

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

Пояснювальна записка

до магістерської кваліфікаційної роботи

на тему «ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СИГНАЛІВ ЦИФРОВОГО
ТЕЛЕБАЧЕННЯ ПРИ ЇХ ПЕРЕДАВАННІ НА РАДІОЛІНІЇ
ТЕРАГЕРЦОВОГО ДІАПАЗОНУ»

Виконав: студент групи 6 курсу, групи АРДМ-61
спеціальності 172 Телекомунікації і
радіотехніка

(шифр і назва спеціальності)

Єрошенко А.О.

(прізвище та ініціали)

Керівник

Дакова Л.В.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(прізвище та ініціали)

Київ – 2022

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АЧХ – амплітудно-частотна характеристика

ВЧ – високочастотний

ГГц – гігагерц

МШП – малошумливий 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 терагерцового діапазонів.

1. ТЕРАГЕРЦОВА СИСТЕМА ЗВ'ЯЗКУ

1.1 Дослідження оптимізації терагерцового випромінювача в терагерцевій системі зв'язку

Діапазон частот терагерців (ТГц) між мікрохвилями і видиме світло, і на нього не було розповсюджено ліцензій, які означає, що це ще порожня смуга. Цей діапазон має декілька хороші властивості, такі як висока швидкість передачі, добре спрямований, високий рівень безпеки, невелике розсіювання та хороша проникаюча здатність. Він може забезпечити високу якість мобільних широкосмугових мультимедійних послуг зі швидкістю 10 Гбіт/с.

Зв'язок у діапазоні ТГц щойно почався. В даний час посилення вказує на те, що ІТУ та IEEE щойно досліджували його та намагаються розробити відповідні стандарти зараз. Отже, дослідження зв'язку ТГц мають велике стратегічне значення для захоплення ресурсів пропускної здатності та розширення смуги пропускання бездротового зв'язку.

Розмір, вартість і продуктивність ТГц системи зв'язку залежать в основному від продуктивності випромінювача. На даний момент посилення вказує на те, що багато фемтосекундних лазерних випромінювачів на основі титану є громіздкими, дорогими та їх важко переміщати, і вони не здатні задовольнити потреби зв'язку в ТГц. Хоча джерела ТГц випромінювання, які базуються на фемтосекундному волоконному лазері з пасивною синхронізацією режимів, можуть вирішити зазначені вище проблеми, але їх стабільність і вихідна потужність ще потребують покращення.

Система зв'язку ТГц складається з підсистеми випромінювання, підсистеми прийому та каналу, а її принцип зв'язку показаний на рис. 1.1. Щоб забезпечити ефективну передачу сигналу ТГц, підсистеми збору, відстеження та вказівки (коротко АТР) і допоміжні функції до нього слід додати підсистему.

Загальний мікрохвильовий зв'язок не має підсистеми АТР. Однак промінь високочастотного діапазону ТГц вузький і навіть близький до оптичної частоти.

Підсистема АТР продовжує прийом сигналу, відстеження та вказівку. Коли точність відстеження та наведення відповідає систематичним потребам, вона запускає підсистему зв'язку та встановлює канали зв'язку для завершення передачі даних.

Модуль керування телеметрією допоміжної підсистеми отримує інструкції та відповідні параметри встановлених каналів зв'язку, а потім виводить параметри телеметрії. Таким чином термінал зв'язку ТГц завершує перемикання режимів.

Підсистема надшвидкісного широкосмугового випромінювання в ТГц системі зв'язку показана на рис. 1.2. Коли вона працює на частоті 2,5 ТГц швидкість передачі інформації досягає 160 ГГц.

Основні технічні труднощі в ТГц системі зв'язку полягають у тому, що: випромінювач, детектор, антени і так далі. Оскільки джерело ТГц випромінювання розташоване в передній частині системи, його продуктивність безпосередньо визначає загальну продуктивність системи.

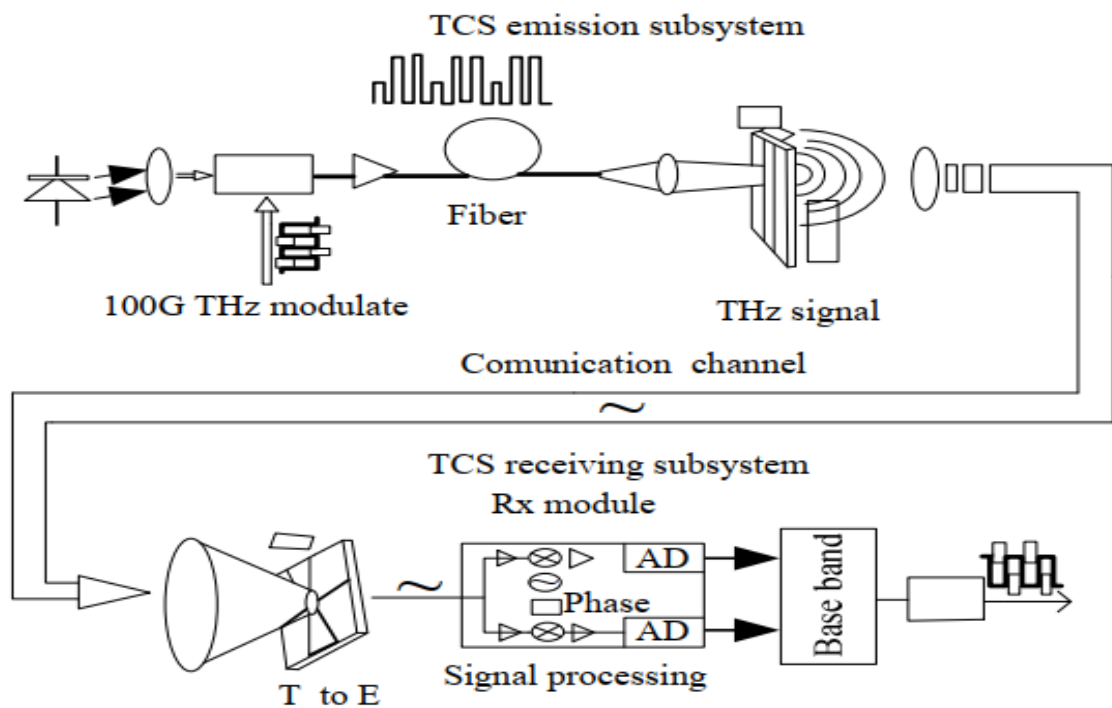


Рис. 1.1 Принцип системи зв'язку ТГц

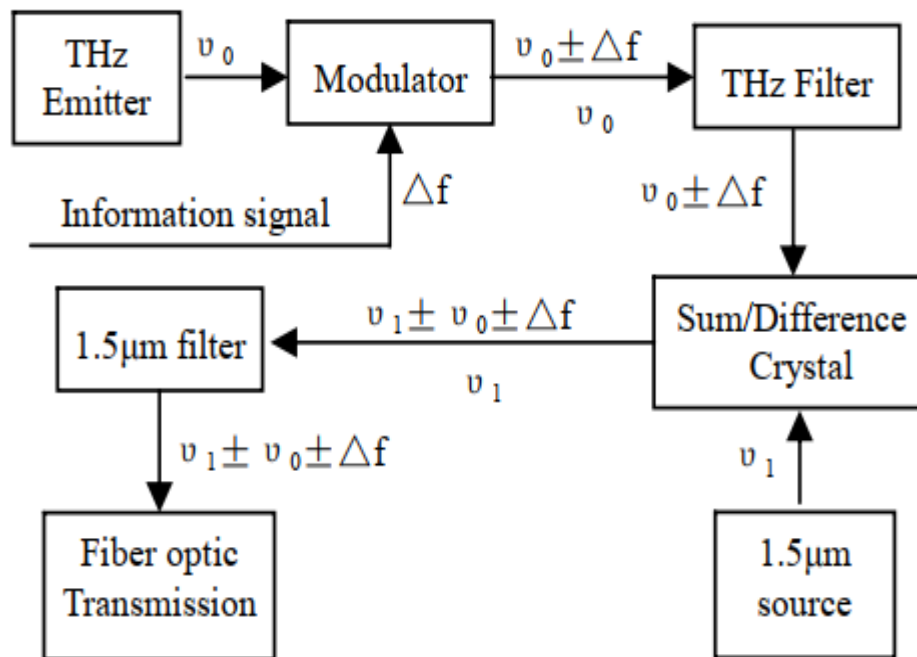


Рис. 1.2 Підсистема викидів TCS

1.2 Стабільність терагерцового випромінювача

ТГц випромінювач створюється за допомогою фемтосекундних імпульсів, які виводяться пасивним волоконним лазером із синхронізованим режимом, і стимулюють напівпровідникові матеріали способом фотопровідності. Стабільність волоконного лазера з пасивною синхронізацією мод визначає надійність цілих джерел випромінювання. Проблеми стабільності волоконного лазера з пасивною синхронізацією мод значною мірою обмежують його застосування: діапазон частот повторення імпульсу з пасивною синхронізацією мод великий і його важко контролювати; може бути кілька імпульсів одночасно в порожнині лазерного резонатора, інтервали імпульсів не зовсім однакові, а амплітуди та ширина імпульсів постійно змінюються. Щоб прискорити процес практичного технічного застосування волоконного лазера з пасивною синхронізацією режимів, необхідно покращити його стабільність.

Фемтосекундний волоконний лазер із пасивною синхронізацією мод складається з волокна сигнального режиму, оптичного волокна з добавками рідкоземельних елементів, швидкого насиченого поглинача, фільтра, ресурсу

насоса тощо. Серед них поглинач із швидким насичуванням є ключовим пристроєм усього волоконного лазера з пасивною синхронізацією мод, а поява та формування імпульсів із синхронізацією мод пов'язані з його характеристикою пропускання. Існує два типи поглинача, що швидко насичується: один — нелінійне оптичне петельне дзеркало (або оптичне петельне дзеркало з нелінійним масштабуванням), інший — нелінійний перемикач поляризації. Обидва поглинача, що насичуються, перетворюють нелінійний фазовий зсув світлових імпульсів на самоамплітудну модуляцію за принципом когерентності, за винятком того, що вони обидва мають повністю волоконні структури. У порівнянні з напівпровідниковим поглиначем, який насичується надрешіткою, вони можуть не тільки зберегти структуру волокна з пасивним синхронізованим режимом волоконного лазера та зменшити втрати порожнини, спричинені компонентами неволоконної структури та з'єднанням волокна, але також мають надшвидку характеристику відгуку (величина f_s). Таким чином, посилання [10-11] вказує на те, що більшість фемтосекундних волоконних лазерів із синхронізованим режимом мод використовують нелінійний насичений поглинач із із зазначеними вище двома типами структур як пристроями блокування режиму.

Чисельний аналіз показав, що вплив насичуваного поглинача на стабільність лазера поділяється на три типи ситуацій: перша полягає в стабілізації виходу лазерного імпульсу, наступна полягає в тому, щоб спричинити нестабільність виходу лазера та форматування нерегулярного виходу імпульсу та останнє - створити слабкий стабільний гармонічний вихід. Посилання [12-13] вказує на те, що причини цього можна отримати, аналізуючи характеристику пропускання насиченого поглинача. На рис. 1.2 показана характеристика пропускання насиченого поглинача швидкого нелінійного перемикача повороту поляризації (нелінійне оптичне петельне дзеркало та нелінійне оптичне петельне дзеркало мають аналогічну характеристику пропускання). Відома з діаграми, його характеристика передачі тісно пов'язана з циклічною зміною вхідної оптичної потужності. Саме ця циклічна зміна змушує насичений поглинач мати інший вплив на робочий стан лазера.

Чисельний аналіз показав, що вплив насиченого поглинача на стабільність лазера поділяється на три типи ситуацій:

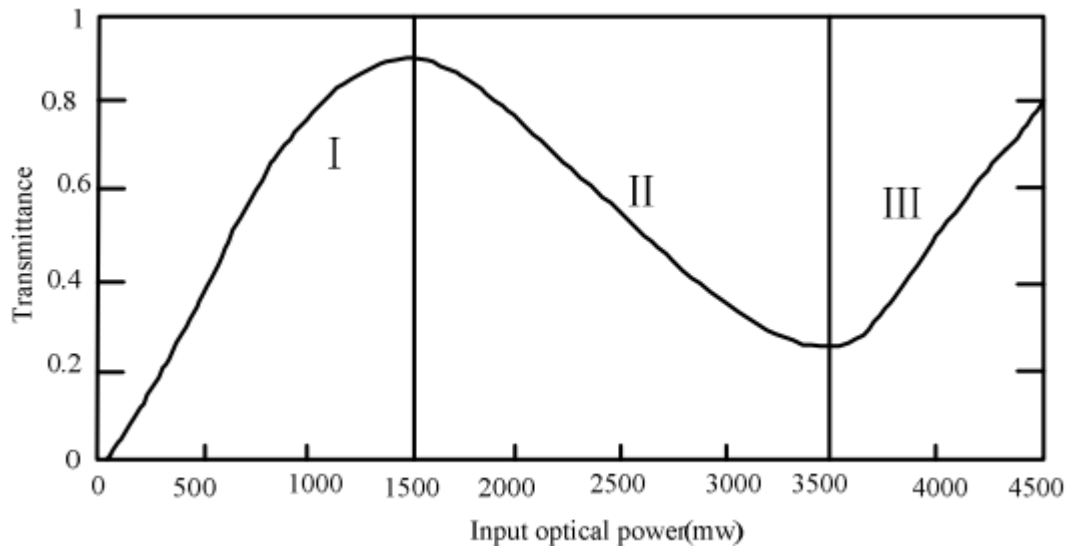


Рис. 1.3. Характеристика пропускання нелінійного поляризаційного поворотного перемикача

Інтервал I: Коли імпульс посилюється підсиленням середній, але до досягнення нелінійного поглинача, що насичується, лазер зберігає стабільний робочий стан. У межах цього інтервалу пікова частина імпульсу зазнала менших втрат, ніж його крила, тому насичений поглинач не підривав би форму вхідного імпульсу. Особливо, коли пікова потужність імпульсу резонатора знаходиться поблизу першого піку характеристики пропускання насиченого поглинача, насичений поглинач навіть може стабілізувати амплітуду імпульсу.

Інтервал II: коли пікова потужність імпульсу перевищує пікову точку, лазер переходить у нестабільний робочий стан. У межах цього інтервалу пікова потужність імпульсу зазнала більших втрат, ніж два крила. Після постійного посилення середовища підсилення інтенсивність двох крил імпульсу буде продовжувати збільшуватися, тоді як інтенсивність піку імпульсу буде відносно зменшуватися. Це призведе до порушення початкової форми імпульсу та формування серії випадкових вихідних імпульсів.

Інтервал III: невідповідність між нелінійністю волокна та дисперсією виникне, коли потужність насоса надто велика. А пропускна характеристика насиченого поглинача відрізняється від нерегулярного вихідного імпульсу, який є

результатом цієї невідповідності. Коли потужність імпульсу знаходиться в цьому інтервалі, світловий імпульс отримуватиме періодичну модуляцію в часовій області за допомогою поглинача, що насичується, що призведе його до роботи з синхронізованим режимом гармоній високого порядку за певних умов. Чисельний аналіз показує, що стабільність у цьому стані не дуже хороша. При зміні потужності насоса гармонічний стабільний синхронізований імпульс зникає.

Зі сказаного вище, робочий стан лазера близький до робочої характеристики насичуваного поглинача. І оскільки робоча характеристика насиченого поглинача пов'язана з потужністю імпульсу в резонаторі, структурні параметри лазера та потужність накачування повинні бути розумно розроблені для забезпечення того, щоб піки потужності солітонних імпульсів основного стану в лазерному резонаторі потрапляли в перший інтервал роботи насиченого поглинача, передавальна характеристика.

На додаток до проблем стабільності лазера, викликаних насиченим поглиначем і оптичною вихідною потужністю, існують також інші фактори впливу. Навколишнє робоче середовище може призвести до коливань вихідної частоти лазера. Випадкове лінійне подвійне променезаломлення волокна впливатиме на формування імпульсів синхронізації мод. Втрата зв'язку над вихідною потужністю посилить дисперсійну хвилю резонатора. Нелінійний ефект високого порядку може призвести до зсуву несучої частоти імпульсу тощо.

1.3 Основні відомості про терагерцовий діапазон частот та особливості поширення радіохвиль в ньому

Оптоелектронна безперервна (неперервна) ТГц спектроскопія має потенціал стати сильним конкурентом спектроскопії в часовій області (TDS) у сфері неруйнівного контролю (NDT). Переваги безперервних ТГц систем полягають у необмеженій сумісності з технологією оптичних волокон, що дозволяє повністю волоконно-з'єднані системи без будь-яких рухомих частин або механічних ліній затримки, а також перевага використання безперервних лазерів замість складних

фемтосекундних лазерів. Крім того, системи безперервного ТГц, що працюють на 1550 нм, можуть використовувати зрілі компоненти з телекомунікаційної галузі. Таким чином, складність всієї системи, зусилля по вирівнюванню і нарешті загальні витрати можуть бути значно знижені порівняно з класичним THz-TDS. Тому безперервні ТГц системи можуть стимулювати додаткові застосування терагерцової технології. Дотепер основним недоліком безперервних ТГц систем є їх низька швидкість вимірювання.

Налаштування

В оптоелектронній безперервній ТГц спектроскопії використовується фотозмішування для перетворення сигналу биття двох безперервних лазерних джерел у ТГц випромінювання. У гомодинній конфігурації той самий оптичний сигнал биття використовується для перетворення з пониженням частоти вхідного ТГц сигналу в приймачі фотозмішування. Шляхом модуляції відносної фази оптичного сигналу биття на випромінювачі по відношенню до приймача може бути встановлена фазочутлива, когерентна схема виявлення [1].

Широкопasmові спектри в ТГц-діапазоні отримані безперервна або ступінчаста настройка одного безперервного лазера відносно другого лазера. Більшість безперервних ТГц спектрометрів, що забезпечують широкий діапазон налаштування, базуються на термічно налаштованих лазерах із розподіленим зворотним зв'язком або механічно налаштованих діодних лазерах із зовнішнім резонатором. Однак жодна з цих концепцій не пропонує одночасно високу швидкість налаштування та широкий діапазон налаштування. Лазери з широким діапазоном налаштування зазвичай страждають від обмеженої швидкості налаштування [1,2] і навпаки [3].

Широкий діапазон налаштування понад 5 ТГц охоплюється використанням ефекту Верньє. Висока швидкість налаштування 10–50 ТГц за секунду з кроком частоти 20 МГц або 100 МГц вмикається струмовою ін'єкцією. Пошукові таблиці використовуються для забезпечення детермінованої та надійної роботи. Незважаючи на те, що під час налаштування частоти відбуваються скачки режиму, схема запуску, реалізована в WaveSource™, дозволяє чітко налаштувати

частоту в усьому спектральному діапазоні. Об'єднавши регульований лазер з Y-гілкою з лазером із фіксованою частотою, фазовим модулятором LiNbO₃ і швидкою схемою збору даних, ми демонструємо безперервний терагерцовий спектрометр із повністю пов'язаним волокном із смугою пропускання понад 2 ТГц із частотою безперервного оновлення 8 Гц.



Рис. 1. Фотографія T-Sweeper – повністю волоконно-з'єднаної, широко регульованої системи безперервного ТГц, яка використовує Finisar® WaveSource™ як регульоване лазерне джерело.

Оптоволоконні модулі встановлені в терагерцевій відбивній головці з фокусною відстанню 4 дюйми.

Фотографія установки та схематичний вигляд системи показані на рис. 1 та рис. 2 відповідно. Оптичний вихід Finisar® WaveSource™ і лазер з фіксованою частотою поєднані в селективному фазовому модуляторі за довжиною хвилі (WSPM). Подробиці про схему модуляції можна знайти в іншому місці. [1] Два підсилювачі оптичних підсилювачів (Thorlabs BOA1004P з OptoSCI LDR1000S TEC і драйвером) використовуються для забезпечення вихідної потужності 32 мВт на ТГц випромінювачі та приймачі відповідно. Випромінювач заснований на комерційно доступному фотодіоді PIN, оптимізованому для роботи при 1550 нм. На стороні приймача використовується комерційно доступний приймач фотозмішування, що містить міжпальцеві електроди та антену-метелик. [5] Сигнал приймача є посилено за допомогою трансїмпедансного підсилювача

(Femto DLPCA-200) з коефіцієнтом посилення 105 В/А при 400 кГц. Посилений сигнал оцифровується за допомогою DAQ-блоку (NI USB-6366) з частотою дискретизації 2 MS/s і 16 біт по вертикалі. Для того, щоб синхронізувати збір даних з налаштуванням WaveSource™, оцінюються два окремих тригерних сигнали: Тригер вибірки та тригер циклу вказують на дійсність кроки частоти та початок кожної спектральної розгортки, відповідно. Таким чином, T-Sweeper — це система безперервного ТГц з повним зв'язком по волокну без будь-яких рухомих частин і оптики у вільному просторі.

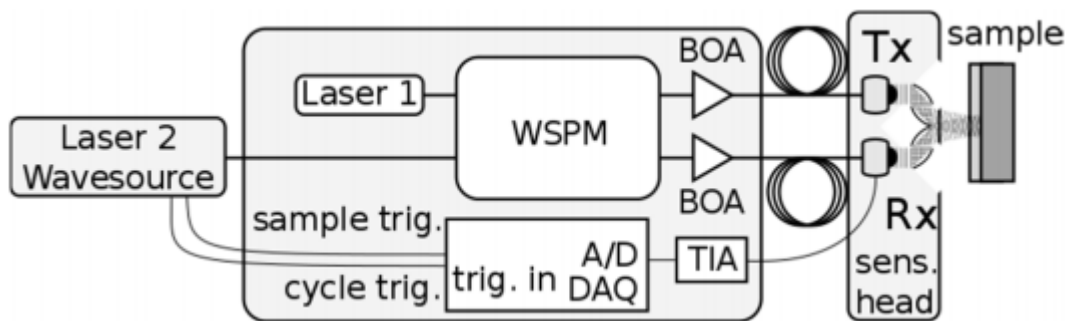


Рис. 2. Оптичний і сигнальний шлях експериментальної установки з використанням двох лазерних джерел, селективного фазового модулятора за довжиною хвилі (WSPM), допоміжних оптичних підсилювачів (BOA), передавача (Tx), приймача (Rx) у головці датчика та зразка.

Отриманий сигнал посилюється (Femto) і подається в DAQ-блок разом із тригером вибірки та циклічного тригера WaveSource™.

ТГц спектри, записані T-Sweeper у двох різних схеми роботи наведені на рис. 3. У режимі реального часу що відповідає безперервній частоті оновлення 8 Гц, смузі > 2 ТГц з роздільною здатністю 1 ГГц і піковим динамічним діапазоном (DR) > 70 дБ. Наскільки нам відомо, це так найшвидше отримання широкопasmового, когерентного безперервного ТГц спектру, продемонстрованого на даний момент. Зауважте, що обмеження, яке заважає нам реалізувати навіть вищі частоти оновлення, наразі встановлюється збором і обробкою даних.

З вищою частотою дискретизації та використанням FPGA можна досягти частоти оновлення 50–100 Гц. Таким чином, концепція TSweeper дозволяє створити просту терагерцеву систему з повним оптоволоконном з високою швидкістю та високою пропускнуою здатністю для позалабораторних застосувань.

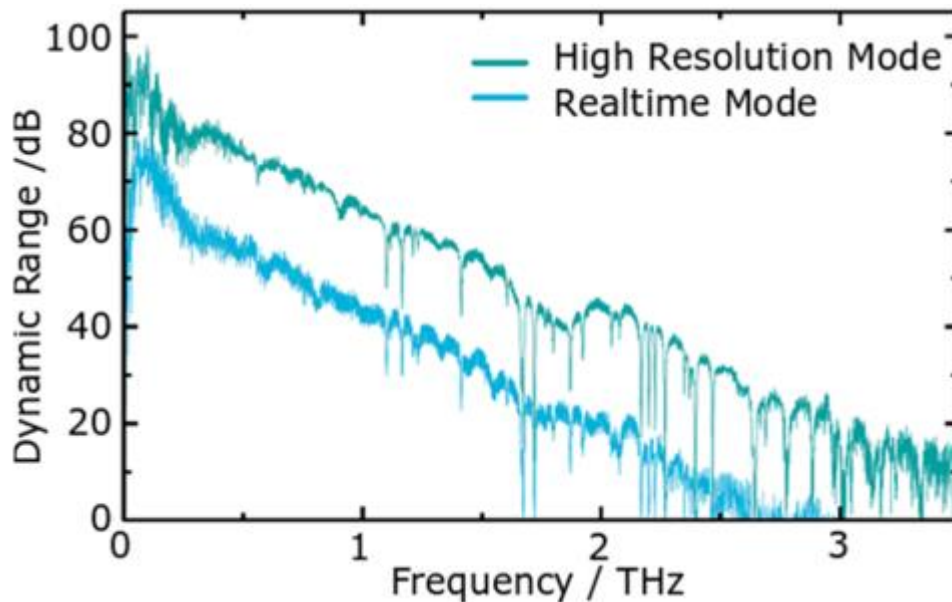


Рис. 3. Частотні спектри, записані за допомогою T-Sweeper у режимі реального часу (однократне вимірювання з часом збору даних 125 мс, синій) і в режимі високої точності (середнє значення 1000 спектрів, зелений).

Крім режиму реального часу, в середньому 1000 окремі ТГц спектри, що відповідають загальному отриманню час 125 с, збільшує смугу пропускання до > 3 ТГц і пік DR досягає майже 90 дБ (зелена лінія на рис. 3). Це серед найвищі значення пропускнуої здатності та DR, зареєстровані на даний момент. [6,7]

Однак загальний час вимірювання при бл. 2 хв. Є значно коротше, ніж попередні результати. Таким чином, TSweeper також підходить для спектроскопії високої роздільної здатності.

Щоб продемонструвати застосовність системи для шару вимірюючи товщину, визначається товщину двошарового зразка, що складається з керамічної пластини з покриттям фарбою з розпилувача зверху в геометрії відбиття.

На рис. 4 (а) і (б) показано абсолютні значення амплітуди і фази відбитого зразком терагерцового спектру (синя крива) відповідно. Зелені лінії відповідають опорному сигналу, отриманому як відображення на плоскому металевому дзеркалі.

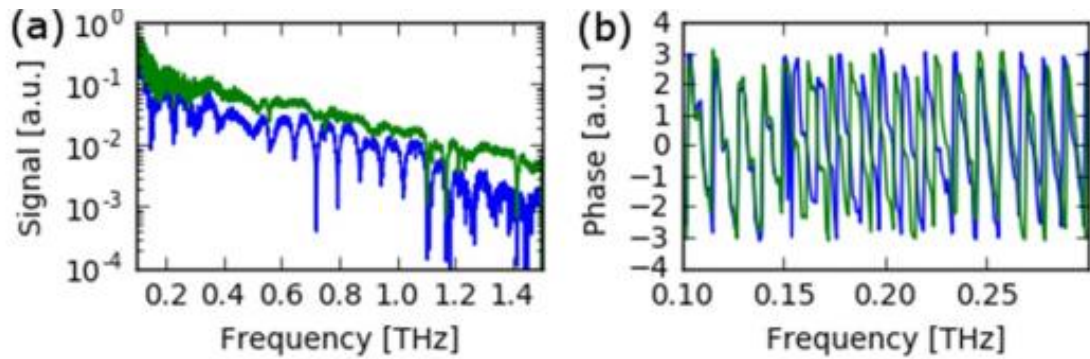


Рис. 4. (а) Амплітуда (а) і фаза (б), отримані в ТГц відбитті вимірювання на двошаровому зразку, що складається з керамічної підкладки з розпилюваним покриттям зверху.

Сині лінії відповідають відображенням від зразка, зелені лінії - еталонним відображенням на металевому дзеркалі. Обидва сигнали були отримані в одноразовому вимірюванні (8 Гц) зі спектральною роздільною здатністю 1 ГГц. За допомогою зворотного перетворення Фур'є комплексні спектри відбиття перетворюються в область оптичної відстані.

Тут яскраво виражені піки вказують на кожну межу розділу матеріалу у зразку (див. рис. 6). Детальну інформацію про схему аналізу даних можна знайти в Ref. [8].

Припускаючи незалежний від частоти показник заломлення $n = 3$ для кераміки та $n = 1,2$ для фарби, визначено товщину шару 630 мкм і 100 мкм.

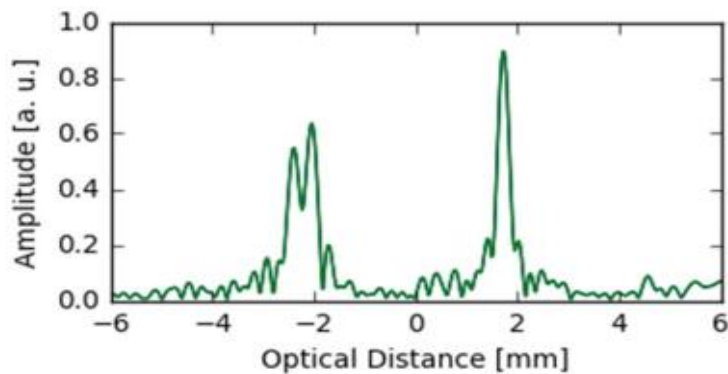


Рис. 6. Абсолютне значення перетворення Фур'є комплексної передавальної функції

Продемонструваний безперервний ТГц у режимі реального часу, пов'язаний із волокном система із смугою пропускання вище 2 ТГц і безперервною частота оновлення 8 Гц, яку можна додатково збільшити збір і обробка даних. Завдяки своєму когерентному виявленню схемою та високою точністю ця система має потенціал для заміни системи THz-TDS у багатьох областях неруйнівного тестування.

1.4 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 безпроводній 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).

По мережам п'ятого покоління (5G) 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/км²;
- 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, підрозділяються на вакуумні лампи, твердо тільні пристрою, а також лазерні та фотонні джерела. ТГЧ-джерела з високим рівнем потужності класифікуються за двома категоріями: з поперечної і поздовжньої модуляцією електронного потоку. До першої категорії відносяться гіротрони і лазери на вільних електронах, а до другий - 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 хвилеводів 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 хвилеводі поширюється основна хвиля гібридного типу HE₁₁, а ширина смуги пропускання досягає 1 ТГц. На частоті 2,5 ТГц ослаблення становить менше 1 дБ / м.

Висновок

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

2. ПРИЙМАЛЬНО-ПЕРЕДАВАЛЬНИЙ ТРАКТ РАДІОРЕЛЕЙНОЇ СИСТЕМИ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДІАПАЗОНУ

Головною складовою частиною радіорелейної системи діапазону 130...134 ГГц є приймально-передавальний тракт. До складу приймально-передавального тракту входять наступні основні функціональні вузли:

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

Даний приймально-передавальний 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 передавального і приймального тракту

Ключовими елементами радіорелейного системи зв'язку терагерцового діапазону є радіоелектронні приймально-передавальні пристрої, здатні формувати і передавати необхідної потужності для цього частотного діапазону модульовані сигнали зі швидкістю від 1 Гбіт/с і приймати сигнали з прийнятною високою чутливістю.

Передавальний (рис. 2.1) і приймальний (рис. 2.2) тракти складають

аналогову (лінійну) частину радіорелейної системи [15, 16, 17, 18]. Ці тракти побудовані за гетеродинною схемою і забезпечують передачу сигналів на трасі в терагерцовому діапазоні частот в межах 130...134 ГГц. Діапазон проміжних частот становить 2...4 ГГц. Структурна схема передавального тракту показана на рисунку 1 і містить в своєму складі наступні функціональні вузли: підсилювач проміжної частоти (ППЧ) (при необхідності); частотний перетворювач вгору; гетеродин; смугопропускний фільтр (СПФ); вихідний підсилювач потужності (ПП) (при можливості придбання компонентів); передавальна антена [19].

На вхід передавального тракту сигнал надходить від формувача групових радіосигналів і в разі, якщо потужність цього сигналу достатня для отримання необхідного рівня сигналу на виході перетворювача, схема не вимагає використання ППЧ. Структурна схема приймального тракту приведена на рис. 2.2 і складається з наступних вузлів: приймальня антена; вхідний малошумний підсилювач (МШП) (при можливості придбання компонентів); смугопропускний фільтр; змішувач; гетеродин; підсилювач проміжної частоти. Реалізація малошумливого підсилювача на вході приймального тракту становить таку ж проблему, як і з підсилювачем потужності на виході передавача.

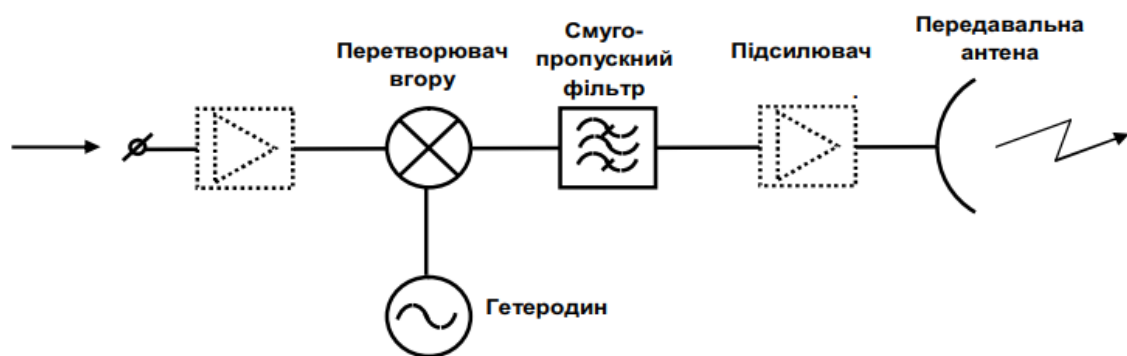


Рис. 2.1. Структурна схема передавального тракту

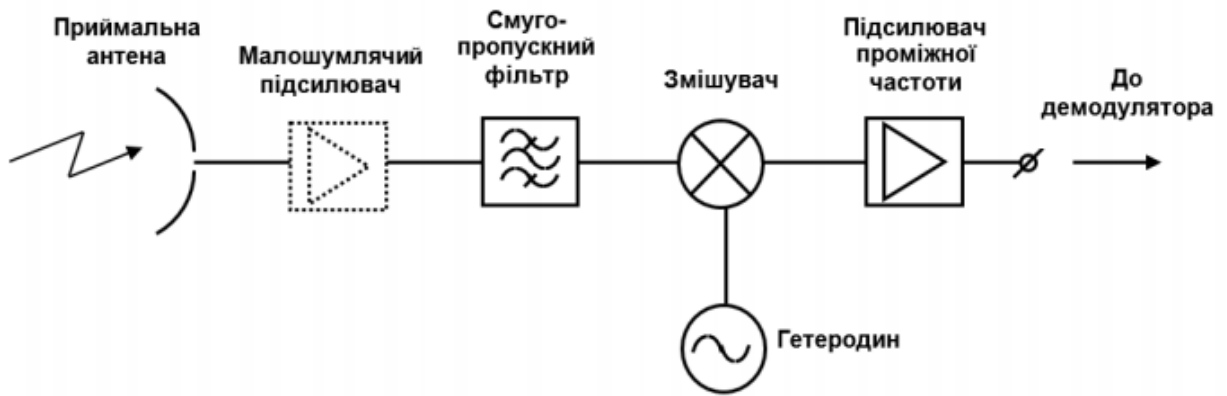


Рис. 2.2. Структурна схема приймального тракту

2.2 Дослідження характеристики радіоканалу в терагерцовому діапазоні

Щоб визначити продуктивність бездротової системи, необхідно провести характеристику каналу.

Насправді в бездротовій системі поширення електромагнітної хвилі в просторі має особливе значення.

З цієї причини необхідно вивчити коректність цього каналу перед початком роботи над ним і впровадження його в систему зв'язку. Тому важливо знати механізми які беруть участь у каналі розповсюдження та його взаємодії з навколишнім середовищем, щоб мати можливість передбачити шанси та умови для встановлення радіозв'язку між передавачем і приймачем [18].

У світі, де спілкування вимагає швидшого та над швидшою передачею даних працюють дослідники впровадження методів і систем, здатних високої швидкості передачі. Щоб досягти і передавати цю широкосмугову мережу, необхідно збільшити частоту, яка передає інформацію. Для цього вчених цікавить терагерцова (ТГц) область, завдяки якій своїм високим частотам між 0,1 ТГц і 30 ТГц, забезпечує можливість збільшення в пропускну здатності. Дійсно, передача бітрейтів порядку Тбіт/с потенційно можливий для ТГц хвиль, що вигідно для застосування в комунікації. Оскільки ТГц промінь є більш дифрагуючим і менше послаблюється сухими та неметалевими предметами, ніж інфрачервоний, представляє інтерес для бездротового зв'язку в приміщенні. Проте велика

складність – з одного боку для виробництва компактних джерел, потужних і недорогих, з іншого боку, чутливих до ТГц, інтегрованих і надійних детекторів. Актуальний виклик в галузі телекомунікацій є забезпечення збільшення в швидкості передачі. Для цього розглядається кілька методів, включаючи підвищення частоти до спектра міліметрових хвиль (терагерцові діапазони частот). Цей підхід є основою цього внеску, який представляє результати характеристики та статистичного моделювання ТГц каналу розповсюдження. А радіоелектрична система передачі дає змогу перетворює електричний сигнал, випромінюваний $x(t)$ в електричний сигнал, отриманий $y(t)$ за допомогою електромагнітної хвилі ОЕМ. Канал розповсюдження – це середовище передачі електромагнітних хвиль під час їх розмноження [18].

Взагалі, це поширення середовища впливає на електромагнітну хвилю, випромінюється і залежатиме від наявності чи відсутності перешкоди в цьому середовищі. Отже, для моделювання ТГц канал має враховувати багато параметрів щоб скинути цінну модель для цього середовища. В альтернативних системах передачі з ортогонального частотного мультиплексування (OFDM), еквалайзери використовуються в частотній області на основі використання швидкого перетворення Фур'є (ШПФ), яке разом з однаковою ймовірністю помилки, менша складність. Але цей спосіб має два істотних недоліки: високий пик-фактор сигналу і висока чутливість до девіації несучої частоти. Це призводить до зниження ККД потужності підсилювачів і збільшенням складності та вартості радіообладнання в цілому. Бездротовий зв'язок в складне середовище, таке як промислове середовище, вимагає поглибленого вивчення каналу розповсюдження, щоб мати можливість передбачити якість і надійність радіозв'язку. Зв'язок в ТГц діапазоні зменшить дефіцит спектра та обмеження пропускної здатності поточних бездротових систем і активування нових програм як у класичних мережевих доменах, так і в нових нанорозмірних комунікаційних парадигмах.

Дослідження каналу розповсюдження в промисловому середовищі дозволить запропонувати стратегії випромінювання/приймання даних, які

здійснюють обмін інформації максимально достовірна. Багато дослідників проводили роботи з моделювання ТГц канал. Ель-Гзауї та ін. запропонував у багатосмугову маніпулюючу імпульсну модуляцію з некогерентним приймачем для ТГц системи бездротового зв'язку.

Характеристика каналу

У період нормального поширення в атмосфері, хвилі проходять один шлях від передавальної антени до приймальної антени. Однак про те, що прямої видимості відомо з 40-х років поширення на частотах вище 1 ТГц іноді супроводжується швидкою і дуже глибокою непритомністю (до кілька десятків децибел), які можна інтерпретувати наявністю кількох одночасних шляхів розповсюдження хвилі між передавачем і приймачем.

У багатопроменевій ситуації суперпозиція на прийомі антени кількох сигналів однієї частоти, але із затримкою та зміщенням по фазі відносно один одного та різної амплітуди, призводить до явища інтерференції. Тому результуючий сигнал супроводжується вибіркочними загасаннями частоти, тобто не всіма частотами діапазону, що передаються, впливають таким же чином, звідси й назва селективне згасання, дана цьому типу явища. Ці ослаблення можуть досягати кількох десятків дБ і можуть змінюватися дуже швидко [18].

Вплив кількох траєкторій на комунікацію та контрзаходи

Вибіркове загасання внаслідок багатопроменевого поширення є найважливішим джерелом завад для високошвидкісних каналів видимого радіозв'язку на частотах нижче 12 ТГц. Перше погіршення відбувається через зменшення потужності прийнятого сигналу, що еквівалентно збільшенню в тепловому шумі. Але суттєва проблема, яку створює багатопроменевість, як тільки корисна пропускну здатність перевищує близько 10 МГц, пояснюється вибіркочним характером явища. Отриманий ефект, природно, залежить від типу використовуваної модуляції: інтермодуляція в аналогових каналів в FM (частотна модуляція), інтерференція між символами у випадку цифрових посилянь.

Ефект ще більше виражений, оскільки корисна пропускну здатність велика: тому вона особливо впливає на високошвидкісні цифрові канали зв'язку, які

використовують кілька десятків МГц. Із загальної характеристики явища, можна отримати уявлення про засоби правового захисту, які необхідно принести. Структура поля перешкод в околицях приймача призводить до використання методів рознесення.

Частотне рознесення: резервні канали використовується для передачі тієї самої інформації. Це рішення вимагають лише антени для прийому, але є дуже дорогим з точки зору використання частотного спектру.

Різноманітність простору: де використовуються дві антени прийому, які знаходяться на відстані кілька сотень довжин хвиль вертикально. Оскільки послаблення має дуже змінну структурою в часі та в просторі, обидва рецептори дуже рідко зазнають однакового впливу. Можна передбачити відновлення найменш порушеного з двох сигналів або виконати більш-менш складну комбінацію [18].

Просторово-часове моделювання імпульсної характеристики каналу

Досліджень, що пропонують моделі розповсюдження, явно менше, ніж тих, що представляють результати характеристики каналів. Деякі з цих досліджень зосереджені на спеціальні додатки, такі як зв'язок між автомобілями [18]. Серед тих, хто звертається до внутрішнього каналу, розглядає детерміновану модель, що включає статистичне врахування шорсткості відбивних поверхонь. Пропонує модель на основі кінцевого імпульсу Структура фільтра відповіді (FIR). Модель, описана в походить від тепер уже класичної моделі Салеха та Валенсуела. Крім того, є багато моделей трасування променів також є в літературі. У більшості ці моделі, враховуючи часові Варіації каналу завжди відкладаються. Іноді цей вибір виправдовується тим фактом, що часові зміни каналу будуть незначними. Оскільки вони будуть повільними порівняно з тривалістю символів, передбачених для цих передач. Кілька моделей з урахуванням впливу діяльності людини використовують методи трасування променів. Так само, за винятком моделей із трасуванням променів, кутовий розмір відсутній у моделях, запропонованих у міліметровий діапазон.

Просторово-часова характеристика русла обґрунтовується декількома

моделями геометричного чи статистичного типу. Отже, просторово-часове моделювання тому канал можливий, включаючи кутовий вимір також. Моделей, що застосовуються для внутрішнього середовища, порівняно небагато. Деякі моделі іноді складні, і їх складно правильно налаштувати, щоб забезпечити легку адаптацію до інших ситуацій, ніж ті, для яких вони були розроблені (інша частота діапазон, наприклад). Модель Цвіка є прикладом, а повна модель для приміщень, яку важко налаштувати. Серед кімнатних моделей була обрана модель Spenser за простоту адаптації. Ця модель також заснована за моделлю, яка тепер широко визнана в цій галузі, тобто Салех і Валенсуела.

Модель Спенсера спочатку була параметризована вимірювання на 7 ГГц. Він заснований на спостереженні явища подвійної групи (групування англосаксонських публікацій): шляхи надходять групами як у область затримок (як у моделі Салеха та Valenzuela) і в кутовій області. Спенсер припускає, що розподіли затримок і кутів прибуття незалежні один від одного (що він потім перевіряє з вимірювань).

$$h(t) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \beta_{lk} e^{j\phi_{lk}} \delta(t - T_l - \tau_{lk}), \quad (2.1)$$

і сума по k шляхів у кожній групі. Термін фази статистично не залежить від іншого терміну, а ϕ_{lk} моделюється рівномірним розподілом на $[0, 2\pi]$.

Середня потужність шляхів слідує за подвійним експоненціальним зменшенням відповідно до затримок груп і відповідно до затримок шляхів.

$$\overline{\beta_{lk}^2} = \overline{\beta_{00}^2} e^{-\frac{T_l}{\Gamma}} e^{-\frac{\tau_{lk}}{\gamma}}, \quad (2.2)$$

де $\overline{\beta_{00}^2}$ є середня потужність першого шляху перша група (визначається з відстані TX – RX), Γ і γ – постійні часу для ослаблення потужності груп і шляхи відповідно.

Припускається, що амплітуда β_{lk} піддається Релею згасання. Кількість груп

шляхів, а також кількість шляхів на групу відповідають процесу Пуассона.

Різниця в часі між двома послідовними групами, як а також різницю в часі між двома послідовними шляхи всередині групи, отже, слідує за спаданням експоненціальний закон.

Умовна щільність ймовірності групових затримок визначається:

$$P(T_l/T_{l-1}) = \begin{cases} e^{\Lambda(T_l-T_{l-1})} & t \in \mathbb{N}^* \text{ et } T_l \geq T_{l-1} \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (2.3)$$

де T_l – затримка групи l , а Λ – середнє

Коефіцієнт прибуття груп (середня кількість груп на підрозділ час) процесу Пуассона. Умовна щільність ймовірності затримок шляху в межах групи визначається:

$$p(\tau_{lk}/\tau_{l(k-1)}) = \begin{cases} e^{\lambda(\tau_{lk}-\tau_{l(k-1)})} & k \in \mathbb{N}^* \text{ and } T_{lk} \geq T_{l(k-1)} \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (2.4)$$

де τ_{lk} – затримка поїздки, що належить до групи L (затримка відносно першої поїздки групи), і λ це середня кількість прибуттів поїздок (середня кількість поїздок за одиницю часу) процесу Пуассона.

Спенсер завершує часову модель Салеха і Валенсуела, запропонувавши представництво IR (імпульсна характеристика), аналогічна в кутовій області:

$$h(\theta) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \beta_{lk} \delta(\theta - \theta_l - \omega_{lk}), \quad (2.5)$$

де θ_l – середній кут приходу групи l та ω_{lk} кут шляху k у групі L .

Амплітуди β_{lk} такі ж, як і раніше, як визначено в рівнянні (2). Середні кути приходу групи мають рівномірний розподіл на $[0, 2\pi]$ і кути прибуття, пов'язані з кожним шляхом слідувати стандарту розподілу Лапласа (за модулем 2π).

відхилення σ з центром на середньому куті групи з якою пов'язана поїздка:

$$p(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\sigma}} e^{-\frac{\sqrt{2}|\omega - \theta_l|}{\sigma}}. \quad (2.6)$$

Перший етап моделювання полягає у вилученні характеристик шляхів із вимірних імпульсних реакцій. Ці характеристики наступні: час прибуття, кут прибуття та потужність.

Точність цього вилучення обмежена роздільною здатністю вимірювання, затримується на часову роздільну здатність (2,3 не для вимірювань), у куті за кутовою роздільною здатністю (6 для вимірювань).

Так звана «висока роздільна здатність» можуть покращити цю роздільну здатність і таким чином підвищити точність моделювання.

Використання алгоритму «високої роздільної здатності» вимагає особливої уваги до умов для отримання вимірювань (точне знання про діаграми спрямованості радіо ТГц).

Розроблений алгоритм виявлення шляху базується на пошуку значущих локальних максимумів профілів потужності куту-затримки, отриманих за допомогою вимірювання, проведені під час кампаній n°2,3 і 4.

Не всі локальні максимуми систематично розглядаються шляхами. Підтвердити як шлях, критерій на градієнт визначається наступним чином.

Це $\vec{g}(t, \theta)$ градієнт у точці (t, θ) :

$$\begin{aligned} \vec{g}(t, \theta) &= \frac{\partial p(t, \theta)}{\partial t} \vec{i}_t + \frac{\partial p(t, \theta)}{\partial \theta} \vec{i}_\theta, \\ \vec{g}(t, \theta) &= g_t(t, \theta) \vec{i}_t + g_\theta(t, \theta) \vec{i}_\theta. \end{aligned} \quad (2.7)$$

Компоненти градієнта на осях затримки і кути, $g_t(t, \theta)$ and $g_\theta(t, \theta)$ поблизу максимуму має бути більше, ніж емпірично визначене порогове значення, щоб максимум був підтверджений як шлях, який формулюється наступним чином:

$$\begin{cases} |g_t(t, \theta)| > \delta t_e & t \in \{t_0 - \varepsilon, t_0 + \varepsilon\} & \varepsilon > 0, \\ |g_\theta(t, \theta)| > \delta \theta_e & \theta \in \{\theta_0 - \varepsilon, \theta_0 + \varepsilon\} & \varepsilon > 0, \end{cases} \quad (2.8)$$

Де t_0 і θ_0 координати локального максимуму. Метою цього критерію є уникнення або суворе обмеження помилкових виявлень.

У моделі Спенсера кути приходу групи шляхів рівномірно розподілені по $[0, 2\pi]$, в той час як шляхи в групах розподіляються відповідно до розподілу Лапласа (вважається по модулю 2π). Кут приходу групи шляхів становить середнє значення кутів прибуття шляхів у група. Тоді кути прибуття шляхів пов'язуються з кутом прибуття їхньої групи [18].

2.2 Функціональні вузли прийомо-передавача терагерцового діапазону

Функціональними вузлами прийомо-передавача 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 сигналу.

Частотний перетворювач вгору і змішувач, що працюють в різних режимах і виконують різні функції, проте мають однакові уніфіковані схему і конструкцію. Перетворювачі були побудовані на базі безкорпусних арсенід-галієвих діодів Шотткі з балочними виводами вітчизняного виробництва (НПП «Сатурн», м. Київ). Гранична частота цих діодів складає 2,5 ГГц, що дозволяє їм працювати принаймні в нижній частині терагерцового діапазону. За електричними і конструктивними параметрами розроблені діоди, які не поступаються

закордонним сучасним аналогам, наприклад, арсенід-галієвим діодам фірми Hewlett Packard.

З метою реалізації субгармонійної схеми перетворювача з накачуванням на половинній частоті в якості нелінійного елемента застосовані два включених зустрічно-паралельно діоди Шотткі. Таке включення формує N-видну результуючу вольт амперну перну характеристику, симетричну відносно початку координат. Дана обставина зумовлює зміну параметрів нелінійного елемента з частотою вдвічі більшою ніж частота гетеродина. Структурна і конструктивна схеми перетворювача показані на рис. 2.3.

Конструкція перетворювача містить два хвилеводних тракти, пов'язаних симетричною смужковою лінією, на якій змонтована пара безкорпусних діодів Шотткі. Діоди підібрані за параметрами, щоб забезпечити симетричність результуючої вольт амперної характеристики для якісного зменшення інтенсивності непарних гармонік частоти гетеродина.

Хвилеводний тракт з перетином каналу $1,6 \times 0,8$ 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 $3,6 \times 1,8$ мм. Канал є позамежним для сигналу ПЧ, а розв'язка гетеродина від ВЧ сигналу забезпечує фільтр нижніх частот (ФНЧ) з частотою зрізу 67 ГГц, виконаний на ділянці смужкової лінії між хвилеводними каналами.

Ланцюг сигналу ПЧ повністю реалізований на симетричній смужковій лінії з підвішеною підкладкою. В якості підкладки використана поліімідна плівка товщиною 30 мкм, підвішена в прямокутному каналі перетином $0,8 \times 0,4$ мм, що запобігає виникненню вищих хвилеводних мод.

Вихідний ФНЧ в ланцюзі ПЧ з частотою зрізу 30 ГГц перешкоджає проникненню сигналів гетеродина і ВЧ в тракт проміжної частоти.

Короткозамикаючі поршні в хвилеводних каналах дозволяють здійснювати підстроювання відповідних ланцюгів перетворювачів.

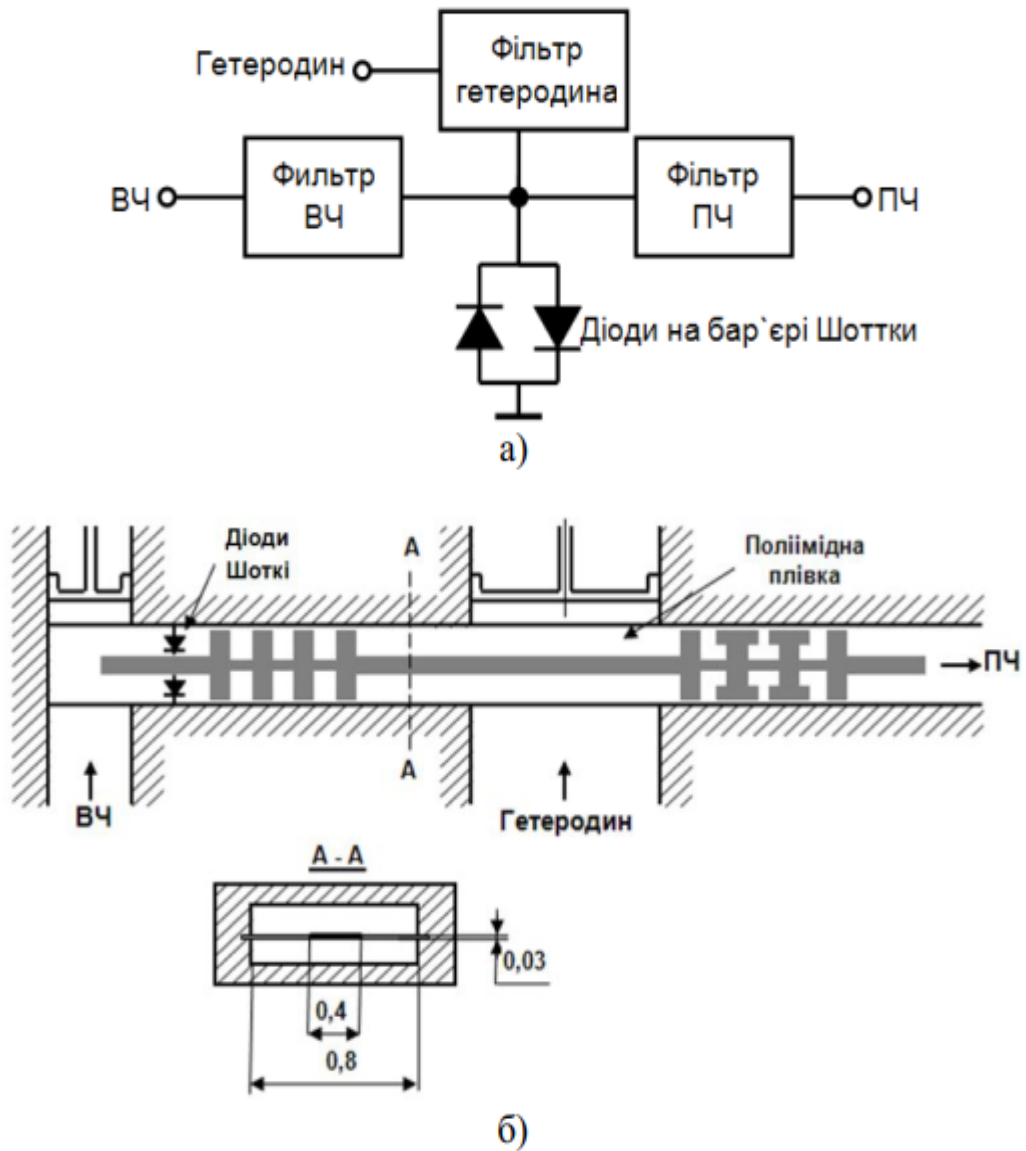


Рис. 2.3. Структурна (а) і конструктивна (б) схеми перетворювача

На рис. 2.4 показана конструкція перетворювача частоти (змішувача) зі знятою верхньою частиною. Діоди з балочними виводами включені смужкову лінію за допомогою електропровідного клею. Конструкція змішувача містить в своєму складі попередній підсилювач сигналу проміжної частоти. На виході ланцюга ПЧ застосований роз'єм SMA приладового типу.

Потужність гетеродина, яка необхідна для нормальної роботи змішувача, не перевищувала 15 мВт. Вимірне значення втрат перетворення становить – 11 дБ, що відповідає найкращим досягненням зарубіжних аналогів.

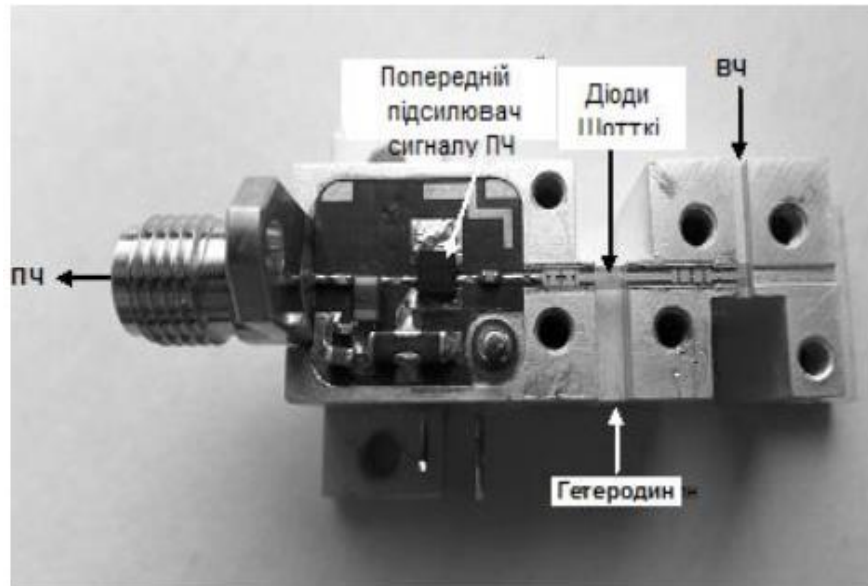


Рис. 2.4. Конструкція перетворювача частоти

Високочастотні підсилювачі.

Підсилювач потужності (ПП) на виході передавача і мало шумливий 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 мал шумного 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.

Підсилювач проміжної частоти.

Підсилювач проміжної частоти розроблений на базі мікросхем TQP3M9008 (фірми Triqwint) і HMC313 (фірми Hittite). Принципова схема підсилювача показана на рис. 2.5.

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.

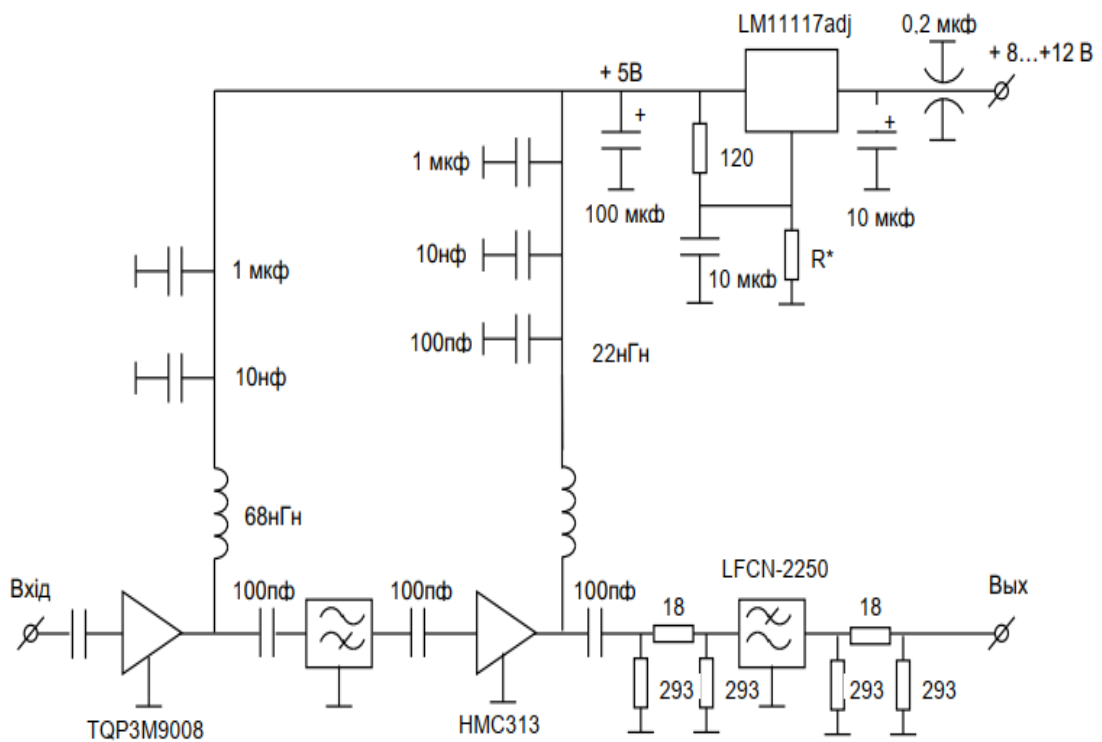


Рис. 2.5 Принципіальна схема ППЧ

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

3.1 Дослідження наскрізної АЧХ тракту

Для дослідження наскрізної АЧХ тракту “вхід ТГц передавача – вихід ТГц приймача” було розроблено експериментальну установку, структурну схему якої представлено на рис. 3.1.

Як видно з рис. 3.1 проводились вимірювання сигналу на вході тракту передавача та на виході тракту приймача терагерцового діапазону. При цьому вихід передавача з'єднувався хвилеводною лінією з входом приймача.

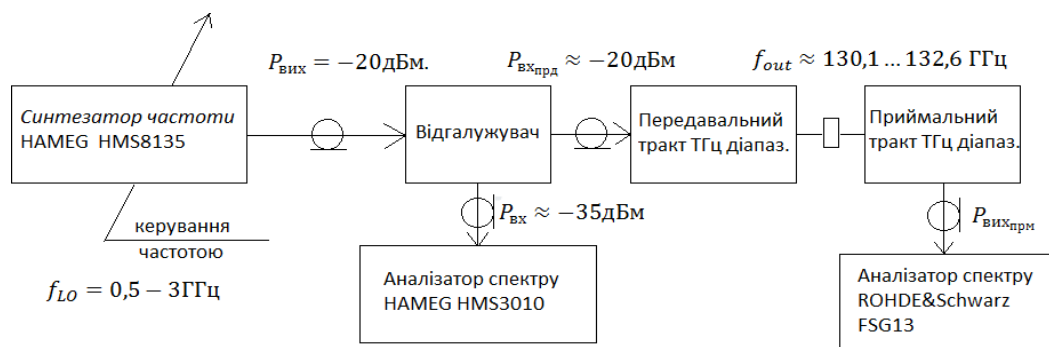


Рис. 3.1 Структурна схема лабораторної установки для вимірювання наскрізної АЧХ тракту “вхід ТГц передавача – вихід ТГц приймача”

Професійний супутниковий телевізійний приймач стандарту DVB-S CODICO SCOPUS, який призначений для демодуляції обраного радіосигналу (частота 12380 МГц, горизонтальна поляризація, символна швидкість 27500 Ксимв/с) до рівня мультипрограмного транспортного потоку MPEG і подачі цього потоку на відповідний інтерфейс модулятора стандарту DVB-S Radyne Comstream DVB-3030. Для розрахунку АЧХ використовувалася лабораторна установка, а параметри були взяті з аналізаторів спектру HAMEG HMS3010 та Rohde&Schwarz вигляд яких наведено на рис. 3.2.

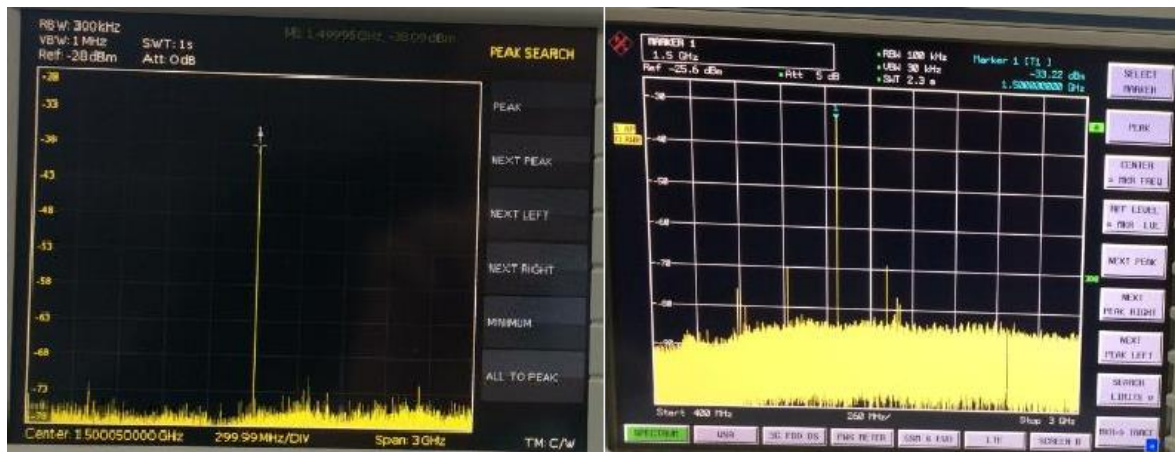


Рис. 3.2 Спектр на вході передачі і виході приймального тракту трансивера ТГц діапазону

Методика вимірювання наскрізної АЧХ:

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

Встановлення початкової частоти синтезатора $f = 500\text{МГц}$.

- 2) Вимірення рівню сигналу на виході приймального тракту ТГц діапазону $P_{\text{вих.прд}}$ за допомогою аналізатору спектра Роде й Шварц.
- 3) Розраховуємо коефіцієнт передавання потужності сигналу від входу передавача до виходу сприймача ТГц діапазону на частоті $f = 500\text{МГц}$

$$L(f) = P_{\text{вих.прд}} - P_{\text{вх}} + 15\text{дБ}. \quad (3.1)$$

- 4) Далі змінюємо частоту f з кроком $\Delta f = 20\text{МГц}$ і виконання п.1-3
- 5) Після досягнення частоти $f = 3\text{ГГц}$ побудова графік АЧХ (рис. 3.3)
- 6) Після проведення розрахунків, смуга пропускання передавально-приймального тракту знаходиться в межах від 950МГц (нижня частота на рівні -3дБ) до 1900МГц (верхня частота на рівні -3дБ).
- 7) Оскільки в лабораторії, в якій проводився експеримент обладнання для формування сигналу стандарту DVB-S працює з частотою не більш ніж 862МГц , тому при проведенні наступних експериментів з сигналами DVB-S, слід враховувати коефіцієнт передачі передавально-приймального тракту буде не оптимальним, але достатнім для проведення експериментів.

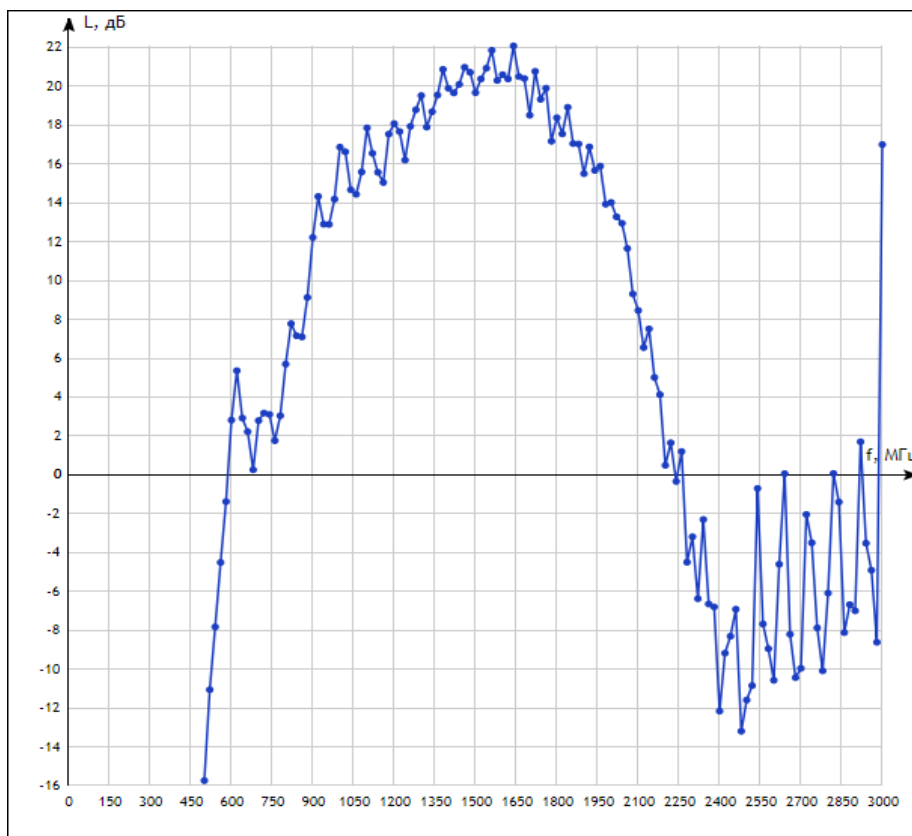


Рис. 3.3 Графік залежності коефіцієнта передавання потужності L до частоти f

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

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

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

супутникового телебачення CODICO Scopus IDR-2600, запрограмоване на демодуляцію радіосигналу стандарту DVB-S з ефірною частотою 12,380 ГГц до рівня мультипрограмного транспортного потоку MPEG TS. Зазначений потік через коаксіальний інтерфейс надходить на DVB-S вхід модулятора RADYNE COMSTREAM, який формує телевізійний радіосигнал стандарту DVB-S з QPSK модуляцією на несучій частоті 95 МГц, з символною швидкістю 27,5 Msim. /сек, потужністю -10 дБм. Потім цей сигнал надсилається на кільцевий діодний змішувач через коаксіальний кабель.

Паралельно з цим сигналом з гетеродина на змішувач на змішувач надходить сигнал на частоті 1990 МГц (при використанні смугового фільтра з центральною частотою 1895 МГц; для смугових фільтрів з частотами 1865 та 1960 МГц частота гетеродина, який може використовувати синтезатор частот HMS 8135, відповідно повинна дорівнювати 1770 МГц і 1865 МГц) і мати потужність +7 дБм. На виході змішувача (у випадку, коли синтезатор був налаштований на частоту 1890 МГц) спектр має вигляд вхідного сигналу (зменшеного по амплітуді, оскільки кожний елемент схеми вносить свій внесок ослаблення), перенесеного з 95 МГц на 1895 МГц та сигналу генератора, а також дзеркального каналу на частоті $1990+95=2085$ МГц. Для компенсації внесеного загасання використовується 2- каскадний підсилювач (12 дБ кожен каскад), який працює від постійного струму, що подається від адаптера живлення. Для паралельного контролю параметрів сигналу на аналізаторі сигналу Rover ST-2 і його передачі на терагерцовий передавач в схемі присутній спрямований зв'язувач. Перед передавачем розташований спрямований розгалужувач, 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 розгалужувача.

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

частотою 1,895 ГГц і смугою пропускання близько 60 ГГц, який виконує операцію виділення частоти, корисного сигналу стандарту DVB-S на фоні інших комбінаційних сигналів.

З виходу ресивера сигнал стандарту DVB-S надходить на сплітер (розрахований на діапазон частот від 5 до 2150 МГц), а з нього на той самий сплітер і на супутниковий ресивер OPENBOX S2. З супутникового ресиверу сигнал надходить на телевізійний приймач Elenberg, зі сплітеру – на аналізатор сигналу ST-2 Rover та на ПК зі встановленою платою супутникового тюнера OMICOM S2. Результати доступних послуг (телевізійних і радіопрограм), що передаються за допомогою радіосигналу DVB-S наведені на рис. 3.5.

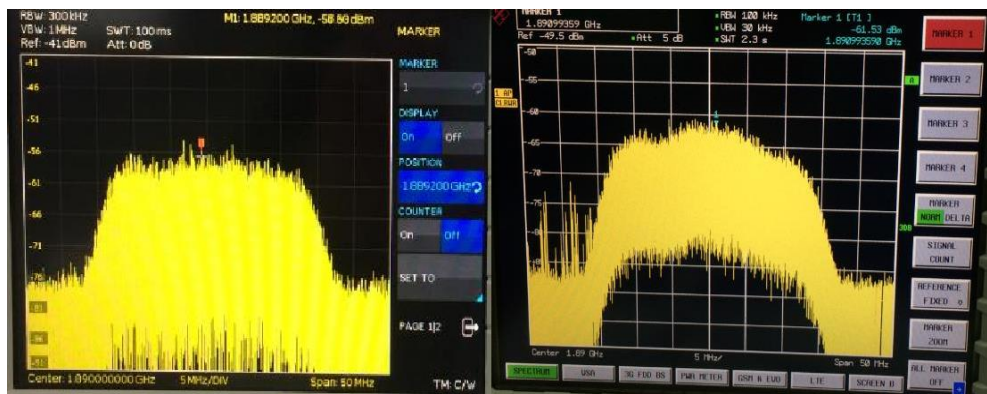


Рис. 3.5 Спектр на вході передавального і виході приймального тракту трансиверу ТГц діапазону

Параметри сигналу стандарту DVB-S, що виміряні за допомогою аналізатора ST-2 ROVER, приймача OpenBox та карти OMICON S2 наведені в таблиця 3.1, рис. 3.6 та рис. 3.7 відповідно.

Таблиця 3.1

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

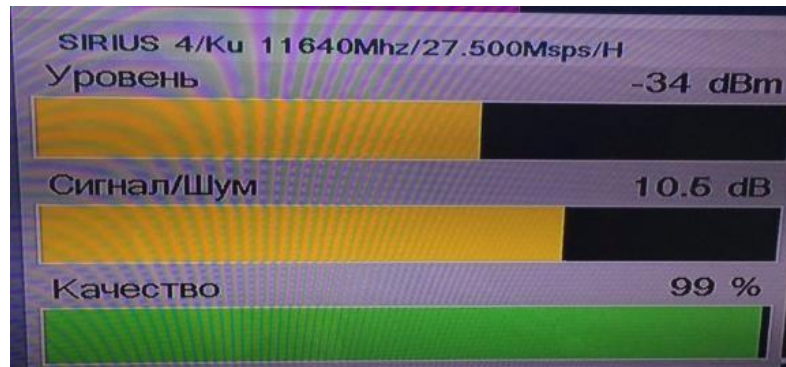


Рис. 3.6 Параметри сигналу стандарту DVB-S, що виміряні на виході приймача ГГц діапазону за допомогою ресивера OpenBox X810

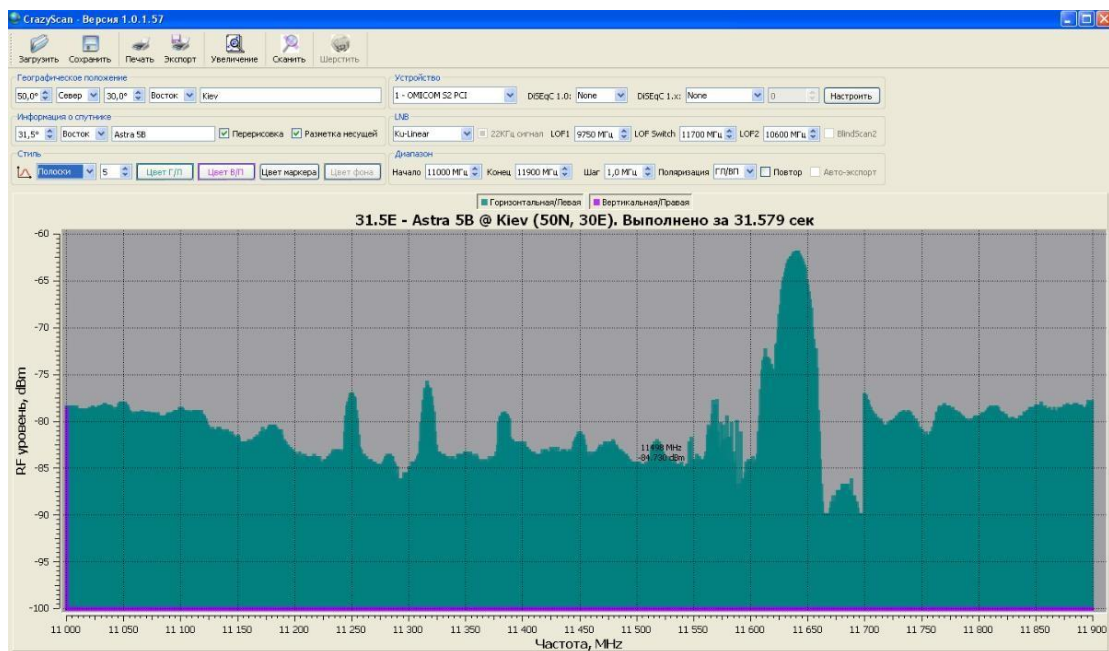


Рис. 3.7 Результати аналізу смуги частот, які отримані за допомогою карти OMICON S2

Параметри сигналу стандарту DVB-S, а також структура елементарних потоків телерадіомовлення, що передаються цим сигналом, наведені на рис. 3.8, рис. 3.9 та на рис. 3.10 відповідно.

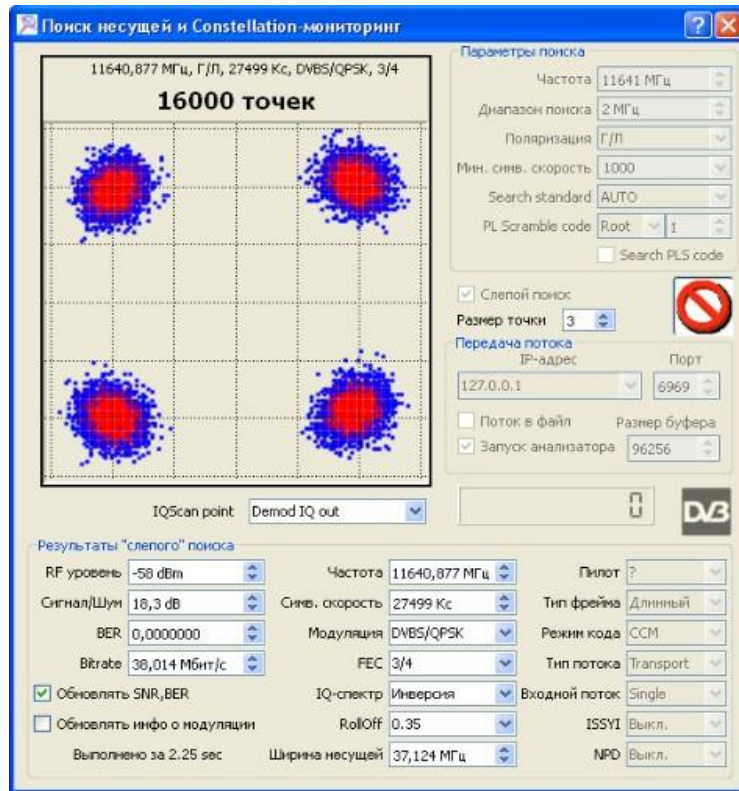


Рис. 3.8 Конституційна діаграма та параметри сигналу DVB-S з модуляцією QPSK

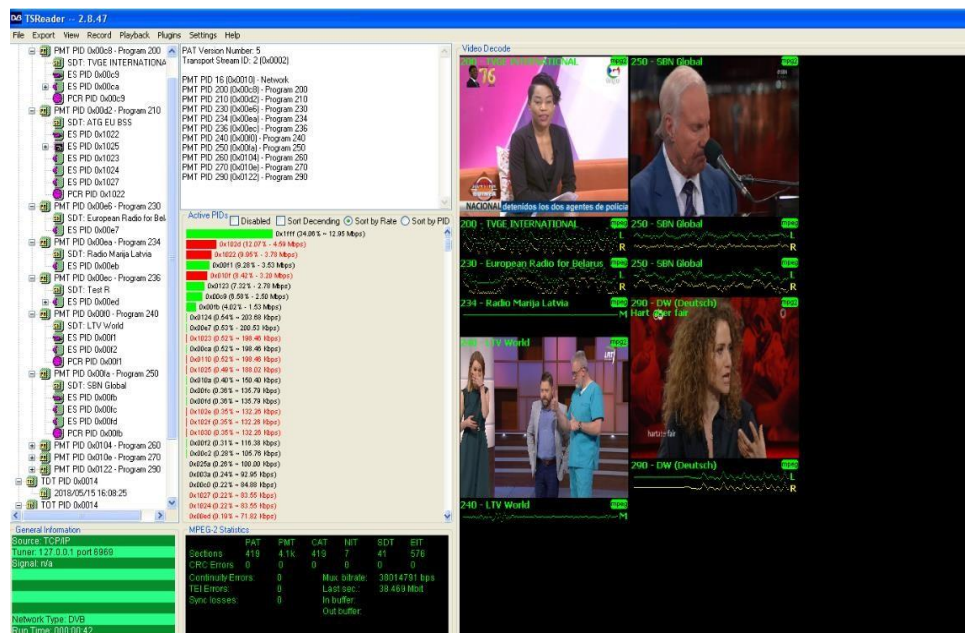


Рис. 3.9 Відкриття та закриття елементарних потоків відео та аудіо здійснюється системою доступу

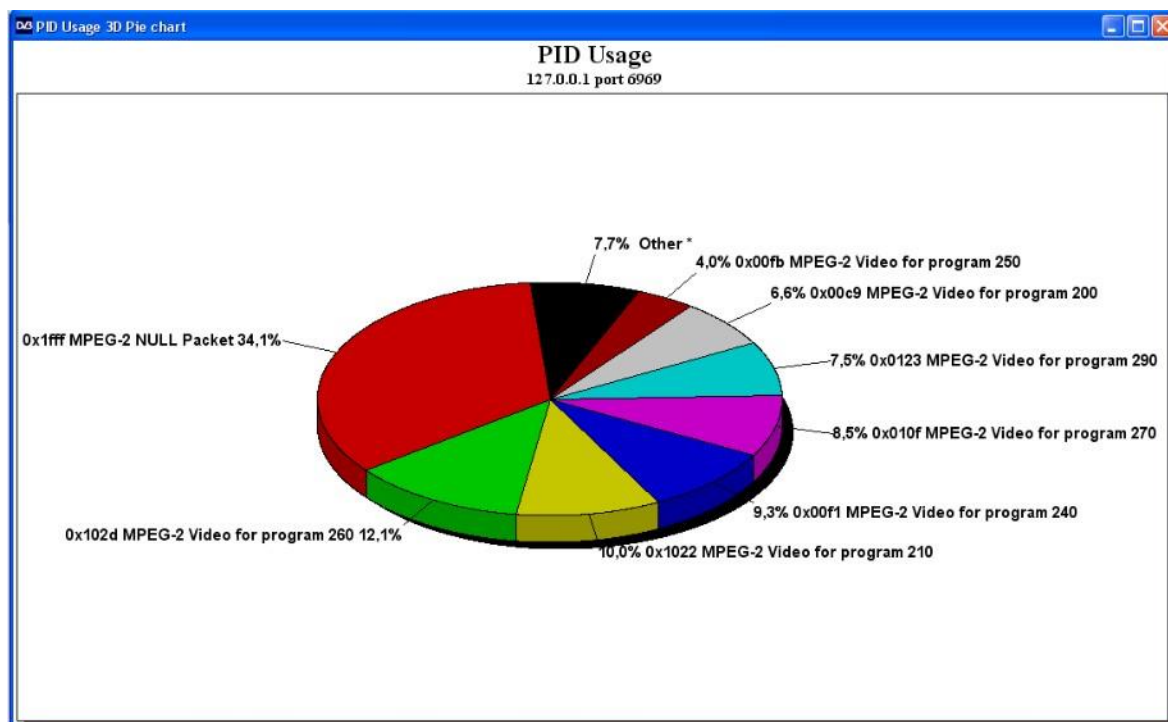


Рис. 3.10 3D Діаграма зайнятості транспортного потоку доступними сервісами

Аналізуючи дані після вимірювань на аналізаторі сигналу ST-2 ROVER і приймачі Homecast, можна зробити висновок, що запасу завадостійкості достатній, для забезпечення трансляції на ТГц тракті за допомогою сигналу стандарту DVB-S декількох телевізійних програм з форматом зображення стандартної/розширеної чіткості з високою якістю відтворення зображення та звуку.

Сигнал також було більш детально досліджено за допомогою карти OMICON S2, підключеної до комп'ютера за допомогою кабелю USB. За допомогою використання програми CrazyScan на ПК розглянуто детальні характеристики сигналу, такі як: відкриті та закриті аудіо та відео потоки, 2D та 3D діаграми зайнятості транспортного потоку доступними сервісами та інші.

3.3 Експериментальні дослідження параметрів радіосигналу стандарту DVB-C при його передачі через трансивер терагерцового діапазону з модуляцією QAM-64.

Для дослідження параметрів багатоканального сигналу цифрового телебачення стандарту DVB-C під час його передачі в тракці передачі терагерцового діапазону розроблено експериментальну установку, структурна схема якої наведена на рис. 3.11.

Як видно з рис. 3.11, вимірювання сигналу проводились на вході тракту передавача та на виході тракту прийомопередавача терагерцового діапазону. При цьому вихід передавача з'єднувався хвильоводною лінією з входом приймача.

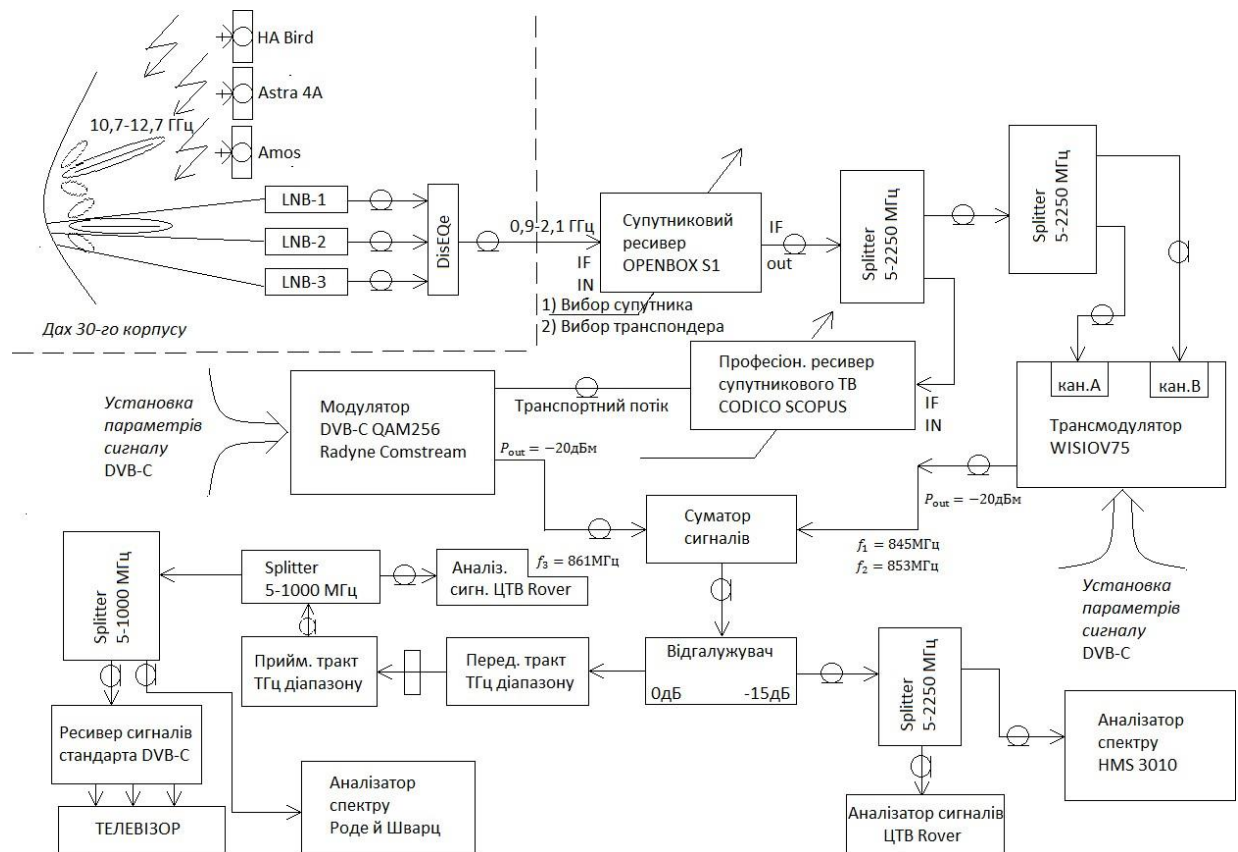


Рис. 3.11 Структурна схема для дослідження параметрів радіосигналів стандарту DVB-C при їх передаванні через трансивер ТГц діапазону

На всіх етапах дослідження використовувалась наступна вимірювальна апаратура:

- аналізатор спектра цифрового телебачення ST-2 ROVER;
- телевізійний приймач цифрового кабельного телебачення Homecast, щопідключений до телевізора Samsung;
- тюнер ефірного та кабельного цифрового телебачення Qbox TBS5880, який підключений до комп'ютера за допомогою USB- кабелю. Тюнер TBS5880 розроблений для отримання зображення констеляційних діаграм та якісних характеристик телевізійних сигналів на вході і виході тракту передачі терагерцового діапазону.

Приймач Homecast призначений для вимірювання параметру якості сигналу (Quality) та інтенсивності сигналу DVB-C у відносній шкалі відсотків на вході і виході тракту прийому-передачі терагерцового діапазону.

Аналізатор сигналів ST-2 ROVER, працюючи з сигналами стандарту DVB-C в режимі емуляції, дозволяє отримати наступні параметри сигналів DVB-C на вході і виході прийому-передачі 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, він показує значення потужності сигналу DVB-C у середньому на 15 дБ менше за значення, отриманого за допомогою тюнера TBS5880.

Вимірювання параметрів багатоканального цифрового телевізійного сигналу стандарту DVB-C під час його передавання в тракті передачі терагерцового діапазону проводилось поетапно: використовувалися одноканальний, двоканальний та триканальний сигнали DVB-C. Сигнали стандарту DVB-C генерувалися шляхом перетворення сигналів стандарту

DVB-S, які приймалися дзеркальною антеною супутника ASTRA 4A.

3.3.1. Передача одного сигналу стандарту DVB-C з частотою 845 МГц

На першому етапі дослідження вхідний телесигнал стандарту DVB-S перетворювався за допомогою транс модулятора WISI OV75 в радіосигнал стандарту DVB-C, при цьому використовувався лише один вхід А.

Результати вимірювань параметрів сигналу стандарту DVB-C наведені на рис. 3.12 та таблиця 3.2. Параметри сигналу стандарту DVB-C, а також структура елементарних потоків теле і радіопрограм, що передаються цим сигналом, наведені на рис. 3.13, рис. 3.14 і рис. 3.15 відповідно.

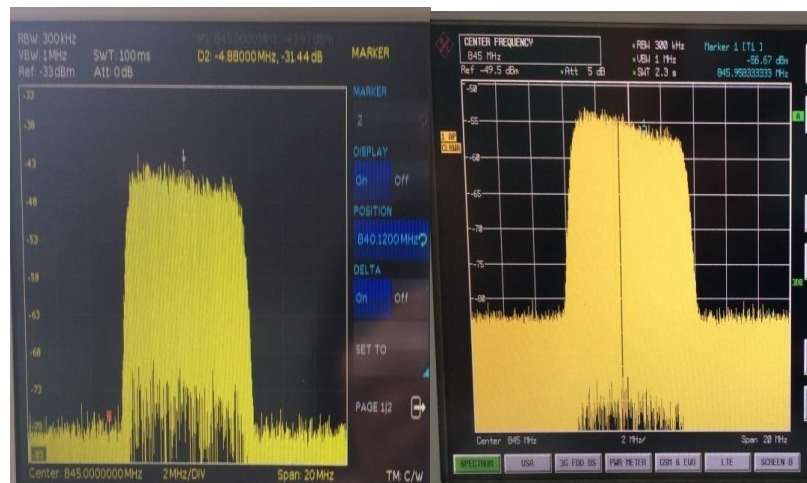


Рис. 3.12 Спектр на вході передавального та виході приймального тракту трансивера ТГц діапазону

Таблиця 3.2

Параметри сигналу цифрового телебачення стандарту DVB-C на несучій частоті $F = 845$ МГц, виміряні аналізатором сигналу ROVER ST-2 та приймачем Номесаст.

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	110^{-7}	QAM-64	6,875	100	65
Вихід	-46,4	15	>36	6	$<10^{-8}$	QAM-64	6,875	100	51

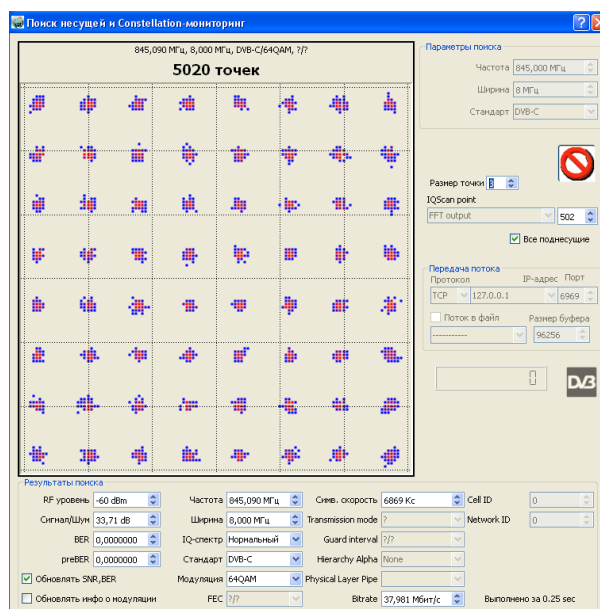


Рис. 3.13 Конституційна діаграма сигналу DVB-C при модуляції QAM-64

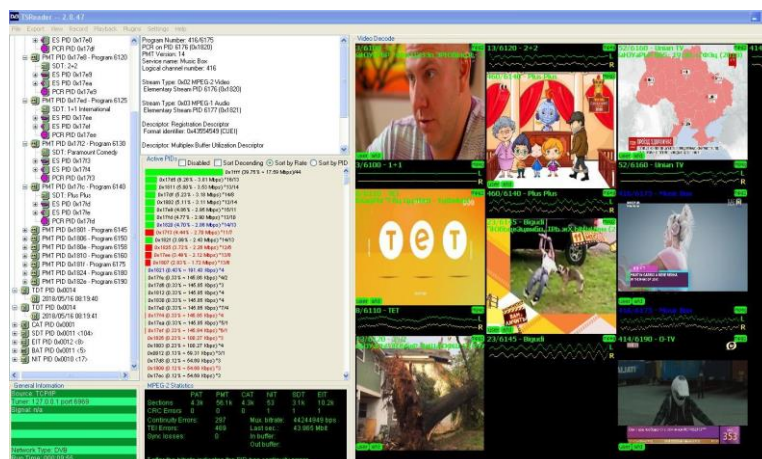


Рис. 3.14 Відкриття та закриття елементарних потоків відео та аудіо здійснюється системою доступу

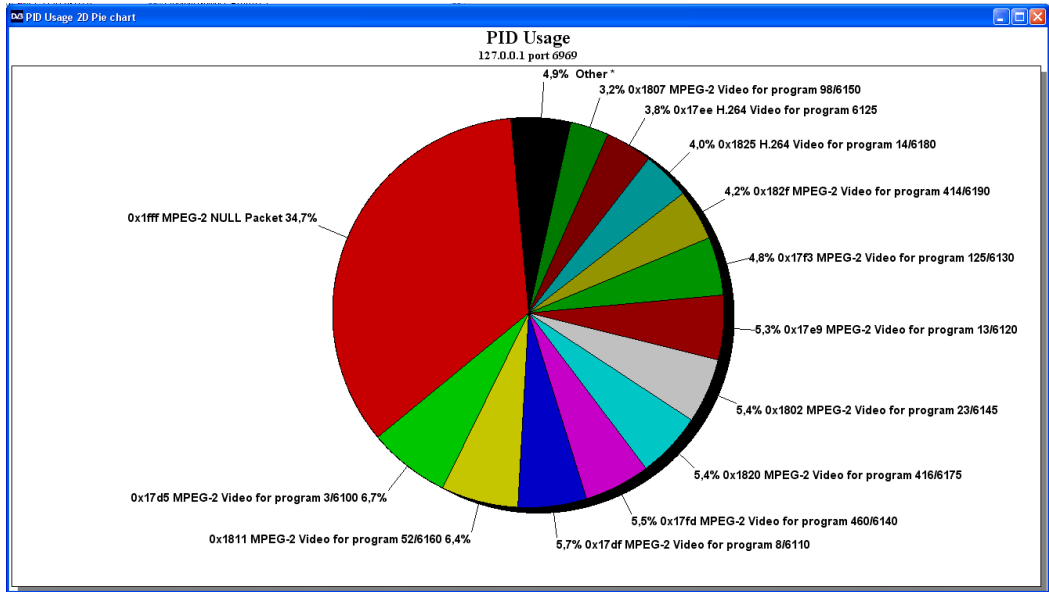


Рис. 3.15 2D діаграма зайнятості транспортного потоку доступними сервісами

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

На другому етапі досліджень у схемі підключення був активований другий приймальний канал (вхід В) трансмодулятора WISI OV75, на який надходив другий сигнал стандарту DVB-S. При перетворенні двох вхідних сигналів стандарту DVB-S в двоканальний сигнал стандарту DVB-S в трансмодуляторі WISI OV75 для останнього були обрані наступні номінальні несучі частоти окремих його сигналів: $F1 = 845$ МГц і $F2 = 853$ МГц.

Результати вимірювань параметрів сигналу стандарту DVB-C наведені на рис. 3.16 та таблиця 3.3.



Рис. 3.16 Спектр на вході передачі та виході приймального тракту трансивера ТГц діапазону



Рис. 3.17 Погіршене зображення телевізійної програми, яка була обрана зі структури транспортного потоку MPEG, що викликано поганою демодуляцією сигналу DVB-S в трансмодуляторі передавальної частини лабораторної установки



Рис. 3.18 Зображення на приймальній частині після усунення дефектів

Таблиця 3.3
 Параметри сигналу цифрового телебачення стандарту DVB-C на несучій 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

3.3.3. Передача трьох сигналів стандарту DVB-C з частотами 845МГц, 853МГц та 861МГц

На третьому етапі досліджень додано третій канал групового сигналу цифрового телебачення DVB-C. Третій телевізійний сигнал стандарту DVB-C отримано за допомогою приймача DVB-S OPENBOX, сигнал DVB-S, з якого ланцюг проміжних частот надходить на приймач IRD-2600 CODICO SCOPUS, який демодулює цей сигнал до рівень багатопрограмного транспортного потоку. З виходу даного приймача транспортний потік по інтерфейсу ASI надходить на QAM модулятор RADYNE COMSTREAM QAM-256, де тип модуляції модуляції QAM-64, швидкість (символьна і бітова в залежності від типу модуляції та перешкодостійкого кодування), номінальна несуча частота 861МГц, формат кадру транспортного потоку 188 байт.

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

Результати вимірювань параметрів сигналу стандарту DVB-C зображені на рис. 3.19 та таблиця 3.4.



Рис. 3.19 Спектр на вході передавачі та виході приймального тракту трансивера ТГц діапазону

Таблиця 3.4

Параметри сигналу цифрового телебачення стандарту DVB-C

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 радіомовлення, що передаються цим сигналом, наведені на рис. 3.20, рис. 3.21 та рис. 3.22 відповідно.

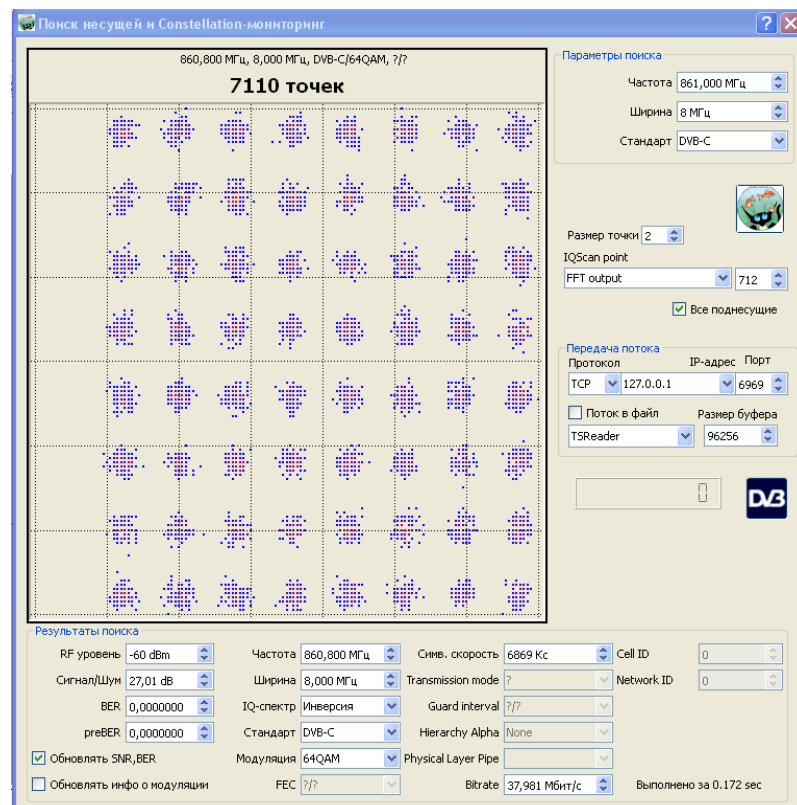


Рис. 3.20 Констеляційна діаграма сигналу DVB-C з модуляцією QAM-64

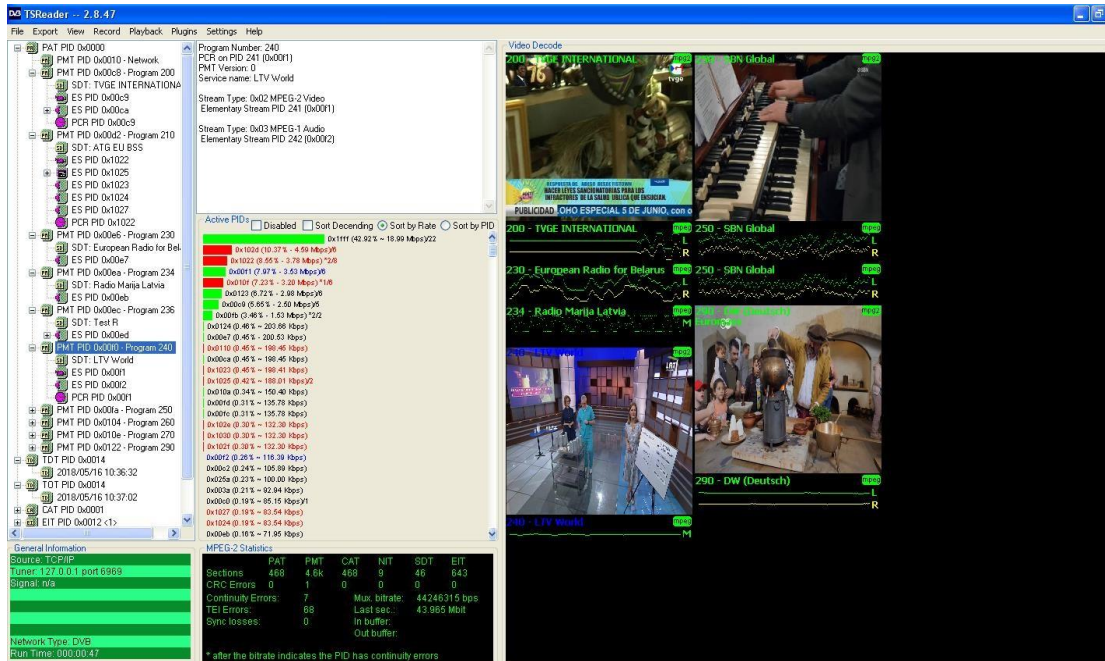


Рис. 3.21 Відкриття та закриття елементарних потоків відео та аудіо здійснюється системою доступу

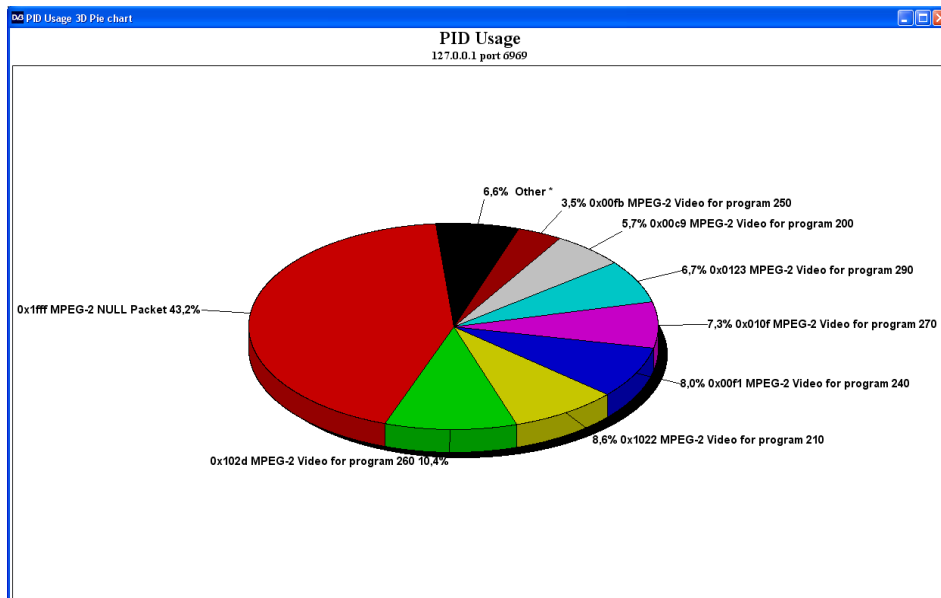


Рис. 3.22 3D діаграма зайнятості транспортного потоку доступними сервісами

Сигнал стандарту DVB-C ТГц діапазону надходить на приймач Номесаст і демодулює телевізійний сигнал DVB-C до рівня окремих телевізійних програм з високою чіткістю зображення і якістю звуку каналу.

На підставі отриманих даних другого етапу дослідження можна зробити висновок, що при одночасній передачі двох телевізійних сигналів DVB-C через тракт передачі ТГц діапазону характеристики кожного з них погіршуються

порівняно з попереднім дослідженням (передача одного телевізійного сигналу).

Інтенсивність сигналу на вході приймача зменшилася, але чіткість зображення та якість звуку на високому рівні.

На підставі отриманих даних другого етапу дослідження можна зробити висновок, що при одночасній передачі двох телевізійних сигналів DVB-C через тракт передачі ТГц діапазону характеристики кожного з них погіршуються порівняно з попереднім дослідженням (передача одного телевізійного сигналу). Інтенсивність сигналу на вході приймача зменшилася, але чіткість зображення та якість звуку на високому рівні.

На другому етапі отримане розпадання зображення на “квадрати” (рис. 3.17) на частоті другого сигналу 853МГц, ця проблема виникла через технічний дефект під час підключення на передавальній стороні, яке було усунуто підключенням до іншого розгалужувача, внаслідок чого, якість зображення підвищилась (рис. 3.18).

Дані третього ступеня показують, що характеристики під час одночасної передачі трьох телевізійних сигналів DVB-C приймально-передавальним трактом ТГц діапазону також знижуються порівняно з першим і другим ступенями.

Підсумовуючи вище сказане, можна сказати, що при передачі одного, двох та трьох телевізійних сигналів DVB-C по тракту передачі ТГц діапазону з модуляцією QAM-64 виходить якісне зображення.

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

На модуляторі Radyne ComStream QAM-256 QAM Modulator, змінили тип модуляції з QAM-64 на QAM-256.

Результати вимірювань параметрів сигналу стандарту DVB-C наведено на рис. 3.21 та таблиця 3.5.



Рис. 3.21 Спектр на вході передачі і виході приймального тракту трансивера ТГц діапазону

Таблиця 3.5
 Параметри цифрового телевізійного сигналу стандарту DVB–Свимірювалися приймачем 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 телерадіомовлення, що передаються цим сигналом, наведені відповідно на рис. 3.23 та рис. 3.24. На рис. 3.22 показано зображення де модульованої телевізійної програми при використанні модуляції QAM-256к.

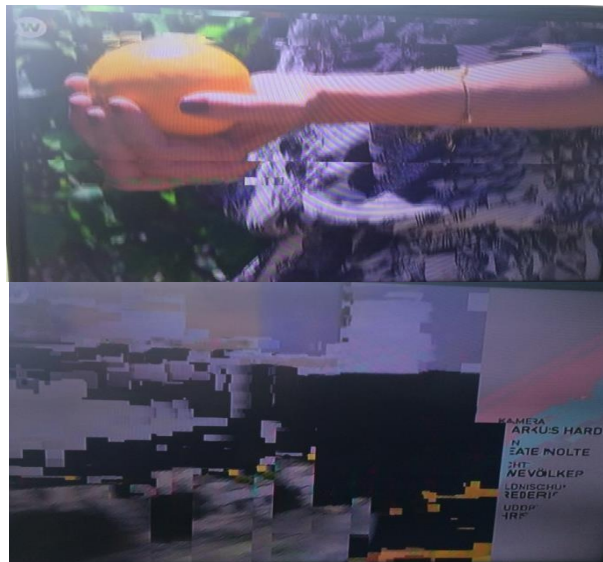


Рис. 3.22 Зіпсоване зображення на телевізорі

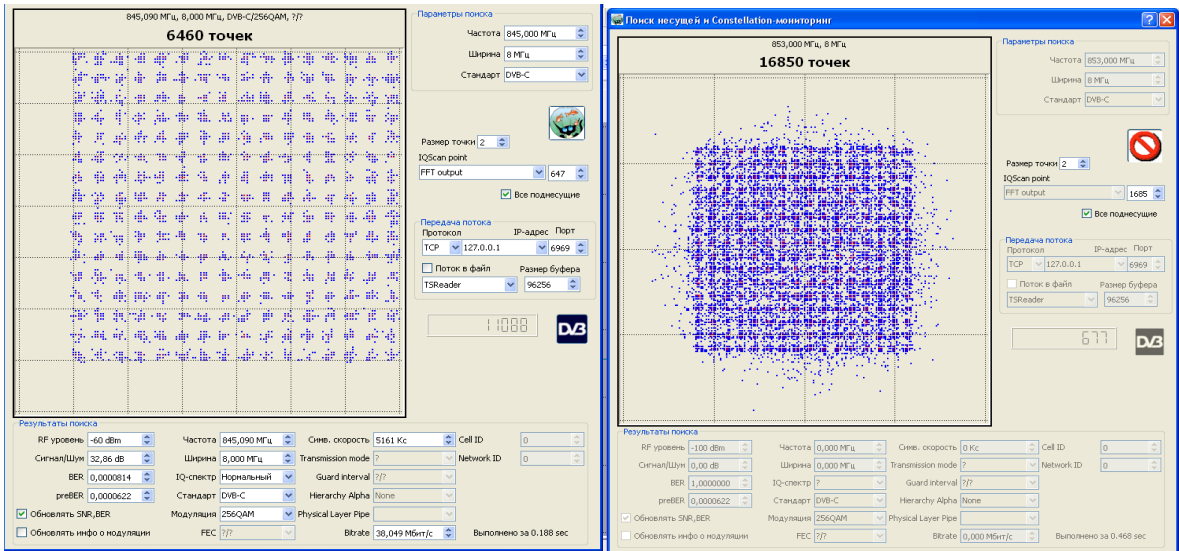


Рис. 3.23 Конституційна діаграма сигналу DVB–C з модуляцією QAM–256 з частотами 845МГц та 853МГц

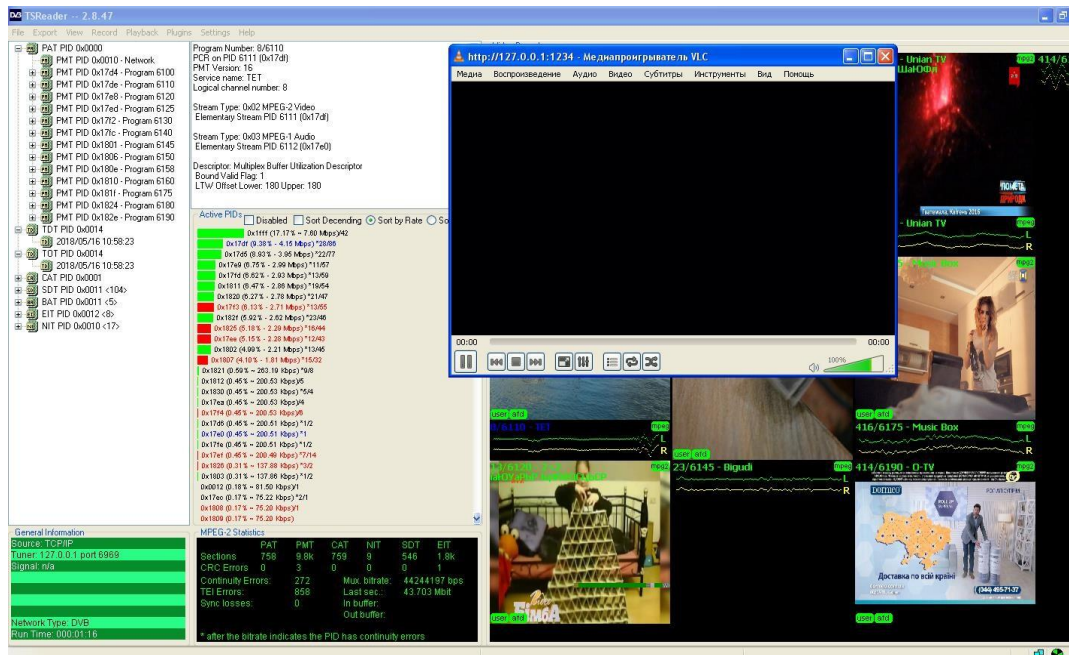


Рис. 3.24 Відкриття та закриття елементарних потоків відео та аудіо здійснюється системою доступу

У цьому розділі тип модуляції було змінено з QAM-64 на QAM-256 під час одночасної передачі трьох телевізійних сигналів DVB-C трактом передачі ТГц діапазону. У підсумку отримали характеристики за допомогою приймача Nomecast. Якість зображення була поганою, тільки при прийомі на частоті 845МГц зображення було чітким, в інших двох сигналах зображення і звук час від часу з'являлися та зникали.

Така зміна якості викликана зміною модуляції, в результаті чого змінилася кількість символів у сигнальному сузір'ї. При цьому інтенсивність внутрішніх перешкод, 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 накладення цих символів один на одного, що призводить до збільшення ймовірності бітових помилок.

Висновок

Результати дослідження параметрів групового сигналу цифрового телебачення стандарту DVB-C під час його передачі в терагерцовому діапазоні приймально-передавальним трактом показали, що нижня частина терагерцового діапазону частот (130,45 ГГц) в діапазоні 24 МГц дозволяє передачу трьох сигналів телевізійного мовлення стандарту DVB-C з загальною швидкістю потоку трафіку на рівні 125 Мбіт/с з високою суб'єктивною якістю відтворення телепрограм в телеприймачі.

Тракти передачі в терагерцовому діапазоні є одним з найбільш перспективних застосовань для бездротової передачі мультиплексованих нестиснених (HD-SDI) телевізійних сигналів високої чіткості (High-Definition Television (HDTV)), швидкість передачі даних яких досягає 1,5 Гбіт/с. Використання тракту передачі терагерцового діапазону зі смугою пропускання 5 Гбіт/с дозволить транслювати понад 130 телеканалів стандарту DVB-C з сумарною швидкістю до 5 Гбіт/с, або якісний триканальний мультиплекс HD-SDI канал без стиснення і затримки.

На основі цього приймально-передавального тракту терагерцового діапазону можна буде будувати високошвидкісні мережі не тільки для використання в сфері телекомунікацій, з їх допомогою можна буде підключати наукове вимірювальне обладнання та ін. пристрої, які створюють величезні обсяги наукових даних.

ВИСНОВКИ

Розглянуто основні відомості про терагерцовий діапазон частот та особливості поширення радіохвиль в ньому. Розглянуто тракт передачі радіорелейної системи терагерцовогодіапазону 130...134 ГГц.

Розраховано дальність дії радіоліній терагерцового діапазону при передачі цифрового сигналу різних стандартів.

Досліджено параметри цифрових телевізійних сигналів під час їх передачі по терагерцовій радіолінії. Для дослідження цих параметрів була розроблена експериментальна установка.

Зроблено аналіз параметрів радіосигналу стандарту DVB-S та DVB-C при передачі через трансивер терагерцового діапазону з різними модуляціями, проведені розрахунки та зроблено висновки, щодо різниці параметрів при передачі групових сигналів стандарту DVB-C.

Тракти передачі в терагерцовому діапазоні є одним з найбільш перспективних застосовань для бездротової передачі мультиплексованих нестиснених (HD-SDI) телевізійних сигналів високої чіткості (High-Definition Television (HDTV)), швидкість передачі даних яких досягає 1,5 Гбіт/с. Використання тракту передачі терагерцового діапазону зі смугою пропускання 5 Гбіт/с дозволить транслювати понад 130 телеканалів стандарту DVB-C з сумарною швидкістю до 5 Гбіт/с, або якісний триканальний мультиплекс HD-SDI канал без стиснення і затримки.

На основі цього приймально-передавального тракту терагерцового діапазону можна буде будувати високошвидкісні мережі не тільки для використання в сфері телекомунікацій, з їх допомогою можна буде підключати наукове вимірювальне обладнання та ін. пристрої, які створюють величезні обсяги наукових даних.