

Г. Л. АВДЄЄНКО<sup>1</sup>, С. Г. БУНІН<sup>1</sup>, Т. М. НАРИТНИК<sup>1,2</sup><sup>1</sup> *Національний технічний університет України «Київський Політехнічний Інститут ім. Ігоря Сікорського»*<sup>2</sup> *СП «Інститут електроніки та зв'язку Української академії наук», Україна*

## ТЕРАГЕРЦОВІ ТЕХНОЛОГІЇ В ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ. ЧАСТИНА 1. ОБҐРУНТУВАННЯ ЧАСТОТНОГО ДІАПАЗОНУ, ПРОЕКТУВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ВУЗЛІВ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДІАПАЗОНУ

Наведено результати проведених авторським колективом досліджень можливостей створення вперше в Україні реальних передумов вирішення фундаментальної проблеми побудови цифрових телекомунікаційних систем з використанням терагерцових технологій. Обґрунтовано необхідність переходу до використання терагерцового діапазону частот при розгортанні майбутніх телекомунікаційних систем надвисокої пропускну здатності. Проведено аналіз сучасного стану проблеми, вибрано напрямки досліджень та виконана постановка задачі щодо створення терагерцової телекомунікаційної системи широкосмугового радіодоступу із гігабітною пропускну здатністю в діапазоні робочих частот 130-134 ГГц. Проведено аналіз характеристик траси поширення сигналу та визначення втрат сигналу в умовах експлуатації радіорелейної системи в терагерцовому діапазоні частот. На основі проведеного аналізу показано, що в діапазоні частот 30-300 ГГц з відомих типів завмирань найбільш вагомими, які слід враховувати при проектуванні, є завмирання внаслідок послаблення сигналу гідрометеорами, завмирання внаслідок поглинання радіосигналу в газах, завмирання внаслідок впливу діаграм спрямованості антен. Показано, що робота радіорелейних ліній в терагерцовому діапазоні дозволяє практично не враховувати рефракцію та інтерференцію електромагнітних хвиль, відбитих від перешкод в зоні поширення радіосигналу, що виникає особливо в умовах щільної міської забудови. Це пов'язано по-перше з тим, що терагерцові хвилі мають низьку здатність до «огинання» завад, по-друге, на поточний момент частоти від 30 до 300 Гц застосовуються на відносно невеликих відстанях (до 5 км), що дозволяє при плануванні прольотів уникнути потрапляння завад в зону прямої видимості антен та першу зону Френеля. Розглянуто основні фактори, що призводять до виникнення завмирань в радіорелейних лініях зв'язку. Показано, що в терагерцовому діапазоні найбільший вплив на енергетичний потенціал радіорелейних ліній чинять затухання в гідрометеорах та газах. Виділено ділянки частот терагерцового діапазону, які найбільше за все придатні для використання в радіорелейних лініях зв'язку. Розглянуто принципи формування сигнально-кодової конструкції, запропоновано способи і нові технічні рішення для вибору виду сигнальної конструкції з метою досягнення найкращої пропускну здатності та продуктивності в каналі зв'язку безпроводової гігабітної системи передачі в терагерцовому діапазоні. Проведено фізичне моделювання надвисокошвидкісного формувача на основі багаточастотного мультиплексування промодульованих OFDM цифрових потоків, проведено стендові випробування та оптимізація на досягнення максимальної пропускну здатності каналу передачі цифрової інформації потоку у форматі Ethernet з використанням розроблених програмних засобів. Створені програмно-апаратні засоби дозволили вперше досягнути загальну каналну швидкість при повному дуплексі до 1,2 Гбіт/с. На основі узагальнення результатів теоретичних досліджень і експериментальних робіт, аналізу наявної радіорелейної елементної бази проведено проектування основних вузлів приймально-передавального тракту телекомунікаційної системи із гігабітною пропускну 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, смугопрускаючий фільтр з використанням тонкої металевої пластини в Е-площині хвилеводного каналу 1,6x0,8 мм, рупорна лінзова антена. Відображено результати експериментальних досліджень основних вузлів приймального і передавального трактів телекомунікаційної системи з гігабітною пропускну спроможністю в діапазоні частот 130-134 ГГц. Наукова новизна роботи полягає в узагальненні та розвитку теорії поширення, формування та вимірювання терагерцових сигналів, в розробленні методу багаточастотного мультиплексування та формування промодульованих OFDM цифрових потоків в терагерцовому діапазоні частот та розвитку принципів функціонального проектування приймально-передавального тракту телекомунікаційної системи із гігабітною пропускну здатністю в терагерцовому діапазоні частот.

**Ключові слова:** терагерцові технології, частотний діапазон поширення радіохвиль, завмирання, телекомунікаційні системи, надвисока пропускна здатність, сигнально-кодові конструкції, функціональне проектування, моделювання, приймальнопередавальні тракти

## Вступ

### Постановка задачі дослідження

Однією з тенденцій розвитку сучасних телекомунікацій є освоєння все більш високочастотних діапазонів. З початку 1980-х рр. і по теперішній час широку увагу дослідників привертає терагерцовий діапазон, який приблизно займає смугу радіочастот від 0,1 до 3 ТГц (рис. 1.1).

Освоєнню терагерцового діапазону сприяла серійна розробка напівпровідникових активних елементів для генерації і підсилення коливань на цих частотах завдяки використанню нанотехнологій, а також нових типів вакуумних приладів для роботи в цьому частотному діапазоні [1].

Проведений аналіз активності наукових досліджень і спрямованості розробок в області терагерцових технологій дозволив виявити більше 7389 патентів на винаходи, заявки на які були подані в період з 1980 р по 2017 г.

Дослідження показують, що терагерцові технології мають надзвичайно широкі перспективи застосування в різних галузях, при цьому спектр областей використання ТГц технологій постійно розширюється. Найбільша кількість винаходів було виявлено в області вимірювальної техніки, оптики, телекомунікацій: ряд запатентованих рішень спрямований на створення компактних генераторів і приймачів ТГц-випромінювання, пристроїв керування ТГц випромінюванням (перемикачів, модуляторів, фазообертачів) [2]. Стабільний позитивний приріст кількості заявок на винаходи в досліджуваній області свідчить про те, що досліджувана тематика відноситься до області перспективних досліджень.

Один із найбільш перспективних напрямків застосування терагерцових технологій в телекомунікаціях пов'язаний з сучасними тенденціями розвитку транспортних розподільних мереж мобільного зв'язку

ку п'ятого покоління, систем управління військовими місіями та протидії тероризму, які передбачають обмін великими обсягами даних. Послуги оптоволоконних мереж забезпечують мультігігабітний потік обміну даних в багатьох частинах світу. Але сучасні телекомунікаційні мережі потребують аналогічної можливості у тих місцях, де оптоволоконного доступу не існує. Супутниковий зв'язок може забезпечити комунікації у віддалених районах, але не може повністю забезпечити пропускну здатність, необхідну для передачі великого обсягу даних [3].

Це дало імпульс до розробки нового покоління малогабаритних безпроводових систем, що використовують неліцензовані терагерцові частотні діапазони, не співпадаючі з ліцензованими частотними діапазонами, традиційно задіяними для транспортування трафіку макростільників.

Прогнози сучасних тенденцій підвищення швидкості бездротового передавання даних показують, що до 2020 року швидкість повинна бути не менше десятків гігабіт за секунду. Ця проблема ставить питання про доступність частотного діапазону, спроможного відповідати таким вимогам. Основною можливістю є збільшення доступної смуги пропускання до декількох десятків терагерців. Зробити це на частотах нижче 100 ГГц та вище 500 ГГц повною мірою не уявляється можливим [4].

У останні роки декілька дослідницьких груп у всьому світі почали досліджувати системи бездротового зв'язку на частоті понад 100 ГГц та вище. Прикладом є програми Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) зі створення технологій і приладів ТГц зв'язку.

Кафедра телекомунікацій ІТС та НДІ телекомунікацій КПІ ім. Ігоря Сікорського, які традиційно займалися апаратно-програмними засобами в мікрохвильовому діапазоні, в останні роки розширили коло своїх наукових інтересів. Один з нових перспективних напрямків нашої роботи – створення,



Рис. 1.1. Терагерцовий діапазон в електромагнітному спектрі

і впровадження терагерцових технологій в телекомунікаціях. Колективу вчених кафедри вдалося отримати значні результати в освоєнні так званої "терагерцової щілини" – області електромагнітного спектра, що лежить в діапазоні від 0,1 до 3 ТГц. Створення пристроїв, систем і мереж ТГц-діапазону здатне радикально змінити принципи і теоретичні підходи до побудови транспортних розподільних мереж мобільного зв'язку п'ятого покоління, систем управління військового призначення. Крім того, відкриваються величезні перспективи їх використання в інших різних областях – від аерокосмічної та метеорології до медицини і безпеки [5, 6].

В 25-річний період з дня заснування кафедри телекомунікацій ІТС КПІ ім. Ігоря Сікорського успішно завершені дослідження щодо можливостей вирішення в Україні фундаментальної проблеми – проблеми побудови цифрової високошвидкісної завадостійкої системи безпроводової передачі інформації високої інформаційної ємності з використанням терагерцових технологій.

Зокрема, в рамках бюджетної програми згідно з "Переліком проектів-переможців третього спільного конкурсу Державного фонду фундаментальних досліджень і Російського фонду фундаментальних досліджень", затвердженим наказом Державного агентства з питань науки, інновацій та інформатизації України від 30 квітня 2013 року № 110, в 2013 році виконана науково-дослідна робота (фундаментальне дослідження) «Розробка фізичних принципів створення терагерцових завадозахищених та скритних систем передавання інформації на основі хаотичних шумових сигналів» (номер державної реєстрації теми: 0113U005206). Також на базі КПІ ім. Ігоря Сікорського колективом вчених були виконані й держбюджетні прикладні науково-дослідні роботи, які пов'язані з тематикою розробки та побудови пристроїв для безпроводових систем зв'язку терагерцового діапазону [7, 8].

*Метою даної статті є ознайомлення широкого кола читачів з результатами циклу досліджень, що проведені колективом вчених КПІ ім. Ігоря Сікорського в галузі безпроводових систем зв'язку терагерцового діапазону, і які включають в себе наступні напрями:*

- дослідження особливостей поширення терагерцових хвиль в атмосфері;
- реалізація концепції створення програмно-визначених радіосистем терагерцового діапазону з використанням технології Wi-Fi;
- проектування передавального та приймального радіотрактів радіорелейних систем терагерцового діапазону.

## 1. Дослідження особливостей поширення терагерцових хвиль в атмосфері

Для ефективного з точки зору фінансових витрат проектування високошвидкісних безпроводових телекомунікаційних систем терагерцового діапазону знання механізмів поширення терагерцових хвиль в атмосфері є надзвичайно важливим, оскільки вони дозволяють розробнику оцінити реальні технічні параметри, надійність та ступінь реалізованості радіосистеми. Однак узагальненого дослідження таких механізмів з врахуванням специфіки побудови безпроводових телекомунікаційних систем проведено не було. Останні дослідження в даній області були засновані на розгляді тільки окремих радіосистем (наприклад безпроводових локальних мереж WLAN (Wireless local Area Network) та радіорелейних систем зв'язку). Тому надзвичайно важливо в умовах сучасного бурхливого освоєння апаратури терагерцового діапазону провідними науково-технічними школами світу, провести такі дослідження, результати яких можна було б використати для розробки будь-якої безпроводової терагерцової телекомунікаційної системи. При цьому необхідним і доцільним є дослідження особливостей поширення терагерцових хвиль в атмосфері в широкому діапазоні частот для подальшого використання отриманих результатів при проектуванні ефективних надширококомунікаційних систем.

### 1.1. Особливості поширення терагерцових хвиль в атмосфері

Проведений авторами аналіз показав, що в діапазоні частот 30-300 ГГц з відомих типів завмирань (рефракційні завмирання внаслідок екрануючого впливу перешкод, рефракційні завмирання інтерференційного типу, інтерференційні завмирання внаслідок відбиття від неоднорідностей шарів тропосфери, завмирання внаслідок екрануючого впливу неоднорідностей шарів атмосфери, завмирання внаслідок впливу діаграм спрямованості антен (для терагерцового діапазону – це неточність налаштування антен кореспондуючих станцій, 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 атмосферними гідрометеорами;

- завмирання внаслідок поглинання енергії радіосигналу в газах (в першу чергу парах води та молекулярному кисні);

- завмирання внаслідок впливу діаграм спрямованості антен, обумовлених неточністю налаштування антен станцій, що кореспондують.

Робота радіорелейних ліній на таких високих частотах (особливо в терагерцовому діапазоні) через високу спрямованість (менше 1°) 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 1,64 м на частоті 140 ГГц і не перевищуватиме 1,12 м 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 [9].

**1.2. Затухання терагерцових хвиль внаслідок поглинання радіосигналу в газах**

Затухання в атмосфері терагерцових хвиль до частот 300 ГГц виникає здебільшого внаслідок присутності в повітрі парів кисню та води. Інші газиносять незначний внесок в величину затухання терагерцових хвиль. На рис. 1.2 зображено результати дослідження залежності величини затухання радіохвиль від частоти, проведене 1996 року Міжнародним союзом елекрозв'язку (далі ІТУ) при нормальних параметрах атмосфери (температура 15 С°, тиск 101,3 кПа та густині водяного пару 7,5 г/м³) в безпосередній близькості від Землі. Одна крива

досліджувала вплив кисню (крива O<sub>2</sub> – сухе повітря), інша – вплив парів води. Результати показали, що піки затухання внаслідок резонансної взаємодії радіохвилі з молекулою кисню утворилися в смузі частот 50-70 ГГц з максимумом на частоті 60 ГГц та на частоті 118 ГГц. Піки затухання внаслідок взаємодії електричних моментів води та радіохвилі утворилися на частоті 22,2 ГГц та на частоті 183 ГГц. На інших частотах спостерігалися менші величини затухання, тому діапазони між піками і назвали радіовікнами. Іншими словами, вибираючи частоти, що знаходяться у радіовікні, можна суттєво зменшити вплив параметрів атмосфери на радіолінію.

**1.3. Затухання терагерцових хвиль внаслідок послаблення радіосигналу гідрометеорами**

Гідрометеори (атмосферні опади) – це вода в рідкому чи твердому стані, що випадає з хмар чи безпосередньо з повітря на земну поверхню та предмети. З хмар випадають: дощ, мряка, мокрий сніг, крупа, град, льодяний дощ. З повітря виділяються: роса, рідкий наліт, іній, твердий наліт, паморозь.

Погонне затухання у дощі  $\gamma_d$  (дБ/км) визначається інтенсивністю дощу R (мм/час) і розраховується за наступною формулою:

$$\gamma_d = aR^b \tag{1}$$

Коефіцієнти а та b залежать від розподілу розмірів крапель води. На рис. 1.3 зображено частотні характеристики затухання для дощу з різними інтенсивностями дощу з різними законами розподілу крапель води. По осі x відкладена частота, по осі

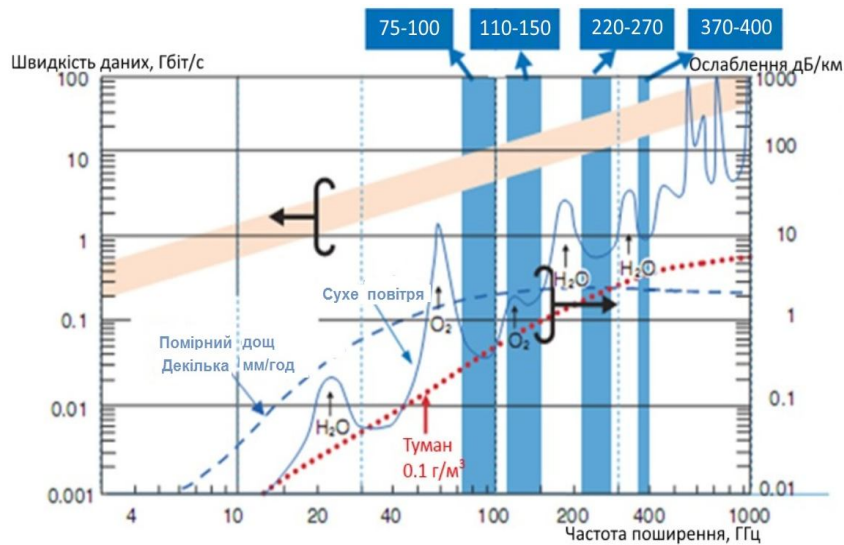


Рис. 1.2. Залежність величини затухання від частоти з врахуванням впливу дощу

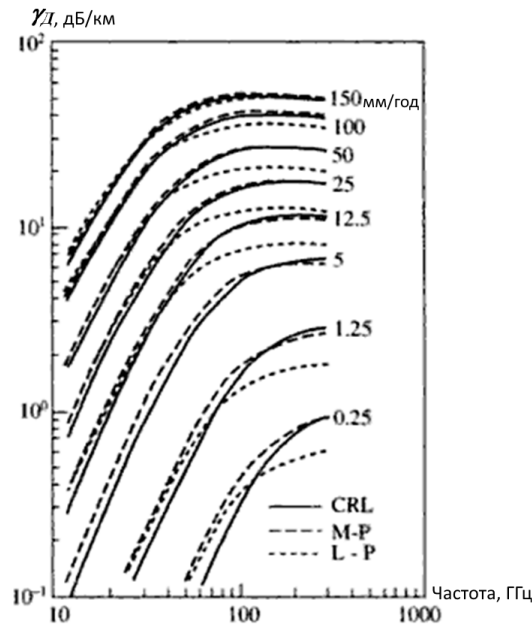


Рис. 1.3. Частотні характеристики затухання в залежності від закону розподілу крапель води в дощі: CRL – модель, яка заснована на спостереженні затухання терагерцових хвиль в атмосфері, M-P – модель Маршала-Палмера, L-P – модель Ло – Парсона

у – коефіцієнт затухання. Параметром залежності виступає інтенсивність дощу. Представлені моделі більш докладно розглянуто в рекомендації P.838 ITU-R.

Проаналізувавши залежності на рис. 1.3 можна зробити логічний висновок, що при збільшенні частоти терагерцових хвиль, затухання в дощі також монотонно збільшується, досягаючи десятків децибел на кілометр.

Результати обчислень коефіцієнтів ослаблення у дощах різної інтенсивності (2,5 мм/год. – слабкий дощ; 12,5 мм/год. – помірний дощ; 50 мм/год. – зливи) при температурі 20°C, які зроблені на основі запропонованої нової функції розподілу, що враховує наявність дрібних дощових крапель, і експериментальні дані з джерел представлені в таблиці 1.1.

Затухання терагерцових хвиль в сухому снігу є малим. У декілька разів зростає величина затухання в мокрому снігу або дощі тієї ж інтенсивності. Для порівняння досліди показали, що для частоти 88 ГГц на відстані 1,4 км затухання в сухому снігу склало лише 1 дБ, в той час коли в мокрому затухання вже дорівнювало 20 дБ. Висновок з цього наступний: внесок снігу в порівнянні з дощем тієї ж інтенсивності нехтовно малий.

У випадку з туманом, для якого характерними є краплі води діаметром 0,1 мм і менше, що сконцентровані в обмеженому просторі і розподілені по закону Райлеха, затухання терагерцових хвиль до частот 300 ГГц незначні. Значення коефіцієнтів послаблення для різних параметрів атмосфери наведено у таблиці 1.1.

#### 1.4. Висновки

Проведено аналіз характеристик траси поширення сигналу та визначення втрат сигналу в умовах радіорелейної лінії в терагерцовому діапазоні частот. На основі проведеного аналізу показано, що в діапазоні частот 30-300 ГГц з відомих типів завмирань найбільш вагомими, які слід враховувати при проектуванні, є наступні:

- завмирання внаслідок послаблення сигналу гідрометеорами;
- завмирання внаслідок поглинання радіосигналу в газах.

Показано, що робота радіорелейних ліній в терагерцовому діапазоні дозволяє практично не враховувати рефракцію та інтерференцію електромагнітних хвиль, відбитих від перешкод в зоні поширення 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 ГГц застосовуються на відносно невеликих відстанях (до 5 км), що дозволяє при плануванні прольотів уникнути потрапляння перешкод в зону прямої видимості антен та першу зону Френеля.

Виходячи із результатів проведених досліджень, можна вважати найбільш придатними і перспективними при проектуванні високошвидкісних надширокодіапазонних безпроводових телекомунікаційних систем частотні діапазони 110-150 ГГц і

Таблиця 1.1

Коефіцієнт послаблення  $\gamma$  (дБ/км) для різних параметрів атмосфери

Вид атмосфери	Частота радіосигналу, ГГц							
	30	60	90	120	140	165	250	300
1. Дощ слабкий (1 ÷ 5 мм/год)	0,9	2,1	3,4	4,7	5,4	7,1	9,8	14,3
2. Дощ помірний (5 ÷ 20 мм/год)	3,5	8,0	9,5	13,2	15,1	18,3	27,5	33,6
3. Дощ сильний (20 ÷ 40 мм/год)	7,0	14,0	15,2	16,3	17,0	20,2	30,5	42,3
4. Дощ зливовий (40 ÷ 100 мм/ год)	17,0	28,0	30,6	33,3	35,0	38,7	45,0	53,2
5. Сухий сніг (10 мм/ год)	0,06	0,13	0,21	0,28	0,32	0,41	0,59	0,74
6. Мокрий сніг (10 мм/ год)	1,7	4,9	7,7	10,7	12,4	15,3	22,8	28,7
7. Хмари потужні купчасті (1,2 г/м <sup>3</sup> )	3,5	8,0	9,5	12,9	15,1	18,9	27,5	33,2
8. Газ (кисень)	-	15,0	0,05	1,8	0,5	0,02	0,02	0,03
9. Газ (водяна пара)	0,07	0,1	0,2	0,5	0,8	2	2,5	5,5

220-270 ГГц, де можна використовувати великі смуги частот шириною 40-50 ГГц для суттєвого збільшення інформаційної ємності, підвищення скритності та захисту від виявлення і несанкціонованого доступу інформації, що передається.

## 2. Реалізація концепції створення програмно-визначених радіосистем терагерцового діапазону з використанням технології Wi-Fi

Серед сучасних тенденцій розвитку інфокомунікацій переважають такі напрямки, як 5G, когнітивні мережі, біг-дейта, оптичні мережі, грін-терагерцового діапазону, розподільчі транспортні мережі мобільного зв'язку тощо.

Побудова значної частки пристроїв безпроводового зв'язку в межах цих тенденцій здійснюється на основі концепції SDR—Software-defined radio. Відомими на сьогоднішній день прикладами реалізації концепції SDR є пристрої для мереж GSM, UMTS, Wi-Fi, WiMAX тощо [10].

Задачею будь-якої телекомунікаційної системи є досягнення, в рамках виділених ресурсів каналу зв'язку, високої швидкості та необхідної достовірності передачі інформації. Одним з відомих засобів реалізації цього завдання є звернення до багатопозиційних видів модуляції та завадостійкого кодування. Комбінацію певного виду багатопозиційної модуляції та завадостійкого кодування із визначеними параметрами завадостійкості називають сигнально-ковою конструкцією (СКК) [11].

Якщо пристрій зв'язку обирає відповідну структуру СКК автоматично за відповідною програмою та алгоритмом, слід вважати такий пристрій відповідним концепції SDR.

Дослідження доцільних для цього критеріїв та алгоритмів і реалізації концепції створення програмно-визначених радіосистем терагерцового діапазону на основі технології Wi-Fi є актуальною науково-технічною задачею.

### 2.1. Приклад реалізації концепції SDR у гігабітному модемі телекомунікаційної системи терагерцового діапазону

З метою реалізації концепції SDR у телекомунікаційній системі терагерцового діапазону на основі технології Wi-Fi створений гігабітний модем G1, який може бути використаний для з'єднання територіально рознесених сегментів мереж Ethernet 10/100/1000-BaseTx. Функціональна схема гігабітного модему G1 представлена на рис. 2.1 [12, 13].

Основні складові гігабітного модему – каналні маршрутизатори 1 і 2, а також груповий маршрутизатор. Вхідний потік автоматично розподіляється на всі канали і далі обробляється для формування радіочастотного спектру в смузі пропускання радіорелейного каналу. Гігабітний модем G1 (рис. 2.2) виконаний у металевому корпусі, дозволяє встановлювати його в стійку RackMount або використовувати настільне розташування.

Основні технічні характеристики модему приведені в таблицях 2.1 та 2.2.

Результати тестування швидкісних характеристик гігабітного модему G1 приведені в таблиці 2.2.

Управління кожним з двох каналних маршрутизаторів, здійснюється за допомогою утиліти Winbox – роз'єми X3, X5 "CONTROL MODEM". Також можливе тестування швидкості передачі інформації за допомогою утиліти Winbox (рис. 2.3).



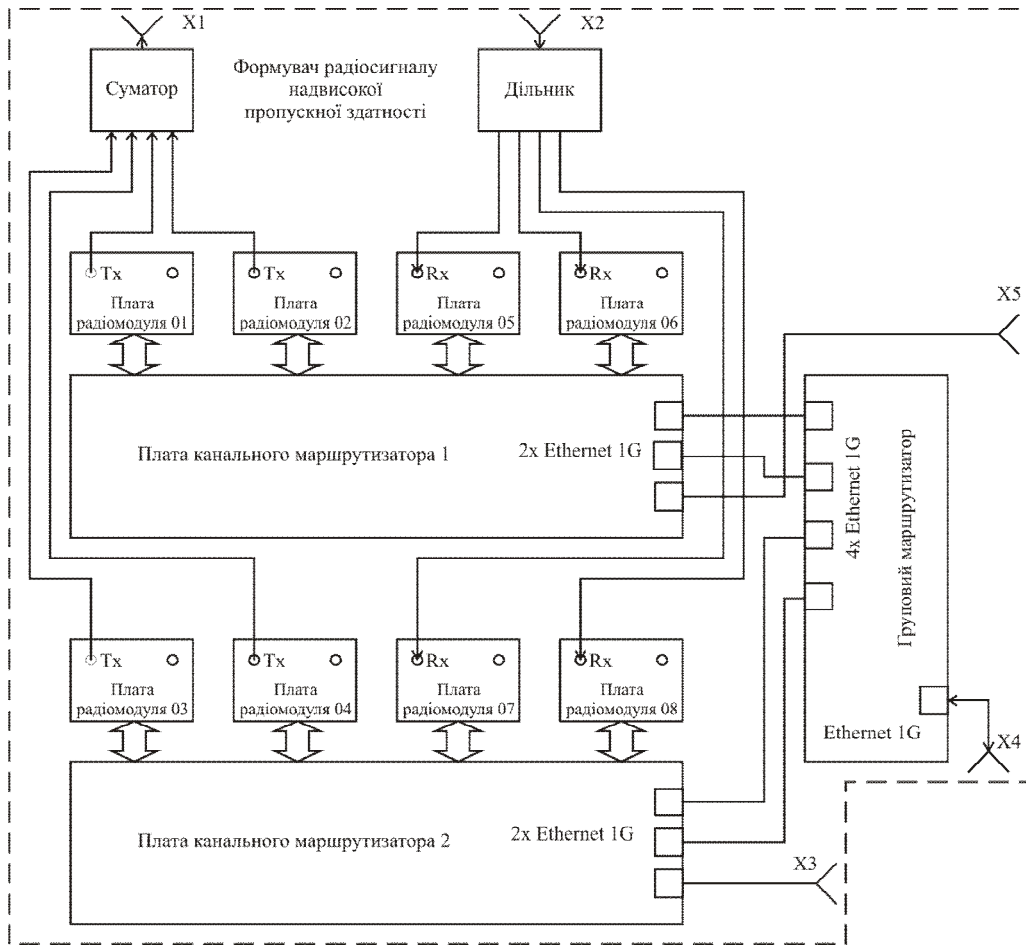


Рис. 2.1. Функціональна схема гігабітного модему

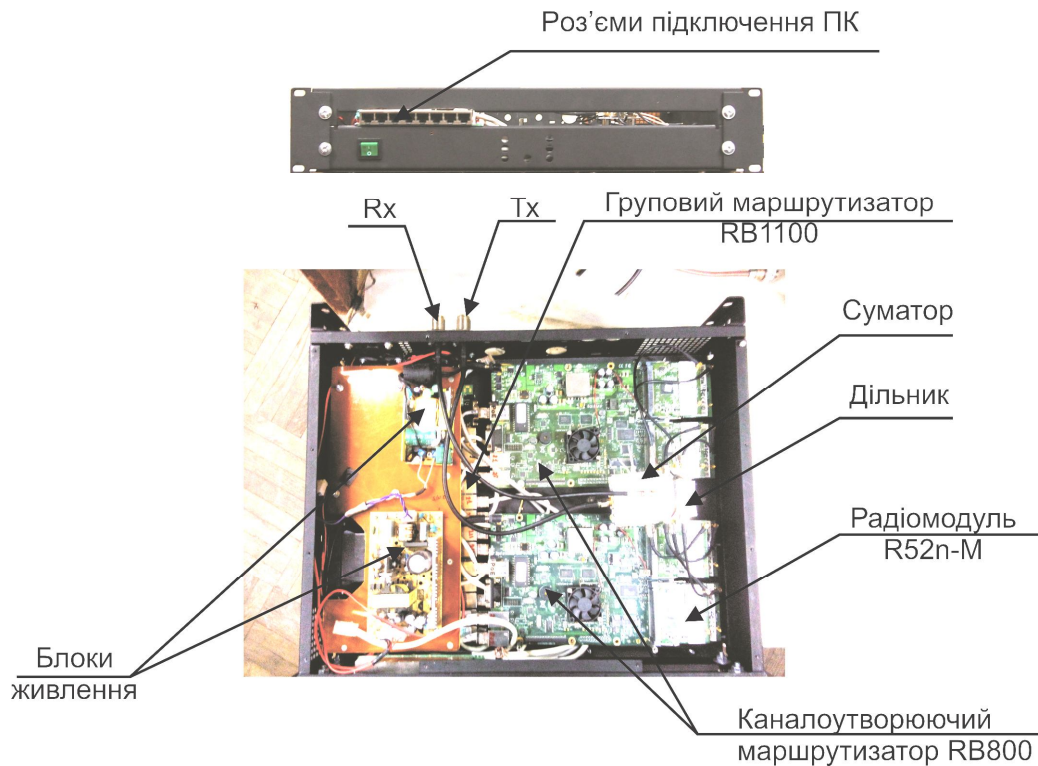


Рис. 2.2. Фото лабораторного зразка гігабітного модему G1

Таблиця 2.1

## Загальні технічні характеристики гігабітного модему

Найменування	Значення
Напруга живлення, В	220
Інтерфейс управління режимами модуляції-демодуляції	Ethernet 10/100 Base-Tx, роз'єм RJ-45
Інтерфейс управління маршрутизатором	Ethernet 10/100/1000 Base-T, роз'єм RJ-45
Інтерфейс даних	Ethernet 10/100/1000 Base-T, роз'єм RJ-45
Інтерфейс тракту ПЧ	Коаксіальний, тракт 50 Ом, роз'єми N-type
Центральна частота тракту ПЧ, МГц	2400
Ширина смуги частот, займана модульованим сигналом в режимі максимальної пропускної спроможності, МГц, не більше	40
Вид модуляції	QAM-64
Потужність сигналу ПЧ на виході модулятора, дБм	0 ... -3
Чутливість по входу ПЧ демодулятора, дБм	-70
Максимально допустимий рівень сигналу ПЧ на вході демодулятора, дБм, не більше	-45
Маса модему, кг, не більше	4

Таблиця 2.2

## Результати тестування швидкісних характеристик гігабітного модему G1

Відповідний маршрутизатор	Кількість каналів dual stream	Режим дуплекса	Канальна швидкість в одному напрямі (Мбіт/с)	Загальна канальна швидкість в двох напрямках (Мбіт/с)	Практична швидкість прийому/передачі (Мбіт/с)	Загальна практична швидкість (Мбіт/с)
rb450g	1	RX	150		116	
rb450g	1	TX	150		116	
rb450g	1	FD	150	300	85	170
rb450g	2	FD	300	600	155	310
rb750	2	FD	300	600	155	310
rb750	2	HD	300		195	
rb450g	2	RX	300		215	
rb450g	2	TX	300		225	
rb450g	4	FD	600	1200	335	670
rb750	4	FD	600	1200	335	670
rb450g	4	HD	600		415	
rb750	4	HD	600		370	

Сигнал проміжної частоти каналних маршрутизаторів надходить на вихід через роз'єм X1 (рис. 2.1). Вихід сигналу проміжної частоти каналних маршрутизаторів – роз'єм X1 (тип «N») з'єднується безпосередньо із входом проміжної частоти передавального блоку терагерцового діапазону. Аналогічно налаштований тракт входу сигналу проміжної частоти від приймального блоку терагерцового діапазону (роз'єм X2). Для з'єднання з мережею Ethernet, а також керуванням груповим маршрутизатором використовувався як прямий, так і перехресний UTP кабель-роз'єм X4. Для забезпечення кана-

льної швидкості 1,2 Гбіт/с в радіорелейній лінії терагерцового діапазону використано 8 прийомопередавачів Wi-Fi стандарту 802.11n в діапазоні 2,1-2,7 ГГц в смузі по 40 МГц кожен, що мають канальну швидкість до 150 Мбіт/с (рис. 2.4 та 2.5).

У модемі застосовується режим «dual stream» на обладнанні Mikrotik, що використовує для створення одного дуплексного радіоканалу два приймачі R52n-M, один на прийом, інший на передачу. Для досягнення сумарної канальної швидкості 1,2 Гбіт/с пропонується чотири дуплексних канали по 150 Мбіт/с у кожному напрямку. При формуванні



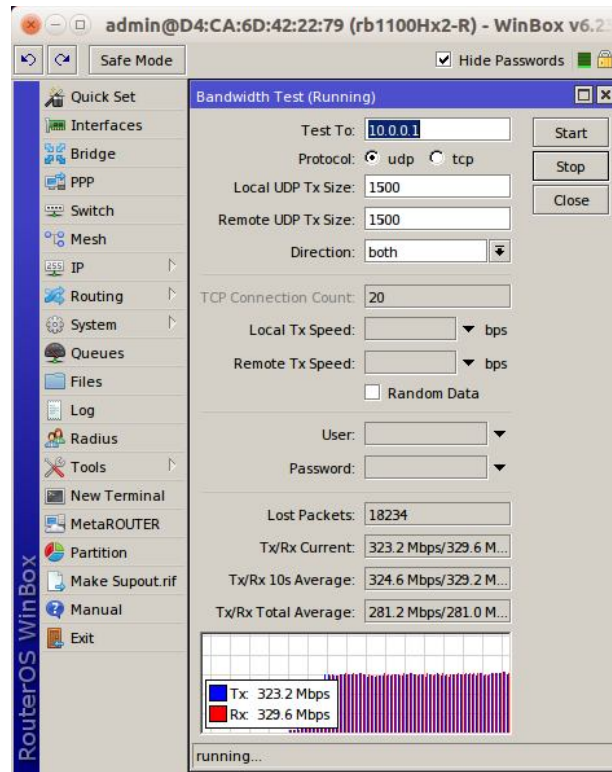


Рис. 2.3. Результат тестування швидкості 4-х каналного дуплексного каналу зв'язку

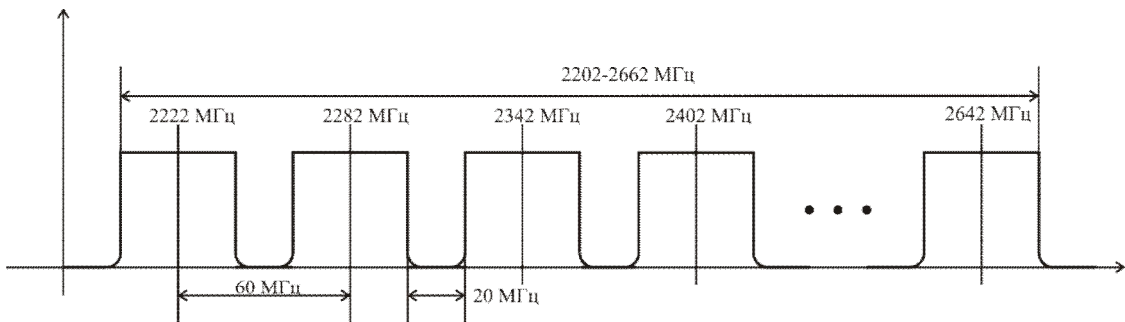


Рис. 2.4. Частотний план гігабітного модему

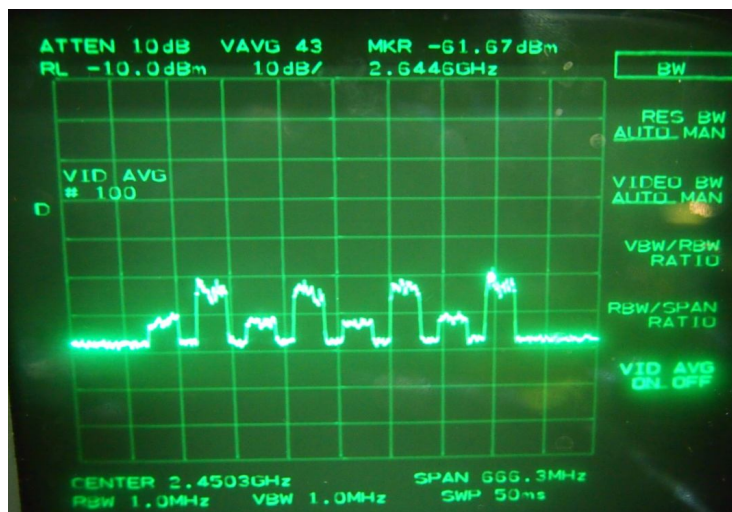


Рис. 2.5. Амплітудно-частотна характеристика 4-х каналного дуплексного каналу зв'язку

dual nstream каналів, що необхідно для організації дуплексних каналів та підвищення ефективності кожного каналу, використовуються маршрутизатори Mikrotik RB800 з чотирма mini-PCI слотами із встановленими прийомопередавачами Mikrotik R52n-M. Доступ до кожного радіоканалу забезпечується окремим інтерфейсом Ethernet маршрутизатора RB800.

Для об'єднання всіх каналів використовується маршрутизатор Mikrotik RB1100Hx2, який надає єдиний інтерфейс для зовнішнього підключення. Дана конфігурація модему забезпечує високу продуктивність і заявлені характеристики, маючи при цьому відносно низьку вартість побудови гігабітного модему. Також є можливим збільшення каналної швидкості гігабітного модему до 1,2 Гбіт/с у кожному напрямку у разі подвоєння кількості комплектів маршрутизаторів RB800 і прийомопередавачів Mikrotik R52n-M.

Для видачі назовні агрегованого каналу з швидкістю 600 Мбіт/с необхідно замінити груповий маршрутизатор RB750 на маршрутизатор з пропускною здатністю в 1 Гбіт/с і більше, наприклад RB450G або RB1100Hx2, що передбачено конструкцією модему.

На основі гігабітного модему G1 із встановленими прийомопередавачами Mikrotik R52n-M та розробленого передавального та приймального тракту з використанням технології Wi-Fi запропоновано гігабітну телекомунікаційну систему на основі технології Wi-Fi в діапазоні 130-134 ГГц з досягненням каналної швидкості до 1,2 Гбіт/с [14].

## 2.2. Висновки

1. Розглянуто принципи формування сигнально-кодових конструкцій (СКК) для сучасних інфокомунікаційних систем. Запропоновано способи і нові технічні рішення для вибору виду сигнальної конструкції з метою досягнення найкращої пропускної здатності та продуктивності в каналі зв'язку безпроводових систем передачі, де показником є відношення рівня сигналу до рівня шуму на вході приймача.

2. Показано вигравш у використанні ресурсів каналу зв'язку при використанні СКК на основі сигнальних конструкцій високого порядку та ефективних блокових завадостійких кодів LDPC. Розглянуто СКК та показники і критерії, що рекомендуються в стандартах 802.11a/n для вибору СКК, а саме – рівень сигналу на вході приймача. Запропоновано показник ефективності використання ресурсів для вибору СКК, а саме – інформаційної ефективності, що показує ефективність використання таких ресурсів каналу зв'язку, як енергетичний, частотний та часовий.

3. Проведено тестування радіолінії зв'язку протяжністю 1,7 км на основі обладнання MikroTik і визначено СКК, що були автоматично вибрані SDR для передачі інформації між прийомо-передавачами. Визначено, що за рівнем сигналу на вході приймача, видами СКК та отриманої швидкості передачі даних ПВР в обладнанні MikroTik повністю відповідає рекомендаціям стандартів 802.11a/n.

4. Прикладом технічного рішення, яке розкриває значний потенціал протоколу 802.11n, є запропонована телекомунікаційна система терагерцового діапазону. Завдяки переходу в терагерцовий діапазон від 100 ГГц і вище, стало можливим використовувати широку смугу частот для передачі інформації порядку сотень МГц та ГГц, а в результаті – досягти надвисоких швидкостей передачі.

## 3. Проектування передавального і приймального радіотрактів радіорелейних систем терагерцового діапазону

### 3.1. Структурна схема передавального і приймального тракту

Ключовими елементами радіорелейної системи зв'язку терагерцового діапазону є радіоелектронні приймальнопередавальні 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. 3.1) і приймальний (рис. 3.2) тракту складають аналогову (лінійну) частину радіорелейної системи [15, 16, 17, 18]. Ці тракту 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.

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. 3.2 і складається з наступних вузлів: приймальна антена; вхідний малощумний підсилювач (МШП) (при можливості придбання компонентів); смугопропускний фільтр; змішувач; гетеродин; підси-

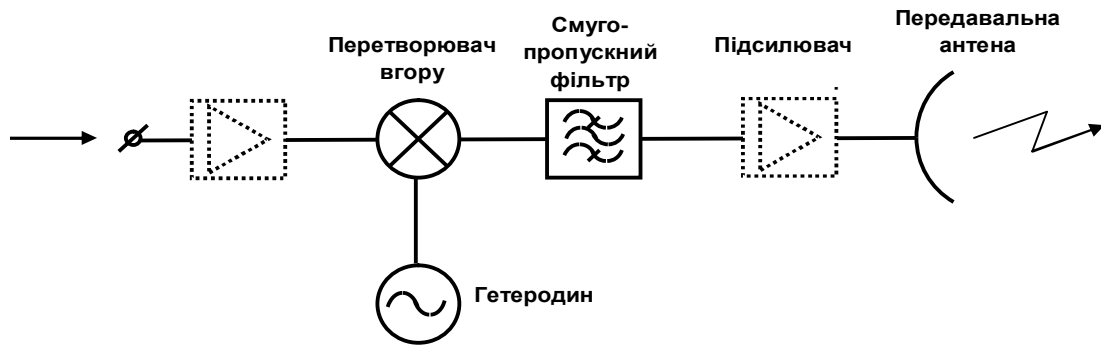


Рис. 3.1. Структурна схема передавального тракту

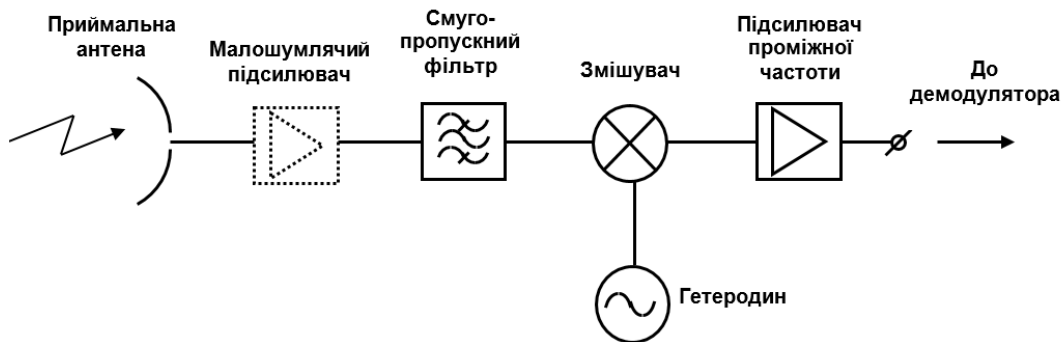


Рис. 3.2. Структурна схема приймального тракту

ловач проміжної частоти. Реалізація малешумливого підсилювача на вході приймального тракту становить таку ж проблему, як і з підсилювачем потужності на виході передавача.

### 3.2. Розробка функціональних вузлів приймального і передавального тракту

#### 3.2.1. 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 Шоттки 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 Шоттки. Таке включення формує N-видну результуючу вольтам-

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. 3.3.

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

Хвилеводний тракт з перетином каналу 1,6x0,8мм є частиною ланцюга височастотного сигналу. Цей хвилеводний канал є позамежним для частот гетеродина і ПЧ.

Сигнал гетеродина надходить на діоди через хвилеводний канал перетином 3,6x1,8 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 0,8x0,4 мм, що запобігає виникненню вищих хвилеводних мод. Вихідний ФНЧ в ланцюзі ПЧ з частотою зрізу 30 ГГц перешкоджає

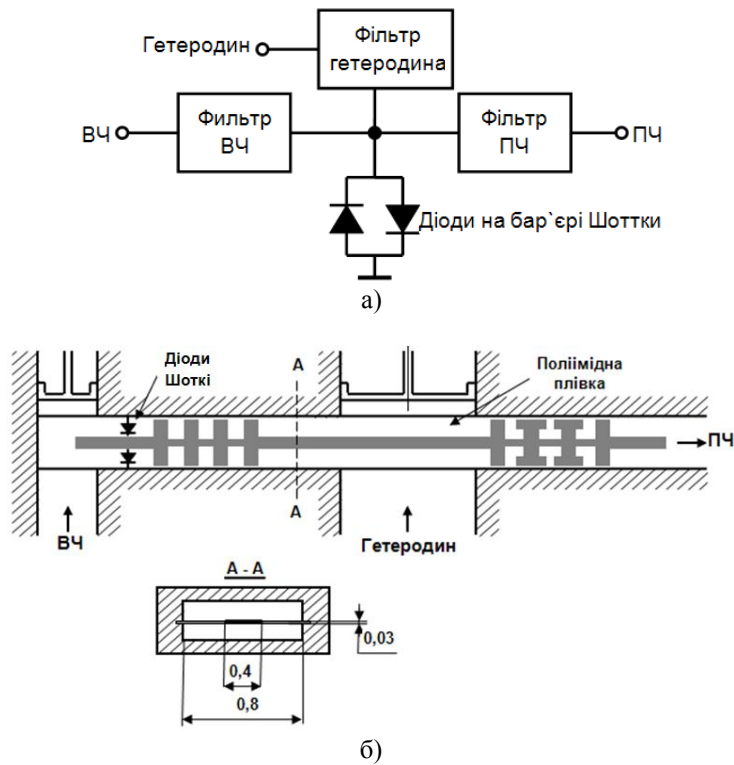


Рис. 3.3. Структурна (а) і конструктивна (б) схеми перетворювача

проникненню сигналів гетеродина і ВЧ в тракт проміжної частоти. Короткозамикаючі поршні в хвилеводних каналах дозволяють здійснювати підстроювання відповідних ланцюгів перетворювачів.

На рис. 3.4 показана конструкція перетворювача частоти (змішувача) зі знятою верхньою частиною.

Діоди з балочними виводами включені смужкову лінію за допомогою електропровідного клею. На фото (рис. 3.5) відсутні короткозамикаючі поршні. 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 пере-

вищувала 15 мВт. Вимірне значення втрат перетворення становить – 11 дБ, що відповідає найкращим досягненням зарубіжних аналогів.

### 3.2.2. Високочастотні підсилювачі

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

Проблеми реалізації таких підсилювачів в терагерцовому діапазоні обумовлені високими робочими частотами. Успіхи напівпровідникової технології в останні роки і створення відповідної елементної

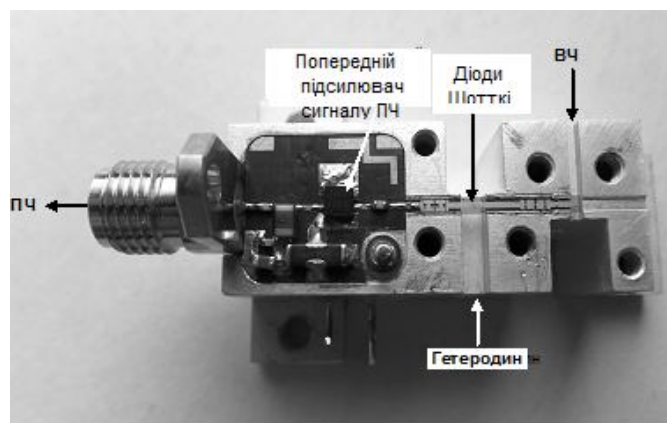


Рис. 3.4. Конструкція перетворювача частоти



Рис. 3.5. Зовнішній вид підсилювача 3 мм діапазону довжин хвиль

бази відкривають перспективи для реалізації високочастотних якісних підсилювачів. Створений малощумний підсилювач в 3 мм діапазоні довжин хвиль реалізовано на монолітній PIn мікросхемі в частотному діапазоні 87...100 ГГц при забезпеченні посилення сигналу на 27дБ і коефіцієнта шуму 5,5 дБ. Зовнішній вигляд цього підсилювача наведено на рис. 3.5.

Існують лабораторні розробки ПП і МШП до 300 ГГц. У найближчі роки очікується поява комерційних підсилюючих мікросхем у всьому міліметровому діапазоні, що стане реальною базою для побудови підсилювачів в терагерцового діапазоні. Використання цих підсилювачів в схемі прийомопередача забезпечить надійну і якісну передачу інформаційного сигналу на великих відстанях зв'язку.

### 3.2.3. Гетеродин

Гетеродин виявляється найбільш складним пристроєм при розробці цифрових телекомунікаційних систем в терагерцовому діапазоні частот. Це пояснюється як труднощами досягнення достатньо-

го рівня потужності на досить високих частотах, так і необхідністю забезпечення високої стабільності гетеродина і низького рівня його фазових шумів. Субгармонічна схема частотних перетворювачів дозволяє знизити необхідну частоту гетеродина, що в деякій мірі полегшує розробку гетеродинного ланцюга, проте зберігаються жорсткі вимоги до стабільності гетеродина і рівня фазових шумів, особливо в цифрових системах передачі даних зі складними видами модуляції.

Для цифрової радіорелейної системи діапазону частот 130...134 ГГц було спроектовано ланцюг гетеродина на частоту 64,8 ГГц. Побудова гетеродина заснована на використанні високостабільного задаючого кварцового генератора з наступним ланцюгом помножуючих і підсилюючих каскадів. Рівень підсилення встановлювався таким, щоб забезпечити оптимальний режим роботи помножуючих каскадів і необхідну потужність на виході гетеродина.

Даний принцип побудови гетеродина набагато дешевше розробки частотного синтезатора, а фільтрація сигналу після кожного помножуючого каскаду усуває наявність паразитних гармонік і комбінаційних частот. Структурна схема ланцюга гетеродина показана на рис. 3.6.

В якості задаючого був використаний кварцовий генератор на 100 МГц типу ССНD-950X-25-100 фірми Crystek Crystals з рівнем фазових шумів не вище -143 дБ при відбудові від центральної частоти на 1 кГц. Параметри генератора, що задає в основному і визначають стабільність частоти і фазові шуми гетеродина.

Особливість даної схеми полягає в тому, що виконаний на транзисторі перший помножувальний каскад дозволяє відразу використовувати дев'ять гармоніку частоти задаючого генератора, а саме з 900 МГц. Сигнал з цією частотою підсилюється на 18 дБ мікросхемою SPF5043Z і селектується фільт-

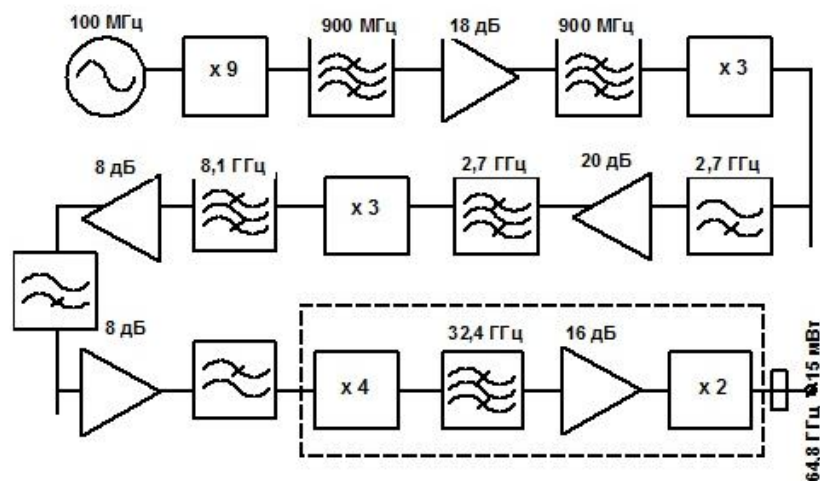


Рис. 3.6. Структурна схема гетеродинного ланцюга



рами на поверхневих акустичних хвилях (ПАХ) типу FAR-F5KA-897M50.

Подальше підвищення частоти до 8,1 ГГц здійснюється двома каскадами потруювачів. Перший каскад по відношенню до вихідної 2,7 ГГц побудований на транзисторі, а другий з вихідною частотою 8,1 ГГц на монолітній мікросхемі HMC916LP3. На частоті 2,7 ГГц здійснюється підсилення сигналу на 20 дБ за допомогою мікросхеми TQR3M9008 і його фільтрація за допомогою фільтрів верхніх і нижніх частот на зосереджених елементах, а також СПФ на виході підсилювача. Смугопропускний фільтр виконано на напівхвильових резонаторах на підкладці з дюрюїда (RT/Duroid 5880) товщиною 0,25 мм.

На частоті 8,1 ГГц також здійснюється посилення сигналу двома каскадами мікросхем NLB300 і його фільтрація за допомогою ФНЧ і фільтра верхньої частоти (ФВЧ) на зосереджених елементах, а також СПФ, що виконано на напівхвильових елементах на підкладці з дюрюїда товщиною 0,125 мм. Результати розрахунку цього фільтра показані на рис. 3.7. Монтаж елементів описаної частини ланцюга гетеродина показано на рис. 3.8. На протилежному боці корпусу змонтований задаючий кварцовий генератор зі схемами живлення (рис. 3.9).

Після кожного помножуючого каскаду перевірялася якість сигналу на достатній рівень потужності, відсутність прилеглих паразитних гармонік і низький рівень фазових шумів. Для прикладу на рис. 3.10 представлений вимірний спектр сигналу на виході помножуючого модуля в області частоти 8,1 ГГц.

З рис. 3.10 видно, що поблизу вихідного сигналу з частотою 8,1 ГГц відсутні помітні паразитні гармоніки задаючого генератора, а друга гармоніка вихідного сигналу з частотою 16,2 ГГц ослаблена на більш ніж на 40 дБ. Вихідна потужність становить 7 мВт, а рівень фазових шумів не перевищує -107 дБ при відбудові від центральної частоти на 100 кГц і 94 дБ при відбудові на 10кГц.

Сигнал з частотою 8,1 ГГц і потужністю 11 дБм подається на вихідні більш високочастотні каскади ланцюга гетеродина, змонтовані в окремому корпусі, який, в свою чергу, вбудований в загальний корпус гетеродина. Конструкція вихідної частини гетеродина показана на рис. 3.11.

Конструкція містить помножувач частоти на чотири, СПФ на частоту 32,4 ГГц, підсилювальний каскад на цю частоту, вихідний подвоювач частоти і перехід з мікросмужкової лінії на хвилеводний канал перетином 7,2x3,4 мм. Помножувачі і підсилювач побудовані на основі безкорпусних монолітних мікросхем. В якості помножувача на чотири застосована мікросхема CHX2092, підсилювач виконаний

на базі мікросхеми CHA3093, а вихідний подвоювач побудовано на мікросхемі CHX2192.

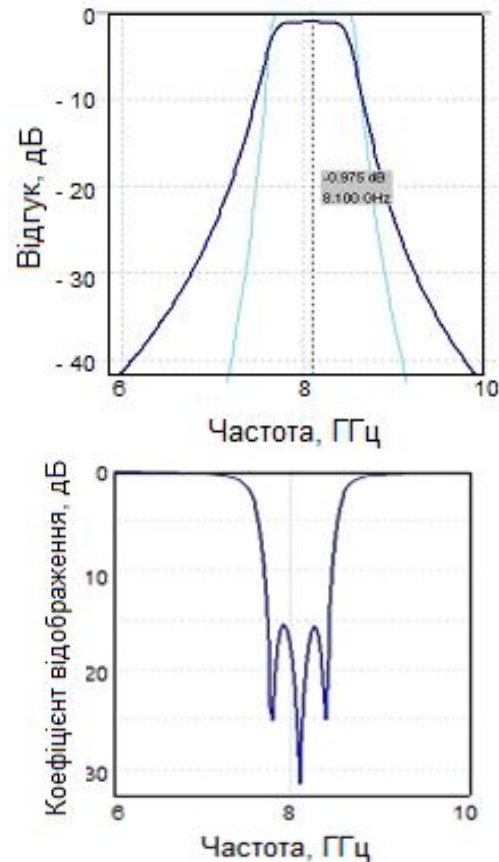


Рис. 3.7. Розраховані АЧХ і КСНН фільтра на 8,1 ГГц

Монолітні мікросхеми помножувачів і підсилювача сигналу включені в мікросмужкові лінії на підкладці з дюрюїду товщиною 0,125 мм. На цій же підкладці виконано хвилеводно-мікросмужковий перехід.

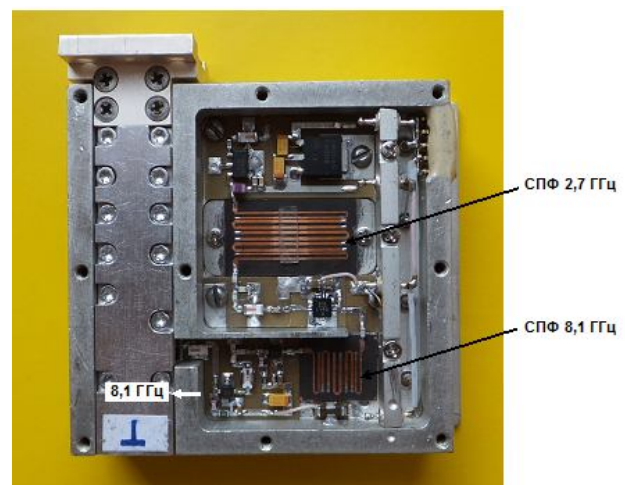


Рис. 3.8. Монтаж елементів вхідної частини помножувального ланцюга в корпусі гетеродина

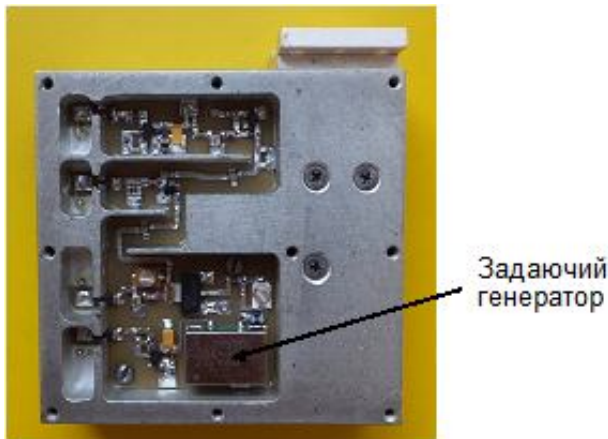


Рис. 3.9. Задающий генератор змонтований на зворотному боці корпусу гетеродина

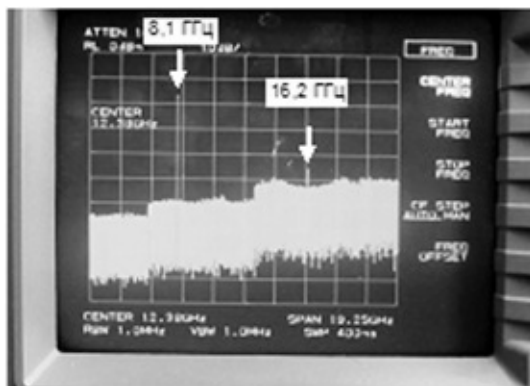


Рис. 3.10. Спектр сигналу гетеродинного ланцюга в області частоти 8,1ГГц (розмах спектра на екрані 19 ГГц)

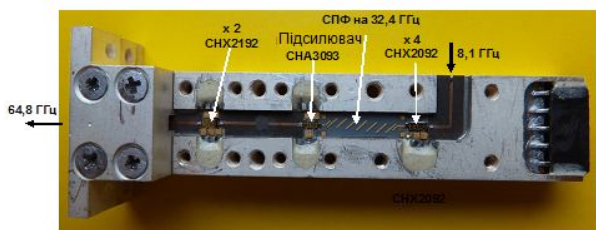


Рис. 3.11. Конструкція вихідних каскадів гетеродина

Семирезонаторний мікросмужковий СПФ розроблений на полікоровій підкладці товщиною 0,2 мм. Для кращого узгодження фільтра з мікросхемами використані фіксовані поглинаючі 3 дБ атенуатори у вигляді чіпів, включених з двох сторін СПФ. Виміряна АЧХ фільтра наведена на рис. 3.12.

Зовнішній вигляд гетеродина в загальному корпусі показано на рис. 3.13.

Виміряні значення вихідних потужностей гетеродина для трактів прийому і передачі перевищували 15 мВт, що цілком достатньо для нормальної роботи частотних перетворювачів приймального і передавального трактів.

Таким чином, в результаті проведених досліджень спроектовано, виготовлено та випробувано гетеродин, який за своїми показниками, зокрема, по вихідній потужності, не поступається закордонним аналогам.

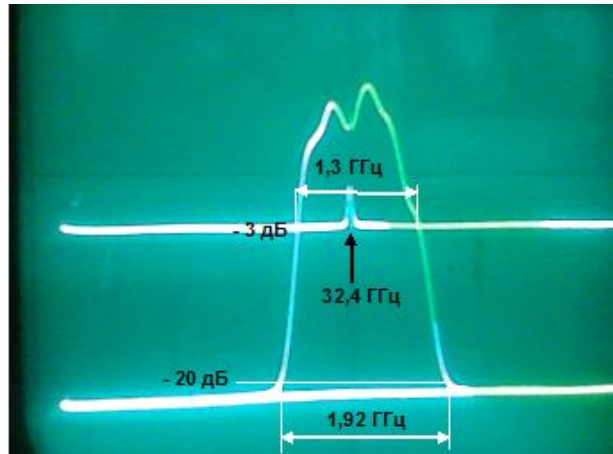


Рис. 3.12. Частотна характеристика фільтра на частоту 32,4 ГГц

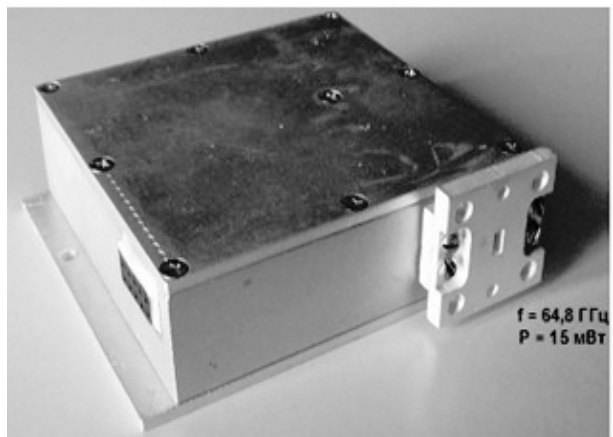


Рис. 3.13. Зовнішній вид гетеродина

### 3.2.4. Підсилювач проміжної частоти

Схема ППЧ включає в себе попередній підсилювач, побудований на мікросхемі TQR3M9037, а також головний підсилювач, розроблений на базі транзистора FPD6836P70 і мікросхеми НМС313. Крім підсилюючих мікросхем схема ППЧ містить монолітні керамічні фільтри верхніх і нижніх частот для формування необхідної смуги пропускання тракту проміжної частоти, резистивний атенуатор для узгодження вихідного фільтра з передавальною лінією, а також вторинні джерела живлення, формуючі стабілізовану напругу для мікросхем. Попередній підсилювач конструктивно інтегрований зі змішувачем, щоб мінімізувати втрати слабого сигналу перед підсиленням. Шумова температура цього підсилювача складає близько 50 К і в значній мірі визна-

чає чутливість всього приймача. Саме тут здійснюється головне посилення сигналу. Повний коефіцієнт підсилення ППЧ становить 47 дБ.

### 3.2.5 Високочастотний смугопропускний фільтр

Високочастотні СПФ на виході передавального і вході приймального трактів повинні забезпечити розв'язку сигналів даних трактів, а також достатнє придушення дзеркальних каналів і сигналів гетеродинів. Мала величина проміжної частоти ( $f_{пч}=2...2,5$  ГГц) обумовлює жорсткі вимоги до високочастотних СПФ за вибірковістю.

Найбільш прийнятними в 2 мм діапазоні довжин хвиль з точки зору малих втрат і високої вибіркової є хвильові septum-фільтри. Саме такий фільтр був розроблений в рамках даного проекту.

Конструктивно фільтр являє собою тонку металеву пластину, вставлену в Е площину хвильового каналу. Пластина містить резонансні вікна, зв'язок між якими визначається шириною розділяючих їх смужок. Був обраний шестирезонаторний фільтр для забезпечення достатньої частотної вибіркової. Розраховані розміри пластинчастої вставки з резонансними вікнами наведені на рис. 3.14. На рис. 3.15 наведено розраховані S-параметри шестирезонаторного СПФ, а також показана вимірjana частотна характеристика виготовленого фільтру.

Отримані експериментальні результати показують, що фільтр задовольняє вимогам вибіркової, з метою забезпечення достатнього (на 20 дБ) придушення дзеркального каналу і другої гармоніки сигналу гетеродина (129,6 ГГц).

Втрати фільтру в терагервовому частотному діапазоні передавача не перевищують 4 дБ, що є

задовільним результатом для таких високих частот. Нерівномірність АЧХ по плоскій частині не перевищує 2 дБ.



Рис. 3.14. Конфігурація і розміри металеві вставки, що монтується в Е-площині хвильового каналу

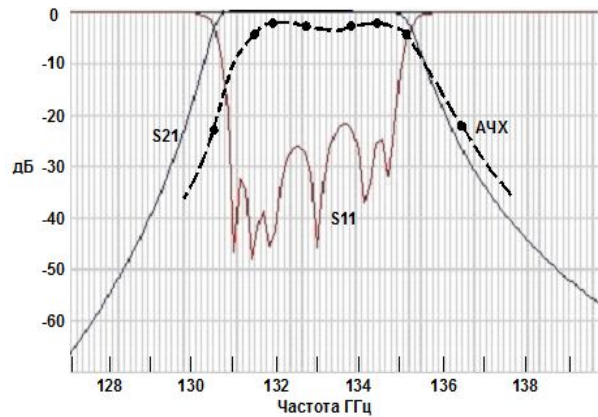


Рис. 3.15. Розраховані S-параметри і вимірjana АЧХ septum-фільтру

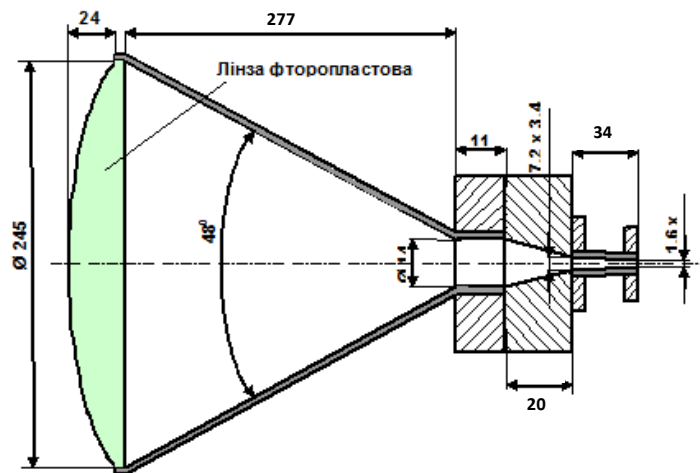


Рис. 3.16. Конструкція рупорної антени

### 3.2.6. Конічна рупорна антена

Як в передавальному, так і в приймальному трактах була використана конічна рупорна антена з діелектричним лінзовим концентратором. Конструкція антени показана на рис. 3.16. Крім конічного рупора конструкція містить перехід з круглого хвилеводу на прямокутний з перетином 7,2x3,4мм. З'єднання антени з передавальним або прийомним трактом здійснювалося за допомогою хвилеводного переходу з хвилевода перетином 7,2x3,4 мм на хвилевод перетином 1,6x0,8 мм. Апертура антени становить 245мм. Як концентратор використана фторопластова лінза. Розрахунки дають наступні характеристики антени:

- Діапазон робочих частот 130 - 134 ГГц;
- Вхід хвилеводний канал з перетином 1,6 x 0,8 мм 2 ( $\lambda = 2$  мм);
- Коефіцієнт підсилення не менше 47 дБ;
- Ширина діаграми спрямованості не більше 0,60 град;
- КСХН входу в межах 1,15.

### Загальні висновки

Уперше в Україні створено та випробовано експериментальний зразок прийомопередавача терагерцового діапазону (130-134 ГГц), який може стати основою для побудови сучасних високошвидкісних безпроводових телекомунікаційних систем, зокрема систем цифрового радіорелейного зв'язку.

### Література

1. Радиотелекоммуникационные системы терагерцового диапазона [Текст] / М. Е. Ильченко, Т. Н. Нарытник, Б. Н. Шелковников, В. И. Христенко // *Электроника и связь*. – 2011. – № 3. – С. 205-210.
2. Kurner, T. *Towards future THz communications systems* [Text] / T. Kurner // *Terahertz Science and Technology*. – 2012. – V. 15, № 1. – P. 11–17.
3. Огляд досягнень в терагерцових комунікаційних системах [Текст] / І. М. Майборода, І. П. Стороженко, В. П. Бабенко, М. В. Кайдаш // *Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України*. – 2016. – Вип. 1 (27). – С. 45-48.
4. Narytnyk, T. *The Ways of Creation and Use of Telecommunication Systems in the Terahertz Band Transport Distribution 5G Mobile Networks* [Text] / T. Narytnyk // *2016 Third International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T)*, 2016. – P. 36–39.
5. *Terahertz range telecommunication systems* [Text] / М. Ye. Pchenko, Т. N. Narytnik, А. I. Fisun,

О. I. Belous // *Telecommunications and Radio Engineering*. – 2011. – № 70(16). – P. 1477-1487.

6. Нарытник, Т. М. *Телекомунікаційні системи терагерцового діапазону* [Текст] : монографія / Т. М. Нарытник, С. О. Кравчук. – Житомир : ФОП «Євенок О.О.», 2015. – 394 с.

7. Ильченко, М. Ю. *Цифрова радіорелейна система терагерцового діапазону з використанням наноелектронних компонентів* [Електронний ресурс] / М. Ю. Ильченко. – Режим доступу: <http://report.kpi.ua/uk/0111U002470>. – Дата звернення 21.05.2018.

8. Нарытник, Т. М. *Розробка радіолінії із гігабітною пропускною здатністю терагерцового діапазону для надвисокошвидкісних розподільчих мереж доступу* [Електронний ресурс] / Т. М. Нарытник. – Режим доступу: <http://report.kpi.ua/uk/0115U002330>. – Дата звернення 21.05.2018.

9. Mandehgar, M. *Atmosphere characterization for simulation of the two optimal wireless terahertz digital communication links* [Text] / M. Mandehgar, Y. Yang, D. Grischkowsky // *Optics Letters*. – 2013. – V. 38, № 17. – P. 3437–3440.

10. Реалізація концепції створення програмно-визначених радіосистем терагерцового діапазону на основі технології Wi-Fi [Текст] / Т. М. Нарытник, О. В. Лутчак, С. О. Осипчук, Л. О. Уривський // *Цифрові технології*. – 2015. – № 18. – С. 9-22.

11. Нарытник, Т. М. *Особенности формирования сигнально-кодовых конструкций на основе технологии Wi-Fi для построения телекоммуникационных систем терагерцового диапазона* [Текст] / Т. М. Нарытник, С. О. Осипчук, Л. О. Уривський // *Проблеми телекомунікацій*. – 2015. – № 2 (17). – С. 37-53.

12. Нарытник Т. М., Лутчак О.В. *Апаратно-програмні рішення побудови гігабітного модему для радіорелейних ліній в терагерцовому діапазоні* [Текст] / Т. М. Нарытник, О. В. Лутчак // *Цифрові технології*. – 2015. – № 18. – С. 43-53.

13. *Transmission Characteristics of 120-GHz-Band Wireless Link Using Radio-on-Fiber Technologies* [Text] / A. Hirata, H. Takahashi, R. Yamaguchi et al. // *Journal of Lightwave Technology*. – 2008. – Vol. 26, Iss. 15. – P. 2338–2344.

14. *Diffraction in mm and Sub-mm Wave Indoor Propagation Channels* [Text] / M. Jacob, S. Priebe, R. Dickhoff et al. // *IEEE Transactions On Microwave Theory And Techniques*. – 2012. – Vol. 60, № 3. – P. 833–844.

15. *Передавальний та приймальний радіотракти радіорелейних систем терагерцового діапазону* [Текст] / М. Ю. Ильченко, Т. М. Нарытник, В. М. Радзіховський, С. Є. Кузьмін, О. В. Лутчак // *Цифрові технології*. – 2015. – № 17. – С. 16-29.

16. *Проектирование передающего и приемного радиотрактов радиорелейных систем терагерцового диапазона* [Текст] / М. Е. Ильченко, Т. Н. Нарытник, В. Н. Радзіховський, С. Е. Кузьмін, А. В. Лутчак // *Електросвязь*. – 2016. – № 2. – С. 42-49.



17. *Transceiver for 130-134 GHz band and digital radiorelay system [Text] / M. Ye. Ilchenko, T. N. Narytnyk, S. Ye. Kuzmin, A. I. Fisun, O. I. Belous, V. N. Radzikhovskiy // Telecommunications and Radio Engineering. – 2013. – Vol. 72, No. 17. – P. 1623-1638.*

18. Nagatsuma, T. *Terahertz technologies: present and future [Text] / T. Nagatsuma // IEICE Electronics Express. – 2011. – Vol. 8, Iss. 14. – P. 1127-1142.*

## References

1. Il'chenko, M. E., Narytnyk, T. N., Shelkovnikov, B. N., Khristenko, V. I. Radiotelekomunikatsionnye sistemy teragertsovogo diapazona [Wireless communication systems of terahertz band]. *Elektronika i svyaz'*, 2011, no. 3, pp.205-210.

2. Kurner, T. Towards future THz communications systems. *Terahertz Science and Technology*, 2012, vol. 5, no. 1, pp. 11-17.

3. Mayboroda, I. M., Storozhenko, I. P., Babenko, V. P., Kaydash, M. V. Review of achievements in the terahertz communication systems. *Zbirnyk naukovykh prats' Natsional'noyi akademiyi Natsional'noyi hvardiyi Ukrainy*, 2016, no. 1(27), pp. 45-48. (in Ukrainian).

4. Narytnyk, T. The Ways of Creation and Use of Telecommunication Systems in the Terahertz Band Transport Distribution 5G Mobile Networks. *2016 Third International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T)*, 2016, pp. 36-39.

5. Ilchenko, M. Ye, Narytnyk, T. N., Fisun, A. I., Belous, O. I. Terahertz range telecommunication systems. *Telecommunications and Radio Engineering*, 2011, no. 70 (16), pp. 1477-1487.

6. Narytnyk, T. M., Kravchuk, S. O. *Telekomunikatsiyini systemy terahertsovoho diapazonu*. [Terahertz range telecommunication systems]. Zhytomir, FOP «Yevenok O.O.» Publ., 2015. 394 p.

7. Ilchenko, M. Ye. *Tsyfrova radioreleyna sistema terahertsovoho diapazonu z vykorystanniam nanoelektronnykh komponentiv* [Digital microwave relay system of terahertz range with the use of nanoelectronic components]. Available at: <http://report.kpi.ua/uk/0111U002470> (accessed 21.05.2018).

8. Narytnyk, T. M. *Rozrobka radiolinyi iz hihabitnoyu propusknoyu zdatnistyu terahertsovoho diapazonu dlya nadvysokoshvydkisnykh rozpodil'chykh merezh dostupy* [Development of radio with gigabit bandwidth terahertz range for ultra-high distribution of access networks]. Available at: <http://report.kpi.ua/uk/0115U002330>. (accessed 21.05.2018).

9. Mandehgar, M., Yang, Y., Grischkowsky, D. Atmosphere characterization for simulation of the two

optimal wireless terahertz digital communication links. *Optics Letters*, 2013, vol. 38, no. 17, pp. 3437-3440.

10. Narytnyk, T. M., Lutchak, O. V., Osypchuk, S. O., Uryvs'kyy, L. O. Realizatsiya kontseptsiyi stvorenniya prohranno-vyznachenykh radiosystem terahertsovoho diapazonu na osnovi tekhnolohiyi Wi-Fi [The implementation concept of software-defined radio systems in terahertz band based on wifi technology]. *Tsyfrovi tekhnolohiyi*, 2015, no. 18, pp. 9-22.

11. Narytnyk, T. M., Osypchuk, S.O., Uryvs'kyy L. O. Osoblyvosti formuvannya syhnal'no-kodovykh konstruktсий na osnovi tekhnolohiyi Wi-Fi dlya pobudovy telekomunikatsiynykh system terahertsovoho diapazonu [Signal-code constructions formation features based on Wi-Fi technology to build telecommunication systems terahertz band]. *Problemy telekomunikatsiy*, 2015, no. 2(17), pp. 37-53.

12. Narytnyk, T. M., Lutchak, O. V. Aparatno-prohranni rishennya pobudovy hihabitnoho modemu dlya radioreleynykh liniy v terahertsovomu diapazoni [Hardware and software solutions for construction gigabit modem for radio-relay lines in the terahertz range]. *Tsyfrovi tekhnolohiyi*, 2015, no. 18, pp. 43-53.

13. Hirata, A., Takahashi, H., Yamaguchi, R. et al. Transmission Characteristics of 120-GHz-Band Wireless Link Using Radio-on-Fiber Technologies. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, vol. 26, iss. 15, pp. 2338-2344.

14. Jacob, M., Priebe, S., Dickhoff, R. et al. Diffraction in mm and Sub-mm Wave Indoor Propagation Channels. *IEEE Transactions On Microwave Theory And Techniques*, 2012, vol. 60, no. 3, pp. 833-844.

15. Il'chenko, M. Yu., Narytnyk, T. M., Radzikhovskiy, V. M., Kuz'min, S. Ye., Lutchak, O. V. Peredaval'nyy ta pryymal'nyy radiotrakty radioreleynykh system terahertsovoho diapazonu [Transmitting and receiving radio paths of radio-relay systems in the terahertz band]. *Tsyfrovi tekhnolohiyi*, 2015, no. 17, pp. 16-29.

16. Il'chenko, M. E., Narytnyk, T. N., Radzikhovskii, V. N., Kuz'min, S. E., Lutchak, A. V. Proektirovanie peredayushchego i priemnogo radiotraktov radioreleynykh sistem teragertsovogo diapazona [Design of transmitting and receiving radio-relay systems' radiopaths of terahertz range]. *Elektrosvyaz'*, 2015, no. 2, pp. 42-49.

17. Ilchenko, M. Ye., Narytnyk, T. N., Kuzmin, S. Ye., Fisun, A. I., Belous, O. I., Radzikhovskiy, V. N. Transceiver for 130-134 GHz band and digital radiorelay system. *Telecommunications and Radio Engineering*, 2013, vol. 72, no. 17, pp. 1623-1638.

18. Nagatsuma, T. *Terahertz technologies: present and future. IEICE Electronics Express*, 2011, vol. 8, iss. 14, pp. 1127-1142.



**ТЕРАГЕРЦОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ.  
ЧАСТЬ 1. ОБОСНОВАНИЕ ЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА,  
ПРОЕКТИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ УЗЛОВ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ  
СИСТЕМ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА**

*Г. Л. Авдеенко, С. Г. Бунин, Т. Н. Нарытник*

Приведены результаты завершённых проведенных авторским коллективом исследований возможностей создания впервые в Украине реальных предпосылок решения фундаментальной проблемы построения цифровых телекоммуникационных систем с использованием терагерцовых технологий. Обоснована необходимость перехода к использованию терагерцового диапазона частот при развертывании будущих телекоммуникационных систем сверхвысокой пропускной способности. Проведен анализ современного состояния проблемы, выбрано направление исследований и выполнена постановка задачи по созданию терагерцовой телекоммуникационной системы широкополосного радиодоступа с гигабитной пропускной способностью в диапазоне рабочих частот 130-134 ГГц. Проведен анализ характеристик трассы распространения сигнала и определены потери сигнала в условиях эксплуатации радиорелейной системы в терагерцовом диапазоне частот. На основе проведенного анализа показано, что в диапазоне частот 30-300 ГГц из известных типов замираний наиболее весомые, которые следует учитывать при проектировании, является замирание вследствие ослабления сигнала гидрометеорами, замирание вследствие поглощения радиосигнала в газах, замирание вследствие влияния диаграмм направленности антенн. Показано, что работа радиорелейных линий в терагерцовом диапазоне позволяет практически не учитывать рефракцию и интерференцию электромагнитных волн, отраженных от препятствий в зоне распространения радиосигнала, которая возникает в условиях плотной городской застройки. Это связано, во-первых, с тем, что терагерцевые волны имеют низкую способность к «огибанию» препятствий, во-вторых, на текущий момент частоты от 30 до 300 Гц применяются на относительно небольших расстояниях (до 5 км), что позволяет при планировании пролетов избежать попадание препятствий в зону прямой видимости антенн и первую зону Френеля. Рассмотрены основные факторы, приводящие к возникновению замираний в радиорелейных линиях связи. Показано, что в терагерцовом диапазоне наибольшее влияние на энергетический потенциал радиорелейных линий оказывают затухания в гидрометеорах и газах. Выделены участки частот терагерцового диапазона, наиболее всего пригодны для использования в радиорелейных линиях связи. Рассмотрено физическое моделирование сверхвысокоскоростного формирователя на основе многочастотного мультиплексирования промодулированных OFDM цифровых потоков, проведены стендовые испытания и оптимизация для достижения максимальной пропускной способности канала передачи цифровой информации потока в формате Ethernet с использованием разработанных программных средств. Созданные программно-аппаратные средства позволили впервые достичь общую канальную скорость при полном дуплексе до 1,2 Гбит/с. На основе обобщения результатов теоретических исследований и экспериментальных работ, анализа имеющейся радиорелейной элементной базы выполнено проектирование основных узлов приемопередающего тракта телекоммуникационной системы с гигабитной пропускной способностью в диапазоне частот 130-134 ГГц, разработана структурная схема приемопередающего тракта системы: частотные преобразователи с субгармонической накачкой, гетеродин, использующий высокостабильный задающий кварцевый генератор с последующим цепью умножительных и усилительных каскадов, полосовой фильтр с использованием тонкой металлической пластины в Е-плоскости волноводного канала 1,6x0,8 мм, рупорная антенна. Приведены результаты экспериментальных исследований основных узлов приемного и передающего трактов телекоммуникационной системы с гигабитной пропускной способностью в диапазоне частот 130-134 ГГц. Научная новизна работы заключается в обобщении и развитии теории распространения, формирования и измерения терагерцовых сигналов, в разработке метода многочастотного мультиплексирования и формирования промодулированных OFDM цифровых потоков терагерцового диапазона частот и развития принципов функционального проектирования приемопередающего тракта телекоммуникационной системы с гигабитной пропускной способностью в терагерцовом диапазоне частот.

**Ключевые слова:** терагерцовые технологии, частотный диапазон, распространение радиоволн, замирание, телекоммуникационные системы, сверхвысокая пропускная способность, функциональное проектирование, моделирование, приемопередающий тракт.

**TERAHERTZ TECHNOLOGIES IN TELECOMMUNICATION SYSTEMS.  
PART 1. JUSTIFICATION OF THE FREQUENCY RANGE, DESIGN OF FUNCTIONAL  
NODES OF TERAHERTZ RANGE TELECOMMUNICATION SYSTEMS**

*G. L. Avdyeyenko, S. H. Bunin, T. M. Narytnyk*

The article presented results of researches conducted by the team of authors devoted to the possibilities of creation for the first time in Ukraine the real prerequisites for solving the fundamental problem of constructing digital telecommunication systems with the use of terahertz technologies. The necessity of transition to the use of the terahertz frequency range substantiated during the deployment of future telecommunication systems of ultra-

high bandwidth. The analysis of characteristics of the path of signal propagation and determination of signal losses in conditions of operation of the radio relay system in the terahertz frequency range is carried out. The conducted analysis has shown that in the frequency range of 30-300 GHz, the most important types of fading that should consider during the design are fading due to the easing of the signal by hydrometeors and fading due to the absorption of the radio signal in gases, fading due to the influence of the antenna pattern. It determined that the work of the radio relay lines in the terahertz range allows practically not to take into consideration the refraction and interference of electromagnetic waves reflected from interference in the zone of radio signal propagation, which arises especially in conditions of dense urban development. This is due primarily to the fact that the terahertz waves have a low ability to "bend" the noise, and secondly, at the current frequency of 30 to 300 Hz apply at relatively small distances (up to 5 km), which allows for avoiding spatial planning interference to the zone of direct visibility of antennas and the first Fresnel zone. It considered the main factors that lead to the emergence of fading in radio relay communication lines. It is shown that in the terahertz range the greatest influence on the energy potential of the radio-relay lines is attenuating in hydro meteors and gases. The terahertz frequency range areas allocated that is most suitable for application in radio relay communication lines. The principles of formation of signal-code construction considered methods and new technical solutions for choosing the type of signal construction proposed in order to achieve the best bandwidth and performance in the channel of communication of a wireless gigabit system of transmission in the terahertz range. The physical simulation of the ultra high-speed shaper based on multifrequency multiplexing of the modulated OFDM digital streams has been carried out, bench tests and optimization have been carried out to achieve the maximum bandwidth of the digital data transmission channel in the Ethernet format using the developed software. The developed software and hardware allowed for the first time to reach the overall channel speed with a full duplex up to 1.2 Gb / s. On the basis of the generalization of the results of theoretical research and experimental work, the analysis of the existing radio relay element base, the design of the main nodes of the receiving and transmitting parts of a telecommunication system with a gigabit throughput in the frequency range 130-134 GHz, the structural scheme of the transmitting and receiving system of the system is developed: frequency mixer with subharmonic pumping, the heterodyne, which uses a highly stable reference quartz oscillator with a subsequent chain of multiplication and under power stage, bandpass filter using a thin metal plate in the E-plane of the waveguide channel 1.6x0.8 mm, horn antenna. It is presented the results of experimental studies of the main nodes of the receiving and transmitting parts of a telecommunication system with a gigabit throughput in the frequency range 130-134 GHz. Scientific novelty of the work consists in generalization and development of the theory of distribution, generation and measurement of terahertz signals, in the development of the method of multiple frequency multiplexing and generation of modulated OFDM digital streams in the terahertz frequency range and the development of the principles of functional design of the receiving and transmitting parts of a telecommunication system with a gigabit throughput in terahertz frequency range.

**Keywords:** terahertz technologies, frequency range, distribution of radio waves, fading, telecommunication systems, ultra high bandwidth, signal-code construction, functional design, modeling, receiving and transmitting parts.

**Авдєєнко Гліб Леонідович** – старший викладач каф. телекомунікацій Інституту телекомунікаційних систем КПІ ім. Ігоря Сікорського, e-mail: djang02006@ukr.net.

**Бунін Сергій Георгійович** – д-р техн. наук, лауреат премії ім. С. А. Лебедева, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, проф. каф. телекомунікацій Інституту телекомунікаційних систем КПІ ім. Ігоря Сікорського, e-mail: sgbunin@ukr.net.

**Наритник Теодор Миколайович** – канд. техн. наук, академік Української академії наук, лауреат Державних премій в галузі науки і техніки Української РСР, СРСР і України, пров. наук. співр., проф. каф. телекомунікацій Інституту телекомунікаційних систем КПІ ім. Ігоря Сікорського; директор СП «Інститут електроніки та зв'язку Української академії наук, e-mail: director@mitris.com.

**Avdyeyenko Hlib Leonidovych** – senior teacher at the Department of Telecommunications of the Institute of Telecommunication Systems of Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, e-mail: djang02006@ukr.net.

**Bunin Serhiy Heorhiyovych** – DrS on Engineering, Professor, Department of Telecommunications, Institute of Telecommunication Systems of Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, winner of the awards to them. SA Lebedev, laureate of the State Prize of Ukraine in the field of science and technology, e-mail: sgbunin@ukr.net.

**Narytnyk Teodor Mykolayovych** – PhD, Academician of the Ukrainian Academy of Sciences; Laureate of State Prizes in the field of science and technology of the Ukrainian SSR, USSR and Ukraine, Leading Research Associate, Professor of the Telecommunications Department of the Institute of Telecommunication Systems of Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute; director of the Joint venture "Institute of Electronics and Communications of the Ukrainian Academy of Sciences", e-mail: director@mitris.com.