxforum.org/sites/wimaxforum.org/files/technical_document/2013/04/WMF-T21-003-R020v02_Air-Interface-Requirements.pdf) 7. Pataki, D. Safeguarding the future of mobile [Text] / D. Pataki // ITU News. — 2015. — № 5. — P. 28–30.
- 10) UQ Surpasses 10 Million WiMAX Contracts [Electronic resource] // WiMAX Forum. — 05.06.2015. — Available at: \www/URL: [http://www.wimaxforum.org/Page/News/PR/20150605\\_UQ\\_Surpasses\\_10\\_Million\\_WiMAX\\_Contracts](http://www.wimaxforum.org/Page/News/PR/20150605_UQ_Surpasses_10_Million_WiMAX_Contracts)
- 11) Parker, T. WiMAX Forum: UQ's model will help others adopt WiMAX 2.1, leverage TD-LTE devices [Electronic resource] / T. Parker // FierceWirelessTech. — 30.12.2013. — Available at: \www/URL: <http://www.fiercewireless.com/tech/story/wimaxforum-uqs-model-will-help-others-adopt-wimax-21-leverage-tdlte-devic/2013-12-30>



- 12) UQ Surpasses 10 Million WiMAX Contracts [Electronic resource] // WiMAX Forum. — 05.06.2015. — Available at: \www/URL: [http://www.wimaxforum.org/Page/News/PR/20150605\\_UQ\\_Surpasses\\_10\\_Million\\_WiMAX\\_Contracts](http://www.wimaxforum.org/Page/News/PR/20150605_UQ_Surpasses_10_Million_WiMAX_Contracts)
- 13) Шакури, М. WiMAX: развитие продолжается [Текст] / М. Шакури // Первая миля. — 2013. — № 4. — С. 16–18.
- 14) <https://docplayer.net/68784460-Analiz-stanu-mobilnih-merezh-4-go-pokolinnya-ta-perspektivi-yih-vprovadzhennya-v-ukrayini.html>
- 15) <https://uk.wikipedia.org/wiki/LTE>
- 16) H.Ishii, Y.Kishiyama,H.Takahashi.: A novel architecture for LTE-B :C-plane/U-plane split and Phantom Cell concept.IEEEGlobecom Workshops (GC Wkshps),pp.624-630, Dec. 2012.
- 17) A. Zakrzewska, D. Lopez-Perez, S. Kucera, H. Claussen.: Dual connectivity in LTE HetNets with split control-and user-plane. IEEE Globecom Workshops, pp.391-396, Dec.2013.
- 18) Inmarsat Global Limited: BGAN [Online]. Available: <http://www.inmarsat.com/service/bgan-link>
- 19) K.Sooyoung, K.Heewook, A. Do Seob.: A Cooperative Transmit Diversity Scheme for Mobile Satellite Broadcasting Systems.Advanced Satellite Mobile Systems,ASMS,pp.72-75, Aug. 2008.
- 20) <https://uk.wikipedia.org/wiki/ADSL>
- 21) O. Vidal, G. Verelst, J. Lacan, E. Albery, J. Radzik, and M. Bousquet, “Next generation High Throughput Satellite system,” IEEE First AESS European Conference on Satellite Telecommunications (ESTEL), 2012
- 22) R. Alegre-Godoy, N. Alagha, and M. A. Vazquez-Castro, “Offered Capacity Optimization mechanisms for Multi-beam Satellite Systems,” IEEE International Conference on Communications (ICC), 2012.
- 23) S. K. Sharma, S. Chatzinotas, and B. Ottersten, “Cognitive Beamhopping for Spectral Coexistence of Multibeam Satellites,” Future Network and Mobile Summit, 2013
- 24) D. Christopoulos, S. Chatzinotas, and B. Ottersten, “User Scheduling for Coordinated Dual-Satellite Systems with Linear Precoding,” IEEE International Conference on Communications (ICC), 2013.
- 25) A. Soysal, S. Ulukus, and C. Clancy, “Channel Estimation and Adaptive M-QAM in Cognitive Radio Links,” IEEE International Conference on Communications (ICC), pp. 4043–4047, 2008.

- 26) J. Palicot and C. Roland, "A New Concept for Wireless Reconfigurable Receivers," IEEE Communications Magazine, vol. 41, no. 7, 2003
- 27) V. Gouldieff, J. Palicot, and S. Daumont, "Blind Digital Modulation Classification based on Mth-Power Nonlinear Transformation," IEEE Global Conference on Signal and Information Processing, 2016
- 28) V. Weerackody, "Sensitivity of Satellite Interference to Locations of Small-Aperture Terminals," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2016.
- 29) K.Liolis et al., "Cognitive Radio Scenarios for Satellite Communications: the CoRaSat Approach," Future Network and Mobile Summit Conference, 2013.
- 30) Comtech, "CDM-625 Advanced Satellite Modem," User Manual, 2013.
- 31) J. E. Mazo, "Jitter Comparison of Tones Generated by Squaring and by Fourth-Power Circuits," Bell System Technical Journal, 1978
- 32) Головинов С.О., Хромых А.А. Проблемы управления системами мобильной связи // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2012. № 9. С. 13-14.
- 33) <https://docplayer.net/68784460-Analiz-stanu-mobilnih-merezh-4-go-pokolinnya-ta-perspektivi-yih-vprovadzhennya-v-ukrayini.html>

## Додаток А

### 4.2.1 Розрахунок параметрів підключення супутника

$$R_z := 6378$$

$$H_z := 35786$$

$$\text{gamma0} := \frac{R_z}{R_z + H_z} = 0.151266483255858$$

$$\text{Kiyv\_shirota} := 50.2$$

$$\text{Suputnik\_dovgota} := 31.2$$

$$\text{delta\_lambda} := \text{Kiyv\_shirota} - \text{Suputnik\_dovgota} = 18.990000000000000$$

$$\text{cos\_fi} := \cos(\text{Kiyv\_shirota}) \cdot \cos(\text{delta\_lambda}) = 0.990143826876948$$

$$\text{Azimut} := 180 + \text{atan}\left(\frac{\tan(\text{delta\_lambda})}{\sin(\text{Kiyv\_shirota})}\right) = 181.5388529401529$$

$$\text{Kyt\_miscya} := \text{atan}\left[\frac{\cos\_fi - \text{gamma0}}{\sqrt{1 - (\cos\_fi)^2}}\right] = 1.405367683537350$$

$$d := R_z \cdot \frac{\sqrt{1 + \text{gamma0}^2 \cdot \cos\_fi}}{\text{gamma0}} = 42638.9592025514$$

### 4.2.2 Розрахунок затухання сигналу

$$\text{lambda} := \frac{300000000}{10000000000} = 0.03$$

$$L0 := 20 \log\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot d}{\text{lambda}}\right) = 145.037903942256$$

$$h0 := 6$$

$$h1 := \frac{h0 - 0.067}{\sin(\text{Kyt\_miscya})} = 6.01511925576348$$

$$h\_H20 := \left[ \frac{1}{(f - 183.3)^2} \right] + \left[ \frac{1}{(f - 323.8)^2 + 1} \right] + 2.2 + \left[ \frac{3}{(f - 22.3)^2 + 3} \right]$$

$$L_{\text{desch}} := \frac{h\_H20 - 0.067}{\sin(\text{Kyt\_miscya})} = 2.162523069702312$$

$$L\_sum := L\_doshd + L0 + Latmosf = 146.5487694800696$$

$$h\_i := 7.8 - 0.1 \cdot Kiyv\_shirota = 2.7729999999999999; a\_dod := 4.21 \cdot 10^{-5} \cdot 10^{2.49} = 0.0130101437708822$$

$$l\_dosch := \frac{h\_dosch - h\_nad\_rivnem\_morya}{\sin(Kyt\_miscya)} = 1.712529674779124;$$

$$Latmosf := LO2 \cdot 11 + LH20 \cdot 12 = 0.1874486539512110; h\_dosch := 1.594 + \log\left(\frac{l\_dosch}{10}\right) = 2.09914997831990;$$

$$h\_nad\_rivnem\_morya := 0.4;$$

$$LH20 := 2.944 \cdot 10^{-4} \cdot 14^2 \cdot \left[ 4.23 \cdot 10^{-5} + \frac{0.094}{\left(-0.741 + \frac{10}{30}\right)^2 + 0.008836} + \frac{0.094}{\left(0.741 + \frac{10}{30}\right)^2 + 0.008836} \right] = 0.0356556046234948$$

$$LO2 := 3.855 \cdot 10^{-4} \cdot 10^2 \cdot \left[ \frac{0.05}{\left(2 + \frac{10}{30}\right)^2 + 0.0025} \right] + \left[ \frac{0.05}{0.000324 + \left(\frac{10}{30}\right)^2} \right] + \left[ \frac{0.05}{\left(2 - \frac{10}{30}\right)^2 + 0.0025} \right] = 0.0183442059412192$$

$$L\_doshd := a\_dod \cdot l\_dosch^{b\_dod} \cdot l\_dosch = 1.323416883861663;$$

$$b\_dod := 1.41 \cdot 10^{-0.0779} = 1.178471577576480$$

## Додаток Б

### 4.3 Енергоспоживання і швидкість встановлення з'єднання. Аналіз супутникової складової

$$f := 1000000$$

$$y := 30000$$

$$G_t := 10 \quad \text{lamb} := \frac{y}{f} = 0.03$$

$$G_r := 1.5$$

$$\text{pi} := 3.141592$$

$$d_{\text{GEO\_and\_LEO}} := \begin{pmatrix} 36000 \\ 800 \end{pmatrix}$$

$$Pr := -80$$

$$Pr_{\text{watt}} := 10^{\frac{Pr-30}{10}} = 1 \times 10^{-11}$$

$$Pt_{\text{GEO\_and\_LEO}} := \frac{Pr_{\text{watt}}}{G_t \cdot G_r \cdot \left( \frac{\text{lamb}}{4 \cdot \text{pi} \cdot d_{\text{GEO\_and\_LEO}}} \right)^2} = \begin{pmatrix} 151.59711842879634 \\ 0.07486277453273893 \end{pmatrix}$$

$$t_{\text{zatr\_GEO\_and\_LEO}} := \frac{d_{\text{GEO\_and\_LEO}}}{y} = \begin{pmatrix} 0.12 \\ 0.002666666666666667 \end{pmatrix}$$

$$\text{Power\_winning} := \frac{151.597}{0.075} = 2021.2933333333333$$

#### 4.3.1 Аналіз наземної складової

$$N_{\text{ukr}} := 4450000$$

$$N_{\text{ab}} := N_{\text{ukr}} \cdot 0.3 = 13350000$$

$$A_{\text{ser}} := 0.05$$

$$A_{\text{odn}} := A_{\text{ser}} \cdot N_{\text{ab}} = 667500$$

$$t_{\text{ser}} := 90$$

$$C_{\text{ser\_viz}} := 5$$

$$C_{\text{ser}} := 0.7$$

$$I_{\text{ser}} := 2500$$

$$R_{ser} := 32$$

$$y0 := \frac{C_{ser} \cdot t_{ser}}{3600} = 0.0175 \quad A_{sum} := Y0_{sum} + A_{odn} = 2349692.708333333$$

$$Y0_{ser} := y0 + y0_{ser} = 0.12600694444444444 \quad y0_{ser} := \frac{C_{ser\_viz} \cdot t_{ser\_per}}{3600} = 0.10850694444444444$$

$$t_{ser\_per} := \frac{I_{ser}}{R_{ser}} = 78.125 \quad Y0_{sum} := N_{ab} \cdot Y0_{ser} = 1682192.7083333333$$

### 4.3.2 Радіус сот

$$S_{Ukraine} := 603700$$

$$N_{odn} := 234969$$

$$n_a := \frac{N_{odn}}{S_{Ukraine}} = 3.892151730992214$$

$$N_c := 20$$

$$R0_{max} := 0.62 \cdot \sqrt{\frac{N_c}{n_a}} = 1.405438370192174$$

### 4.3.3 Розрахунок інших параметрів наземної складової

$$G_{vig} := 2$$

$$E_{bNo} := 1.7$$

$$R_{chip\_stand} := 1.44 \cdot 10^6$$

$$R_{kor} := 144 \cdot 10^3$$

$$T_{abs} := 288$$

$$B := 1.44 \cdot 10^6$$

$$K_{sh} := 2.4$$

$$H_{stand} := 0.4$$

$$k := 1.38 \cdot 10^{-23}$$

$$N_{tepl} := k \cdot T_{abs} \cdot B = 5.7231359999999999 \cdot 10^{-15}$$

$$N_{tepl\_db} := 10 \cdot \log\left(\frac{N_{tepl}}{0.001}\right) = -112.4236593374428$$

$$P_{sh} := N_{tepl\_db} + K_{sh} = -109.923659337442$$

$$G_{obr} := 10 \log\left(\frac{R_{chip\_stand}}{R_{kor}}\right) = 10$$

$$L_{dopust} := -10 \cdot \log(1 - H_{stand}) = 3.01029995663981$$

$$P_{dopust} := P_{sh} + E_{bNo} - G_{obr} + L_{dopust} - G_{vig} = -117.2133593808030$$