

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 621.396.43

До захисту допущено  
**В.о. завідувача кафедри**  
 \_\_\_\_\_ **Явіся**

(підпис) В.С.  
 (ініціали, прізвище)

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2018р.

**Магістерська дисертація**  
**на здобуття ступеня магістра**

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

спеціалізація Апаратно-програмні засоби електронних комунікацій  
 на тему: «Дослідження параметрів сигналів цифрового телебачення при їх передаванні по радіолінії терагерцового діапазону»

Виконав: студент 6 курсу, групи ТЗ-61м  
 (шифр групи)

Кисельов Вячеслав Олександрович  
 (прізвище, ім'я, по батькові)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Науковий керівник професор каф. телекомунікацій, к.т.н., професор Якорнов Є.А.  
 (посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Консультант старший викладач Авдєєнко Г.Л.  
 (посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Рецензент доцент каф. ТС, к.т.н., доцент Гаттуров В.К.  
 (посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

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)

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)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 р.

## ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Кисельову Вячеславу Олександровичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Дослідження параметрів сигналів цифрового телебачення при їх передаванні по радіолінії терагерцового діапазону

науковий керівник дисертації Якорнов Євгеній Аркадійович, к.т.н., професор,  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «06» «04» 2018р. № 1105-с

2. Строк подання студентом дисертації \_\_\_\_\_ « \_\_\_\_\_ » травня 2018р.

3. Об'єкт дослідження технології терагерцового діапазону частот

4. Предмет дослідження параметри сигналів цифрового телебачення та їх зміна при передачі цих сигналів по радіолінії терагерцового діапазону

5. Перелік завдань, які потрібно розробити

- аналіз сучасного стану розвитку технологій для створення бездротових телекомунікаційних систем терагерцового діапазону
- розробка структурної схеми бездротової телекомунікаційної системи терагерцового діапазону

- розрахунок енергетичного бюджету радіолінії терагерцового діапазону
- створення експериментального зразка радіолінії терагерцового діапазону частот та проведення за допомогою його експериментальних досліджень параметрів цифрового телебачення.

#### 6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу

1. Тема, актуальність, мета, задачі.
2. Аналіз сучасного стану розвитку технологій для створення безпроводових телекомунікаційних систем терагерцового діапазону.
3. Структурна схема приймально-передавального тракту.
4. Огляд енергетичного бюджету радіоліній терагерцового діапазону.
5. Дослідження наскрізної АЧХ тракту.
6. Експериментальні дослідження параметрів радіосигналу стандарту DVB-S при його передаванні через прийомопередавач терагерцового діапазону
7. Експериментальні дослідження параметрів радіосигналу стандарту DVB-C при його передаванні через прийомопередавач терагерцового діапазону.
8. Висновки.

#### 7. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	ст.викл. Г.Л.Авдеєнко	20.11.2017 р	01.02.2018 р
2	ст.викл. Г.Л.Авдеєнко	01.02.2018 р	01.03.2018 р
3	ст.викл. Г.Л.Авдеєнко	01.03.2018 р	15.04.2018 р
4	ст.викл. Г.Л.Авдеєнко	15.04.2018 р	15.05.2018 р

#### 8. Дата видачі завдання 10.09.2016

## Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Розробка, оформлення, узгодження та затвердження технічного завдання на дипломну роботу	10.09.2016	Виконано
2	Опрацювання літературних джерел з теми досліджень	01.03.2017	Виконано
3	Аналіз вимог завдання, вибір методів і засобів розв'язання поставленої задачі	01.04.2017	Виконано
4	Дослідження телекомунікаційних параметрів сигналів для передачі по радіорелейних лініях зв'язку терагерцового діапазону частот	01.06.2017	Виконано
5	Розробка імітаційної моделі радіолінії терагерцового діапазону, що призначений для передавання/прийняття сигналу ТВ мовлення	01.08.2017	Виконано
6	Дослідження наскрізної АЧХ тракту	01.10.2017	Виконано
7	Дослідження передачі сигналів цифрового телебачення стандарту DVB-S по радіолінії терагерцового діапазону	01.12.2017	Виконано
8	Дослідження передачі сигналів цифрового телебачення стандарту DVB-C по радіолінії терагерцового діапазону	01.02.2018	Виконано
9	Оформлення магістерської дисертації	01.05.2018	Виконано

Студент

\_\_\_\_\_

(підпис)

Кисельов В.О.

\_\_\_\_\_

(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

\_\_\_\_\_

(підпис)

Якорнов Є.А.

\_\_\_\_\_

(ініціали, прізвище)

**Пояснювальна записка  
до магістерської дисертації**

на тему: Дослідження параметрів сигналів цифрового телебачення при їх передаванні по радіолінії терагерцового діапазону

Київ – 2018 року

## РЕФЕРАТ

Робота містить 103 сторінки, 73 рисунки, 10 таблиць. Було використано 18 джерел.

### **Актуальність теми**

Використання терагерцового діапазону в телекомунікаціях перспективно в силу перевантаженості діапазонів більш низьких частот, зростання інформаційного трафіку, який вимагає передачі гігабітних цифрових потоків по лініях зв'язку є актуальним. Тому передбачається створення принципово нових за габаритами, завадозахищеності та енергоефективності пристроїв суб- та терагерцового діапазону для високошвидкісного передавання відеосигналів, для радіорелейних систем прямої видимості, для транспортних мереж мобільного зв'язку п'ятого покоління (5G) та радарів для високоточного виявлення і розпізнавання малорозмірних швидкісних цілей.

І хоча дальність зв'язку в терагерцевому діапазоні оцінюється декількома кілометрами через обмеження у вихідній потужності передавача і чутливістю приймача, є ряд перспективних застосувань каналів передачі, що базуються на цьому частотному діапазоні.

Розвиток елементної бази радіоелектронних пристроїв, широке впровадження цифрової техніки формування та оброблення сигналів, дозволяє по-новому підійти до розв'язування багатьох задач, які раніше стримували втілення розробок телекомунікаційних систем суб- та терагерцового діапазонів. Освоєння суб- та терагерцового діапазонів саме по собі викликає значний інтерес у зв'язку з їх унікальними властивостями, зокрема щодо реалізації завадозахищених, екологічно безпечних каналів з гігабітною пропускною здатністю. Зазначені обставини роблять цей діапазон унікальним для побудови телекомунікаційних систем та мереж, зокрема персональних, локальних і міських транспортних безпроводових мереж, а також радіоканалів "точка-точка" (радіорелейних ліній).

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами**

Магістерська дисертація виконувалась згідно з планом наукових досліджень кафедри телекомунікацій Інституту телекомунікаційних систем в рамках держбюджетної науково-дослідної роботи (тема №2035-П) «Розробка імпульсної над широкосмугової системи радіозв'язку терагерцового діапазону частот».

### **Мета й завдання дослідження**

Метою даної магістерської дисертації переконатися в можливості застосування безпроводових телекомунікаційних систем терагерцового діапазону для високоякісного передавання сигналів цифрового телебачення..

Для досягнення мети дослідження було поставлено та вирішено такі основні задачі:

1. Аналіз сучасного стану розвитку технологій для створення бездротових телекомунікаційних систем терагерцового діапазону.
2. Розробка структурної схеми бездротової телекомунікаційної системи терагерцового діапазону.
3. Розрахунок енергетичного бюджету радіолінії терагерцового діапазону.
4. Створення експериментального зразка радіолінії терагерцового діапазону частот та проведення за допомогою його експериментальних досліджень параметрів цифрового телебачення.

### **Об'єкт дослідження**

Технології терагерцового діапазону частот.

### **Предмет дослідження**

Параметри сигналів цифрового телебачення та їх зміна при передачі цих сигналів по радіолінії терагерцового діапазону.

### **Методи дослідження**

Методи теорії поширення радіохвиль, принципи побудови приймальних та передавальних пристроїв. Методи формування сигналів аналогового та

цифрового телебачення. Методи вимірювання сигналів аналогового телебачення, імітаційне моделювання, аналітичні розрахунки.

### **Практичне значення одержаних результатів**

Передача сигналу в ТГц діапазону з використанням модуляції з високою позиційністю модуляції не вище чим QAM-64 являється надійною. З використанням модуляції вище чим QAM-64 (наприклад QAM-256), необхідно вжити необхідних заходів, для зменшення рівня шумів в передавальному та приймальному трактах, а також збільшення частоти гетеродина.

Розробки магістерської дисертації були доведені до конкретної реалізації у вигляді моделі прийомопередавального тракту системи, що працює в діапазоні частот 130,4 ГГц.

### **Впровадження роботи**

Результати магістерської роботи впроваджено в навчальний процес Інституту телекомунікаційних систем, а саме в якості лабораторної роботи з дисципліни «Телекомунікаційні безпроводові системи – 1».

### **Ключові слова.**

Радіолінія терагерцового діапазону, цифрове телебачення, безпроводові телекомунікаційні, прийомопередавальний тракт, модуляція.



## **ABSTRACT**

This work contains 103 pages, 73 figures, and 10 tables and 18 sources have been used.

### **Actuality of theme**

The use of the terahertz range in telecommunications is promising due to the overloading of lower frequency ranges, the growth of information traffic, which requires the transmission of gigabit digital streams along the communication lines, is relevant. Therefore, it is envisaged to create fundamentally new dimensions, impedance and energy efficiency of sub-and terahertz range devices for high-speed video transmission, for radio-relay systems of direct visibility, for fifth-generation mobile communication networks (5G) and radars for high-precision detection and detection of small-scale speed goals. Despite the fact that the range in the terahertz range is estimated at several kilometers due to limitations in the transmitter output power and receiver sensitivity, there are a number of promising applications of transmission channels based on this frequency range.

The development of the elemental base of radio electronic devices, the widespread introduction of digital technology for the formation and processing of signals, allow the use of new approaches to the solution of many problems that previously held back the implementation of the development of telecommunication systems of sub- and terahertz ranges. The development of sub-and terahertz ranges is of considerable interest due to unique properties, in particular, regarding the implementation of malicious, environmentally safe channels with gigabit throughput. These circumstances make this range unique for the construction of telecommunication systems and networks, including personal, local and urban transport wireless networks, as well as point-to-point radio (radio relay lines).

### **Relation with scientific programs, plans, themes**

The Master's dissertation was carried out in accordance with the research plan of the Telecommunication Department of the Institute of Telecommunication Systems within the framework of state budget research work (theme №2035-II)

"Development of pulsed over the broadband radio-telegraph system of the terahertz frequency range".

### **The purpose and tasks of the research**

The purpose of this master's thesis is to make sure that wireless telecommunication systems can use the terahertz range for high-quality digital TV signals.

To achieve the research goal, the following main tasks were set and solved:

5. Analysis of the current state of technology development for the creation of wireless telecommunication systems terahertz range.
6. Development of the structural scheme of the wireless telecommunication system of the terahertz range.
7. Calculation of the energy budget of the radiolino terahertz range.
8. Creation of a pilot sample of the radio frequency range of the terahertz frequency range and conducting with its experimental research the parameters of digital television..

### **Object of research**

Technologies terahertz frequency range.

### **Subject of research**

Parameters of digital television signals and their change when transmitting these signals over the tertiary ring radio line.

### **Research methods**

Methods of the theory of radio waves propagation, principles of construction of receiving and transmitting devices. Methods of forming signals of analogue and digital television. Methods of measurement of analogue television signals, simulation, analytical calculations.

### **The practical value of the results obtained**

The transmission of a signal in the THZ range using modulation with high modulation position is not higher than the QAM-64 is reliable. Using modulation higher than QAM-64 (eg QAM-256), it is necessary to take the necessary measures to

reduce the noise in the transmission and receiving paths, as well as to increase the frequency of the heterodyne.

The development of the master's thesis was brought to a concrete implementation in the form of a model transceiver system of the system operating in the frequency range 130.4 GHz.

### **Implementation**

The results of the Master's dissertation are introduced into the educational process of the Institute of Telecommunication Systems, namely as a laboratory work on the discipline "Telecommunication Wireless Systems - 1".

### **Keywords**

Terahertz radiation range, digital television, wireless telecommunication, transceiver, modulation.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	14
ВСТУП.....	15
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ СТВОРЕННЯ БЕЗПРОВОДОВИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДІАПАЗОНУ .....	11
1.1 Основні відомості про терагерцовий діапазон частот та особливості поширення радіохвиль в ньому.....	11
1.2 Огляд технічних рішень з побудови перспективних радіоліній терагерцового діапазону .....	17
1.3 Напрямок використання терагерцового діапазону безпроводових телекомунікаційних систем.....	25
1.4 Роль наукової технічної спільноти України, в області дослідження діапазону терагерцових частот та створення перспективних зразків телекомунікаційної техніки терагерцового діапазону частот .....	27
РОЗДІЛ 2 ПРИЙМАЛЬНОПЕРЕДАВАЛЬНИЙ ТРАКТ РАДІОРЕЛЕЙНОЇ СИСТЕМИ СУБТЕРАГЕРЦОВОГО ДІАПАЗОНУ 130...134 ГГц .....	33
2.1 Структурна схема приймальнопередавального тракту....	33
2.2 Функціональні вузли прийомопередавача .....	35
2.3 Конструктив приймальнопередавального тракту радіорелейної системи .....	53
2.4 Антена для приймальнопередавального тракту суб-терагерцового діапазону .....	55

					КПІ ім. Ігоря Сікорського 1105-с 08.ТЗ-61м.2018.ПЗ			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.	Кисельов В.О.				Дослідження параметрів сигналів цифрового телебачення при їх передаванні по радіолінії терагерцового діапазону	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.	Якорнов В.О.							
Реценз.	Гаттуров В.К.							
Н. Контр.	Петрова В							
Затверд.	Явіся В.С.							

РОЗДІЛ 3 РОЗРАХУНОК ЕНЕРГЕТИЧНОГО БЮДЖЕТУ РАДІОЛІНІЙ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДІАПАЗОНУ .....	60
3.1 Початкові дані та обмеження.....	60
3.2 Розрахунок дальності дії радіоліній терагерцового діапазону при передаванні цифрового сигналу різних стандартів .....	61
РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СИГНАЛІВ ЦИФРОВОГО ТЕЛЕБАЧЕННЯ ПРИ ЇХ ПЕРЕДАВАННІ ПО РАДІОЛІНІЇ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДІАПАЗОНУ.....	66
4.1 Дослідження наскрізної АЧХ тракту.....	66
4.2 Експериментальні дослідження параметрів радіосигналу стандарту DVB-S при його передаванні через прийомопередавач терагерцового діапазону.....	73
4.3 Експериментальні дослідження параметрів радіосигналу стандарту DVB-C при його передаванні через прийомопередавач терагерцового діапазону з модуляцією QAM-64 .....	80
4.3.1 Передача одного сигналу стандарту DVB-C з частотою 845 МГц.....	82
4.3.2 Передача двох сигналів стандарту DVB-C з частотами 845МГц та 853 МГц.....	85
4.3.3 Передача трьох сигналів стандарту DVB-C з частотами 845МГц, 853МГц та 861МГц.....	87
4.4 Експериментальні дослідження параметрів групового сигналу, що складається з трьох сигналів стандарту DVB-C з модуляцією QAM-256 при його передаванні через прийомопередавач терагерцового діапазону.....	91
ВИСНОВКИ ДО РОБОТИ.....	95
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ .....	96

					КПІ ім. Ігоря Сікорського 1105-с 08.ТЗ-61м.2018.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АЧХ – амплітудно-частотна характеристика

ВЧ – високочастотний

ГГц – гігагерц

МШП – мало шумливий підсилювач

НВЧ – надвисокочастотний діапазон

ППФ – полосо-пропускний фільтр

ППЧ – підсилювач проміжної частоти

ПЧ – проміжна частота

СПФ – смуго-пропускаючий фільтр

ТГц – терагерц

ФНЧ – фільтр нижніх частот

ЦРРЛ – цифрова радіорелейна лінія

HD-SDI – послідовний цифровий інтерфейс високої чіткості (High-Definition Serial Digital Interface)

## ВСТУП

Використання терагерцового діапазону в телекомунікаціях перспективно в силу перевантаженості діапазонів більш низьких частот, зростання інформаційного трафіку, який вимагає передачі гігабітних цифрових потоків по лініях зв'язку є актуальним.

Оскільки пропускна здатність лінії радіозв'язку збільшується із ростом смуги частоти сигналу, то використання доступного і поки не ліцензійного частотного ресурсу є потужним засобом збільшення величини інформаційного трафіку. Особливістю терагерцових хвиль є відносно сильне загасання в атмосфері, викликане дощем і резонансним поглинанням в молекулах кисню та води, тому вони придатні для радіозв'язку на малих відстанях.

В даний час в мережах зв'язку існує нагальна потреба в широкосмуговому безпроводовому обладнанні, здатному підтримувати високі швидкості передачі даних та нестисненого HD-відео. Тому у розробників телекомунікаційної апаратури є великий інтерес до високошвидкісних безпроводових технологій терагерцового діапазону частот, оскільки вони можуть забезпечити достатню пропускну здатність каналів передачі. Розвиток елементної бази радіоелектронних пристроїв, широке впровадження цифрової техніки формування та оброблення сигналів, дозволяє по новому підійти до розв'язування багатьох задач, які раніше стримували втілення розробок телекомунікаційних систем суб- та терагерцового діапазонів.

Метою даної магістерської дисертації переконатися в можливості застосування безпроводових телекомунікаційних систем терагерцового діапазону для високоякісного передавання сигналів цифрового телебачення.

Для досягнення мети дослідження було поставлено та вирішено такі основні задачі:

1. Аналіз сучасного стану розвитку технологій для створення бездротових телекомунікаційних систем терагерцового діапазону.

2. Розробка структурної схеми бездротової телекомунікаційної системи терагерцового діапазону.

3. Розрахунок енергетичного бюджету радіолінії терагерцового діапазону.

4. Створення експериментального зразка радіолінії терагерцового діапазону частот та проведення за допомогою його експериментальних досліджень параметрів цифрового телебачення. Використовуючи макети віртуальної машини та віртуального контейнера, проаналізувати придатність їх використання в системі хмарних сервісів.

Об'єктом дослідження виступають технології терагерцового діапазону частот.



# РОЗДІЛ 1

## АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ РОЗВИТКИ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ СТВОРЕННЯ БЕЗПРОВОДОВИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДІАПАЗОНУ

### 1.1 Основні відомості про терагерцовий діапазон частот та особливості поширення радіохвиль в ньому.

Появу терміну «терагерцовий» (“terahertz”) пов’язують з роботою Флемінга (Fleming) [1, 2] в 1974 р., де цей термін був використаний для опису спектрального діапазону частот лінії інтерферометра Майкельсона. Роком раніше, Керекмен (Kerestman) [3] застосував термін «терагерц» для позначення частоти випромінювання детекторного діоду з точковим контактом. В роботі [4] Ешлі та Палка (Ashley і Palka) використали вказаний термін для позначення резонансної частоти водневого лазера. В області спектроскопії даний термін ввели набагато раніше для опису діапазону частот випромінювання нижче далекої інфрачервоної (ІЧ) області. Так, в 1970 р. згідно академічного словника Oxford English Dictionary термін «терагерц» був застосований для опису частотного діапазону роботи HeNe-лазеру.

Терагерцовими хвилями останнім часом називають електромагнітні хвилі в частотному діапазоні  $10^2 \dots 10^4$  ГГц (або з довжинами хвиль від 3 мм до 30 мкм) [5]. Іноді (за аналогією з рентгенівськими променями) їх називають «Т-променями». Вони займають більшу частину електромагнітного спектру між інфрачервоним і мікрохвильовим діапазонами [5, 6]. Вважається, що в порівнянні з відносно добре вивченими і технічно оснащеними мікрохвильовим, оптичним і рентгенівським діапазонами досягнення в галузі дослідження та застосування терагерцового випромінювання поки обмежені і залишаються скоріше на демонстраційному рівні, незважаючи на великі потенційні можливості технічного та біомедичного застосування [5, 7].

Слід зазначити деяку невідповідність поширеного на даний час терміну до раніше прийнятого. За довжинами хвиль в спектрі електромагнітного випромінювання вже давно використовуються інші назви. Після радіохвиль в бік зменшення довжини хвилі послідовно розташовані сантиметровий, міліметровий, субміліметровий, дальній і ближній інфрачервоні діапазони, за якими безпосередньо слідує видиме світло і ультрафіолет. Ці діапазони охоплюють всі довжини хвиль, і між ними не існує жодних проміжків. Аналогічно грецьким приставок «кіло» -  $10^3$ , «мега» -  $10^6$ , «гіга» -  $10^9$  вводиться «тера» -  $10^{12}$ . І, отже, до терагерцового діапазону слід було б відносити випромінювання з частотами від  $10^3$  до  $10^6$  ГГц, з довжинами хвиль від 0,3 мм до 0,3 мкм, відповідно, тобто більшу частину субміліметрового, весь інфрачервоний діапазон і навіть частина видимого діапазону [7, 8]. Таку невідповідність викликано, перш за все, тим, що субміліметровий і дальній інфрачервоний діапазони дійсно відставали як в області чисто фізичних досліджень, так і в біомедичній галузі. У цьому частотному проміжку було важко застосовувати методи, ідеї та технічні рішення, які цілком себе виправдали при освоєнні сусідніх діапазонів.

Таким чином, терагерцовий діапазон частот від 100 ГГц до 10 ТГц ( $1 \text{ ТГц} = 10^3 \text{ ГГц}$ ) лежить на межі між електронікою і фотонікою. Знизу він визначений частотно-часовим обмеженням (більше 100 ГГц) електронних переходів у напівпровідникових структурах, а зверху - максимальною довжиною хвилі квантових переходів лазерних структур (рис. 1.1.). Цей діапазон хвиль знаходиться на шкалі електромагнітних хвиль між мікрохвильовим діапазоном і інфрачервоним та видимим діапазоном і частково перекриває високочастотну частину діапазону вкрай високих частот (ВВЧ) (100...300 ГГц) та низькочастотну частину інфрачервоного діапазону [9].



Рис.1.1 Розміщення терагерцового діапазону в електромагнітному спектрі

Взаємодія терагерцових хвиль з газами атмосфери, рідинами, різними твердими середовищами і матеріалами має свою специфіку, яка проявляється в суттєвій відмінності ослаблення, проникної здатності, розсіювання, віддзеркалення та випромінювання цих хвиль в порівнянні з оптичними хвилями. Ця специфіка і визначає ті задачі, вирішення яких потрібно здійснювати з використанням терагерцових хвиль в сукупності з хвилями оптичного та надвисокочастотного діапазонів, які уже широко використовуються в різних областях.

В терагерцовій спектральній області випромінювання погано працюють як радіофізичні методи - методи електроніки (зі сторони довгих хвиль), так і оптичні методи - методи фотоніки (зі сторони коротких хвиль). Як наслідок: відсутність прийнятних джерел випромінювання та чутливих приймачів випромінювання в терагерцовій області.

Застосування електромагнітного випромінювання в терагерцовому діапазоні частот може дати потужний імпульс науковим дослідженням в самих різних областях знань. Так, наприклад, в цій надзвичайно великій смузі частот 2900 ГГц терагерцового діапазону, яка в 100 раз більша смуги частот надвисокочастотного діапазону (НВЧ), сховані значні резерви реалізації телекомунікаційних систем з надзвичайно високими значеннями пропускної здатності порядку десятків і сотен Гбіт/с.

Порівняно з видимим і ІК-випромінюванням, терагерцове випромінювання є довгохвильовим, а значить, що воно менш схильне до розсіювання. В результаті, в цьому діапазоні прозорими є багато сухих

діелектричних матеріалів, таких як тканини, дерево, папір, пластмаси. Тому терагерцове випромінювання можна використовувати для неруйнівного контролю матеріалів, сканування в аеропортах та ін. У той же час довжина хвилі випромінювання досить мала, щоб забезпечити субмікронний просторовий дозвіл. При використанні методів ближнього поля може бути досягнуто просторовий дозвіл порядку нанометрів.

Як відомо, молекули будь-якої речовини вібрують, тобто скоюють дуже швидкі коливання. Кожна речовина має свої, властиві тільки їй суто індивідуальні частоти коливань молекул, але всі ці частоти лежать саме в терагерцовому діапазоні. Таким чином, розробка джерел і приймачів коливань відповідних частот означала б значний прогрес в області спектрального аналізу і дозволила б безпомилково ідентифікувати будь-які відомі науці речовини та їх з'єднання, де б вони не знаходилися, - будь то в живих клітинах або в космосі. Озброєні такою терагерцовою технологією радіоастрономи можуть набагато глибше осягнути механізми, що керують процесами утворення зірок і галактик.

В області фізики твердого тіла тривалість протікання багатьох процесів прекрасно співвідноситься з часовими параметрами терагерцового випромінювання. І що ще дуже важливо: величина енергії, необхідної для того, щоб запустити ці процеси, приблизно така, що вони якраз можуть бути запущені за допомогою терагерцового опромінювання. Завдяки цьому в справі вивчення та аналізу процесів, що відбуваються в твердих тілах, відкриваються абсолютно нові можливості, можливості, яких до цих пір просто не було.

Терагерцове випромінювання має і ще одну корисну властивість: подібно рентгенівському, вона дозволяє заглянути всередину матерії, просвітити її. Це може означати нові методи дефектоскопії та контролю якості на виробництві. Нітрохи не менш райдужні перспективи відкриваються і перед біологами і медиками. Справа в тому, що терагерцове випромінювання, на відміну від рентгенівського, не завдає шкоди живим тканинам, оскільки для отримання знімка достатньо дуже слабкого і дуже короткого імпульсу. Але, незважаючи на низьку інтенсивність і малу тривалість опромінювання,

контрастність зображення при цьому виявляється значно вище, ніж при традиційному рентгенологічному або ультразвуковому обстеженні.

Терагерцове випромінювання є неіонізуюче, на відміну від рентгеновського випромінювання, використовуваного в медичній діагностиці. Водночас, різні біологічні тканини володіють істотно різним поглинанням в даному діапазоні, що дозволяє забезпечити контрастність знімків. Однак, надзвичайно високе поглинання водою не дозволяє терагерцовому випромінюванню проникати глибоко в тканини, що обмежує область його застосування поверхнею тканин.

Когерентна терагерцова спектроскопія в часовій області, забезпечує надшироку частотну смугу і високий дозвіл за часом, дозволяє досліджувати склад, електронні та коливальні властивості твердих тіл, рідин і газів, плазми і плазмopodobних середовищ, потоків. Багато біологічних і хімічних агентів мають спектральні «відбитки пальців» в терагерцовому діапазоні, пов'язані з унікальними коливальними і обертальними рівнями молекул, що дозволяє досліджувати їх хімічний склад за допомогою терагерцового випромінювання. Цю властивість можна застосувати для діагностики захворювань, виявлення біологічних і хімічних агентів, забруднень, контролю якості продуктів харчування і медикаментів. Одним з важливих можливих застосувань є виявлення замаскованої пластикової вибухівки. Детектування пов'язаних станів генетичного матеріалу (ДНК і РНК) шляхом прямого використання терагерцового випромінювання, без застосування спеціальних маркерів, дозволить в майбутньому проводити безмаркерний генетичний аналіз біочипів.

Відомо, що практично всі біологічні структури мають власні резонансні частоти, на які вони відгукуються, якщо ці частоти збігаються з частотами зовнішнього електромагнітного поля. Діапазон цих частот дуже широкий і охоплює область на шкалі електромагнітних хвиль від наднизьких частот до частот, які поділяють іонізуючі і неіонізуючі випромінювання ( $\lambda \sim 200\text{nm}$ ). У терагерцовому діапазоні знаходяться резонансні частоти деяких біологічних структур організму і живої клітини. Можливо найближчим часом терагерцові

апарати з нешкідливим електромагнітним випромінюванням увійдуть в практику медичної діагностики і зможуть замінити в ряді випадків рентгенівські апарати. Але найбільші надії медичних фахівців пов'язані з лікуванням онкологічних хворих. Оскільки терагерцові хвилі добре проникають у верхні шари шкіри (аж до м'язових тканин), то з'являється можливість контролювати розвиток недоброякісних процесів на самих ранніх стадіях. Взагалі в цьому діапазоні відкриваються нові можливості вивчення процесів навіть на рівні живої клітини.

Як відомо, максимальна енергія кванта в НВЧ-діапазоні становить  $1,17 \times 10^{-4}$  eВ, а в терагерцевому вона на два порядки більша, тобто  $\sim 10^{-2}$  eВ. Саме у терагерцевому діапазоні частот енергія кванта відповідає енергії коливальних переходів молекул ( $10^{-3} \dots 10^{-2}$  eВ). Зокрема, частотні діапазони спектрів газів знаходяться між короткохвильовою частиною НВЧ діапазону і довгохвильовою частиною терагерцевого діапазону. У терагерцевому діапазоні найбільший вплив на поглинання електромагнітних хвиль надає водяний пар, що має в ньому близько 900 інтенсивних ліній поглинання.

На поточний момент в світовій практиці не існує універсального методу, що забезпечуватиме надійне прогнозування якісних показників цифрових радіорелейних ліній (ЦРРЛ). Це призводить до великої похибки результатів розрахунку якісних показників за методами різних фірм, що використовують різні підходи в оцінці впливу факторів поширення радіохвиль на стійкість роботи ЦРРЛ. Також при поширенні електромагнітних хвиль в атмосфері є декілька відомих видів замирань сигналу, що актуальні в діапазоні до 30 ГГц, які в діапазоні терагерцових хвиль будуть мати мінімальні значення, а деякими взагалі можливо знехтувати. Відповідно певні види замирань, що не є критичними та суттєвими в більш низьких частотних діапазонах, навпаки будуть мати значний вплив на роботу ЦРРЛ.

В діапазоні частот 30-300 ГГц з відомих типів замирань (рефракційні замирання внаслідок екрануючого впливу перешкод, рефракційні замирання інтерференційного типу, інтерференційні замирання внаслідок відбиття від

неоднорідностей шарів тропосфери, завмирання внаслідок екрануючого впливу неоднорідностей шарів атмосфери, завмирання внаслідок впливу діаграм спрямованості антен) для терагерцового діапазону – це неточність юстировки антен, а також вітрової навантаженості на антенні опори, завмирання внаслідок послаблення радіосигналу гідрометеорами (дощ, сухий та мокрий сніг, град, туман, хмари), завмирання внаслідок поглинання радіосигналу в газах, завмирання радіосигналу в піщаних та пилових бурях) найбільш вагомими, які слід враховувати при проектуванні, є наступні:

- завмирання внаслідок послаблення сигналу гідрометеорами;
- завмирання внаслідок поглинання радіосигналу в газах (в першу чергу парах води та молекулярному кисні);
- завмирання внаслідок впливу діаграм спрямованості антен.

Робота радіорелейних ліній на таких високих частотах (особливо в терагерцовому діапазоні) через високу спрямованість антен кореспондуючих станцій дозволяє практично не враховувати інтерференцію електромагнітних хвиль, відбитих від перешкод в зоні поширення сигналу, яка виникає особливо в умовах щільної міської забудови. Розраховане значення найбільшого значення радіусу першої зони Френеля посередині траси довжиною 5 км складає величину 2,3м на частоті 140 ГГц і не перевищуватиме 1,6м на частоті 300 ГГц і, отже, це дає право не враховувати рефракцію і інтерференційні завмирання при розрахунку енергетичного бюджету цифрових радіорелейних ліній терагерцового діапазону, що планується.

## **1.2 Огляд технічних рішень з побудови перспективних радіоліній терагерцового діапазону.**

Розвиток елементної бази радіотехнічних пристроїв, широке впровадження цифрової техніки формування та оброблення сигналів, дозволяє по-новому підійти до розв'язування багатьох задач, які раніше стримували втілення розробок телекомунікаційних систем суб- та терагерцового діапазонів.

Освоєння суб- та терагерцового діапазоні саме по собі викликає значний інтерес у зв'язку з наступним:

1. Слабка завантаженість даних цього діапазону порівняно з сантиметровим діапазоном.
2. Можливість виділення широких смуг частот (до 5 ГГц).
3. Спрощена процедура виділення частот у багатьох країнах світу.
4. Істотне зниження габаритів антенних систем, які забезпечують при цьому формування вузької діаграми напрямленості.
5. Швидке загасання радіохвиль у поєднанні з вузько напрямленими антенами усуває проблему інтерференції різних джерел сигналу, що спрощує задачу частотного планування .
6. Екологічна безпечність.

Зазначені обставини роблять цей діапазон унікальним для побудови персональних, локальних і міських транспортних бездротових мереж, а також радіоканалів “точка-точка” (радіорелейних ліній). Терагерцові хвилі (частотний діапазон від 100 ГГц до 3000 ГГц) в електромагнітному спектрі (рис. 1.2.) знаходяться між надвисокочастотними хвилями (частотний діапазон від 3 ГГц до 30 ГГц) та інфрачервоними хвилями (частотний діапазон від 300 ГГц до 430000 ГГц) . Тобто терагерцовий діапазон (в довжинах хвиль – від 3 мм до 0,1 мм) включає у себе короткохвильову частину міліметрового діапазону, весь субміліметровий і далекий (довгохвильовий) інфрачервоний діапазони довжини хвиль. Між довгохвильовою країною інфрачервоного діапазону та короткохвильовою ділянкою надвисокочастотного діапазону не встановлена чітка межа. На інфрачервоній ділянці спектра від 0,74 мкм до 1000 мкм, в основному, припадає теплове випромінювання – передача енергії від одних тіл до інших у вигляді електромагнітних хвиль за рахунок їх теплової енергії.



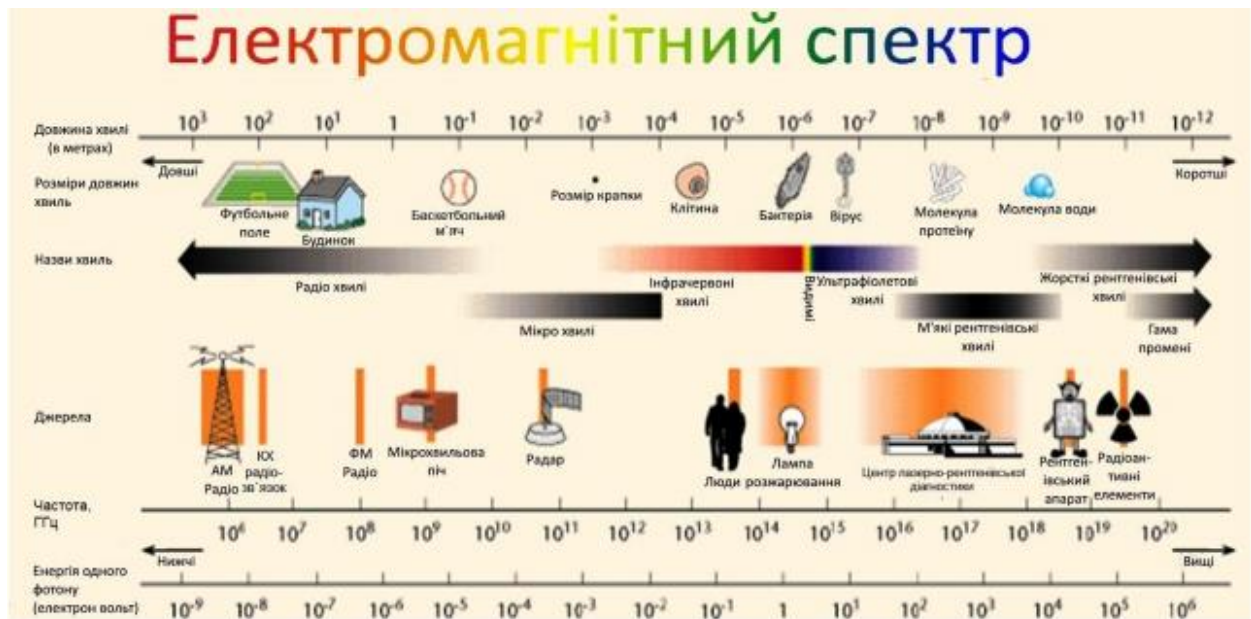


Рис.1.2 Електромагнітний спектр.

Судячи з рекламних матеріалів низки зарубіжних фірм, в завершальній стадії знаходяться розробки приладів (теравізорів) для визначення наявності вибухових речовин і різних сторонніх предметів в аеропортах, вокзалах і т.п. Великі надії з освоєнням терагерцових хвиль пов'язують фахівці в області контролю навколишнього середовища (визначення шкідливих домішок в атмосфері, воді, у близькому космічному просторі і т.д.).

На основі узагальнення результатів, аналізу наявної радіорелейної елементної бази та теоретичних досліджень і експериментальних робіт проведено проектування основних вузлів і всього приймально-передавального тракту телекомунікаційної системи із гігабітною пропускнуою здатністю в діапазоні частот 130-134 ГГц, розроблена структурна схема приймально-передавального тракту системи: частотні перетворювачі з субгармонійною накачкою, гетеродин, що використовує високостабільний задаючий кварцовий генератор з подальшим ланцюгом помножувальних і підсилювальних каскадів, смугопропускаючий фільтр з використанням тонкої металеві пластили в Е-площині хвилеводного каналу.

Визначені та обґрунтовані параметри основних вузлів приймально-передавального тракту радіорелейної системи в діапазоні частот

130–134 ГГц. Розроблена структурна схема радіорелейної лінії в терагерцовому діапазоні та досліджені розрахункові характеристики її приймальнопередавального тракту.

На основі узагальнення результатів, аналізу наявної радіорелейної елементної бази та теоретичних досліджень проведено проектування основних вузлів і всього приймальнопередавального тракту телекомунікаційної системи із гігабітною пропускною здатністю в діапазоні частот 130...134 ГГц у складі: частотні перетворювачі з субгармонійною накачкою, гетеродин, що використовує високостабільний задавальний кварцовий генератор з подальшим ланцюгом помножувальних і підсилювальних каскадів, смуго-пропускний фільтр з використанням тонкої металевої пластини в Е-площині хвилеводного каналу  $1,6 \times 0,8$  мм.

До особливостей терагерцового діапазону належить значна залежність від метеорологічних умов поглинання сигналів при передачі в атмосфері, що призводить до зниження надійності зв'язку на великих відстанях. Однак на малих відстанях, рівних або менших п'яти кілометрів, цей недолік не тільки не заважає надійності зв'язку, а навіть може бути корисним. Це зумовлено зменшенням імовірності в цих умовах того, що один з каналів буде заважати іншим каналам, і зниженням електромагнітного фону в навколишньому середовищі, що, у свою чергу, є однією з необхідних умов екологічної безпеки ряду телекомунікаційних систем. З іншого боку, при створенні розгалужених систем зв'язку в великих містах найбільш затребуваними є канали на відносно невеликі відстані. Крім того, в терагерцовому діапазоні зростає інформаційна ємність каналу порівняно з мікрохвильовим діапазоном, тут знижуються габарити і вага апаратури, яка стає портативною, легко встановлюється і орієнтується в просторі.

Затухання в атмосфері терагерцових хвиль до частот 350 ГГц виникає здебільшого внаслідок присутності в повітрі парів кисню та води. Інші гази вносять незначний внесок в величину затухання терагерцових хвиль. На

рис.1.3. зображено результати дослідження залежності величини затування радіохвиль від частоти, проведене.

Результати показали, що піки затування внаслідок магнітних явищ в молекулі кисню утворилися в полосі частот 50...70 ГГц з максимумом на частоті 60 ГГц, та на частоті 118 ГГц. Піки затування внаслідок взаємодії електричних моментів води та радіохвилі утворилися на частоті 22,2 ГГц та на частоті 183 ГГц. На інших частотах спостерігалися менші величини затування, тому діапазони між піками і назвали радіовікнами, або вікнами «прозорості». Іншими словами, вибираючи частоти з радіовікон можна зменшити вплив параметрів атмосфери на радіолінію.

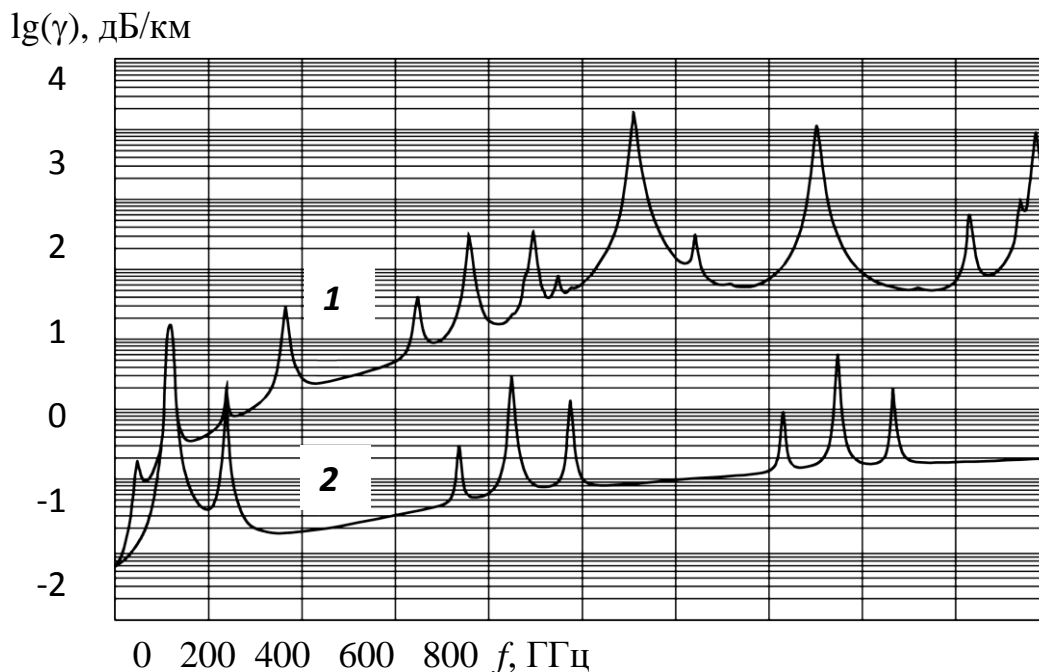


Рис.1.3.Залежність величини затування сигналу терагерцового діапазону в атмосферних газах від частоти (згідно Рекомендації МСЕР.676)

1 – на рівні моря ( $t = 20^{\circ}\text{C}$ , атмосферний тиск 760 мм.рт.ст., вологість 7,5 г/м<sup>3</sup>); 2 –  $t = 0^{\circ}\text{C}$ , вологість 1 г/м<sup>3</sup>

Про вплив піщаних і пилових бур на трасах на радіосигнали терагерцового діапазону відомо не багато. В зв'язку з тим, що в Україні немає

пустель, та вірогідність появи піщаних та пилових бур надзвичайно мала, то цим параметром можливо знехтувати. В випадку, якщо траса проектується в місцях, де можливі виникнення піщаних та пилових бур, необхідно провести додаткові вимірювання втрат, що будуть виникати. Безсумнівно вплив матиме суттєвий характер, тому що середні розміри часток піски та глиняного пилу становлять 0,015 и 0,008 см, що має не суттєвий вплив на лінії зв'язку на більш низьких частотах, а із зменшенням довжини хвилі буде мати більш суттєвий характер.

Найбільш придатними для освоєння під телекомунікаційні системи є вікна «прозорості», які можна визначити по певному рівню затухання. Згідно з [11] таким граничним рівнем (найгіршим випадком) можуть бути 100 дБ/км. Тоді маємо п'ять вікон «прозорості», що наведені в табл.1 і на рис.1.6. На тому ж рис.1.6. наведена відповідна до визначених вікон «прозорості» залежність спектральної ефективності радіотраси довжиною 1 км при інтенсивності опадів 50 мм/год.

Таблиця 1.1. Частотні характеристики радіовікон

Частотне вікно «прозорості»	Ширина смуги вікна, ГГц	Центральна частота вікна, ГГц
I	76	338
II	58	414
III	62	484
IV	85	669
V	94	855

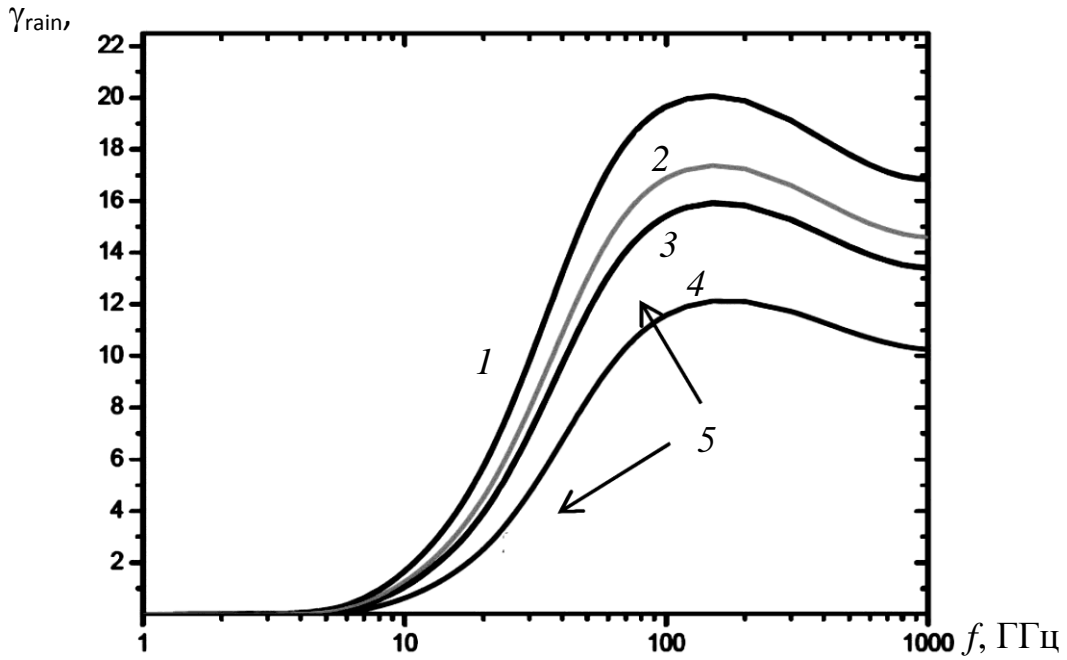


Рис.1.4 Частотна залежність затухання сигналу при інтенсивності дощових опадів (1 – 50 мм/год; 2 – 40 мм/год; 3 – 35 мм/год; 4 – 24 мм/год; 5 – умови центральної Європи)

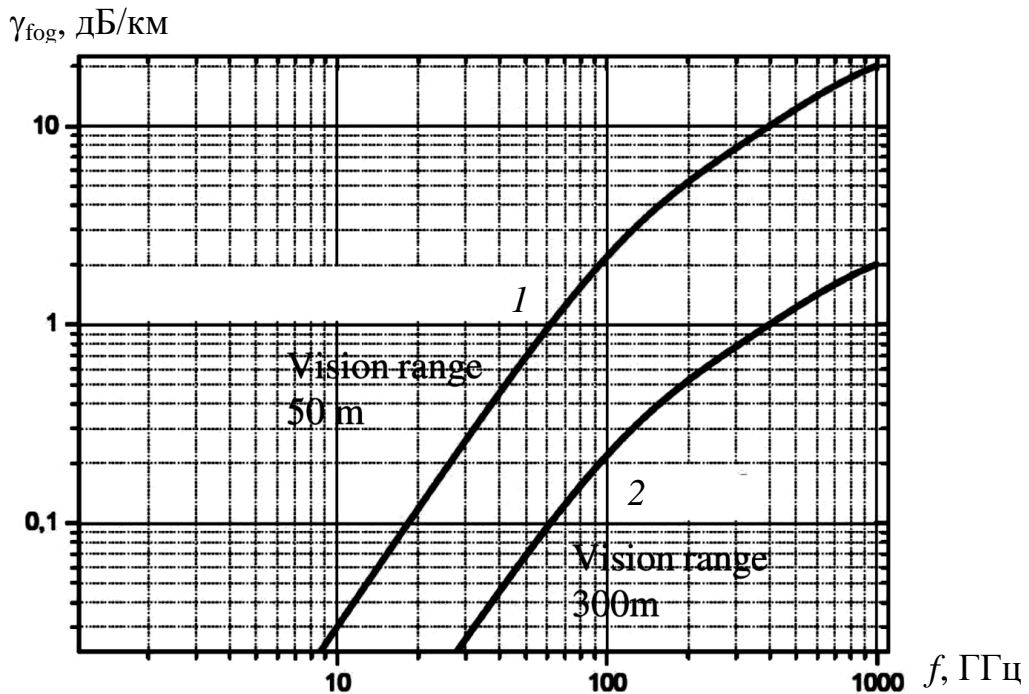


Рис.1.5 Частотна залежність затухання сигналу в тумані:

1 – вологість 0,5 г/м<sup>3</sup>; 2 – вологість 0,05 г/м<sup>3</sup>

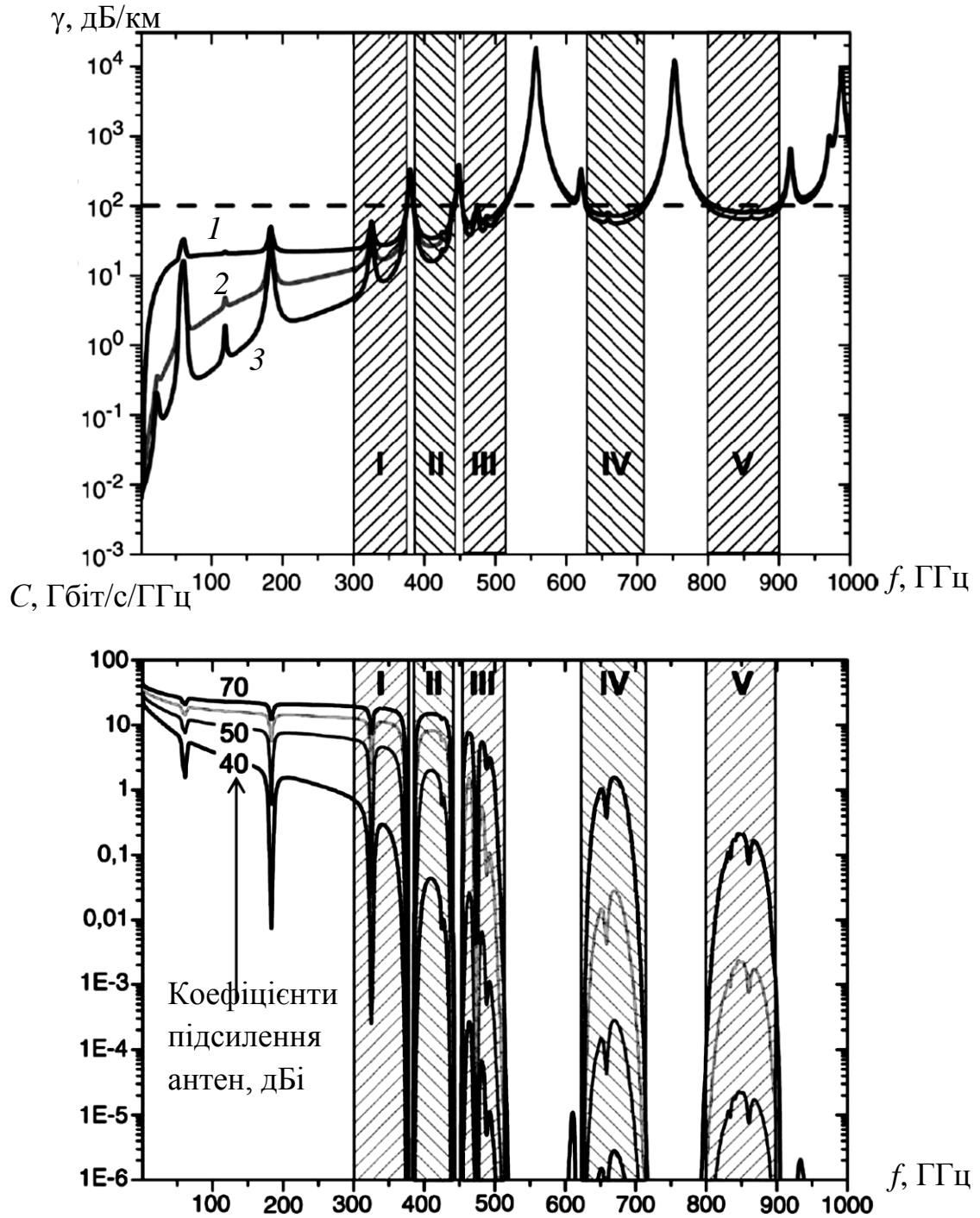


Рис.1.6 Частотні залежності затухання та спектральної ефективності радіотраси довжиною 1 км:

1 – інтенсивність дощу 50 мм/год; 2 – туман з відстанню видимості 50 м; 3 – ясна атмосфера на рівні моря

(римські цифри позначають вікна «прозорості»)

Таким чином в терагерцовому діапазоні частот, як і в субтерагерцовому, з відомих типів завмирань найбільш вагомі, які слід враховувати при проектуванні телекомунікаційних систем, є наступні:

- завмирання внаслідок послаблення сигналу гідрометеорами;
- завмирання внаслідок поглинання радіосигналу в газах;
- завмирання внаслідок впливу діаграм спрямованості антен.

При роботі телекомунікаційних систем в терагерцовому діапазоні можна практично не враховувати рефракцію та інтерференцію електромагнітних хвиль, відбитих від перешкод в зоні розповсюдження сигналу, що виникає особливо в умовах щільної міської забудови. Це пов'язано по перше з тим, що терагерцові хвилі мають низьку здатність до «огинання» перешкод, по друге, на поточний момент частоти від 30 до 300 Гц застосовуються на відносно невеликих відстанях (до 5 км), що дозволяє при плануванні радіопрольотів уникнути потрапляння завад до зони прямої видимості антен та до першої зони Френеля. Розраховане, наприклад, на частоті 140 ГГц прирощення просвіту посередині траси довжиною  $L=5$  км (в місці найбільшого значення радіусу першої зони Френеля величиною 1,64м) не перевищуватиме 0,34м і цим параметром можна знехтувати.

### **1.3 Напрямок використання терагерцового діапазону безпроводових телекомунікаційних систем.**

Терагерцовий діапазон частот завдяки своїм особливостям, може використовуватись в різних областях: фізики, хімії, біології, медицини, безпеки. Сфери використання терагерцових хвиль:

#### 1) телекомунікаційні системи

- в транспортних мережах мобільного зв'язку наступних поколінь;
- в телерадіомовленні;
- в міжсупутниковому зв'язку;
- в радарях та в радіолокації ближньої дії;

- в радіорелейних системах прямої видимості;
- в комунікаціях однієї будівлі, зокрема, в безпроводовій версії USB

3.0.

2) системи виявлення та розпізнавання об'єктів

3) системи контролю якості харчових продуктів

4) системи діагностики в медицині

5) системи для сканування об'єктів

6) системи як інструмент для наукових досліджень (радіоастрономічні спостереження з супутників холодних космічних об'єктів, високоточний хімічний аналіз атмосфери, вивчення надпровідності, створення нових напівпровідникових матеріалів, бімолекулярні дослідження).

Як відомо, вчені приступили до розробки 5G. Про плюси впровадження мереж п'ятого покоління ще рано говорити, але можна виділити такі вимоги та цілі при впровадженні даних мереж зв'язку:

- стабільний зв'язок, з великою зоною покриття;
- підтримка попередніх поколінь;
- зменшення енергоспоживання;
- пропускна здатність мережі понад 10 Гбіт/сек;
- підтримка одночасного підключення до 100 млн. пристроїв/км<sup>2</sup>;
- затримка передачі даних на радіоінтерфейсі не більше 1 мс.

Одним із ймовірних рішень для дотримання сформульованих вище вимог, насамперед збільшення пропускної здатності, може бути застосування терагерцового діапазону. Дане рішення дозволить також вирішити проблему дефіциту частотного спектру.

*Активні терагерцові прилади.* Розвиток і впровадження ТГЧ-систем різного призначення знаходяться в прямій залежності від успіхів в області сучасної електроніки та фотоніки. Активні прилади ТГЧ-діапазону можна умовно розділити на три групи: генератори, підсилювачі і приймачі. Генератори, в свою чергу, підрозділяться на вакуумні лампи, твердо тільні пристрою, а також лазерні та фотонні джерела. ТГЧ-джерела з високим рівнем



мощності класифікуються за двома категоріями: з поперечної і поздовжньої модуляцією електронного потоку. До першої категорії відносяться гіротрони і лазери на вільних електронах, а до другої - клістри з розподіленим взаємодією (КРВ), лампи біжучої хвилі (ЛБХ) і лампи зворотної хвилі (ЛЗВ). Рівні робочих потужностей для вакуумних ТГЧ-приладів варіюються від мВт до ГВт (12 порядків).

*Пасивні елементи терагерцової техніки.* Для передачі ЕМ-сигналів і енергії в ТГЧ-пристроях в даний час застосовуються різні хвилеведучі структури, в тому числі коаксіальні лінії, фотонно-кристалічні, діелектричні і металеві хвилеводи з полімерними плівками. Використання звичайних мікрохвильових коаксіальних ліній і діелектричних волноводів ближнього інфрачервоного діапазону малоефективно через високі втрати в металі або діелектрику. За останні роки в цій галузі вдалося добитися зниження втрат з 100 до 1 дБ / км для ТГЧ-хвиль. Кілька модифікацій таких хвилеводів детально проаналізувати в огляді, де також представлена конструкція круглого металевого хвилевода з тонкою полімерною плівкою на внутрішній поверхні стінки хвилеводу. В такому волноводі поширюється основна хвиля гібридного типу HE<sub>11</sub>, а ширина смуги пропускання досягає 1 ТГц. На частоті 2,5 ТГц ослаблення становить менше 1 дБ / м.

#### **1.4 Роль наукової технічної спільноти України, в області дослідження діапазону терагерцових частот та створення перспективних зразків телекомунікаційної техніки терагерцового діапазону частот.**

Сучасні тенденції розвитку транспортних розподільних мереж мобільного зв'язку четвертого (4G) і п'ятого покоління (5G), мереж наземного цифрового телебачення, систем управління військовими місіями і протидії тероризму передбачають обмін великими обсягами даних. Послуги оптоволоконних мереж забезпечують гігабітні швидкості обміну даних у багатьох частинах світу. Але сучасні телекомунікаційні мережі також

потребують аналогічної можливості з обміну даними в тих місцях, де оптоволоконного доступу не існує або його організація не є економічно рентабельною. Тому сьогодні надзвичайно актуальним завданням є побудова високошвидкісних мереж мобільного зв'язку четвертого (4G) і п'ятого (5G) поколінь з використанням телекомунікаційних систем фіксованого радіозв'язку терагерцового діапазону і перехід на малі соти. Маючи невелику дальність передачі, ці малі соти дозволяють задіяти технологію багаторазового використання одних і тих же частот для більш ефективного використання доступного радіочастотного ресурсу. Системи малих сот, які також називаються гетерогенними мережами або HetNets, з часом можуть стати основою стільникового зв'язку п'ятого покоління (5G). Дана проблема дала імпульс до розробки нового покоління компактних бездротових телекомунікаційних систем, що використовують неліцензійні Терагерцеві частотні діапазони ( $> 100$  ГГц). Сьогодні дослідження для таких мобільних систем сфокусовані на збільшенні пропускної здатності каналу зв'язку при використанні надширокосмугових сигналів, що займають весь терагерцовий діапазон. Однак варто зазначити, що в багатьох перспективних додатках для мереж 5-го покоління дальність зв'язку грає більш значиму роль, ніж швидкість передачі даних. Таким чином, розробка методів і технічних рішень збільшення радіусу дії окремого вузла зв'язку терагерцового діапазону є важливою науково-технічною задачею.

Інноваційні технічні рішення для створення каналу передачі в терагерцевому діапазоні:

1. Варіанти каналу терагерцового діапазону на базі вітчизняних розробок, що підтримують режим передачі даних «точка-точка».
2. Технічне рішення каналу терагерцового діапазону для організації сегментів опорних мереж з конфігурацією «точка-багатоточка»

Найбільш придатними для освоєння під мобільні телекомунікаційні системи є вікна прозорості, які можна визначити за певним рівнем загасання. Відповідно до прийнятих норм, таким граничним рівнем може бути 100 дБ / км.

Тоді маємо п'ять вікон прозорості і пропускну здатність в смугах вікон терагерцового діапазону може досягати сотень Гбіт / с. Причому, чим менше відстань радіотраси, тим менший вплив зовнішніх факторів і тим більшої пропускну спроможності можна досягати.

Але даний підхід для визначення вікон прозорості, з нашої точки зору, не є раціональним. Це обумовлено тим, що при фіксованому граничному рівні порога коефіцієнт використання радіоканалу буде змінний і відповідно ефективність використання вікна прозорості також буде мінлива. Тому нами була запропонована нова адаптивна модель зі змінним рівнем порога. Вона дозволяє при зміні відношення сигнал / шум підтримувати постійний заданий коефіцієнт використання радіоканалу і відповідно швидкість передачі даних.

Особливістю розробленої ймовірнісної моделі є те, що вона описує тільки характеристики стійкості прийому дискретної інформації і не враховує вид сигналу і алгоритми роботи обчислювальних схем приймального пристрою під час його цифрової обробки. Завдання полягає в тому, щоб на основі цієї моделі отримувати можливість вироблення оптимальних правил оптимізації власне радіоканалу терагерцового діапазону (оптимального управління параметрами передачі), а не конкретних цифрових пристроїв (модемів, кодексів і т.д.).

При оцінці якості радіоканалу по всій робочій смузі терагерцового діапазону можна виділити три характерні області зміни його енергетичного стану. Як критерій оцінки тут може виступати ймовірність прийому  $n$ -значної дискретної послідовності з  $m$  і більш ураженими символами. Отримані результати дозволяють оцінити поточні (очікувані) характеристики надійності терагерцового каналу в динаміці функціонування при різних параметрах частотних вікон прозорості.

На основі даного методу розроблено спосіб, на якій отримано патент України. Запропонований спосіб дозволяє визначати оптимальні смуги пропускання каналу (вікна прозорості) для практичної реалізації і, відповідно, в залежності від вимог використовуваних додатків можна зробити раціональний

вибір параметрів, які відповідають критеріям пропускної здатності і дальності зв'язку цих додатків.

У період з 2011 по 2016 роки Інститут електроніки та зв'язку Української академії наук успішно завершили дослідження можливостей створення в Україні реальної передумови вирішення фундаментальної проблеми - побудови цифрової терагерцової високошвидкісної системи радіорелейного зв'язку з використанням наноелектронних компонентів. На базі розроблених нових схем технічних рішень побудови радіорелейної системи терагерцового діапазону проведеного моделювання основних функціональних вузлів її приймальнопередавального тракту, спроектовано та виготовлено експериментальний зразок цифрової симплексної радіорелейної лінії терагерцового діапазону частот 128-134 ГГц із загальною пропускною спроможністю каналу зв'язку до 1,2 Гбіт / с при значенні ймовірних бітових помилок BER на рівні  $10^{-6}$  і дальністю зв'язку в межах 1 км.

Однак необхідно відзначити, що застосування традиційних радіорелейних ліній вимагає виділення для кожної такої лінії частотного ресурсу, розрахованого на пікове навантаження, що призводить до недовикористання цього ресурсу при номінальній (не пікової) величині трафіку. У зв'язку з цим, пропонується для побудови бездротових опорних мереж («середньої милі») в інтересах операторів телекомунікаційних послуг (операторів мобільного зв'язку, Інтернет-провайдерів, операторів корпоративних інформаційних систем та ін.) Нове технічне рішення для створення сегментів опорних мереж з топологією «точка-багаточка» і «точка-точка», підтримуючи в рамках зазначених сегментів передачу потоків даних на базі сервісу Ethernet (Carrier Ethernet Transport).

До складу такої апаратури, яка отримала назву «Сектор-Т» входить устаткування трьох типів:

- головна станція;
- термінальна станція;
- ретрансляційна станція.

За останні 2-3 роки рядом фірм було запропоновано обладнання для організації сегментів опорних мереж з конфігурацією «точка-багаточка». Однак, вказане обладнання призначене для організації мікросот і забезпечує при декларованій пропускній здатності дальність зв'язку не більше 1-2 км.

При цьому слід зазначити найбільш суттєві відмінності апаратури «Сектор-Т». Перш за все, в зазначених аналогах динамічне управління пропускною спроможністю забезпечується лише в межах окремого каналу, в той час як в апаратурі «Сектор-Т» забезпечується агрегування ресурсів всіх використовуваних прямих і зворотних каналів, що, як зазначалося вище, підвищує гнучкість і ефективність використання частотного ресурсу. Крім того, зазначені аналоги вимагають для забезпечення надійності зв'язку резервування за схемою «1+1» на відміну від апаратури «Сектор-Т», яка не потребує подібної надмірності обладнання що застосовується.

Функціональні можливості та технічні характеристики зразків апаратури «Сектор-Т» забезпечуються за рахунок ряду оригінальних технічних рішень, в тому числі її архітектури, комунікаційних протоколів, алгоритмів управління потоками даних, реалізації радіочастотних трактів і цифрової обробки сигналів.

## Висновок

Аналіз особливостей характеристик терагерцового діапазону показав перспективу його використання в транспортних розподільних мережах мобільного зв'язку з високою пропускнуою спроможністю.

Телекомунікаційні системи терагерцового діапазону мають величезний потенціал. З кожним роком теоретична та практична база з цього питання все збільшується і збільшується, а це в свою чергу відкриває нові можливості у генерації, обробці та прийомі сигналів в ТГЧ-діапазоні. Переваги застосування терагерцового діапазону перевершують недоліки і відкривають великі можливості у застосуванні в області телекомунікацій. Одним із перспективних варіантів впровадження терагерцових технологій є можливе використання їх на стратосферних платформах. Можливо саме дана система зв'язку стане основою при проектуванні та впровадженні мобільних систем зв'язку п'ятого покоління (5G).

В подальшому для ефективного освоєння терагерцових частот необхідна обґрунтована база. Проте на даний момент ця суттєва проблема залишається невирішеною. Крім цього процес створення систем терагерцового діапазону, залишається досить затратним за рахунок складності розробки та особливостей їх функціонування.

## РОЗДІЛ 2

### ПРИЙМАЛЬНОПЕРЕДАВАЛЬНИЙ ТРАКТ РАДІОРЕЛЕЙНОЇ СИСТЕМИ СУБТЕРАГЕРЦОВОГО ДІАПАЗОНУ 130...134 ГГц

Головною складовою частиною радіорелейної системи діапазону 130...134 ГГц є приймальнопередавальний тракт. До складу приймальнопередавального тракту входять наступні основні функціональні вузли:

- частотні перетворювачі;
- гетеродин;
- підсилювачі проміжної частоти;
- смугопропускні фільтри.

Даний приймальнопередавальний тракт дозволяє забезпечити створення радіорелейної системи з наступними характеристиками:

- діапазон робочих частот – 130...134 ГГц.
- дальність дії - до 5 км;
- швидкість передачі від 1 Гбіт / с;
- потужність передавача – 10...17 дБм;
- модуляція - QPSK, комбінована QAM / FM.

При цьому для радіотелекомунікаційних систем можуть бути досягнуті значення узагальненого енергетичного показника, в якості якого використовують коефіцієнт системи, рівний відношенню вихідної потужності передавача до мінімально допустимої («порогової») потужності корисного сигналу на вході приймача при  $BER = 10^{-3}$ , в межах 90 дБ.

#### 2.1 Структурна схема приймальнопередавального тракту

Структурна схема аналогової частини приймальнопередавального тракту наведена на рис. 2.1.

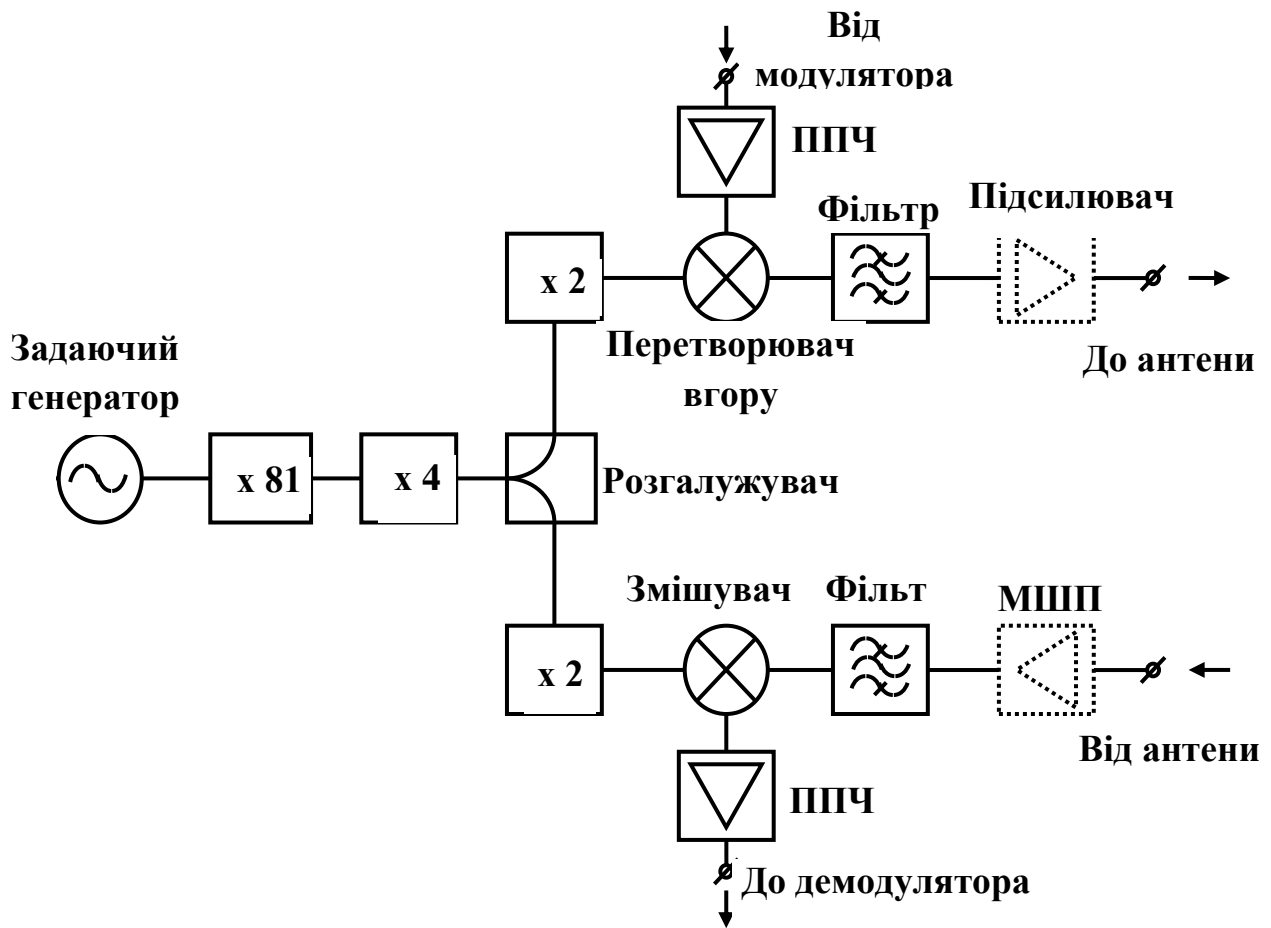


Рис.2.1 Структурна схема приймальнопередавального тракту

Схема містить тракт передачі, тракт прийому, а також ланцюг гетеродину, який є спільним для передавального та приймального трактів.

Прийомопередавач працює в частотному діапазоні 130...134 ГГц і виконаний у вигляді єдиного блоку. Тракти прийому і передачі побудовані за гетеродинною схемою і, використовуючи загальний гетеродин, працюють на різних бічних частотних смугах перетворювачів.

Передавальний тракт містить вхідний підсилювач проміжної частоти (ППЧ), частотний перетворювач вгору, смуго-пропускаючий фільтр (СПФ) і вихідний підсилювач потужності, використання якого передбачається при його наявності. При достатньо високому рівні вхідного сигналу від модулятора вхідний ППЧ може не використовуватися.



Приймальний тракт складається з вхідного мало шумливого підсилювача (МШП) (при наявності останнього), смуго-пропускаючого фільтра, змішувача і вихідного ППЧ.

Ланцюг гетеродина включає в себе: задавальний кварцовий генератор, помножувально-підсилювальний ланцюг, розгалужувач на два канали та кінцеві подвоювачі сигналів гетеродина.

## **2.2 Функціональні вузли прийомопередавача терагерцового діапазону.**

Функціональними вузлами прийомопередавача є наступні:

- частотні перетворювачі (змішувач і перетворювач вгору);
- високочастотний підсилювач;
- гетеродин з використанням помножувально-підсилювального ланцюга на основі високо стабільного заданого кварцового генератора;
- гетеродин з використанням радіоімпульсного помноження частоти на лавинно-прольотному діоді;
- підсилювач проміжної частоти;
- смуго-пропускаючий фільтр на  $E$ -площинній хвилеводній вставці.

### **Частотні перетворювачі**

Одним із найбільш перспективних і на сьогодні практично можливих варіантів побудови частотного перетворювача в терагерцовому діапазоні вважається так званий клас діодних перетворювачів з субгармонійною накачкою (Sub-harmonic pumped mixer), із цього класу змішувачів в теперішній час освоєним вважається найбільш простий варіант: змішувач з накачкою на двохкратній частоті гетеродина, в якому для змішування частот використовується опорний сигнал, частота якого відповідає подвоєній частоті сигналу зовнішнього гетеродина. Подвоєння частоти реалізується в схемі з двома активними елементами за рахунок протифазної подачі опорного сигналу [12]. Щоб розрізнити його з широковідомим в мікрохвильовій техніці з

змішувачем на гармоніках сигналу гетеродина, даний варіант отримав назву змішувач з накачкою на половинній частоті.

Незважаючи на очевидні переваги змішувачів монолітних інтегральних схем (МІС) на базі арсенід-галлієвих гетероструктурних польових транзисторів (ГПТ), приклади їх розробки в терагерцовому діапазоні до цього часу відсутні у вітчизняній та зарубіжній електронній промисловості, хоча вони вже освоєні в міліметровому і суб-терагерцовому діапазоні частот рядом відомих світових виробників мікрохвильових електронних компонентів: AgilentTechnologies, HittiteMicrowaveCorporation, UnitedMonolithicSemiconductors (UMS), TLCPrecisionWaferTechnology (TLC), NorthropGrumman, Volocium, MimixBroadband.

Таким чином, для терагерцового діапазону єдиним варіантом залишається дослідження та розробка більш удосконалених схем діодних змішувачів. Крім цього, розробка резистивного змішувача терагерцового діапазону на основі накачки на половинній частоті дозволяє використовувати більш низькочастотний гетеродин з кращими техніко-економічними показниками (більшою потужністю меншими шумами), а також забезпечити більш високі параметри щодо розв'язки гетеродинного та сигнального входів і гетеродинного входу та виходу проміжної частоти.

Розробка частотних перетворювачів в діапазоні 130...134 ГГц, як змішувача, так і перетворювача вгору, вимагає насамперед наявності змішувальних діодів, здатних працювати на таких високих частотах, забезпечуючи досягнення необхідних електричних параметрів перетворювачів.

При моделюванні частотних перетворювачів в якості активних елементів були використані структури без корпусних арсенід галієвих діодов Шоткі з балочними виводами на базі розробленої та впровадженої у виробництво в НДІ «Сатурн» (м. Київ) технології виготовлення інтегральних схем міліметрового діапазону довжин хвиль.

Конструкція діоду, його еквівалентна схема та типова вольтамперна характеристика показані на рис.2.2.

Застосування розробленої технології дозволило отримати діоди з наступними електричними характеристиками:

- сумарна ємність діода при нульовому зміщенні  $C_{\Sigma} = (28...32)$  фФ;
- ємність бар'єру при нульовому зміщенні  $C_{j0} = (8...12)$  фФ;
- паразитна ємність кристала  $C_S = (18...20)$  фФ;
- послідовний резистанс втрат  $R_n = (6...8)$  Ом;
- показник ідеальності ВАХ 1,11 - 1,12;
- напруга пробою при рівні зворотного струму 1 мкА не менше 5 В;
- гранична частота при нульовому зсуві становить понад 2,5 ТГц.

Настільки високе значення граничної частоти діодів дозволяє розробляти на їх основі частотні перетворювачі, принаймні, в нижній ділянці терагерцового діапазону. Габаритні розміри діода складають 0,45 x 0,14 x 0,06 мм. Модульна конструкція з балочними виведеннями зручна для монтажу діодів в інтегральну схему перетворювачів.

За електричними і конструктивними параметрами розроблені діоди не поступаються закордонним сучасним аналогам, наприклад, арсенід галієвим діодам фірми HewlettPackard.

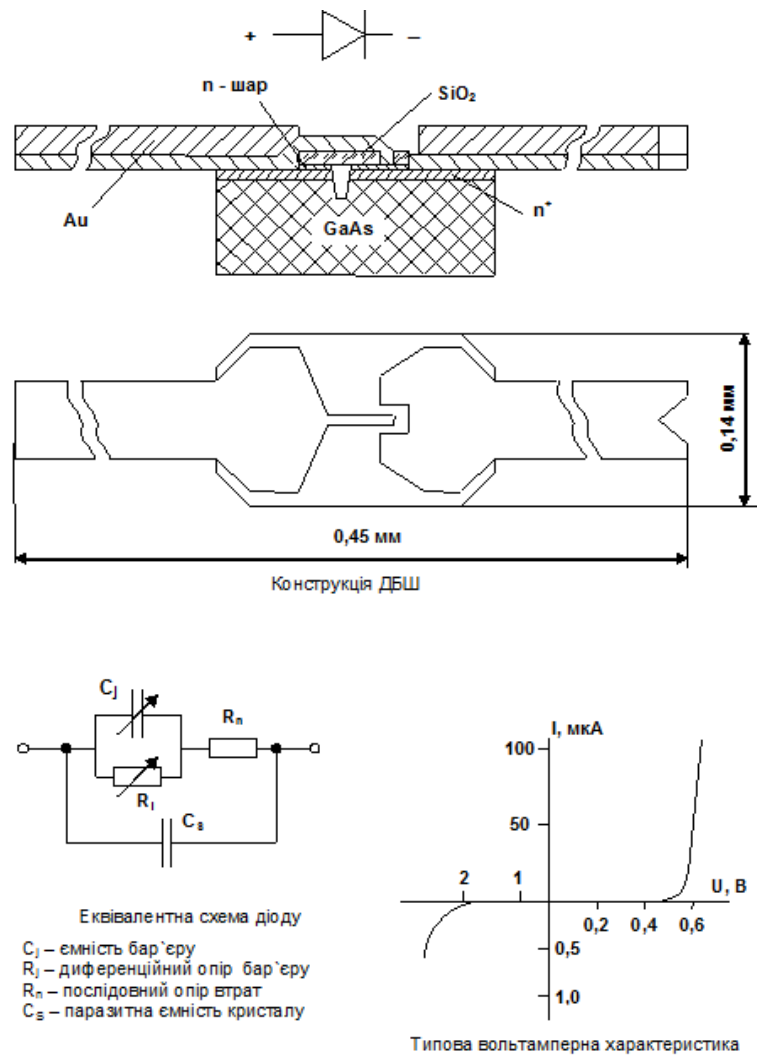


Рис.2.2 Конструкція, еквівалентна схема і вольт-амперна характеристика діоду

Частотні перетворювачі, а саме, змішувач приймача і перетворювач в гору передавача мають ідентичні схеми і конструкції, але розрізняються напрямком проходження сигналів у відповідності з їх функціональним призначенням. Була обрана субгармонічна схема перетворювачів, яка показана на рис.2.3. Схема містить два діоди з бар'єром Шоттки і розв'язує фільтри у всіх трьох частотних ланцюжках. Зустрічно-паралельне включення пари діодів формує симетричну щодо початку координат  $N$ -образну результуючу ВАХ, що дозволяє використовувати гетеродин з частотою вдвічі нижче, ніж у звичайних змішувачах. Дана обставина істотно спрощує завдання побудови гетеродина тракту, що особливо важливо при таких високих частотах прийомопередачі сигналів.

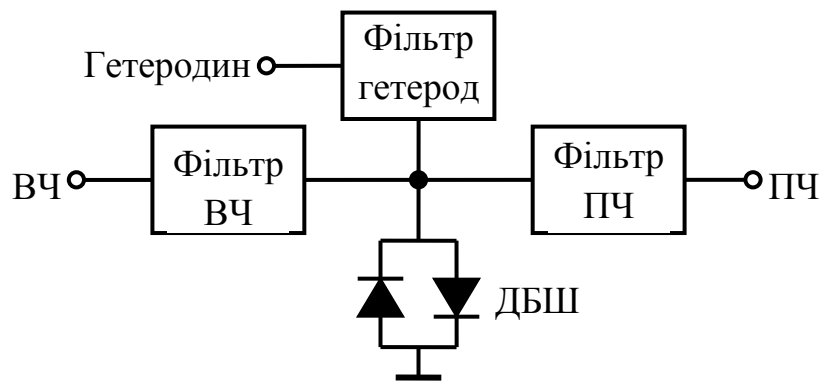


Рис.2.3 Структурна схема субгармонійного перетворювача

Конструкція перетворювача схематично показана на рис. 2.4.

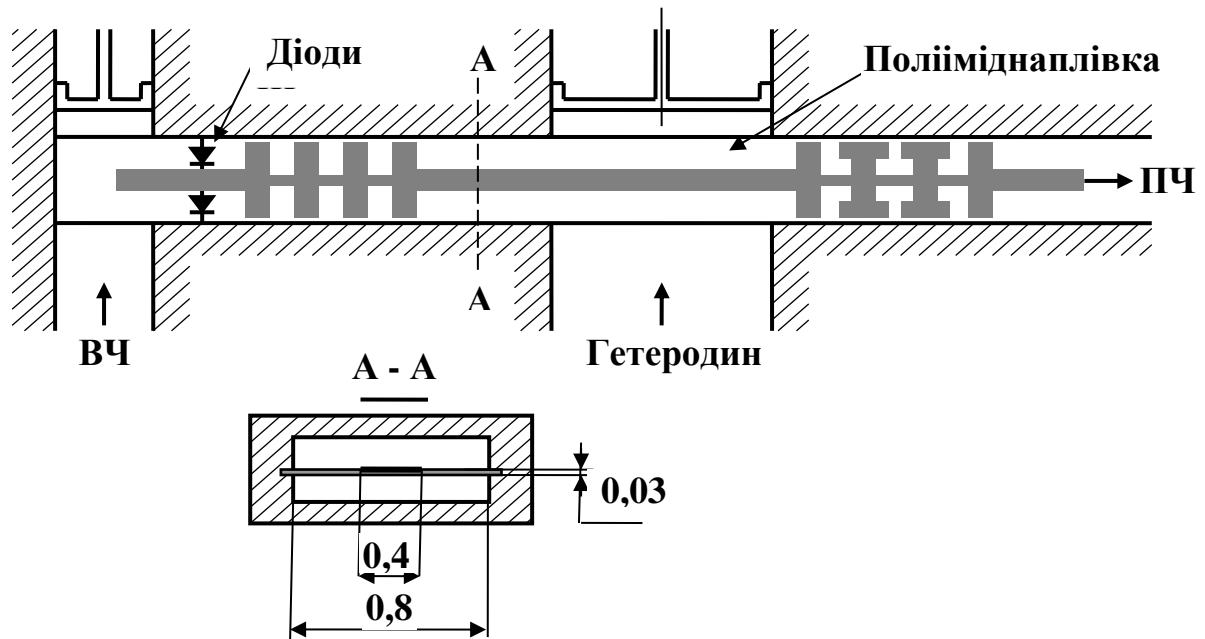


Рис.2.4 Конструкція перетворювача

Конструкція містить два хвильоводних тракти, пов'язаних симетричною смуговою лінією, на якій змонтована пара безкорпусних діодів Шотткі. Діоди підібрані за параметрами, щоб забезпечити симетричність результуючої вольтамперної характеристики для якісного зменшення парних гармонік частоти гетеродина.

Хвилеводний тракт з перетином каналу 1,6 x 0,8 мм є частиною ланцюга високочастотного сигналу. Цей хвилеводний канал є позамежним для частот гетеродина і ПЧ.

Сигнал гетеродина надходить на діоди через хвилеводний канал перетином 3,6 x 1,8 мм. Канал є позамежним для сигналу ПЧ, а розв'язку гетеродина від ВЧ сигналу забезпечує фільтр нижніх частот (ФНЧ) з частотою зрізу 67 ГГц, виконаний на ділянці смугової лінії між хвилеводними каналами. Ланцюг сигналу ПЧ повністю реалізований на симетричній смуговій лінії з підвішеною підкладкою. В якості підкладки використана поліімідна плівка товщиною 30 мкм, підвішена в прямокутному каналі перетином 0,8 x 0,4 мм, позамежному для виникнення вищих хвилеводних мод. Вихідний ФНЧ в ланцюгу ПЧ з частотою зрізу 30 ГГц перешкоджає проникненню сигналів гетеродина і ВЧ в тракт проміжної частоти.

Коротко замикаючі поршні у хвилеводних каналах дозволяють здійснювати підстроювання відповідних ланцюгів перетворювачів.

Зовнішній вигляд перетворювача показаний на рис.2.5.

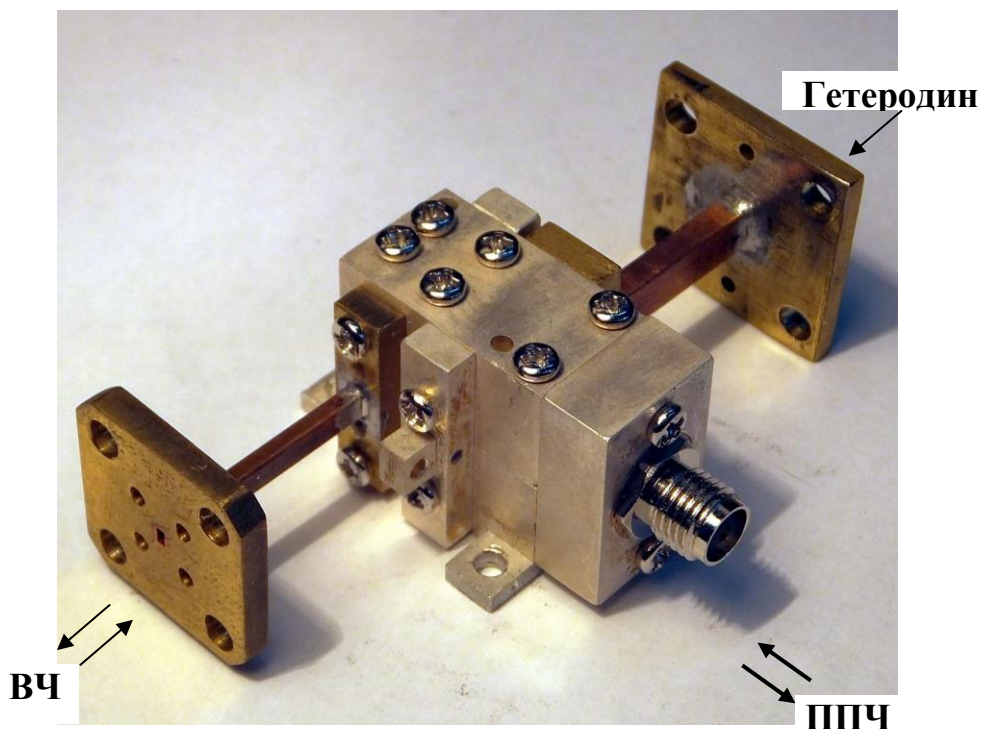


Рис.2.5 Зовнішній вигляд частотного перетворювача із з'єднуючими хвилеводами

### **Високочастотні підсилювачі**

Підсилювач потужності (ПП) на виході передавача і малошумливий підсилювач (МШП) на вході приймача є тими функціональними вузлами, які головним чином визначають енергетичний потенціал всієї системи.

Проблеми реалізації таких підсилювачів в терагерцевому діапазоні обумовлені високими робочими частотами. Успіхи напівпровідникової технології в останні роки і створення відповідної елементної бази відкривають гарні перспективи для реалізації високочастотних якісних підсилювачів. У роботі [13] повідомляється про створення малошумного підсилювача 3мм діапазону довжин хвиль. Є інформація про лабораторні розробки ПП і МШП аж до 300 ГГц [14]. У найближчі роки очікується поява комерційних підсилювальних мікросхем у всьому міліметровому діапазоні, що стане реальною базою для побудови підсилювачів в терагерцевого діапазоні. Використання цих підсилювачів у схемі прийомо-передавача забезпечить надійну і якісну передачу інформаційного сигналу.

### **Гетеродин**

Проблема гетеродина є однією з основних при розробці прийомопередавачів для цифрових телекомунікаційних систем в терагерцевому діапазоні частот. Вона обумовлена як труднощами досягнення достатнього рівня потужності на настільки високих частотах, так і необхідністю забезпечення високої стабільності гетеродина і низького рівня його фазових шумів.

Побудова частотних перетворювачів за субгармонійною схемою дозволяє вдвічі знизити необхідну частоту гетеродина. Ця річ істотно полегшує реалізацію гетеродинного ланцюга, разом з тим зберігаються жорсткі вимоги до стабільності гетеродина і рівня фазових шумів, особливо в цифрових системах передачі даних зі складними видами модуляції.

Для цифрової радіорелейної системи, що працює в діапазоні 130...134 ГГц, був спроектований ланцюг гетеродина на частоту 64,8 ГГц. З різних схем

побудови ланцюга гетеродина була обрана схема, що використовує високостабільний задаючий кварцовий генератор з подальшим ланцюгом помножувальних і підсилувальних каскадів. Така побудова гетеродинного ланцюга характеризується мінімальною кількістю паразитних гармонік і комбінаційних частот і набагато дешевше схеми з частотним синтезатором.

Структурна схема ланцюга гетеродина показана на рис. 2.6.

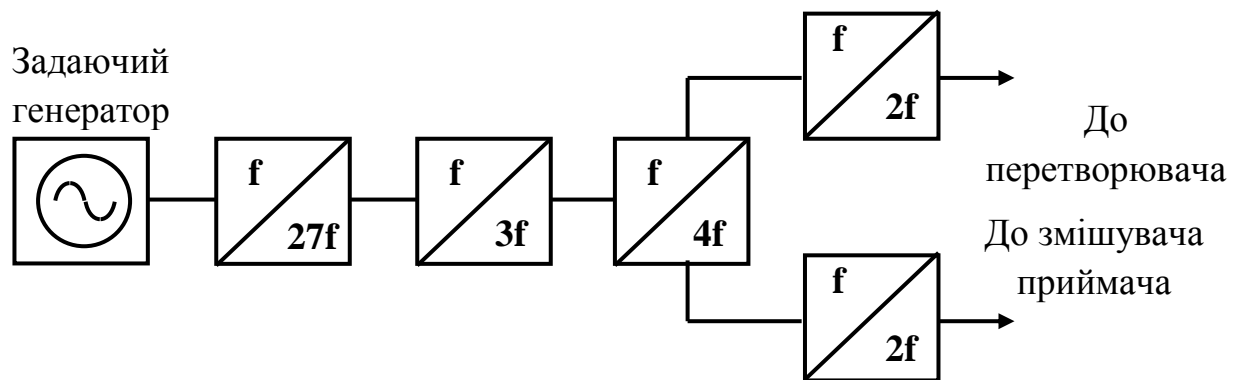


Рис.2.6 Структурна схема гетеродинного ланцюга

В якості задаючого був використаний кварцовий генератор на 100 МГц типу ССНД-950Х-25-100 фірми CrystekCrystals і рівнем фазових шумів не вище - 143 дБ при відстройці від центральної частоти на 1 кГц. Параметри задаючого генератора в основному і визначають стабільність частоти і фазові шуми гетеродина.

Множення частоти задаючого генератора до 2,7 ГГц здійснюється модулем, що містить помножувально-підсилувальні каскади з селектуючими фільтрами. Конструкція модуля показана на рис.2.7.



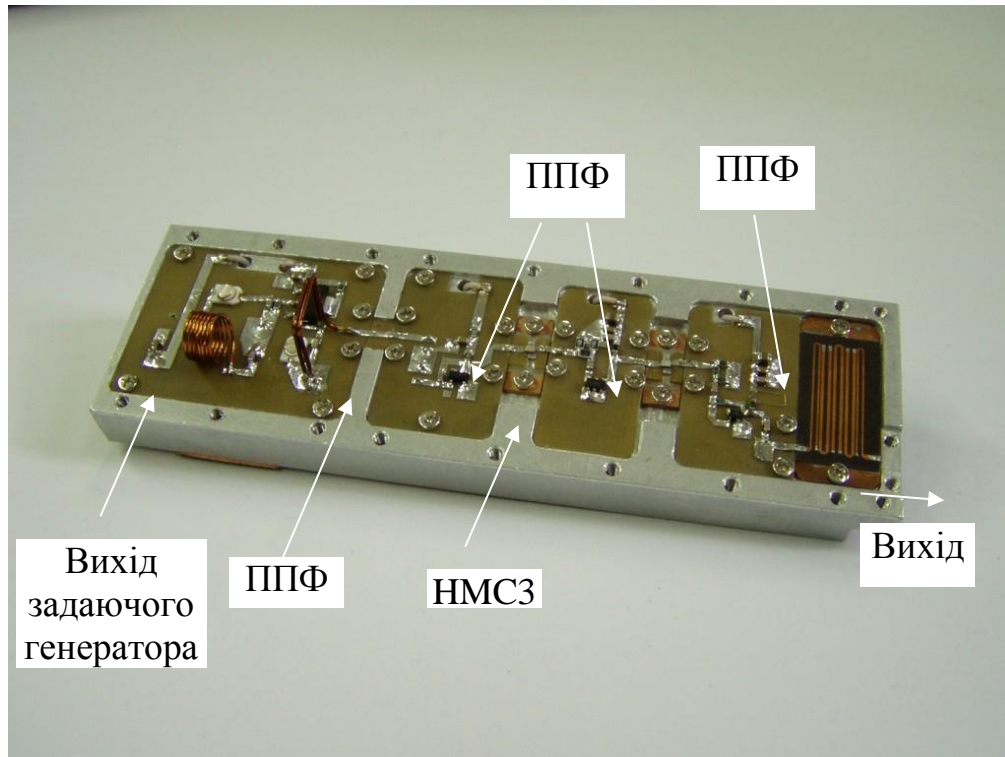


Рис.2.7 Помножувальний модуль сигналу гетеродина з частоти 100 МГц до 2,7 ГГц

Помножувальні каскади виконані на транзисторах відповідних частотних діапазонів, а підсилювач на частоту 900 МГц реалізований на монолітній мікросхемі НМС313 фірми Hittite. СПФ на 2,7 ГГц гребінчастого типу спроектований і виготовлений на підкладці з дюрюїду товщиною 0,25мм, а на частотах 300МГц і 900 МГц використані ПАХ-фільтри.

У корпусі описаного модуля на протилежній стороні змонтований і задаючий кварцовий генератор.

У наступному модулі здійснюється посилення сигналу з частотою 2,7 ГГц мікросхемою НМС313 і його додаткова фільтрація, після чого частота сигналу потроюється до 8,1 ГГц помножувачем на мікросхемі НМС916LP3Е. Після цього сигнал селекується за допомогою гребінчастого СПФ на 8,1 ГГц і підсилюється мікросхемою типу NLB-300 фірми RFMD (США).

Вихідна частина гетеродинного ланцюга крім підсилювально-помножувальних функцій здійснює розгалуження сигналу гетеродина на два канали. Така побудова вихідної частини дозволяє застосувати загальний

гетеродин для передавального і приймального трактів, що істотно спрощує схему і конструкцію всього прийомопередавача і тим самим знижує його вартість. Прийом і передача сигналів при цьому здійснюється на різних бокових частотах перетворювачів. Віддаленість цих частот один від одного визначається, виходячи з вимог забезпечення достатньої режекції дзеркального каналу і сигналу гетеродина як в передавальному, так і в приймальному трактах.

На основі проведеного комп'ютерного і фізичного моделювання розроблено структурну схему вихідної частини гетеродинного ланцюга, яка представлена на рис.2.8.

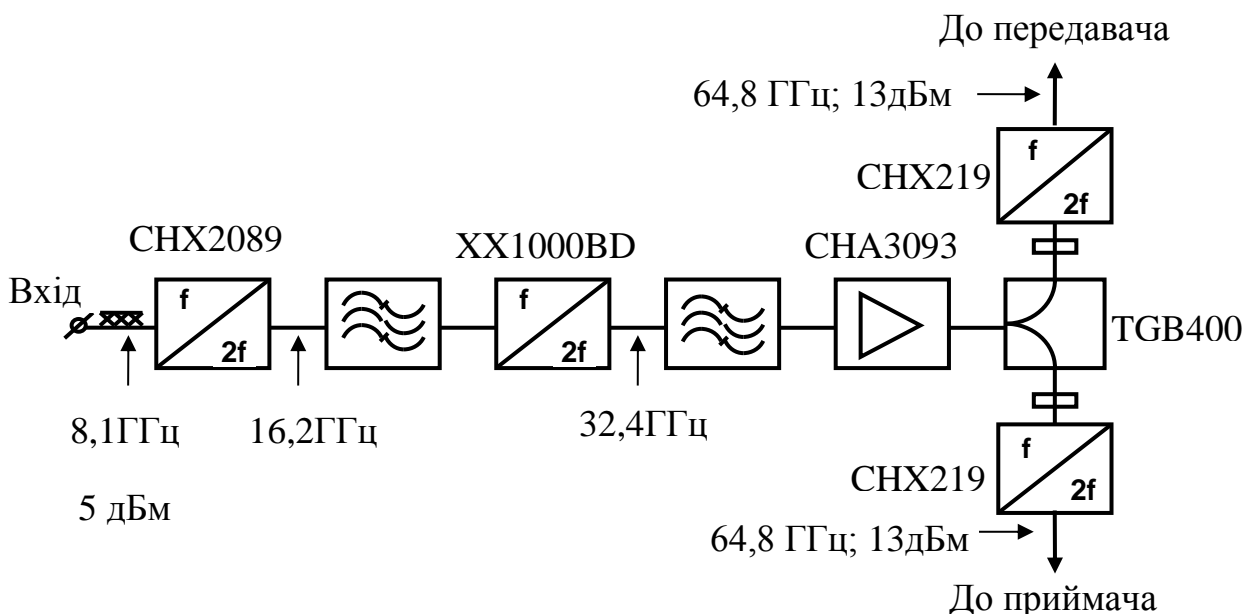


Рис.2.8 Структурна схема вихідної частини гетеродинного ланцюга

Схема містить два каскадно включених подвійника, смуго-пропускаючі фільтри, які селектують необхідні частоти, підсилювальний каскад і розгалужувач, вихідні сигнали з якого подвоюються по частоті вихідним помножувачами.

Частота сигналу, що подається на вхід схеми від попередніх каскадів гетеродинного ланцюжка, підвищується до 32,4 ГГц за допомогою двох послідовно включених подвоювачів, виконаних на мікросхемах CHX2089

фірми UMS і XX1000BD фірми MimixBroadband. Дані мікросхеми містять у своєму складі підсилювачі, що компенсують втрати сигналу при множенні. Смуго-пропускаючі фільтри на виході помножувальних каскадів перешкоджають потраплянню паразитних гармонік на входи подальших каскадів. Для отримання достатнього рівня вихідних потужностей перед розгалужувачем включений підсилювач, реалізований на мікросхемі CHA2093.

Посилений сигнал з частотою 32,4 ГГц розгалужується на два канали, що живлять вихідні помножувальні каскади гетеродинного ланцюга. Розгалуження здійснюється на мікросхемі TGB4002 фірми TriQuint, що представляє собою міст Ланге. Описана частина схеми виготовлена у вигляді модуля в окремому корпусі. На рис.2.9. показана фотографія монтажу компонентів схеми.

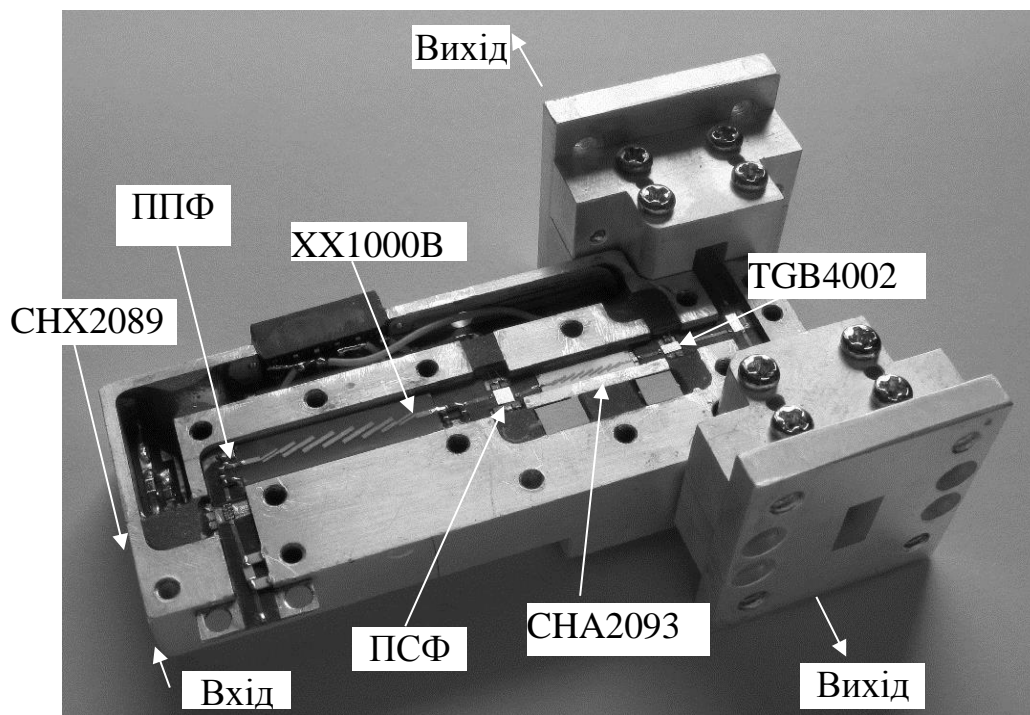


Рис.2.9 Монтаж елементів вихідної частини гетеродинного ланцюжка

Монолітні мікросхеми помножувачів, підсилювача і розгалужувача сигналу включені в мікросмугові лінії на підкладці з дюрюїду товщиною 0,125 мм. На цій же підкладці виконані хвилеводно-мікросмугові переходи на виходах модуля. Смуго-пропускаючі фільтри реалізовані на полікорових

підкладках. Поглинаючі компоненти (зосереджені фіксовані атенюатори), які включені в відповідних місцях схеми, покращують узгодження і забезпечують оптимальний енергетичний режим роботи помножувальних мікросхем.

Конструкція має мікросмуговий вхід і два хвилеводних виходи в каналі 7,2x3,4мм зі стандартними фланцями. Зовнішній вигляд модуля показаний на рис.2.10.

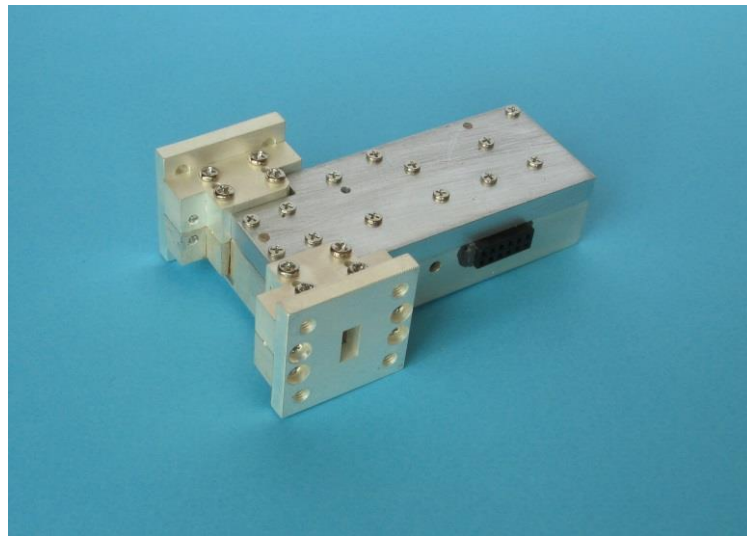


Рис.2.10 Зовнішній вигляд помножувально-розгалужуючого модуля

Вихідні каскади гетеродинного ланцюга виконані в окремих корпусах і побудовані на помножувальних мікросхемах CHX2192 фірми UMS, що підвищують частоту вихідних сигналів до 64,8 ГГц. Монтаж мікросхеми в корпусі подвоювача показаний на рис.2.11.

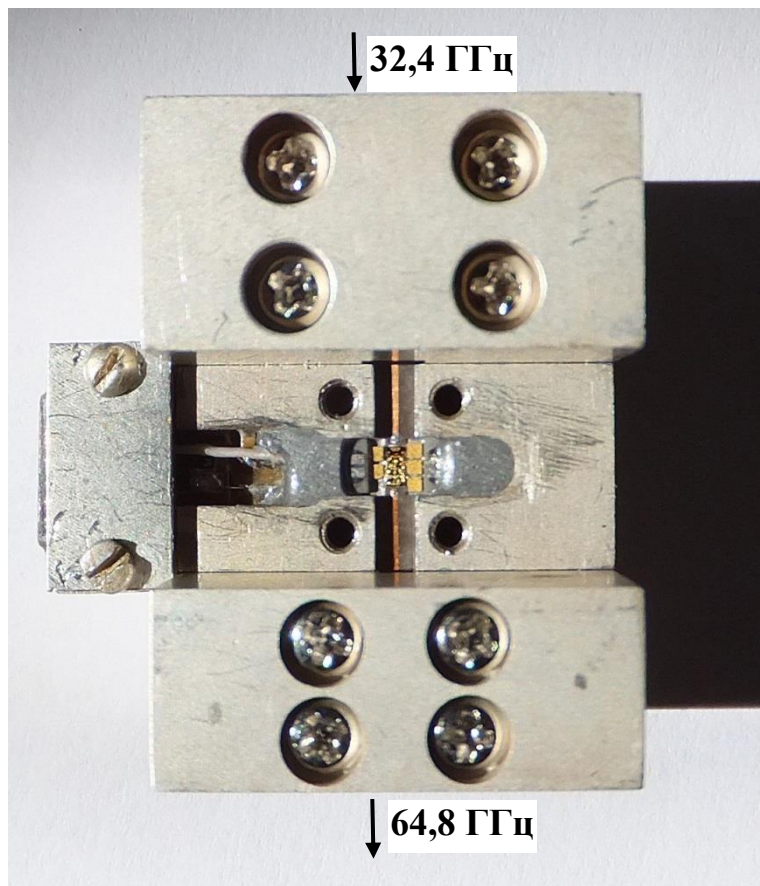


Рис.2.11 Вихідний подвоювач гетеродинного ланцюга

Виміряні значення вихідних потужностей гетеродина для трактів прийому і передачі перевищували 20 мВт, що цілком достатньо для нормальної роботи перетворювачів прийомопередавача.

#### **Гетеродин з використанням радіоімпульсного помноження частоти на лавинно-прольотному діоді**

Конструктивно гетеродин складається з окремих функціональних елементів, які представлені на рис.2.12.

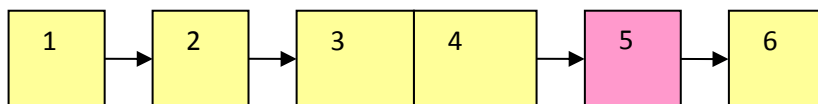


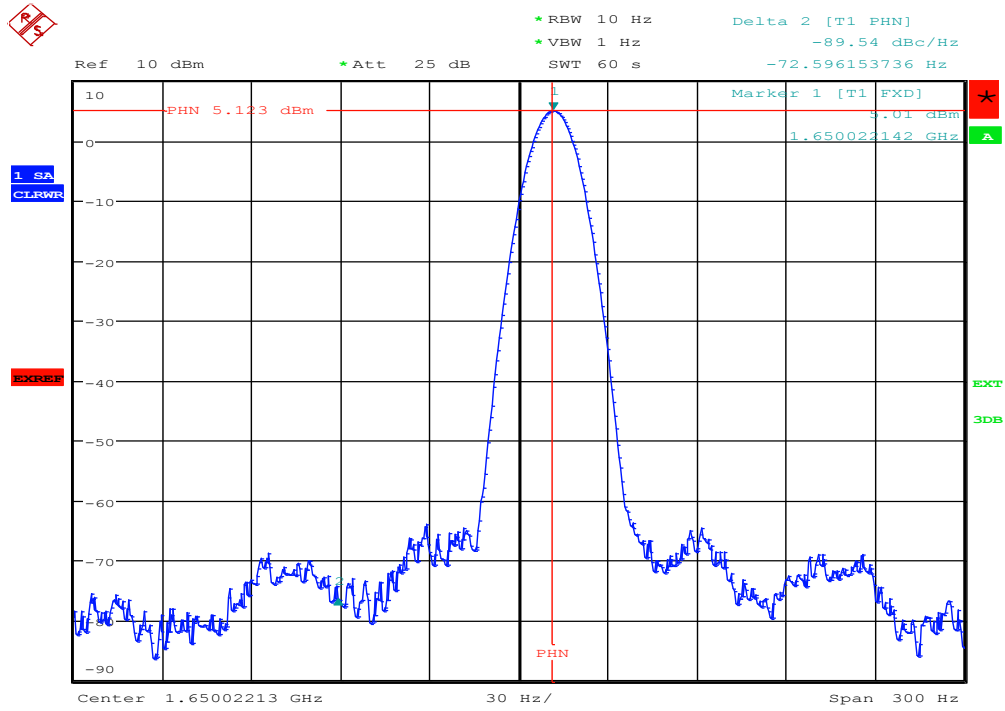
Рис.2.12 Структурна схема гетеродина

- 1 - кварцовий генератор;
- 2 - генератор на діелектричному резонаторі (ІН) з ФАПЧем;
- 3 – множник частоти на 4;
- 4 – підсилювач потужності;
- 5 – множник частоти на 2;
- 6 – вентиль.

В якості задаючого генератора або опори застосований кварцовий генератор на частоті 50 МГц. Він визначає стабільність частоти. Отже, чим вище його стабільність, тим вище стабільність всього гетеродина. Генератор на частоту 8,1 ГГц виконаний на діелектричному резонаторі з використанням фазової автопідстройки частоти, яка забезпечує сигнал з високою фазовою стабільністю. Далі сигнал з частотою 8,1 ГГц надходить на помножувач частоти на чотири. Отриманий сигнал з частотою 32,4 ГГц надходить на помножувач на два, виконаний на ефекті множення з допомогою кремнієвого лавинно-прольотного діода. В якості кінцевого пристрою використаний вентиль що забезпечує необхідне узгодження зі змішувачем частоти.

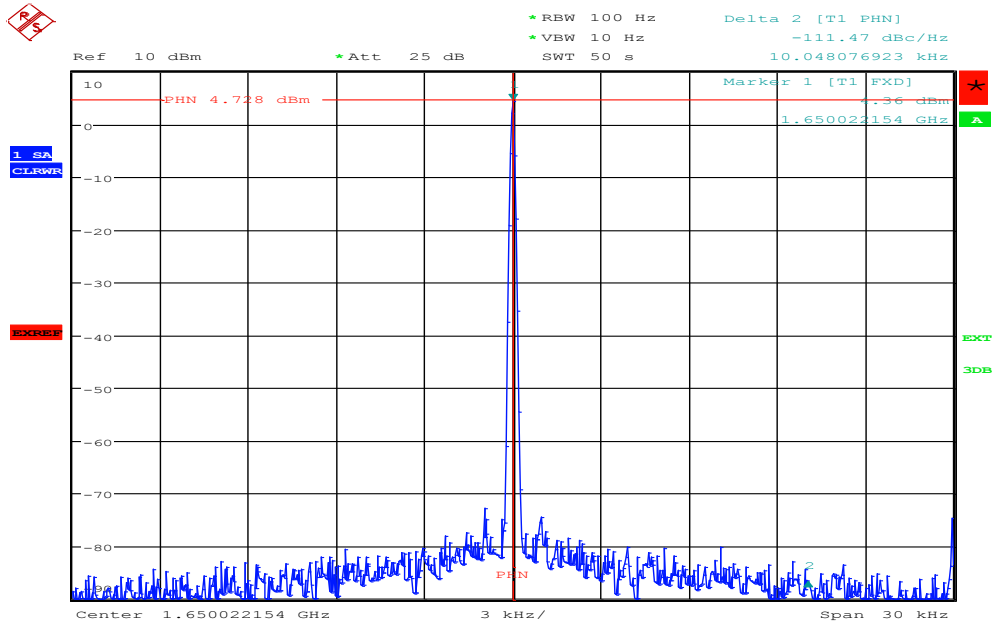
Спроектований множник частоти на лавинно-прольотному діоді представляє особливий інтерес, оскільки одержувана потужність на його виході в кілька разів перевищує потужність зарубіжних аналогів і складає не менше 30 мВт. Даний рівень потужності цілком достатній для субгармонійних змішувачів вгору для отримання терагерцового інформаційного сигналу.

На рис.2.13 і 2.14. представлені фазові шуми генератора на діелектричному резонаторі виміряні методом перенесення частоти.



Date: 19.JUN.2012 15:11:07

Рис.2.13 Спектральна щільність фазових шумів генератора на діелектричному резонаторі в смузі частот 300 Гц



Date: 19.JUN.2012 15:18:42

Рис.2.14 Спектральна щільність фазових шумів генератора на діелектричному резонаторі в смузі частот 30 кГц

Як видно з цих графіків, отримані результати спектральної щільності генератора при відстройках від несучої частоти:

на 100Гц - 85 дБн/Гц

на 1кГц - 105 дБн/Гц

на 10кГц - 113 дБн/Гц

З урахуванням множення частоти в 8 разів отримуємо такі кінцеві фазові шуми гетеродина на 64,8 ГГц:

на 100Гц - 67 дБн/Гц

на 1кГц - 87 дБн/Гц

10кГц - 95 дБн/Гц

Зовнішній вигляд гетеродина на діелектричному резонаторі з використанням радіоімпульсного помноження частоти на кремнієвому лавинно-прольотному діоді наведено на рис.2.15.

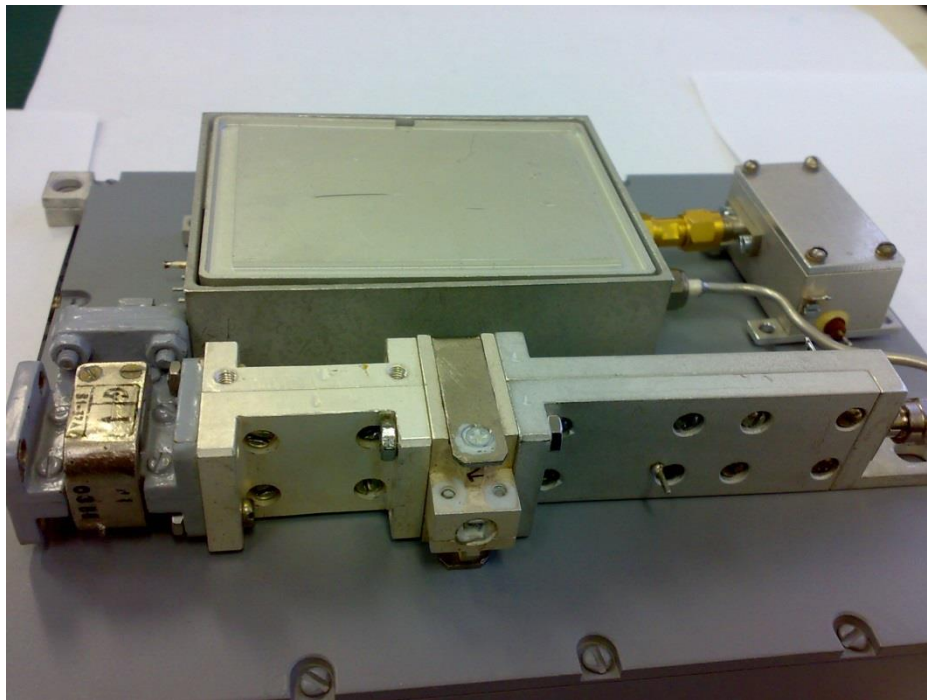


Рис.2.15 Зовнішній вигляд гетеродина на діелектричному резонаторі з використанням радіоімпульсного помноження частоти на кремнієвому лавинно-прольотному діоді



Таким чином, в результаті проведених досліджень спроектовано, виготовлено та випробувано гетеродин, який за своїми показниками, зокрема по вихідній потужності, переважає зарубіжні аналоги.

### Підсилювач проміжної частоти

Підсилювач проміжної частоти розроблений на базі мікросхем TQP3M9008 (фірми Triqwint) і HMC313 (фірми Hittite). Принципова схема підсилювача показана на рис.2.16.

Крім підсилювальних мікросхем схема ППЧ містить монолітні керамічні фільтри верхніх і нижніх частот для формування необхідної смуги пропускання тракту проміжної частоти 1...2 ГГц, резистивні 3 дБ атенюатори для поліпшення узгодження вихідного фільтра з передавальною лінією, а також стабілізатор LM1117adj, що формує напругу живлення для мікросхем.

Загальний коефіцієнт підсилення ППЧ становить 28,5 дБ, шумова температура не перевищує 100 К.

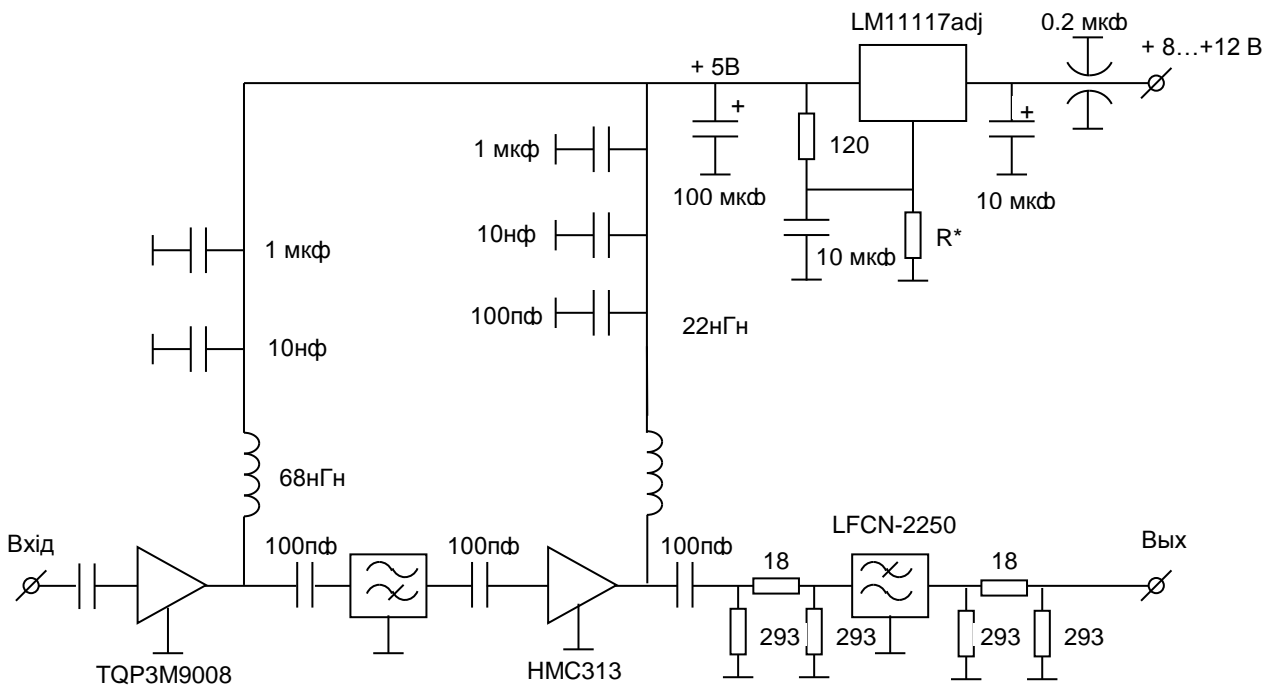
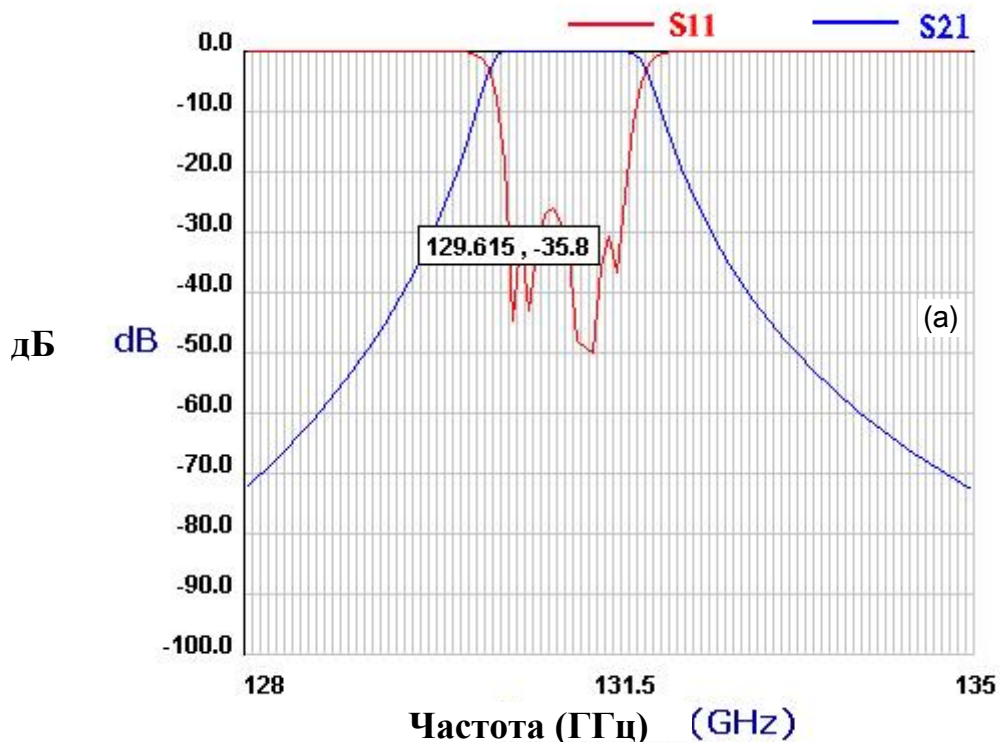


Рис.2.16 Принципіальна схема ППЧ

## Смуго-пропускаючі фільтри

Низька величина проміжної частоти ( $F_{ПЧ} = 1...2$  ГГц) обумовлює жорсткі вимоги до високочастотних СПФ за вибірковістю. Фільтри повинні забезпечити достатню розв'язку сигналів передавального і приймального тракту, а також надійну режекцію другої гармоніки частоти гетеродина в обох трактах.

Найбільш прийнятними в 2 мм діапазоні довжин хвиль з точки зору малих втрат і високої вибіркової представляються septum-фільтри, які і були розраховані і змодельовані в рамках цього проекту. Конструктивно фільтр являє собою тонку металеву пластину, вставлену в  $E$ -площину хвилеводного каналу. Пластина містить резонансні вікна, зв'язок між якими визначається шириною розділяючі їх смужок. На рис.2.17. наведені розраховані  $S$ -параметри СПФ, а також конфігурація та розміри пластини фільтра.



Розміри (мм) 5-ти резонаторної пластинчастої вставки

Центральна частота 130 ГГц

Ширина смуги 5 ГГц

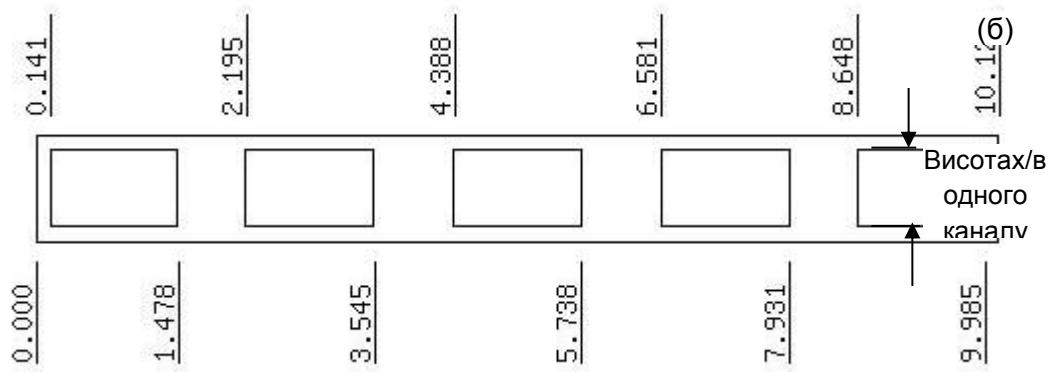


Рис.2.17.Розрахункові АЧХ septum-фільтра (а) і розміри пластинчатої вставки (б)

За результатами розрахунків були виготовлені та експериментально досліджені зразки СПФ. На рис.2.18. показаний монтаж пластини з резонансними вікнами в  $E$ -площині хвильового каналу.

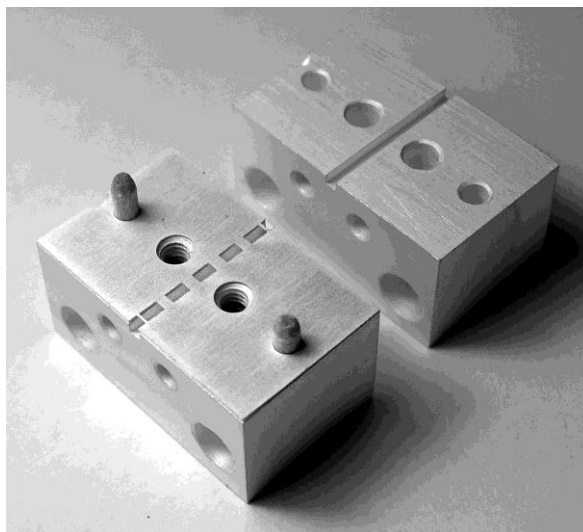


Рис.2.18 Фотографія septum-фільтра в розібраному вигляді

### 2.3 Конструктив приймальнопередавального тракту радіорелейної системи

Результати моделювання окремих функціональних вузлів приймальнопередавального тракту радіорелейної системи терагерцового діапазону[14-18] дозволили виконати проектування всієї аналогової приймальнопередавальної частини системи, структурна схема якої показана на

рис.2.1. Конструктивно прийомо-передавач виконаний у вигляді єдиного блоку, що включає всі розроблені вузли, модульне виконання яких забезпечує компактність всього виробу, зручність його зборки і монтажу. Зовнішній вигляд прийомо-передавача показаний на рис.2.19.

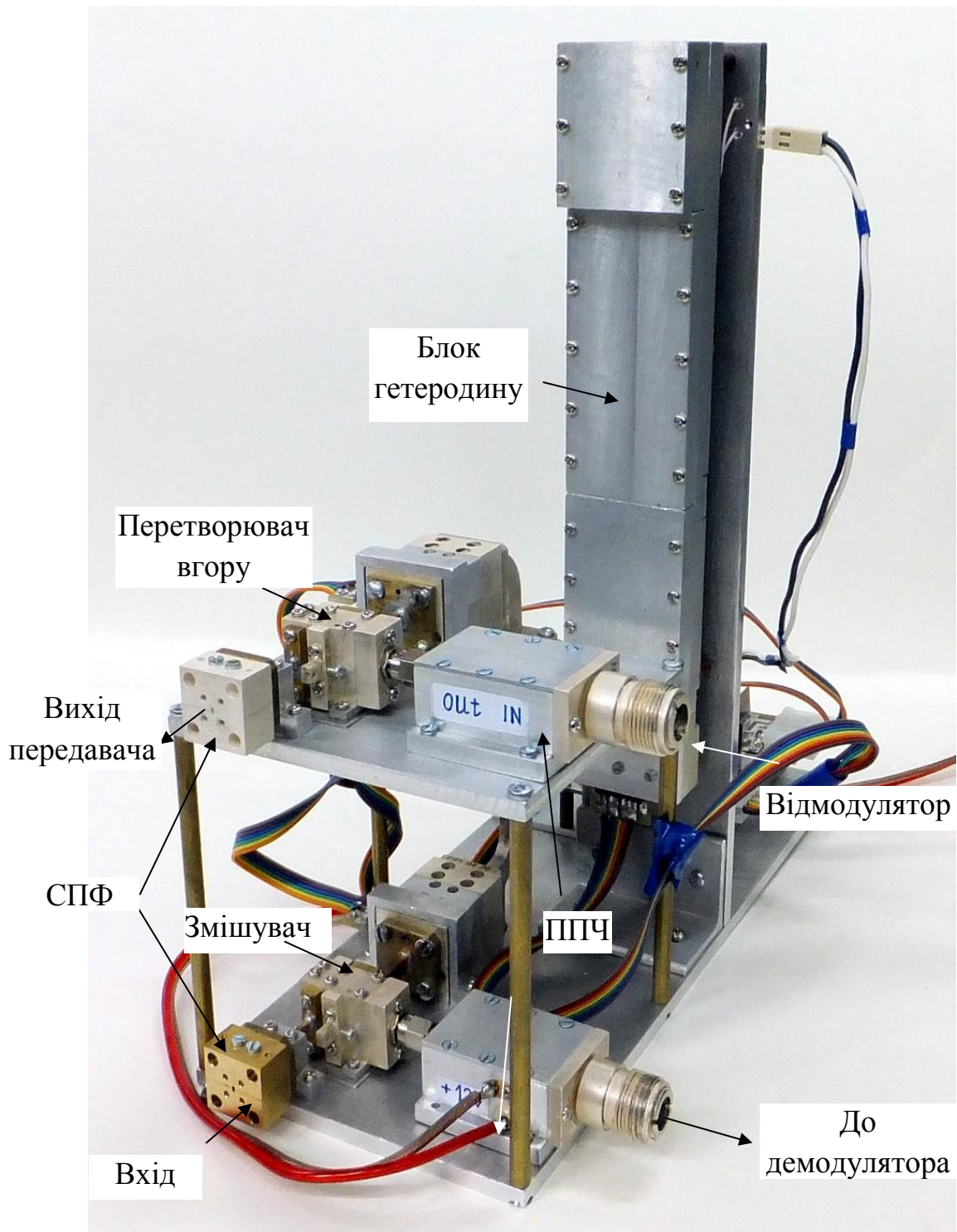


Рис.2.19 Приймальнопередавальний тракт радіорелейної системи терагерцового діапазону частот

Передавальний і приймальний тракт розташовані на різних рівнях і живляться від загального гетеродина. По ланцюгами проміжної частоти тракти мають коаксіальні вхід та вихід з роз'ємами *N*-типу, а повисоко частотним ланцюгам – хвилеводний вихід та вхід в каналі 1,6 x 0,8 мм. Приймально-передавальний тракт містить окремий блок, що формує необхідні високостабільні напруги для живлення всіх вузлів тракту.

Надійність і стабільність роботи прийомопередавача забезпечується максимальним використанням при проектуванні наноелектронних компонентів у вигляді монолітних мікрохвильових мікросхем.

#### **2.4 Антена для приймальнопередавального тракту суб-терагерцового діапазону**

Телекомунікаційні системи суб-терагерцового діапазону зазвичай використовують дзеркальні параболічні антени діаметром до 30 см. Ці антени, як правило, інтегровані із зовнішнім блоком приймальнопередавального тракту, щоб уникнути втрат у фідерному тракті і спростити процес установки.

Важливо відмітити, що в терагерцовому діапазоні антени дуже чутливі до виробництва та установки, оскільки невеликі відхилення можуть привести до великої різниці в значеннях коефіцієнта спрямованості (підсилення) антени. Завдяки тому, що підсилення антен росте з частотою, великі вигоди можуть бути досягнуті при відносно невеликих розмірах (діаметрі) антен на цих частотах.

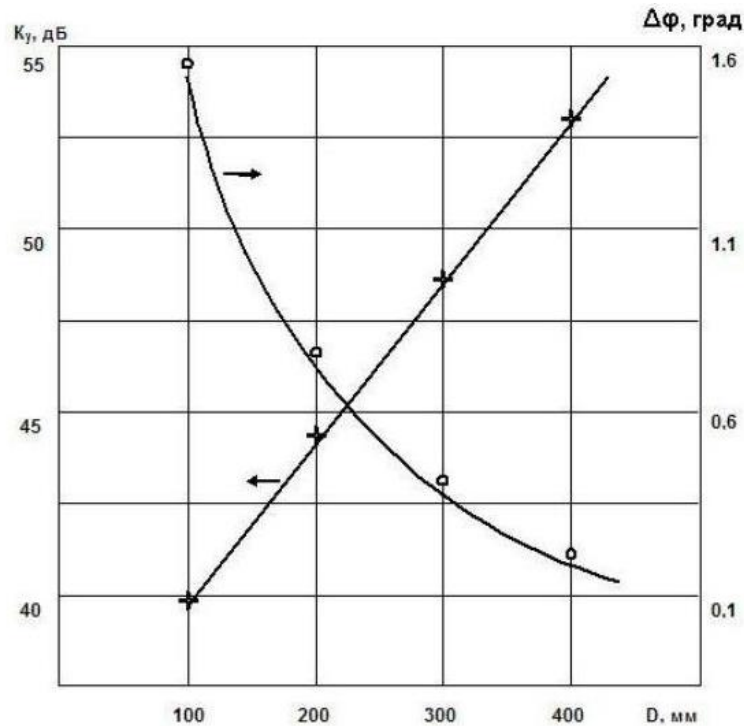


Рис.2.20 Залежність коефіцієнта підсилення антени і ширини променя від діаметра антени

На рис.2.20. наведена залежність коефіцієнта підсилення антени і ширини променя від діаметра антени в діапазоні частот хвильового каналу WR-06 (114-173ГГц), а на рис.2.21. показана залежність підсилення для дзеркальної параболічної антени діаметром 30 см. Крім цього, вузька діаграма спрямованості антен в терагерцовому діапазоні дозволяє розміщати антени на більш низьких висотах без ризику багатопроменевого завмирання внаслідок відбивань променів від поверхні Землі. Цей результат в можливості простої установки антен терагерцового діапазону заключається в тому, що телекомунікаційні системи з такими антенами можуть бути побудовані на невеликих ділянках Землі і вздовж наявних напрямків, таких як трубопроводи, залізничні шляхи та дороги.

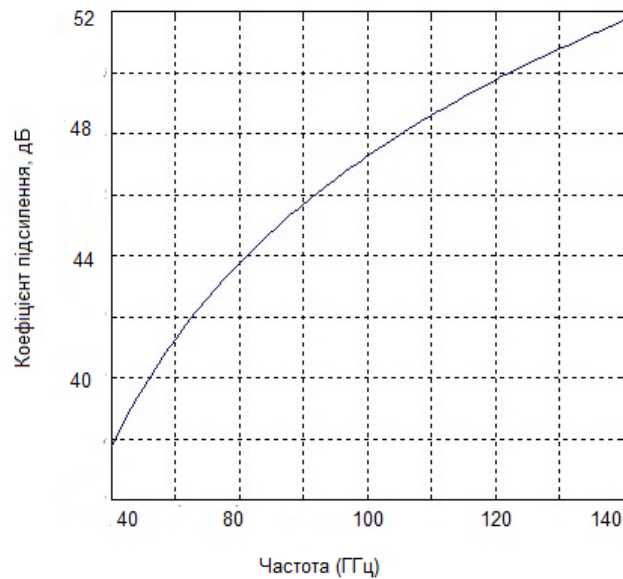


Рис.2.21 Залежність коефіцієнта підсилення дзеркальної параболічної антени діаметром 30 см від частоти.

В табл.2. наведена маска дзеркальної параболічної антени діаметром 30 см згідно з версією звіту ITU-R F/2107-1.

Таблиця 2.1 Маска дзеркальної параболічної антени діаметром 30 см

Частота, ГГц	Максимальна ширина променя на рівні 3 дБ, град	Мінімальне підсилення, дБі	Мінімальні придушення при відхиленні в градусах від геометричної осі основного променя, дБ						
			5-10	10-15	15-20	20-30	30-100	100-140	140-180
71-76	1,2	43	35	40	45	50	50	55	55
92-95	0,6	50	36	40	45	50	55	55	55
130-134	0,3	55	40	45	50	55	55	55	55

Якщо підсилення антени менше 50 дБ (але більше або рівне 43), то допускається тільки при пропорційному зменшенні максимально допустимої еквівалентно ізотропно випромінюваної потужності ЕІВП у співвідношенні 2дБ

потужності на 1 дБ коефіцієнта підсилення антени. Таким чином, мінімально допустима ЕІВП (в дБВт) для антен з підсиленням менше 50 дБ стає рівною  $+55 - 2 (50-G)$ , де  $G$  є коефіцієнтом підсилення антени в дБ. Крім цього, антени в терагерцовому діапазоні повинні відповідати двом додатковим стандартам, що відносяться до вимог щодо рівнів придушення випромінювання. При кутах від 1,2 до 5 градусів від центральної лінії основного променя, рівень побічного випромінювання повинен бути  $G-28$ , а при кутах менше 5,0 градуса від центральної лінії основного променя крос поляризаційна розв'язка повинна бути не менше 25 дБ.

На рис.2.22. наведено фото двохдзеркальної антени з еліптичною твірною субрефлектора АДЕ, яка відповідає вимогам МСЕ згідно з версією звіту ITU-RF.2107-1.



Рис.2.22 Двохдзеркальна параболічна антена діаметром 10 см з еліптичною твірною субрефлектора

Основні її параметри на частоті 140 ГГц:

Коефіцієнт підсилення  $G=41$  дВі

КСВН  $< 1.1.5$

Ширина діаграми спрямованості за рівнем мінус 3 дБ -1.4град

Основними особливостями такої антени є наступні:

- покращене узгодження (КСВН $\leq 1,15$ );



- більша рівномірність амплітудного розподілу в розкритті антени при конструктивно більш простому опромінюванні завдяки чому досягається високий коефіцієнт використання поверхні дзеркала;

- забезпечення більш прийнятних характеристик спрямованості, зокрема, високої захисної дії та високих електричних параметрів, які недосяжні в класичних схемах двох дзеркальних антен.

## **Висновок**

Визначені та обґрунтовані параметри основних вузлів приймально-передавального тракту радіорелейної системи в діапазоні частот 130–134 ГГц. Розроблена структурна схема радіорелейної лінії в терагерцовому діапазоні та досліджені розрахункові характеристики її приймальнопередавального тракту.

На основі узагальнення результатів, аналізу наявної радіорелейної елементної бази та теоретичних досліджень проведено проектування основних вузлів і всього приймальнопередавального тракту телекомунікаційної системи із гігабітною пропускною здатністю в діапазоні частот 130...134 ГГц у складі: частотні перетворювачі з субгармонійною накачкою, гетеродин, що використовує високостабільний задавальний кварцовий генератор з подальшим ланцюгом помножувальних і підсилювальних каскадів, смуго-пропускний фільтр з використанням тонкої металевої пластини в Е-площині хвилеводного каналу  $1,6 \times 0,8$  мм.

### РОЗДІЛ 3

## РОЗРАХУНОК ЕНЕРГЕТИЧНОГО БЮДЖЕТУ РАДІОЛІНІЙ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДІАПАЗОНУ

### 3.1 Початкові дані та обмеження.

Математичне моделювання радіорелейної лінії терагерцового діапазону.

Математичне моделювання було виконано з метою розрахунку можливих *відстаней* передачі інформації в терагерцовому діапазоні враховуючи декілька сценаріїв та визначення можливого *затухання* при передачі інформації на розраховані відстані.

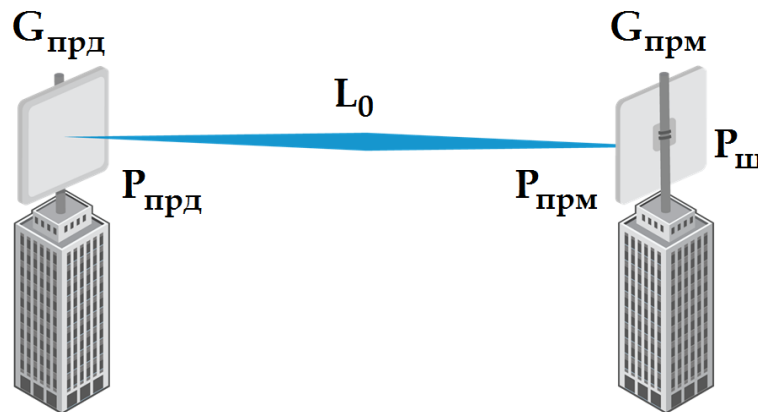


Рис. 3.1 Структурна схема радіоліній точка-точка

Для математичного моделювання було використано формулу передачі Фрііса для розрахунку потужності сигналу на вході приймача радіорелейної лінії терагерцового діапазону:

$$P_{\text{прм}} [\text{Вт}] = \frac{P_{\text{прд}} G_{\text{прд}} G_{\text{прм}}}{L_0 L_d L_{\text{атм}}} \quad (3.1)$$

Для розрахунку теплового шуму приймального пристрою використовувалась формула Джонсона:

$$P_{\text{ш}} [\text{Вт}] = k T_{\text{ш}} \cdot \Delta f \quad (3.2)$$

Відношення сигнал/шум на вході приймача:

$$SNR_{[дБ]} = P_{\text{прд}[дБВт]} + G_{\text{прд}[дБ]} + G_{\text{прм}[дБ]} - L_0_{[дБ]} - L_{\text{д}[дБ]} - L_{\text{атм}[дБ]} - P_{\text{ш}[дБВт]} \quad (3.3)$$

*Втрати потужності у вільному просторі:*

$$L_0_{[дБ]} = 20 \log \left( 4 \frac{\pi \cdot R_{[м]}}{\lambda_{[м]}} \right) \quad (3.4)$$

*Послаблення в дощі  $L_{\text{д}[дБ]}$*

$$L_{\text{д}[дБ]} = \gamma_{\text{д}[дБ/км]} \cdot R_{\text{еф}[км]} \quad (3.5)$$

### 3.2 Розрахунок дальності дії радіоліній терагерцового діапазону при передаванні цифрового сигналу різних стандартів.

$\gamma_{\text{д}[дБ/км]} = 15,5$  дБ/км – погонне затухання сигналу в дощі, знаходиться за формулою:

$$\gamma_{\text{д}[дБ/км]} = k_{\text{дощ}[рази]} R_{\text{інтДощ}[мм/год]}^{\alpha} \quad (3.6)$$

де

$\alpha$  та  $k_{\text{дощ}}$  – частотно-залежні коефіцієнти, що знаходяться відповідно до рекомендації ITU-R P.838;

$R_{\text{інтДощ}[мм/год]}$  – інтенсивність дощу, по Україні середня – 35 мм/год;

$R_{\text{еф}[км]}$  — ефективна відстань, що знаходиться за формулою:

$$R_{\text{еф}[км]} = R_{[км]} \cdot \left( \frac{1}{1 + \frac{R_{[км]}}{35 \cdot e^{-0.015 \cdot R_{\text{інтДощ}[км]}}} } \right) \quad (3.7)$$

Втрати потужності у атмосферних газах – водяних парах ( $\text{H}_2\text{O}$ ) та сухому повітрі (кисні, азоті, нерезонансне дебаєвське загасання тощо)

$$L_{\text{атм}[дБ]} = \gamma_{\text{атм}[дБ/км]} R_{[км]} \quad (3.8)$$

де

$\gamma_{\text{атм}} [\text{дБ/км}]$  – питомі втрати в атмосфері відповідно до рекомендації ITU-R P.676 . На частоті  $f = 130 \text{ ГГц}$   $\gamma_{\text{атм}} [\text{дБ/км}] = 0,9 \text{ дБ/км}$ .

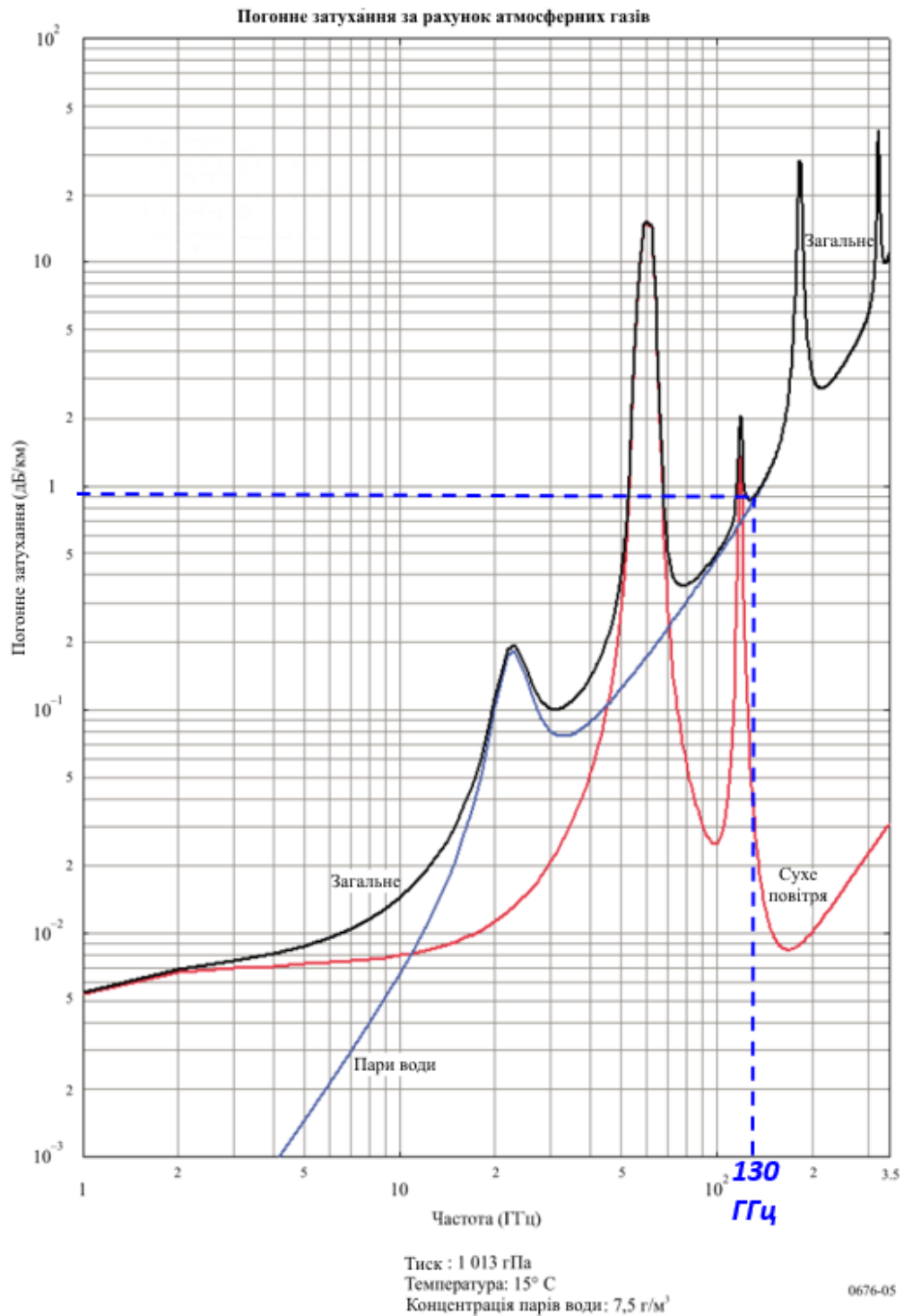


Рис.3.2 Питомі криві втрат у водяному парі, сухому повітрі та загальні втрати (ITU-R 676)

$$\gamma_{\text{атм}} [\text{дБ/км}] = 0,9 \text{ дБ/км}$$

Табл.3.1 *Вимоги до якості передачі сигналу*

Метод модуляції	SNR при BER=10 <sup>-9</sup>	Допустимий рівень подавлення інтермодуляційних спотворень 3-го порядку, дБ	Допустимі відхилення АЧХ тракту від оптимального
<i>QPSK</i>	<b>16</b>	<b>-30</b>	<b>1,0</b>
<i>QAM-16</i>	<b>23</b>	<b>-35</b>	<b>0,3</b>
<i>QAM-64</i>	<b>29</b>	<b>-40</b>	<b>0,2</b>
<i>QAM-256</i>	<b>35</b>	<b>-50</b>	<b>0,1</b>

**Математичне моделювання радіорелейної лінії терагерцового діапазону.**Табл. 3.2 **Вхідні дані дослідження**

Частота передачі $f$ , ГГц	Середньостатистична інтенсивність дощу в Україні $\gamma_d$ , мм/год	Температура навколишнього середовища $T_0$ , К	Потужність передавача без ПП $P_{пер}$ , мкВт	Потужність передавача з ПП $P_{пер}$ , мВт	Діаметр антен передавача і приймача $D$ , м	Коефіцієнт використання поверхні антени $\eta$ , рази	Ширина спектру частот $\Delta f$ , МГц	Коефіцієнт шуму приймача, дБ
<b>131.2</b>	<b>35</b>	<b>290</b>	<b>50</b>	<b>50</b>	<b>0,3</b>	<b>0,6</b>	<b>440</b>	<b>12,61</b>

Табл. 3.3 **Вихідні дані дослідження**

Погодні умови	При вихідній потужності (без ПП) <b>50 · 10<sup>-6</sup></b> , Вт		При вихідній потужності (з ПП) <b>50 · 10<sup>-3</sup></b> , Вт	
	Відстань, км ( <b>SNR = 16 дБ</b> )	Сумарні ослаблення	Відстань, км ( <b>SNR = 16 дБ</b> )	Сумарні ослаблення
Ідеалізований випадок	<b>3,773</b>	<b>146,334</b>	<b>119,229</b>	<b>176,328</b>
Без дощу	<b>2,817</b>	<b>146,331</b>	<b>18,165</b>	<b>176,324</b>
В дощі	<b>0,831</b>	<b>146,492</b>	<b>2.306</b>	<b>175,162</b>

*Метод графічного пошуку відстаней передачі інформації у найгіршому та ідеальному випадку*

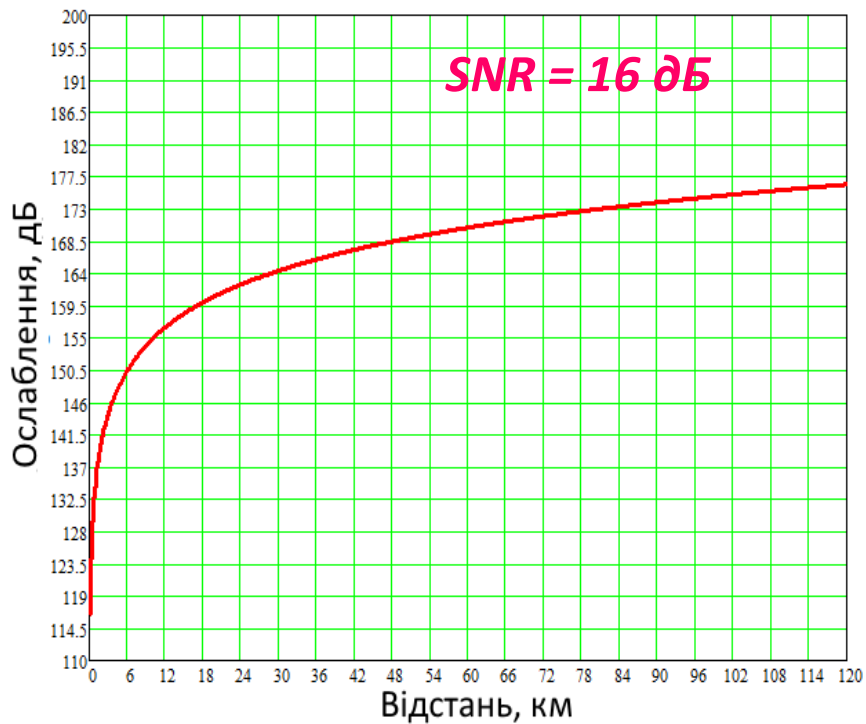


Рис.3.3 Графік залежності ослаблення в вільному просторі від дистанції прольоту без урахування атмосферних ослаблень і дощу на частоті 131.2 ГГц

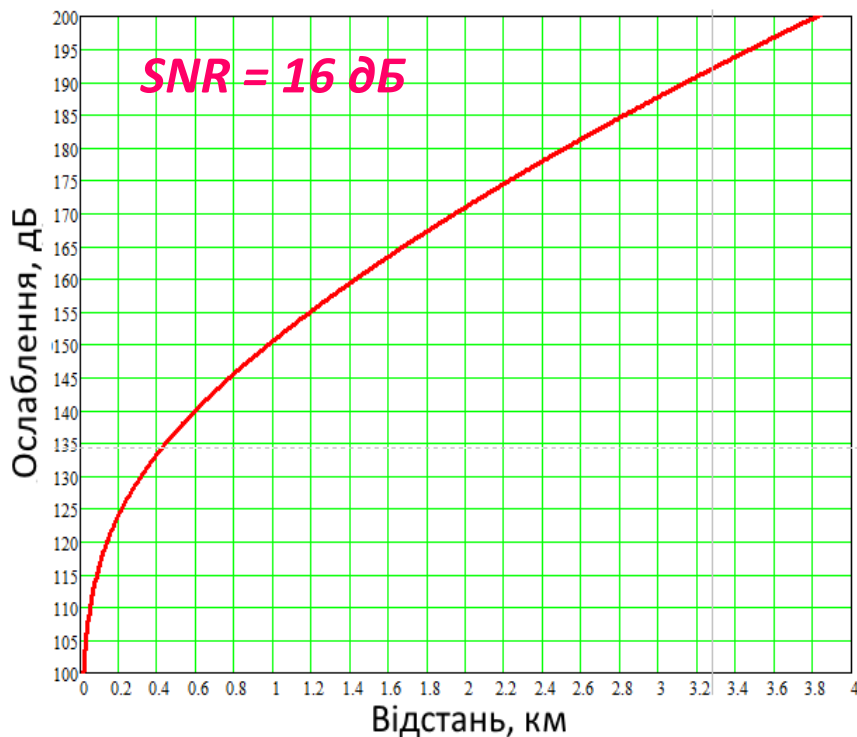


Рис.3.4 Графік залежності ослаблення в дощі від дистанції прольоту на частоті 131.2 ГГц

## Висновок

Було виконано математичне моделювання та розрахунок можливих *відстаней* передачі інформації в терагерцовому діапазоні враховуючи декілька сценаріїв та визначення можливого *затухання* при передачі інформації на розраховані відстані. Як показано в роботі, на якість передачі, в стільникових системах найбільший вплив роблять теплові шуми і соканальні перешкоди.

Можна зробити висновок, що відстань між стільниками напряду залежить від впливу багатьох факторів, в регіонах без дощу відстань більша, а в регіонах с дощем треба використовувати допоміжну потужність за для кращої передачі сигналу ТЦг діапазону без перешкод.

## РОЗДІЛ 4

### ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СИГНАЛІВ ЦИФРОВОГО ТЕЛЕБАЧЕННЯ ПРИ ЇХ ПЕРЕДАВАННІ ПО РАДІОЛІНІЇ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДІАПАЗОНУ

#### 4.1 Дослідження наскрізної АЧХ тракту

Для дослідження наскрізної АЧХ тракту “вхід ТГц передавача – вихід ТГц приймача” було спроектовано експериментальну установку, структурну схему якої надано на рис.4.1.

Як видно з рис. 4.1, заміри сигналу виконувалися на вході тракту передавача та на виході тракту приймача прийомопередавача терагерцового діапазону. При цьому вихід передавача було з’єднано з входом приймача хвилеводною лінією.

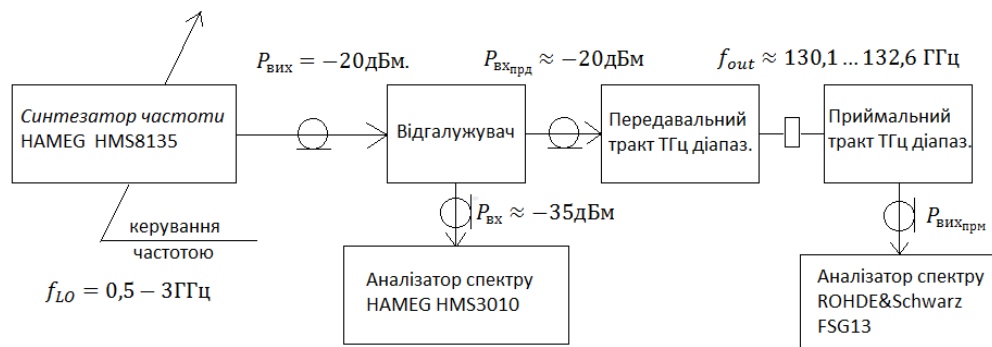


Рис.4.1 Структурна схема лабораторної установки для вимірювання наскрізної АЧХ тракту “вхід ТГц передавача – вихід ТГц приймача”

Супутниковий ресивер для керування DISEQc комутатором (тобто для вибору необхідного конвертору і відповідно супутника, а також вибору транспондера) зображено на рис.4.2.



Рис.4.2 Супутниковий ресивер OPENBOX S1.



Професійний ресивер супутникового телебачення стандарту DVB-S CODICO SCOPUS, який призначений для демодуляції обраного радіосигналу (частота 12380МГц, поляризація горизонтальна, символна швидкість 27500Ксимв/с) до рівня багатопрограмного транспортного потоку MPEG та подачі цього потоку на відповідний інтерфейс модулятора стандарту DVB-S Radyne Comstream DVB-3030 зображені на рис.4.3.



Рис.4.3 Цифровий відео модулятор Radyne Comstream DVB-3030 та Професійний ресивер супутникового ТВ CODICO SCOPUS.

Для розрахунку АЧХ використано лабораторну установку, яка зображена на рис.4.4 та зняті параметри з аналізаторів спектрів HAMEG HMS3010 та Rohde&Schwarz вигляд яких зображений на рис.4.5.



Рис.4.4 Фотографія лабораторного стенду для дослідження передавальноприймального тракту ТГц діапазона

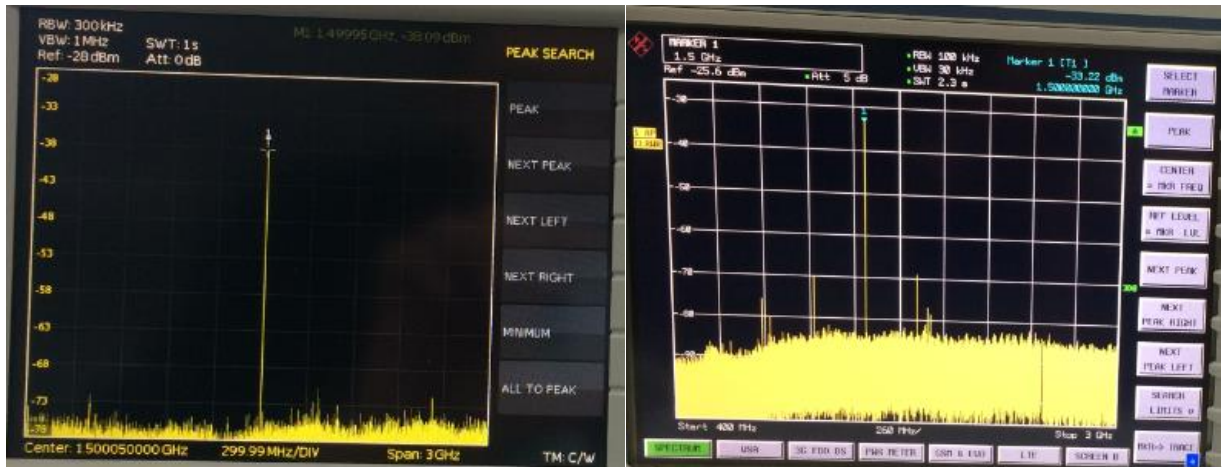


Рис.4.5 Спектр на вході передавального та виході приймального тракту прийомопередавача ТГц діапазону

Методика вимірювання наскрізної АЧХ:

1) Встановлюємо на виході синтезатору частот HMS8135 вихідний рівень сигналу гармонічної частоти  $P_{\text{вих}} = -20\text{дБм}$ .

Встановлюємо початкову частоту синтезатору  $f = 500\text{МГц}$ .

2) Вимірюємо рівень сигналу на виході приймального тракту ТГц діапазону  $P_{\text{вих.прд}}$  за допомогою аналізатору спектру Роде й Шварц.

3) Розраховуємо коефіцієнт передавання потужності сигналу від входу передавача до виходу сприймача ТГц діапазону на частоті  $f = 500\text{МГц}$

$$L(f) = P_{\text{вих.прд}} - P_{\text{вих}} + 15\text{дБ}. \quad (4.1)$$

Заносимо розраховане значення до таблиці.4.1

4) Далі змінюємо частоту  $f$  з кроком  $\Delta f = 20\text{МГц}$  і виконуємо п.1-3

5) Після досягнення частоти  $f = 3\text{ГГц}$  будемо графік АЧХ(рис 4.6)

Табл. 4.1 Результати вимірювань АЧХ

$f$ , МГц	$P_{\text{вих}}$ , дБм	$P_{\text{вих.прм}}$ , дБм	$L$ , дБ
500	-37,52	-68,26	-15,74
520	-37,17	-63,23	-11,06
540	-36,98	-59,81	-7,83
560	-36,30	-55,81	-4,51
580	-37,58	-53,96	-1,38
600	-37,33	-49,51	2,82
620	-37,62	-47,26	5,36

640	-36,40	-48,48	2,92
660	-37,47	-50,25	2,22
680	-37,43	-52,17	0,26
700	-37,85	-50,06	2,79
720	-37,65	-49,47	3,18
740	-37,13	-49,02	3,11
760	-37,59	-50,83	1,76
780	-37,35	-49,31	3,04
800	-38,54	-47,84	5,7
820	-37,07	-44,29	7,78
840	-37,48	-45,32	7,16
860	-37,35	-45,25	7,1
880	-38,10	-43,97	9,13
900	-37,98	-40,76	12,22
920	-37,21	-37,88	14,33
940	-37,52	-39,62	12,9
960	-37,64	-39,75	12,89
980	-38,07	-38,88	14,19
1000	-38,12	-36,25	16,87
1020	-37,40	-35,77	16,63
1040	-37,70	-38,03	14,67
1060	-37,50	-38,06	14,44
1080	-38,85	-38,26	15,59
1100	-37,85	-34,99	17,86
1120	-37,88	-36,33	16,55
1140	-37,35	-36,78	15,57
1160	-38,57	-38,52	15,05
1180	-38,92	-36,38	17,54
1200	-37,83	-34,75	18,08
1220	-37,60	-34,93	17,67
1240	-38,04	-36,84	16,2
1260	-39,18	-36,24	17,94
1280	-38,14	-34,35	18,79
1300	-37,85	-33,33	19,52
1320	-37,45	-34,55	17,9
1340	-38,99	-35,30	18,69
1360	-39,13	-34,58	19,55
1380	-38,27	-32,40	20,87
1400	-37,74	-32,84	19,9
1420	-38,52	-33,86	19,66
1440	-39,11	-34,01	20,1
1460	-38,17	-32,19	20,98
1480	-37,80	-32,08	20,72

1500	-38,13	-33,46	19,67
1520	-39,22	-33,84	20,38
1540	-38,64	-32,71	20,93
1560	-38,62	-31,77	21,85
1580	-38,63	-33,33	20,3
1600	-39,48	-33,88	20,6
1620	-38,67	-33,29	20,38
1640	-39,58	-32,50	22,08
1660	-39,55	-34,05	20,5
1680	-40,33	-34,93	20,4
1700	-39,12	-35,61	18,51
1720	-39,91	-34,14	20,77
1740	-40,60	-36,27	19,33
1760	-40,59	-35,69	19,9
1780	-40,14	-37,97	17,17
1800	-39,20	-35,82	18,38
1820	-41,26	-38,71	17,55
1840	-40,07	-36,15	18,92
1860	-40,58	-38,53	17,05
1880	-38,97	-36,94	17,03
1900	-40,90	-40,40	15,5
1920	-41,09	-39,21	16,88
1940	-39,92	-39,25	15,67
1960	-39,93	-39,04	15,89
1980	-39,56	-40,63	13,93
2000	-41,63	-42,61	14,02
2020	-39,71	-41,43	13,28
2040	-39,73	-41,78	12,95
2060	-39,05	-42,40	11,65
2080	-40,83	-46,52	9,31
2100	-40,23	-46,77	8,46
2120	-38,30	-46,75	6,55
2140	-38,70	-46,19	7,51
2160	-39,98	-49,97	5,01
2180	-39,97	-50,84	4,13
2200	-38,46	-52,97	0,49
2220	-37,72	-51,07	1,65
2240	-38,55	-53,89	-0,34
2260	-39,40	-53,20	1,2
2280	-38,44	-57,94	-4,5
2300	-38,35	-56,54	-3,19
2320	-37,20	-58,58	-6,38
2340	-39,10	-56,40	-2,3

2360	-38,46	-60,11	-6,65
2380	-38,65	-60,45	-6,8
2400	-36,72	-63,88	-12,16
2420	-35,97	-60,15	-9,18
2440	-38,29	-61,60	-8,31
2460	-39,64	-61,56	-6,92
2480	-38,30	-66,50	-13,2
2500	-36,67	-63,26	-11,59
2520	-38,54	-64,39	-10,85
2540	-45,14	-60,84	-0,7
2560	-43,58	-66,26	-7,68
2580	-40,87	-64,82	-8,95
2600	-40,27	-65,85	-10,58
2620	-44,15	-63,75	-4,6
2640	-48,69	-63,63	0,06
2660	-43,48	-66,69	-8,21
2680	-41,74	-67,18	-10,44
2700	-43,07	-68,03	-9,96
2720	-48,63	-65,67	-2,04
2740	-48,29	-66,79	-3,5
2760	-44,25	-67,13	-7,88
2780	-44,01	-69,10	-10,09
2800	-45,90	-66,99	-6,09
2820	-53,13	-68,06	0,07
2840	-49,88	-66,28	-1,4
2860	-46,52	-69,64	-8,12
2880	-46,09	-67,77	-6,68
2900	-49,10	-71,10	-7
2920	-54,78	-68,08	1,7
2940	-52,40	-70,92	-3,52
2960	-49,40	-69,31	-4,91
2980	-49,06	-72,68	-8,62
3000	-74,10	-72,10	17

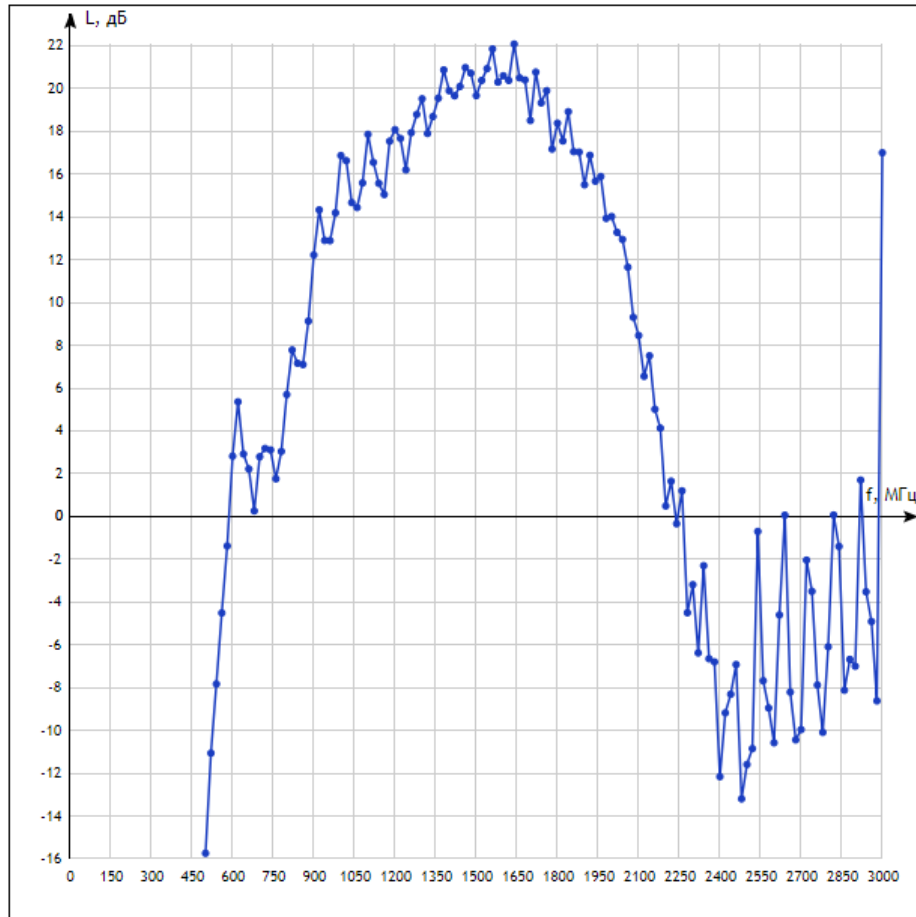


Рис.4.6 Графік залежності коефіцієнта передавання потужності  $L$  до частоти  $f$

Після проведення розрахунків, смуга пропускання передавально-приймального тракту знаходиться в межах від 950МГц (нижня частота по рівню -3дБ) до 1900МГц (верхня частота по рівню -3дБ).

Оскільки в лабораторії, в якій проводився дослід обладнання для формування сигналу стандарту DVB-S працює з частотою не більш ніж 862МГц, тому при проведенні наступних дослідів з сигналами DVB-S, слід враховувати коефіцієнт передачі передавальноприймального тракту буде не оптимальним, але достатнім для проведення дослідів.

Для сигналу стандарту DVB-S буде використаний перетворювач частоти 1895МГц, який перенесе спектр цього сигналу з міжної частоти 95МГц на проміжну частоту 1895МГц, яка є оптимальною для роботи цього приймальнопередавального тракту ТГц діапазону.

## 4.2 Експериментальні дослідження параметрів радіосигналу стандарту DVB-S при його передаванні через прийомопередавач терагерцового діапазону

Дослідження параметрів радіосигналу стандарту DVB-S проведено відповідно до схеми на рис.4.7, за якою: в мережу (220 В) ввімкнено супутниковий ресивер OPENBox X-810(рис.4.13) на радіочастотний вхід якого в діапазоні частот 0,95 – 2,15 ГГц подаються супутникові телевізійні сигнали від супутникової дзеркальної параболічної офсетної антени діаметру 0,85 м, яка розташована на даху 30-го корпусу ІТС.

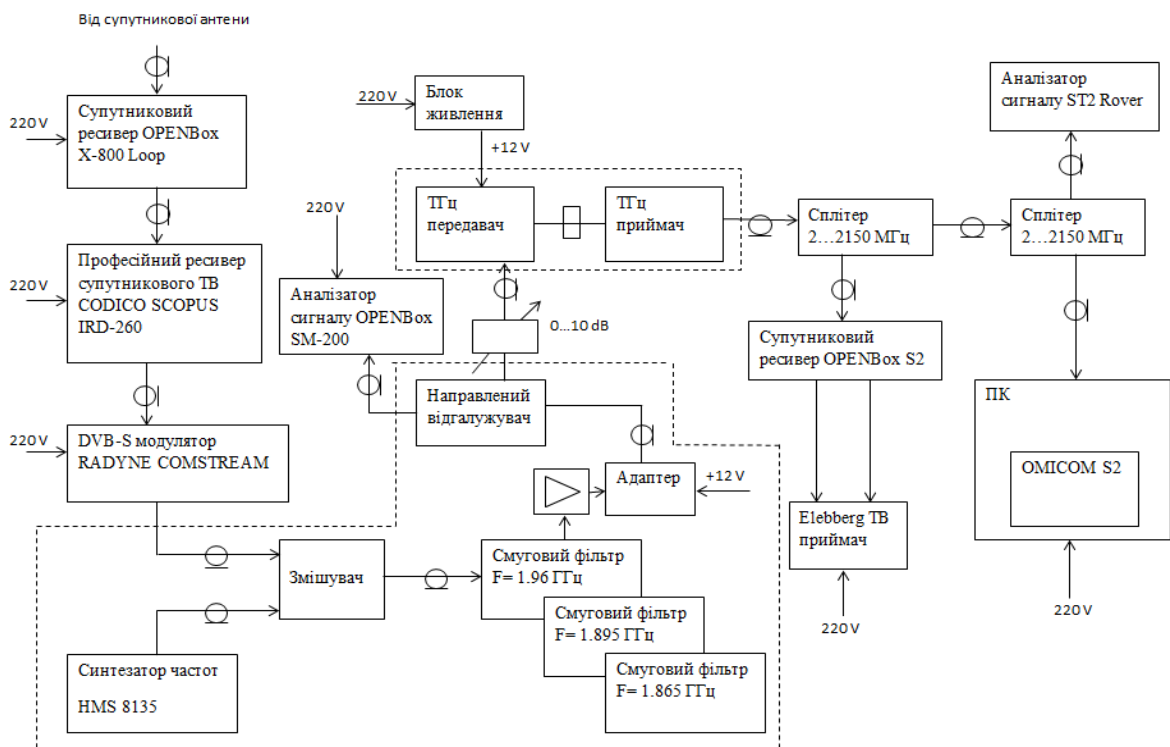


Рис.4.7 Структурна схема для дослідження параметрів радіосигналів стандарту DVB-S при їх передаванні через прийомопередавач ТГц діапазону

Дзеркальна антена має три конвертори для прийому супутникових телевізійних сигналів в діапазоні 10,7 – 12,7 ГГц від супутників Amos (4° з.д), Astra 4A (5° сх.д) та Hot Bird (13° сх.д). З ланцюга проміжної частоти цього ресиверу супутникові радіосигнали діапазону 0,95 – 2,15 ГГц коаксіальним кабелем надходять до ввімкненого до мережі (220 В) професійного ресиверу

спутникового телебачення CODICO Scopus IDR-2600, програмно налаштований на демодуляцію радіосигналу стандарту DVB-S з ефірною частотою 12,380 ГГц до рівня багатопрограмного транспортного потоку MPEG TS. Вказаний потік по коаксіальному інтерфейсу надходить на вхід DVB-S модулятора RADYNE COMSTREAM, який формує на несній частоті 95 МГц радіосигнал ТВ мовлення стандарту DVB-S з модуляцією QPSK, символною швидкістю 27,5 Мсим/сек, з потужністю -10 дБм. Далі цей сигнал коаксіальним кабелем надходить на кільцевий діодний змішувач. Паралельно цьому сигналу, з місцевого гетеродину на змішувач надходить сигнал на частоті 1990 МГц (при використанні смугового фільтру з центральною частотою 1895 МГц; для смугових фільтрів з частотами 1865 та 1960 МГц частота гетеродину, в якості якого може бути використаний синтезатор частот HMS 8135 відповідно повинні дорівнювати 1770 МГц і 1865 МГц) та потужністю +7 дБм. На виході змішувача (в випадку, коли синтезатор було налаштовано на частоту 1890 МГц) спектр має форму вхідного сигналу (зменшеного за амплітудою, оскільки кожний елемент схеми вносить своє затухання), перенесеного з 95 МГц на 1895 МГц та сигналу генератору, а також дзеркального каналу на частоті  $1990+95=2085$  МГц. Для компенсації внесеного затухання використовується 2-каскадний підсилювач (по 12 дБ кожен каскад), який працює на постійному струмі, що надходить з адаптеру живлення. Направлений відгалужувач присутній в схемі для можливості паралельного контролю параметрів сигналу на аналізаторі сигналу Rover ST-2 та його передачі до терагерцового передавача. Перед передавачем стоїть направлений відгалужувач, який з перехідним загасанням в 15дБ передає сигнал на аналізатор спектру HAMEG HMS 3010, призначений для візуального контролю наявності сигналу на основному виході цього спрямованого відгалужувача.

Сигнал з виходу модулятора DVB-3030 надходить на вхід кільцевого змішувача перетворювача частоти на другий вхід якого подається сигнал від місцевого гетеродину з частотою 1,99 ГГц. З третього виходу змішувача комбінаційні сигнали надходять на вхід смуговий фільтр з центральною



частотою 1,895 ГГц і смугою пропускання біля 60 ГГц, який виконує операцію частотної селекції, корисного сигналу стандарту DVB-S на фоні інших комбінаційних сигналів, що зображений на рис.4.8.

З виходу приймача сигнал стандарту DVB-S надходить на сплітер (розрахований на діапазон частот від 5 до 2150 МГц), а з нього на такий само сплітер та на супутниковий ресивер OPENBOX S2. З супутникового ресиверу сигнал потрапляє на телевізійний приймач Elenberg, зі сплітеру – на аналізатор сигналу ST-2 Rover та на ПК зі встановленою платою супутникового тюнера OMICOM S2(рис.4.9).

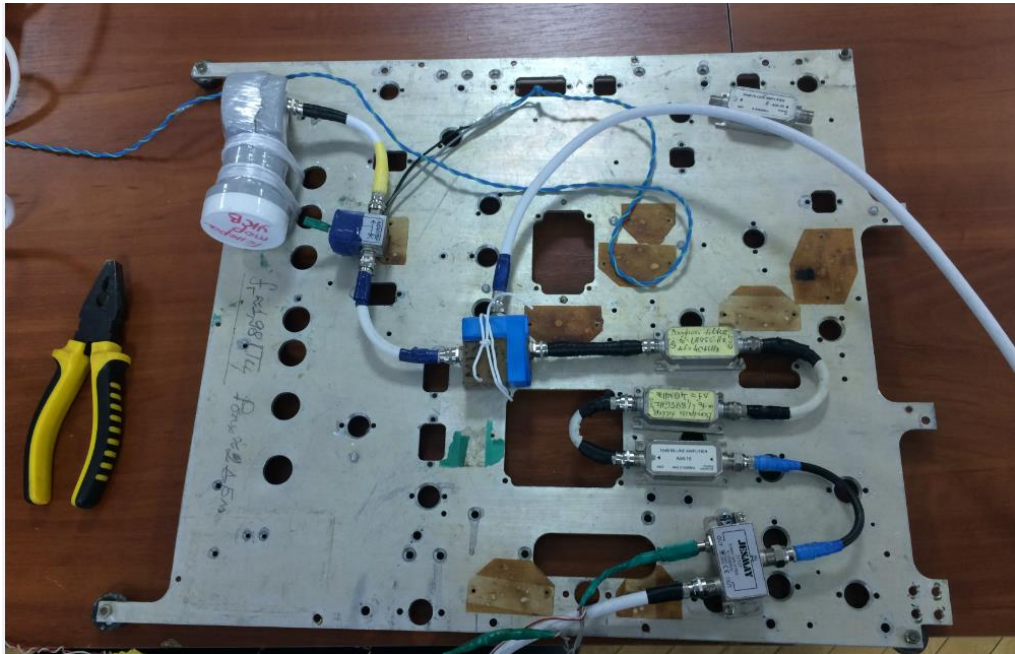


Рис.4.8 Перетворювач частоти несучої сигналу стандарту DVB-S с 95МГц на 1895МГц

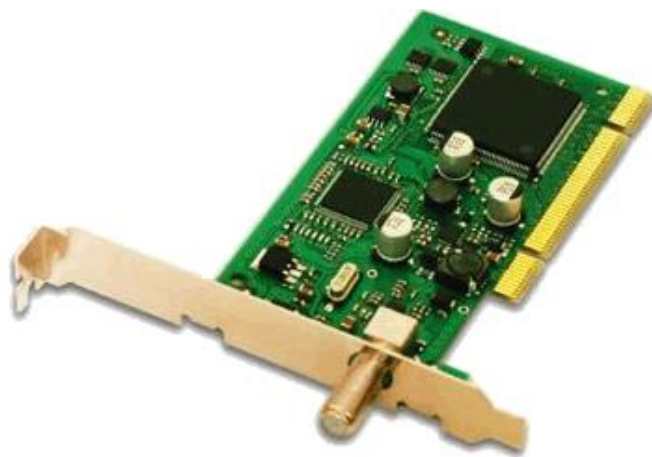


Рис.4.9 DVB-карта Omicom S2

Результати вимірювань параметрів спектру сигналу стандарту DVB-S зображені на рис.4.10 та рис.4.11. Перелік наявності сервісів (теле та радіо програми), що переноситься радіосигналом DVB-S зображений на рис.4.12.

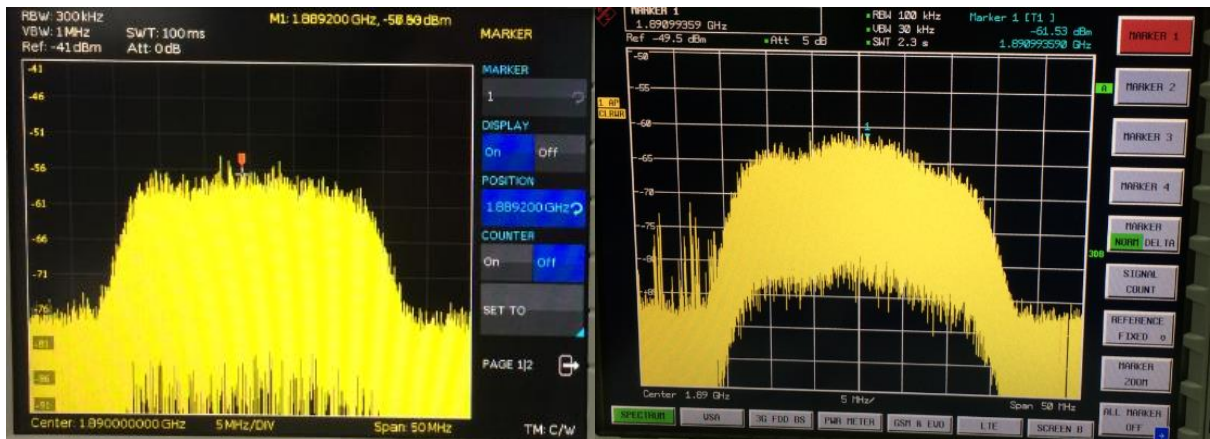


Рис.4.10 Спектр на вході передавального та виході приймального тракту прийомопередавача ТГц діапазону

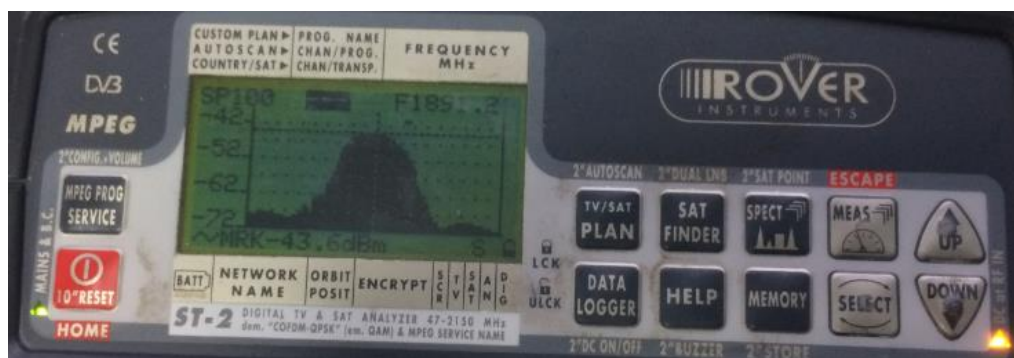


Рис.4.11 Вигляд спектру сигналу з частотою 1,891 ГГц на аналізаторі спектрів цифрового телебачення ST-2 ROVER



Рис.4.12 Перелік доступних каналів на аналізаторі спектрів цифрового телебачення ST-2 ROVER

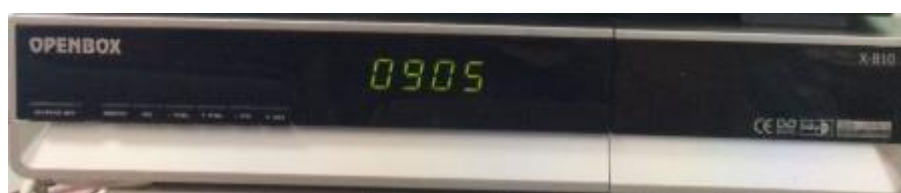


Рис.4.13 Ресивер OpenBox X810

Параметри сигналу стандарту DVB-S, що виміряні за допомогою аналізатора ST-2 ROVER, ресиверу OpenBox та карти OMICON S2 указані в табл.4.2, рис.4.14 та рис.4.15 відповідно.

Табл.4.2 Параметри сигналу цифрового телебачення стандарту DVB-S на носійній частоті  $F = 1,891$  ГГц, виміряні аналізатором сигналу ST-2 ROVER.

Параметри каналу		Значення замірів на вході тракту ТГц діапазону			Значення замірів на виході тракту ТГц діапазону		
Частота, МГц	Модуляція	N.MAR dB	MER dB	EVM %	N.MAR dB	MER dB	EVM %
1890,5	QPSK	6	12,5	25,1	9	16	15,8

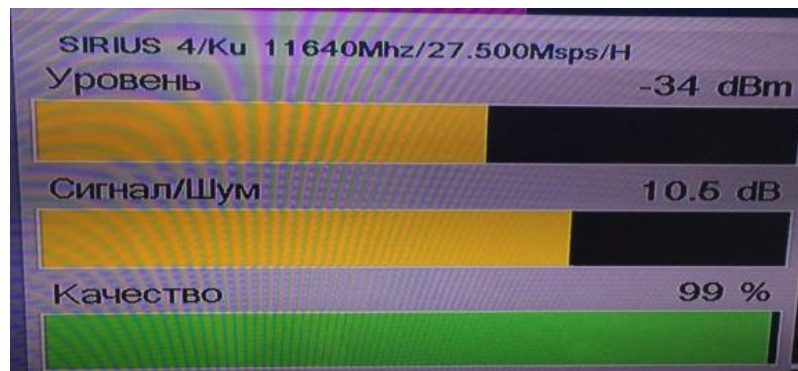


Рис.4.14 Параметри сигналу стандарту DVB-S, що виміряні на виході приймача ТГц діапазону за допомогою ресивера OpenBox X810

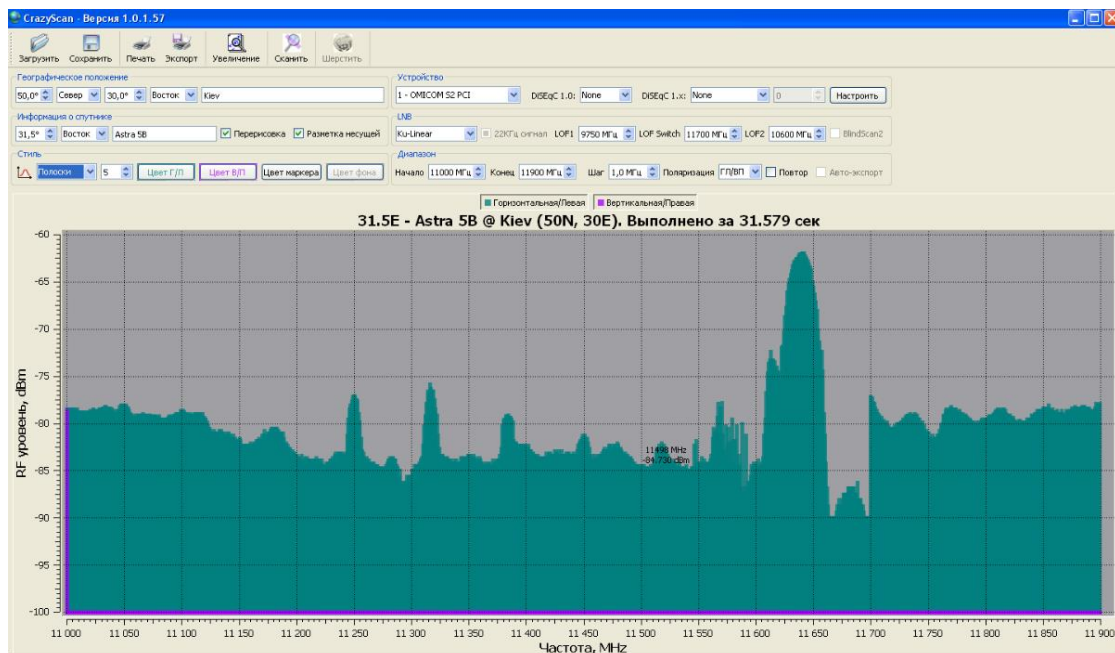


Рис.4.15 Результати аналізу смуги частот, які отримані за допомогою карти OMICON S2

Параметри сигналу стандарту DVB-S, а також структура елементарних потоків програм теле- та радіо- мовлення, які переносяться цим сигналом, відображені відповідно на рис.4.16, рис.4.17 та рис.4.18.

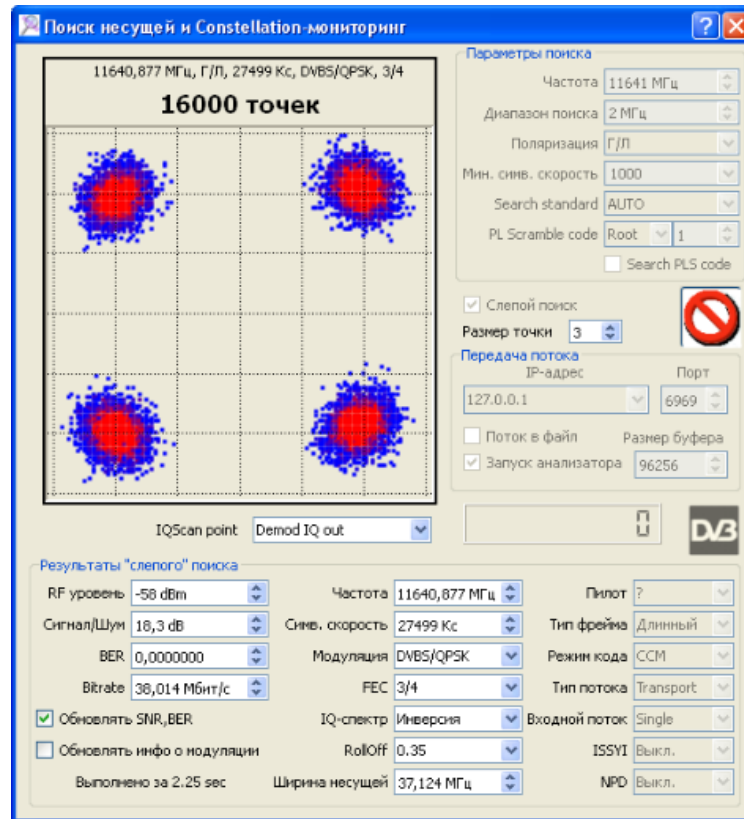


Рис. 4.16 Констеляційна діаграма та параметри сигналу DVB–S при модуляції QPSK

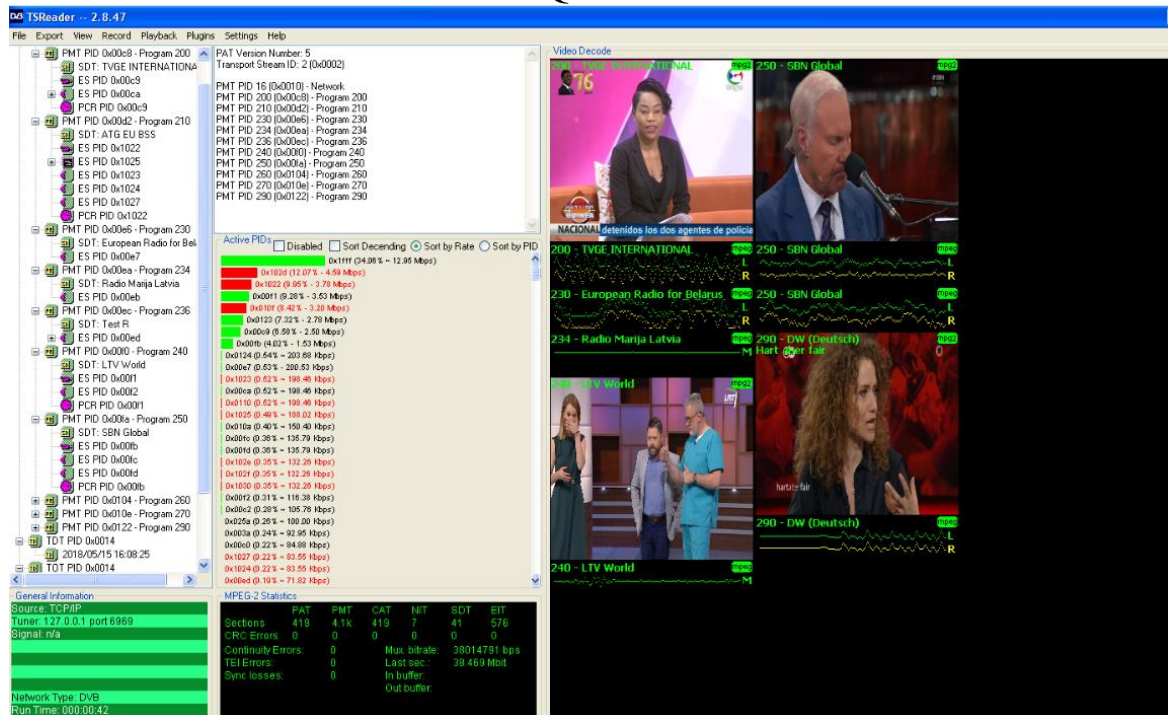


Рис.4.17 Відкриті та закриті системою доступу відео та аудіо елементарні ПОТОКИ

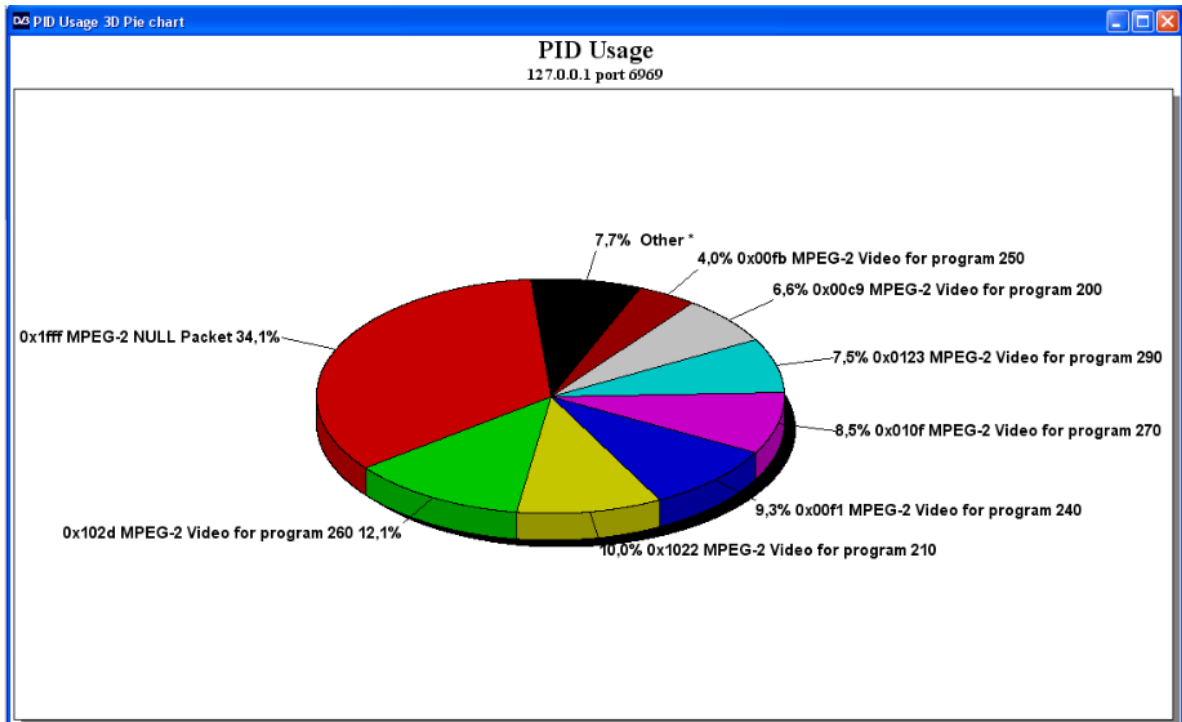


Рис.4.18 3D Діаграма зайнятості транспортного потоку доступними сервісами

Аналізуючи дані після проведення замірів на аналізаторі сигналу ST–2 ROVER та ресивері Homecast, можна дійти висновку, що запасу завадостійкості достатньо, щоб забезпечити трансляцію по ТГц тракту за допомогою сигналу стандарта DVB-S декількох телевізійних програм з форматом зображення стандартної/покращеної чіткості з високою якістю відтворення зображення та звуку.

Також більш детально було розглянуто сигнал за допомогою карти OMICON S2, що підключена до комп'ютера за допомогою USB-кабелю. З використанням програми CrazyScan на ПК розглянуті детальні характеристики сигналу, такі як: відкриті та закриті аудіо та відео потоки, 2D та 3D діаграми зайнятості транспортного потоку доступними сервісами та інші.

### 4.3 Експериментальні дослідження параметрів радіосигналу стандарту DVB-C при його передаванні через прийомопередавач терагерцового діапазону з модуляцією QAM-64.

Для дослідження параметрів багатоканального сигналу цифрового телебачення стандарту DVB-C при його передаванні по приймальнопередавальному тракту терагерцового діапазону було спроектовано експериментальну установку, структурну схему якої надано на рис.4.19.

Як видно з рис.4.19, заміри сигналу виконувалися на вході тракту передавача та на виході тракту приймача прийомопередавача терагерцового діапазону. При цьому вихід передавача було з'єднано з входом приймача хвилеводною лінією.

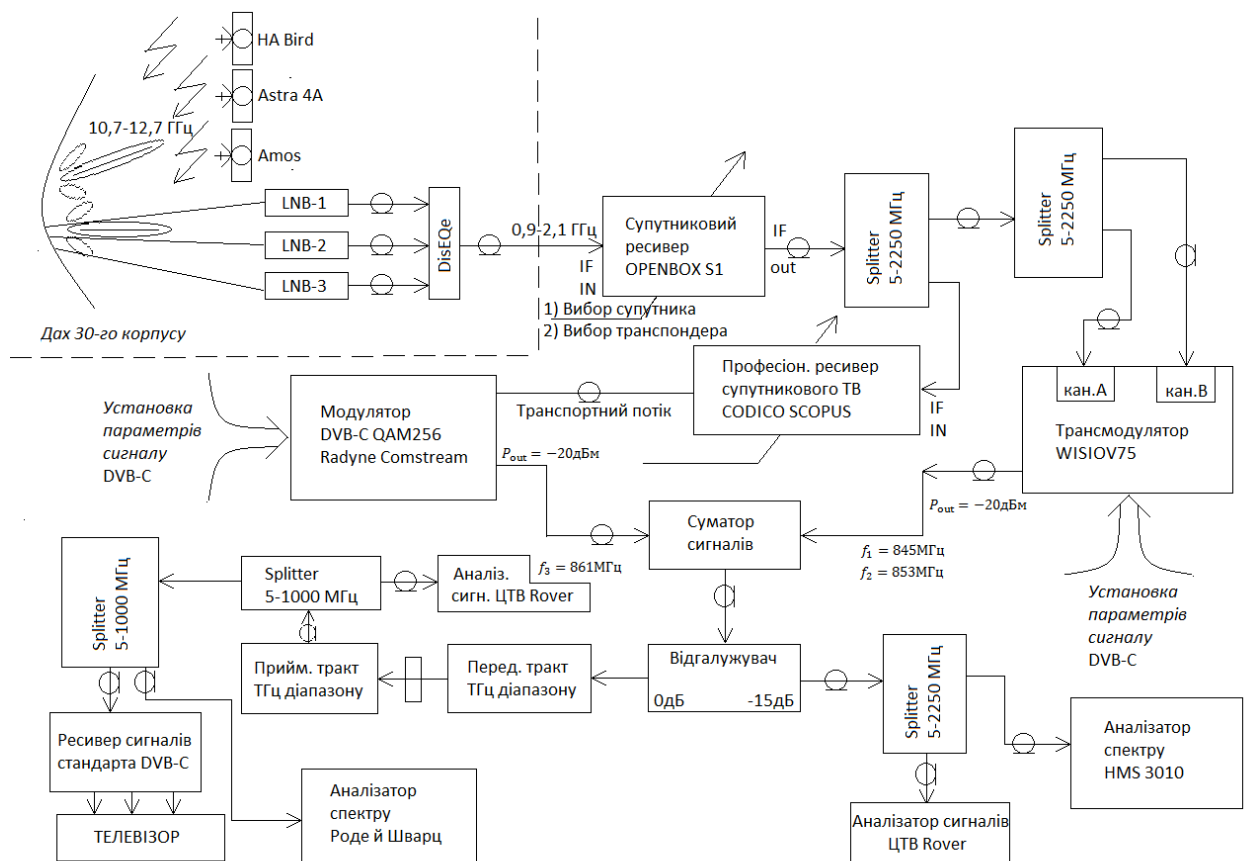


Рис.4.19 Структурна схема для дослідження параметрів радіосигналів стандарту DVB-C при їх передаванні через прийомопередавач ТГц діапазону

На всіх етапах дослідження використовувалась наступна вимірювальна апаратура:

- аналізатор спектра цифрового телебачення ST–2 ROVER;
- телевізійний ресивер цифрового кабельного телебачення Homecast, що підключений до телевізора Samsung;
- тюнер ефірного та кабельного цифрового телебачення Qbox TBS5880(рис.4.23), що підключений до комп'ютера за допомогою USB–кабелю. Тюнер TBS5880 призначений для отримання зображення констеляційних діаграм та якісних характеристик телевізійних сигналів на вході та на виході приймальнопередавального тракту терагерцового діапазону.

Ресивер Homecast призначений для вимірювання параметру якості сигналу (Quality) та інтенсивності сигналу DVB–C у відносній шкалі відсотків на вході та на виході приймально–передавального тракту терагерцового діапазону.

Аналізатор сигналів ST–2 ROVER, що працює з сигналами стандарту DVB–C в режимі емуляції, дозволяє отримати наступні параметри сигналів DVB–C на вході та виході приймально–передавального тракту терагерцового діапазону:

- рівень сигналу (LEV);
- відношення потужності носійного коливання до потужності шуму (C/N);
- запас завадостійкості (N.MAR);
- коефіцієнт нерівномірності спектра (FLAT);
- коефіцієнт бітової помилки (BER).

Слід зазначити, що оскільки аналізатор сигналу ROVER ST–2 працює в режимі емуляції, то він показує значення потужності сигналу DVB–C у середньому на 15 дБ менше за значення, що отримане за допомогою тюнера TBS5880.

Вимірювання параметрів багатоканального сигналу цифрового телебачення стандарту DVB–C при його передаванні по

приймальнопередавальному тракту терагерцового діапазону проводилось поетапно: було використано одноканальний, двоканальний та триканальний сигнали DVB-C. Формування сигналів стандарту DVB-C здійснювалось шляхом перетворення сигналів стандарту DVB-S, які було прийнято на дзеркальну антену від супутника ASTRA 4A.

Фотографія експериментальної установки показана на рис.4.20.

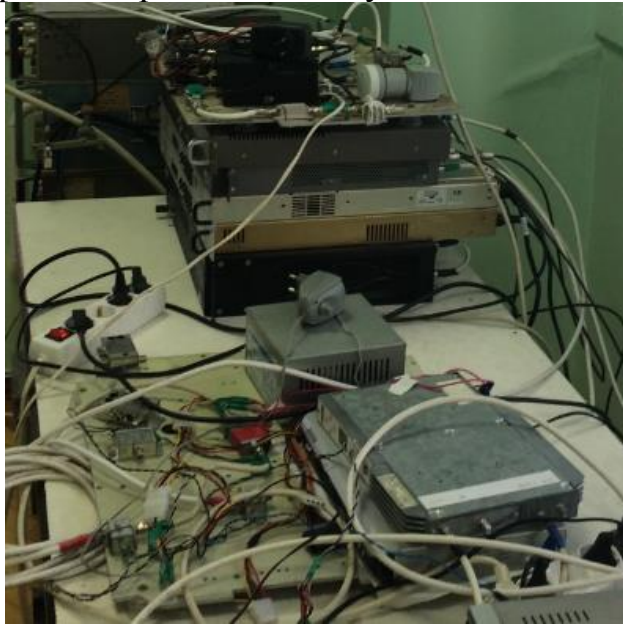


Рис.4.20 Модулятор Radyne Comstream DVB-3030 та трансмодулятор WISI OV75

#### **4.3.1. Передача одного сигналу стандарту DVB-C з частотою 845 МГц**

Вхідний телевізійний сигнал стандарту DVB-S на першому етапі дослідження був перетворений за допомогою транс модулятора WISI OV75 у радіосигнал стандарту DVB-C, при цьому був використаний тільки один вхід А (рис.4.21).

Результати вимірювань параметрів сигналу стандарту DVB-C зображені на рис.4.22 та табл.4.3. Параметри сигналу стандарту DVB-C, а також структура елементарних потоків програм теле- та радіо- мовлення, які переносяться цим сигналом, відображені відповідно на рис.4.24, рис.4.25 та рис.4.26.



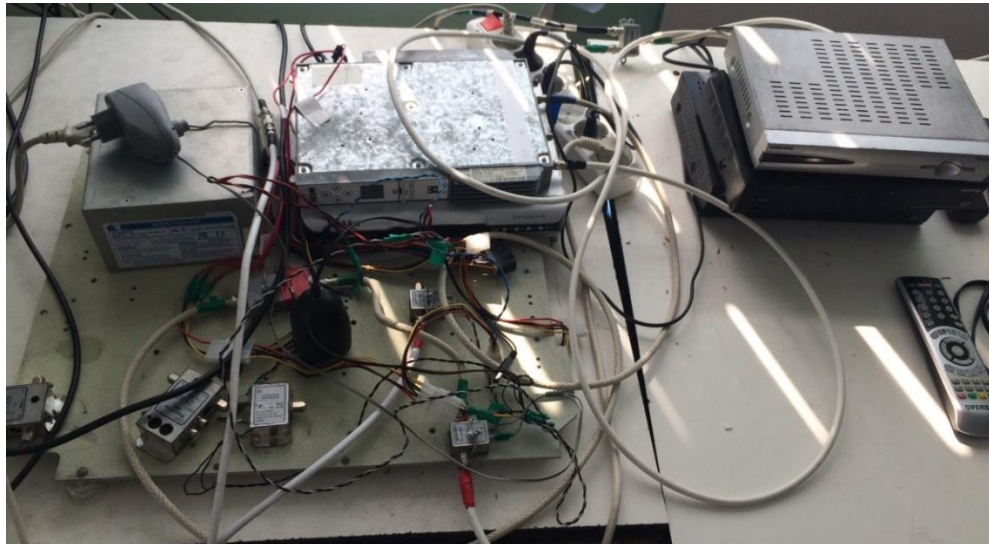


Рис.4.21 Структурна схема формування групового сигналу DVB-C, який складається з одного сигналу з частотою 845 МГц



Рис.4.22 Спектр на вході передавального та виході приймального тракту прийомопередавача ТГц діапазону

Табл. 4.3 Параметри сигналу цифрового телебачення стандарту DVB-C на носійній частоті  $F = 845$  МГц, виміряні аналізатором сигналу ROVER ST-2 та ресивером Homecast.

Місце заміру	LEV dBm	N.MAR dB	C/N dB	FLA T dB	BER	Модуляція	$V_{\text{симв}}$ Мсимв/с	Якість %	Інтенсивність, %
Вхід	-15,3	7	31	2	$10^{-7}$	QAM-64	6,875	100	65
Вихід	-46,4	15	>36	6	$<10^{-8}$	QAM-64	6,875	100	51



Рис.4.23 Тюнер ефірного та кабельного цифрового телебачення Qbox TBS5880

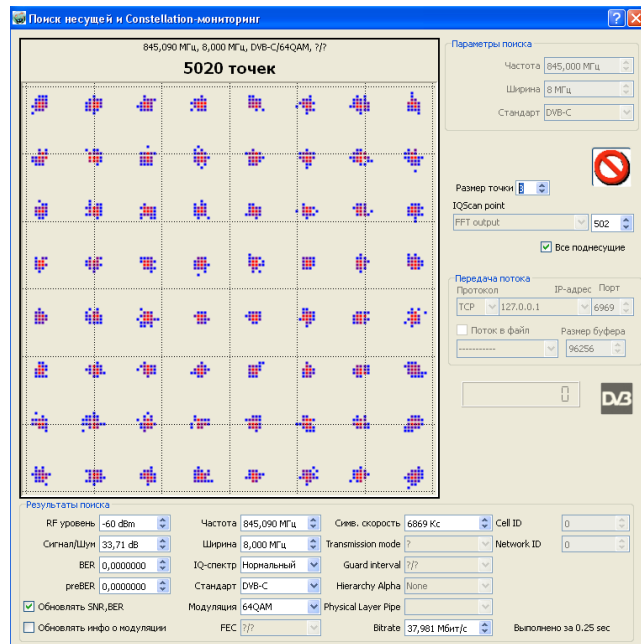


Рис. 4.24 Констеляційна діаграма сигналу DVB–C при модуляції QAM–64

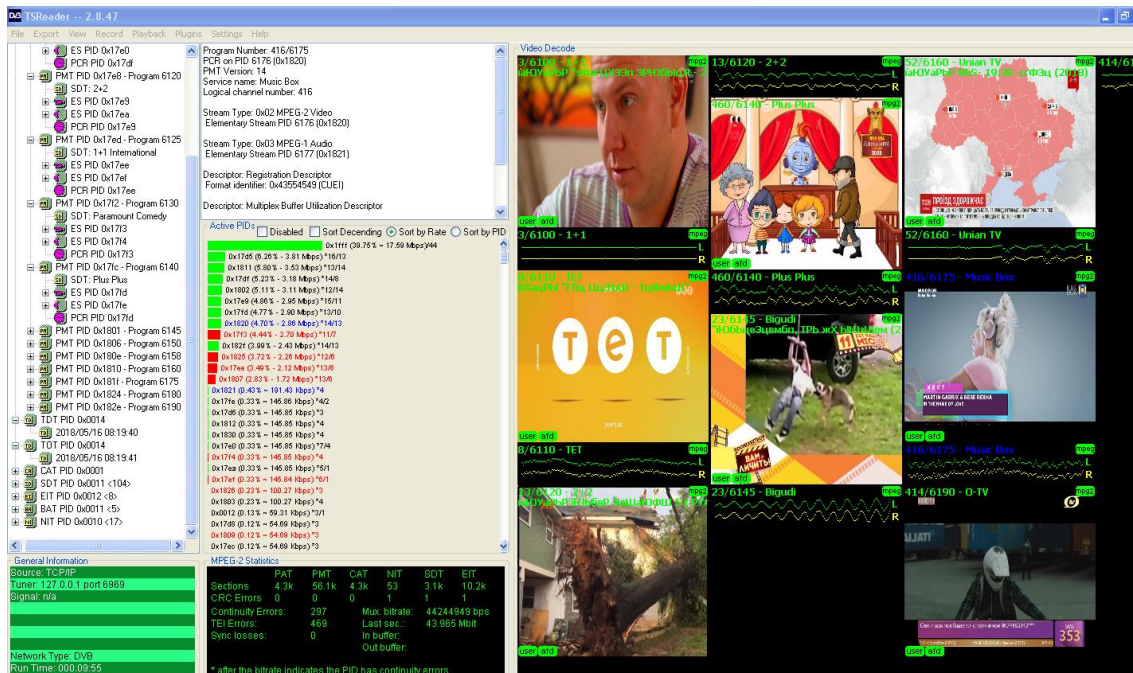


Рис.4.25 Відкриті та закриті системою доступу відео та аудіо елементарні потоки

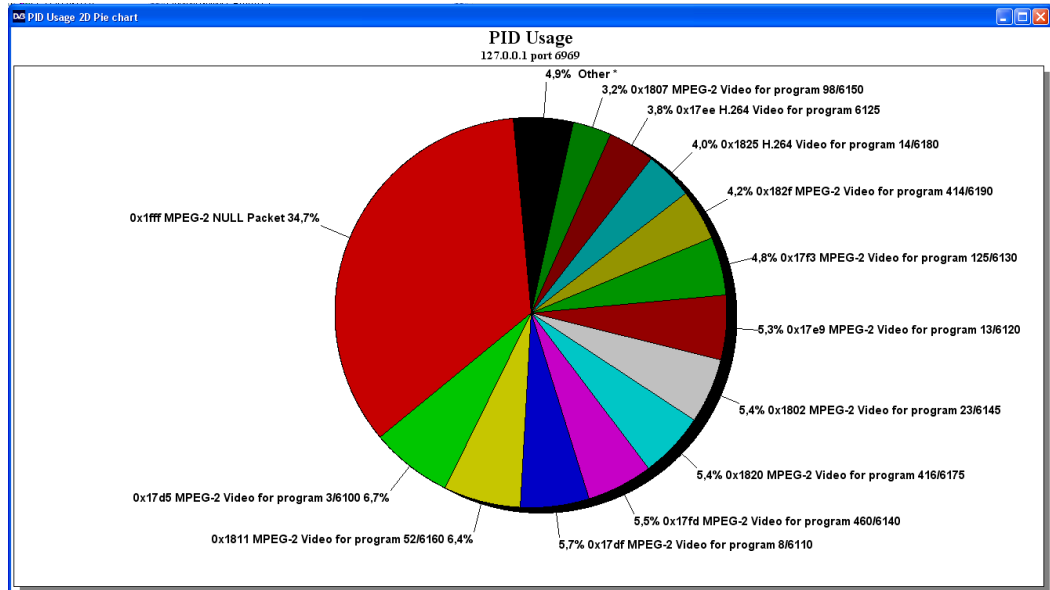


Рис.4.26 2D діаграма зайнятості транспортного потоку доступними сервісами

### 4.3.2 Передача двох сигналів стандарту DVB-C з частотами 845МГц та 853 МГц

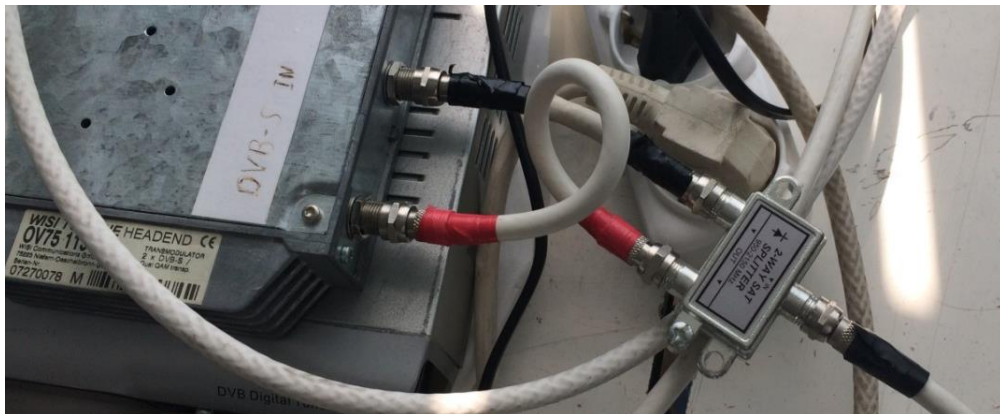


Рис.4.27 Структурна схема формування групового сигналу DVB-C, який складається з двох сигналів з частотами 845 МГц та 853 МГц

Під час другого етапу досліджень у схемі підключення був активований другий приймальний канал (вхід Б) трансмодулятора WISI OV75, до якого надходив другий сигнал стандарту DVB-S. При перетворенні в трансмодуляторі WISI OV75 двох вхідних сигналів стандарту DVB-S в двоканальний сигнал стандарту DVB-C для останнього вибирались наступні номінали носійних частот його окремих сигналів:  $F1 = 845$  МГц та  $F2 = 853$  МГц (рис. 4.27).

Результати вимірювань параметрів сигналу стандарту DVB-S зображені на рис.4.28 та табл.4.4.

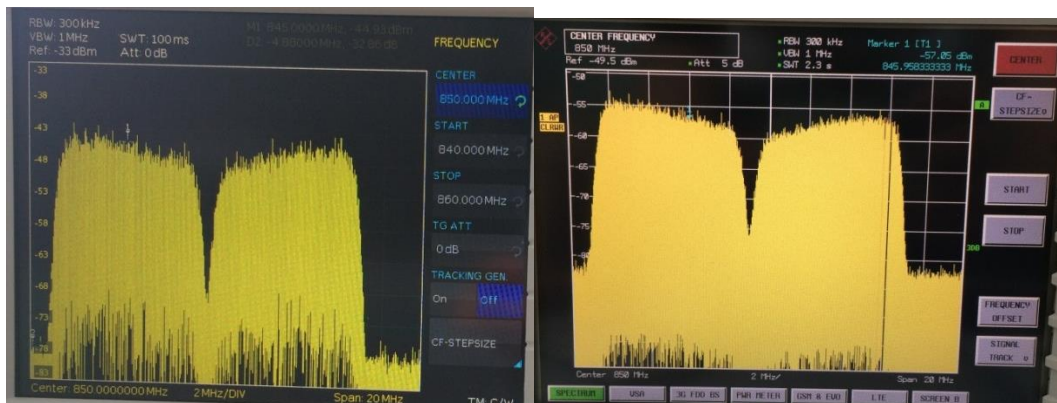


Рис.4.28 Спектр на вході передавального та виході приймального тракту прийомопередавача ТГц діапазону



Рис.4.29 Погіршене зображення телевізійної програми, яка була вибрана зі структури транспортного потоку MPEG, яке обумовлене неякісною демодуляцією сигналу DVB-S в трансмодуляторі передавальної частини лабораторної установки



Рис. 4.30 Підключення другого сигналу з частотою 853МГц напряму, без використання зайвого сплітера



Рис.4.31 Зображення на приймальній частині після усунення недоліків на приймальній частині

Табл. 4.4. Параметри сигналу цифрового телебачення стандарту DVB–С на носійній частоті  $F = 853$  МГц, виміряні аналізатором сигналу ROVER ST–2 та ресивером Homecast.

Місце заміру	LEV dBm	N.MAR dB	C/N dB	FLA T dB	BER	Модуляція	$V_{\text{симв}}$ Мсимв/с	Якість %	Інтенсивність, %
Вхід	-16,3	19	>36	3	$<10^{-8}$	QAM-64	6,875	100	41
Вихід	-51,5	9	34	3	$<10^{-8}$	QAM-64	6,875	100	28

#### 4.3.3. Передача трьох сигналів стандарту DVB-С з частотами 845МГц, 853МГц та 861МГц



Рис.4.32 Структурна схема формування групового сигналу DVB-С, який складається з трьох сигналів з частотами 845 МГц, 853 МГц та 861МГц

Під час проведення третього етапу досліджень був доданий третій канал групового сигналу цифрового телебачення DVB–С. Третій телевізійний сигнал стандарту DVB–С був отриманий за допомогою ресивера стандарту DVB–S

OPENBOX, сигнал DVB-S, з якого по ланцюгу проміжної частоти надходить на ресивер IRD-2600 CODICO SCOPUS, що демодулює цей сигнал до рівня багатопрограмного транспортного потоку. З виходу даного ресивера транспортний потік по інтерфейсу ASI надходить на QAM модулятор RADYNE COMSTREAM QAM-256, де обирається вид модуляції QAM-64, швидкість (символьна і бітова в залежності від типу модуляції та завадостійкого кодування), номінал носійної частоти 861МГц, формат фрейма транспортного потоку 188 байт.

З виходу QAM модулятора RADYNE COMSTREAM QAM-256 та виходу трансмодулятора WISI OV75 (рис.4.32) телевізійні сигнали DVB-C надходять на суматор, з виходу якого сформований багатоканальний (триканальний) телевізійний сигнал DVB-C надходить на вхід передавача приймальнопередавального тракту терагерцового діапазону.

Результати вимірювань параметрів сигналу стандарту DVB-C зображені на рис.4.33 та табл.4.5.



Рис.4.33 Спектр на вході передавального та виході приймального тракту прийомопередавача ТГц діапазону

Табл. 4.5. Параметри сигналу цифрового телебачення стандарту DVB-C на носійній частоті  $F = 861$  МГц, виміряні аналізатором сигналу ROVER ST-2 та ресивером Homecast.

Місце заміру	LEV dBm	N.MAR dB	C/N dB	FLA T dB	BER	Модуляція	$V_{\text{симв}}$ Мсимв/с	Якість %	Інтенсивність, %
Вхід	-17,4	18	>36	2	$<10^{-8}$	QAM-64	6,875	100	34
Вихід	-55,3	6	30	3	$5 \cdot 10^{-7}$	QAM-64	6,875	100	26

Параметри сигналу стандарту DVB-C, а також структура елементарних потоків програм теле- та радіо- мовлення, які переносяться цим сигналом, відображені відповідно на рис.4.34, рис.4.35 та рис.4.36.

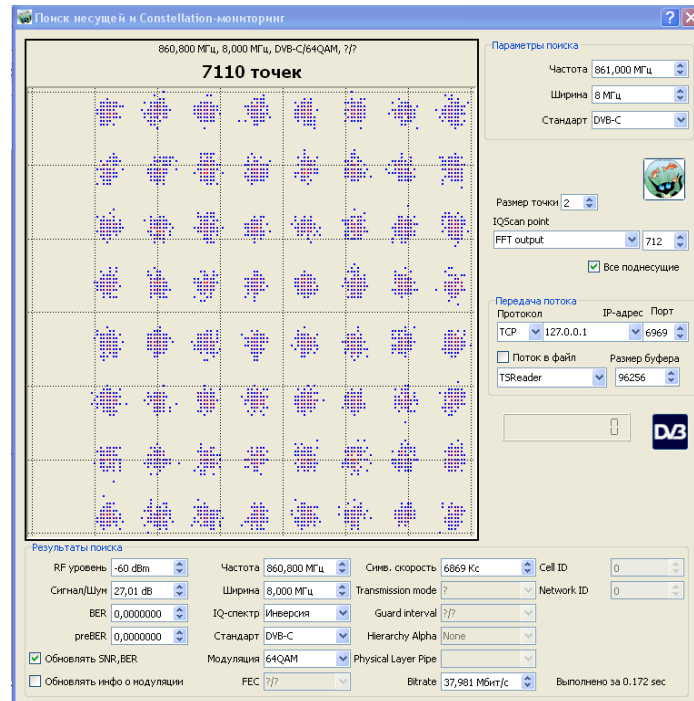


Рис. 4.34 Констеляційна діаграма сигналу DVB–C при модуляції QAM–64

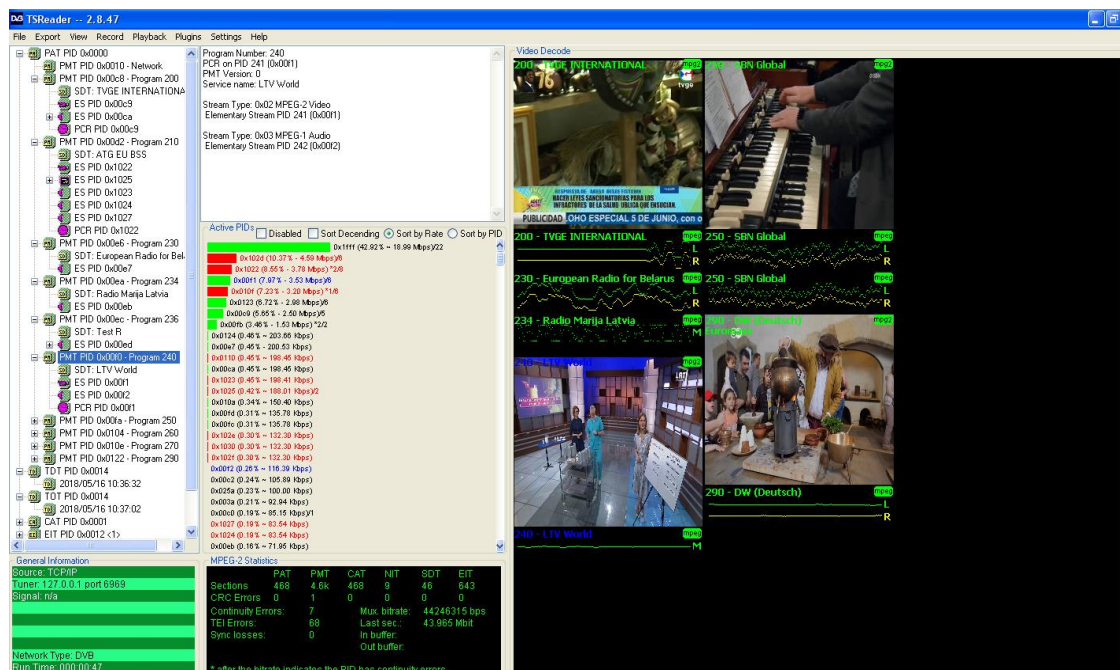


Рис.4.35 Відкриті та закриті системою доступу відео та аудіо елементарні ПОТОКИ

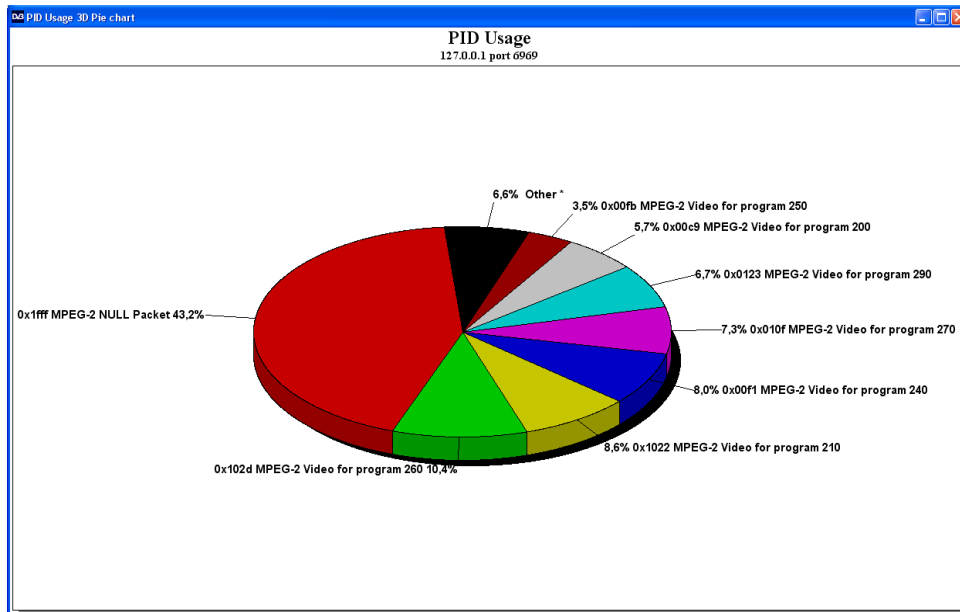


Рис.4.36 3D діаграма зайнятості транспортного потоку доступними сервісами

Сигнал стандарту DVB-C ТГц діапазону надходить до ресиверу Homecast та демодулює телевізійний сигнал DVB-C до рівня окремих телевізійних програм, що мають високу чіткість зображення та якість звучання каналу.

Виходячи з отриманих даних другого етапу досліджень, можна дійти висновку, що при одночасній передачі двох телевізійних сигналів DVB-C приймальнопередавальним трактом ТГц діапазону характеристики кожного з них погіршуються параметри сигналу відносно з попереднім дослідженням (передачею одного телевізійного сигналу). Інтенсивність сигналу на вході ресивера зменшилась, але чіткість зображення та якість звуку на високому рівні. Під час другого етапу отримане розпадання зображення на “квадратики”(рис.4.29) на частоті другого сигналу 853МГц, ця проблема виникла із-за технічного браку під час підключення на передавальній стороні, що зображена на рис.4.27, яке було усунено шляхом підключення до іншого сплітеру, що зображено на рис.4.30, внаслідок чого якість зображення збільшилась(рис.4.31).

Дані третього етапу показують, що характеристики при одночасній передачі трьох телевізійних сигналів DVB-C приймальнопередавальним трактом ТГц діапазону також зменшуються відносно першого та другого етапів.



Узагальнюючи вище сказаному можна сказати, що при передачі одного, двох та трьох телевізійних сигналів DVB-C приймальнопередавальним трактом ТГц діапазону з модуляцією QAM-64 отримане якісне зображення.

**4.4 Експериментальні дослідження параметрів групового сигналу, що складається з трьох сигналів стандарту DVB-C з модуляцією QAM-256 при його передаванні через прийомопередавач терагерцового діапазону.**

На модуляторі Radyne ComStream QAM-256 QAM Modulator, що зображений на рис.4.37 змінили вид модуляції з QAM-64 на QAM-256.



Рис.4.37 Модулятор Radyne ComStream QAM-256 QAM Modulator

Результати вимірювань параметрів сигналу стандарту DVB-C зображені на рис.4.38 та табл.4.6.



Рис.4.38 Спектр на вході передавального та виході приймального тракту прийомопередавача ТГц діапазону

Табл. 4.6. Параметри сигналу цифрового телебачення стандарту DVB-C виміряні ресивером Homecast

Частота МГц	$V_{\text{симв}}$ Мсимв/с	Якість %	Інтенсивність %
845	5156	18	30
853	5156	1	26
861	5156	1	28

Параметри сигналу стандарту DVB-C, а також структура елементарних потоків програм теле- та радіо- мовлення, які переносяться цим сигналом, відображені відповідно на рис.4.40 та рис.4.41. На рис. 4.39 показано зображення де модульованої телевізійної програми при використанні модуляції QAM-256.

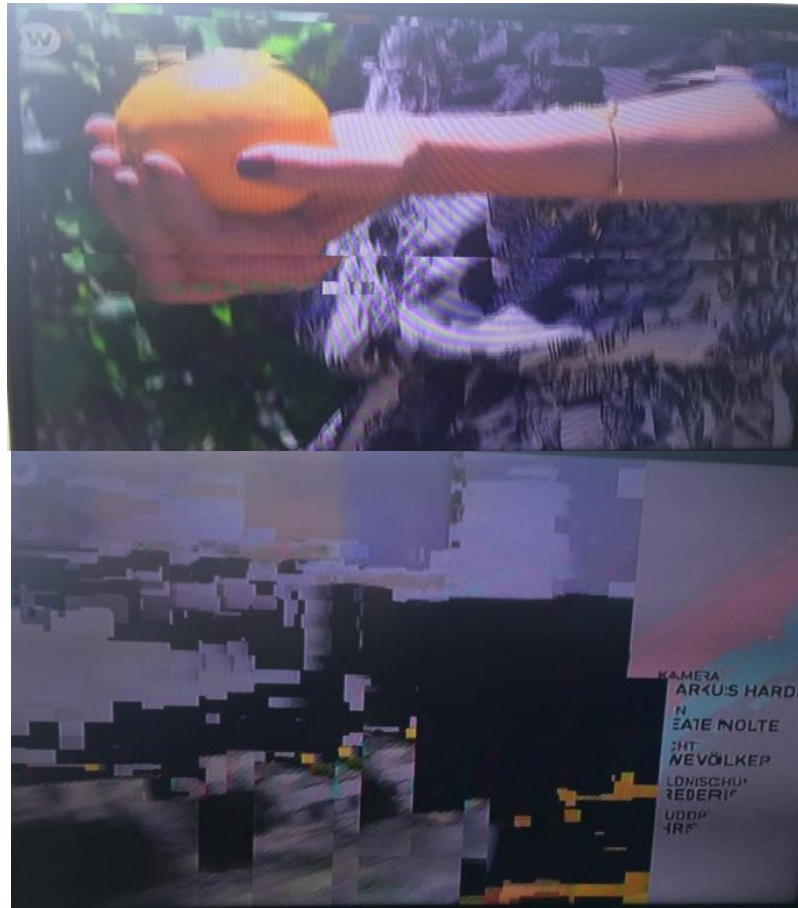


Рис.4.39 Погіршене зображення на телевізорі

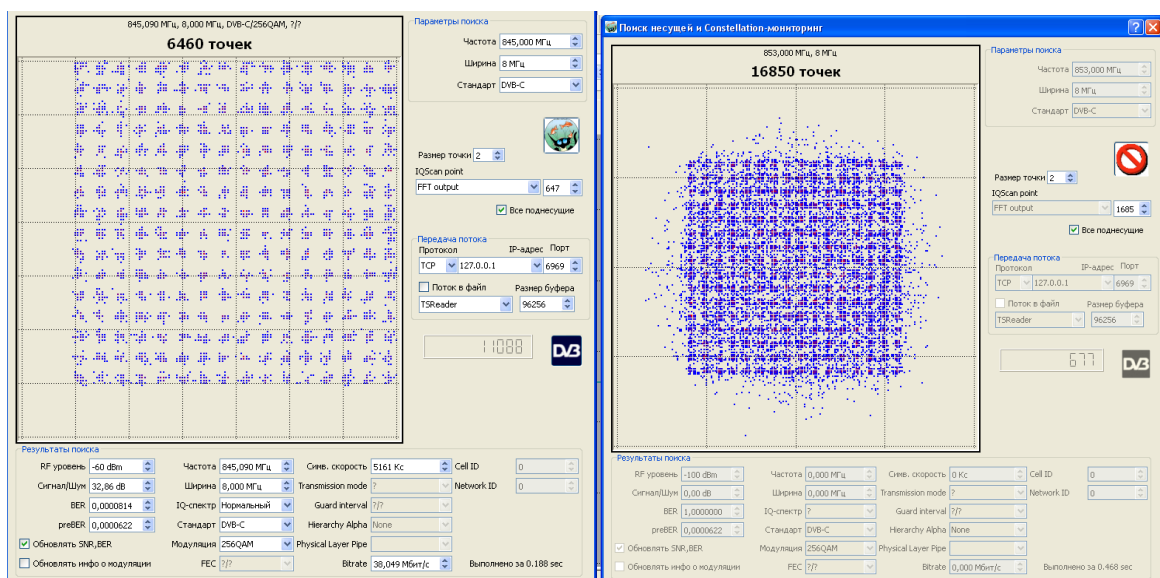


Рис. 4.40 Конституційна діаграма сигналу DVB-C при модуляції QAM-256 з частотами 845МГц та 853МГц відповідно.

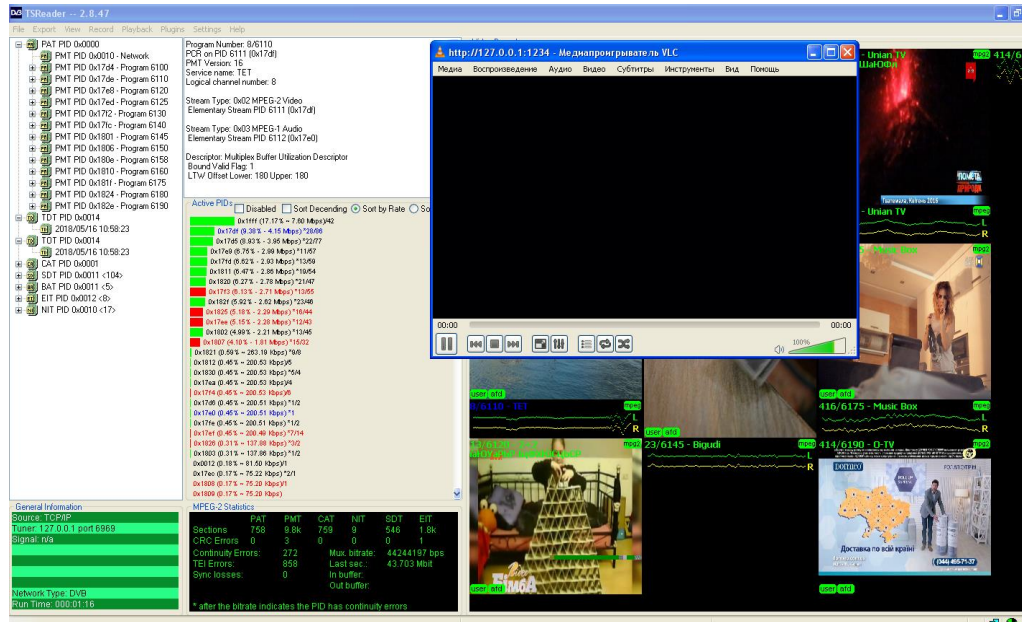


Рис.4.41 Відкриті та закриті системою доступу відео та аудіо елементарні потоки.

В цьому розділі змінено тип модуляції з QAM-64 на QAM-256 при одночасній передачі трьох телевізійних телевізійних сигналів DVB-C приймальнопередавальним трактом ТГц діапазону.

В результаті отримали характеристики за допомогою ресивера Homecast. Якість зображення була поганою, тільки при прийомі на частоті 845МГц була чіткість зображення, в інших двох сигналах зображення та звук періодично то з'являлись то пропадали.

Така зміна якості викликана зміною модуляції, внаслідок чого змінилася кількість символів на сигнальному сузір'ї. При цьому інтенсивність внутрішніх завад, залишається такою ж, як і для модуляції QAM-64, але через малу відстань між канальними символами в сигнальному сузір'ї, вплив цього шуму призводить до періодичного накладання цих символів один на одного, що призводить до збільшення ймовірності бітової помилки.

## Висновок

Результати дослідження параметрів групового сигналу цифрового телебачення стандарту DVB-C при його передаванні по приймальнопередавальному тракту терагерцового діапазону показали, що використання нижньої частини терагерцового діапазону частот (130,45 ГГц) зі смугою 24 МГц дозволяє передавати три сигнали телевізійного мовлення стандарту DVB-C з загальною швидкістю транспортного потоку на рівні 125 Мбіт/с з високою суб'єктивною якістю відтворення ТВ програм в телевізійному приймачі.

Приймальнопередавальні тракти терагерцового діапазону є одним із найбільш перспективних застосовань для безпроводового передавання мультиплексованих нестиснених (HD-SDI) телевізійних сигналів високої чіткості (High-Definition Television (HDTV)), швидкість передавання даних яких сягає 1,5 Гбіт/с. Використання приймальнопередавального тракту терагерцового діапазону з пропускнуою здатністю 5 Гбіт/с дозволить передавати понад 130 телевізійних каналів стандарту DVB-C із загальною швидкістю до 5 Гбіт/с, або високоякісний триканальний мультиплексний HD-SDI канал без стиснення та часової затримки.

На базі такого приймальнопередавального тракту терагерцового діапазону можна буде будувати високошвидкісні мережі не тільки для використання в області телекомунікацій, з їх допомогою можна буде пов'язувати в єдине ціле наукове вимірювальне обладнання та інші прилади, які виробляють величезні обсяги наукових даних.

## ВИСНОВКИ ДО РОБОТИ

1. Розглянуті основні відомості про терагерцовий діапазон частот та особливості поширення радіохвиль в ньому. Розглянуто приймальнопередавальний тракт радіорелейної системи субтерагерцового діапазону 130...134 ГГц.
2. Розраховано енергетичний бюджет радіоліній терагерцового діапазону. Розрахунок дальності дії радіоліній терагерцового діапазону при передаванні цифрового сигналу різних стандартів.
3. Досліджено параметри сигналів цифрового телебачення при їх передаванні по радіолінії терагерцового діапазону. Спроектовано експериментальну установку для дослідження цих параметрів.
4. Експериментально досліджено параметри радіосигналу стандарту DVB-S та DVB-C при його передаванні через прийомопередавач терагерцового діапазону з різними модуляціями, виконані розрахунки та виконані висновки, щодо різниці параметрів при передачі групових сигналів стандарту DVB-C.

**ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ**

1. Siegel P.H. Terahertz Technology // IEEE TRANS. ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES. – 2002. – VOL. 50, no. 3. – P. 910-928.
2. Microwavetechnologiesinthecommunicationsystems / V.P. Babak, T.N. Narytnik, M.E. Ilchenko, S.A. Kravchuk.- K.: Техніка, 2002.- 272 с.
3. Kerecman A.J. The tungsten-P typesiliconpointcontactdiode // IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., 1973. -P. 30–34.
4. Ashley J.R., Palka F.M. Transmissioncavityand injectionstabilizationofan X-bandtransferredelectronoscillator // IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., 1973. - P. 181–182.
5. Бецкий О.В., Козьмин А.С., Яременко Ю.Г. Возможные применения терагерцевых волн // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2008. – № 3. – С. 48–54.
6. Mittleman D.M., Jacobson R.H., Nuss M.C. T-ray imaging // IEEE J. sel.top. Quantumelectron. – 1996. – № 2. – P. 679–692.
7. Федоров В.И. Исследование биологических эффектов электромагнитного излучения субмиллиметровой части терагерцевого диапазона // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2011. – № 2. – С. 17–27.
8. Григорьев И.С., Мейлихов Е.З. Физические величины: справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
9. Гершензон Е.М., Малов Н.Н., Мансуров А.Н. Молекулярная физика. – М.: Академия, 2000. – 272 С.
10. Ильченко М.Е., Кравчук С.А. Телекоммуникационные системы на основе высотных аэроплатформ. – К.: Наукова думка, 2008. – 580 с.
11. Link Budget Considerations for THz Fixed Wireless Links / M.Grigat, T. Schneider, S.Preubler, R.-P. Braun // IEEE TRANS. ON TERAHERTZ SCIENCE AND TECHNOLOGY. – 2012. - VOL. 2, NO. 2. – P. 567-572.

12. Белкин М.Е., Л.М.Белкин. Особенности построения резистивных смесителей диапазона крайне высоких частот. // Электронная техника.-Сер.2.- Полупроводниковые приборы.-2010.-вып. 1 (224).-с.98-104./

13. Радзиховский В.Н., Кузьмин С.Е., Хайкин В.Б., Закамов В.Р., Шашкин В.И. Приемный модуль для пассивных систем формирования изображений в 3 мм диапазоне длин волн. // Материалы 19-ой Международной Крымской конференции КрыМиКо'2009.-С.79-80.)

14. Нарытник Т.Н., Кузьмин С.Е., Радзиховский В.Н. Тракт гетеродина для радиорелейной системы в диапазоне частот 130-124 ГГц. Материалы 21-ой Международной Крымской конференции КрыМиКо'2011.-С. 396-397.

15. Нарытник Т.Н., Ильченко М.Е., Калинин В.И., Черепенин В.А. Экологически безопасная линия связи с мощностью СШП излучения 70 нановатт для беспроводных локальных сетей Материалы 21-ой Международной Крымской конференции КрыМиКо'2011.-С.355-356.

16. Ильченко М.Е., Нарытник Т.Н., Калинин В.И. Экологическая безопасность и микроволновые телекоммуникационные технологии Материалы Международного симпозиума «Инженерная экология-2--9» (Engineering Ecology) 2—9.-Москва, 8-9 декабря 2009 г.- с.115-118.

17. Нарытник Т.Н., Радзиховский В.Н., Кузьмин С.Е. Разработка гетеродинной цепи для приемопередатчика в диапазоне 126-134 ГГц// Материалы 22-ой Международной Крымской конференции КрыМиКо'2012.- С.106-107.

18. Нарытник Т.Н., Ильченко М.Е., Калинин В.И., Чапурский В.В., Черепенин В.А. Сверхширокополосная линия связи с низкой мощностью излучения в терагерцовом диапазоне частот// Материалы 22-ой Международной Крымской конференции КрыМиКо'2012.-С.302-303.