

УДК 621.39.029.7:621.397.2.029.6

doi: 10.32620/reks.2018.3.09

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 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕДАВАННЯ  
ТЕЛЕВІЗІЙНИХ СИГНАЛІВ СТАНДАРТУ DVB-C  
І ІМПУЛЬСНОГО НАДШИРОКОСМУГОВОГО СИГНАЛУ  
РАДІОЛІНІЄЮ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДІАПАЗОНУ**

*Уперше в практичному плані проведені дослідження лабораторного зразка цифрової симплексної радіорелейної системи терагерцового діапазону в складі приймального і передавального радіотракту в діапазоні частот 130÷134 ГГц і цифрового модему з пропускною каналною здатністю до 1200 Мбіт/с на дальність зв'язку в нормальних умовах в межах 1 км. Показано, що запропонована телекомунікаційна система, яка реалізує концепцію створення програмно-визначених радіосистем на основі технології Wi-Fi, може високопродуктивно використовуватись в транспортних розподільчих мережах мобільного зв'язку наступного покоління із забезпеченням відповідних швидкостей передачі, надійності та захищеності. Досліджено параметри багатоканального сигналу цифрового телебачення стандарту DVB-C при його передаванні через макет приймальнопередавального тракту діапазону 130 ГГц. Результати дослідження показали, що використання нижньої частини терагерцового діапазону частот (130 ГГц) зі смугою 24 МГц дозволяє передати три канали телевізійного мовлення стандарту DVB-C з загальною швидкістю транспортного потоку на рівні 125 Мбіт/с з високою суб'єктивною якістю відтворення ТВ програм. Наведено результати моделювання передавання методом гетеродинування імпульсного широкосмугового сигналу (IR-UWB) радіолінією терагерцового діапазону. Уперше наведено результати досліджень (зміни часової форми) при передаванні IR-UWB сигналу у вигляді гаусівського моноциклу передавальним трактом та його приймання приймальним трактом терагерцового діапазону, спроектованим для смуги частот 130,4÷131,5 ГГц. На основі отриманих результатів досліджень сформульовані вимоги до параметрів радіолінії терагерцового діапазону для забезпечення прийнятної якості приймання імпульсних надширокосмугових сигналів. Розробка прийомпередавального тракту радіорелейної системи терагерцового діапазону немає прямих аналогів на даний час, що може забезпечити суттєвий прорив у розвитку галузі телекомунікацій. Отримані результати досліджень також сприятимуть розвитку суміжних з телекомунікаціями галузей, зокрема: радіоастрономії, міжсупутникового зв'язку, радіолокації, медицини і т.д.*

**Ключові слова:** *терагерцові технології, телекомунікаційні системи, надвисока пропускна здатність, приймальнопередавальні тракти, цифрова симплексна радіорелейна система, транспортні розподільчі мережі, мобільний зв'язок, багатоканальний сигнал цифрового телебачення стандарту DVB-C, імпульсний широкосмуговий сигнал, модель генератора IR-UWB, передавання моноциклу радіолінією терагерцового діапазону.*

### Вступ

На сьогоднішній день у провідних країнах світу продовжуються наукові дослідження та розробки в галузі безпроводових систем зв'язку терагерцового діапазону (0,1÷3 ТГц), які поділяються на оптичні, електронні та гібридні, в залежності від використовуваних компонентів. про що свідчить велика кількість наявних публікацій та спеціалізованих видань, присвячених цій темі. Гібридна бездротова лінія ТГц-зв'язку може бути реалізована на основі двох підходів, в залежності від методу генерації

ТГц-сигналу. При одному підході генерація ТГц-сигналу здійснюється технологіями фотоніки, при іншому – технологіями електроніки.

Наприклад, в роботі [1] представлений експериментальний зразок симплексної безпроводової системи зв'язку терагерцового діапазону з використанням модуляції QAM-16, який забезпечує передавання інформації із сумарною швидкістю 80 Гбіт/с у чотирьох суміжних частотних каналах, що займають смугу радіочастот 375÷450 ГГц, на відстань не більше 0,5 м, забезпечуючи при цьому ймовірність бітової помилки не гірше за  $3,8 \cdot 10^{-3}$ . У свою чергу, в

роботі [2] представлено розробку монолітних інтегральних мікросхем передавача та приймача діапазону 300 ГГц, а також макету симплексної безпроводової системи зв'язку на їх основі, яка забезпечує при використанні модуляції QPSK передавання інформації зі швидкістю 64 Гбіт/с на відстань до 2 м при значенні вектора похибки EVM (Error Vector Magnitude) не більше – 9,65 дБ.

Також у роботі [3] описаний експериментальний зразок симплексної терагерцової системи зв'язку, який призначений для передавання в одночастотному каналі на несній частоті 237,5 ГГц методом модуляції QAM-8 цифрового потоку зі швидкістю 75 Гбіт/с, а методом QAM-16 – цифрового потоку зі швидкістю 100 Гбіт/с на відстань до 40 м з ймовірністю помилки не гірше  $3,7 \cdot 10^{-4}$ .

Далі, в роботі [4] представлений експериментальний зразок симплексної терагерцової системи зв'язку, який в смузі радіочастот 385–435 ГГц (4 радіоканали по 12,5 ГГц, модуляція QPSK) забезпечує передачу на відстань не більше 0,5 м цифрового потоку із сумарною швидкістю 60 Гбіт/с та ймовірністю бітової помилки не гірше за  $2 \cdot 10^{-3}$ .

Варто відзначити про значну зростаючу кількість публікацій, подібних до робіт [1-4], у більшості яких, включаючи й ті, що представлені в роботах [1, 2, 4], експериментальні зразки передавального та приймального трактів терагерцових систем радіозв'язку будуються за одним і тим самим гібридним принципом, а саме за рахунок використання сучасних досягнень в галузі терагерцової фотоніки та електроніки [5, 6].

У першій частині статті були розглянуті результати досліджень, що проведені колективом вчених КПІ ім. Ігоря Сікорського в галузі безпроводових систем зв'язку терагерцового діапазону, і які включають в себе наступні напрями: особливості поширення терагерцових хвиль в атмосфері, концепція створення програмно-визначених радіосистем терагерцового діапазону з використанням технології Wi-Fi, особливості проектування передавального та приймального радіотрактів радіорелейних систем терагерцового діапазону [7].

*Метою* другої частини статті є продовження ознайомлення з дослідженнями в галузі безпроводових телекомунікаційних систем терагерцового діапазону, що включають в себе наступні напрями:

– дослідження та випробування радіорелейної системи терагерцового діапазону 130–134 ГГц;

– дослідження передачі багатоканального сигналу стандарту DVB-C через передавально-приймальний тракт терагерцового діапазону;

– імітаційне моделювання передачі імпульсного надширокопосмугового сигналу радіолінією терагерцового діапазону.

## 1. Дослідження та випробування радіорелейної системи терагерцового діапазону 130-134 ГГц

### 1.1. Конструктивна побудова

На базі розроблених функціональних вузлів, описаних в першій частині, були побудовані приймальний та передавальний тракти радіорелейної системи [8]. Приймач і передавач системи мають однакову конструктивну побудову. Модульне виконання окремих вузлів з максимальним використанням монолітних мікросхем забезпечує компактність конструкції, а також зручність її складання і монтажу, як показано на рис. 1.1.

Тракти мають коаксіальні вхід (вихід) з роз'ємами SMA на проміжних частотах, і хвилеводний вхід (вихід) в каналі 1,6×0,8 мм на терагерцових частотах. Зовнішній вигляд приймального (передавального) тракту показано на рис. 1.2.

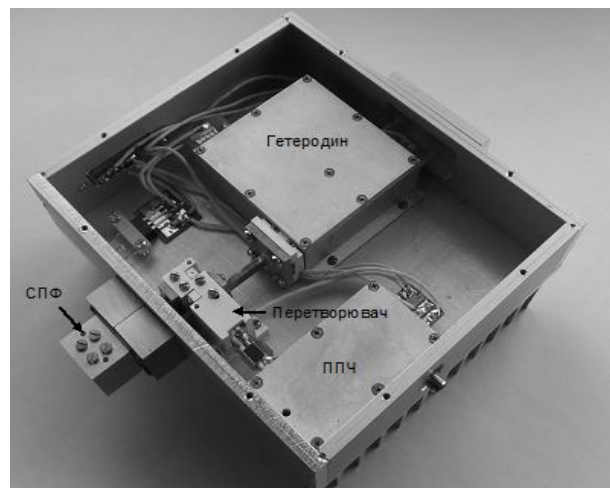


Рис. 1.1. Розташування вузлів в складі приймального (передавального) тракту

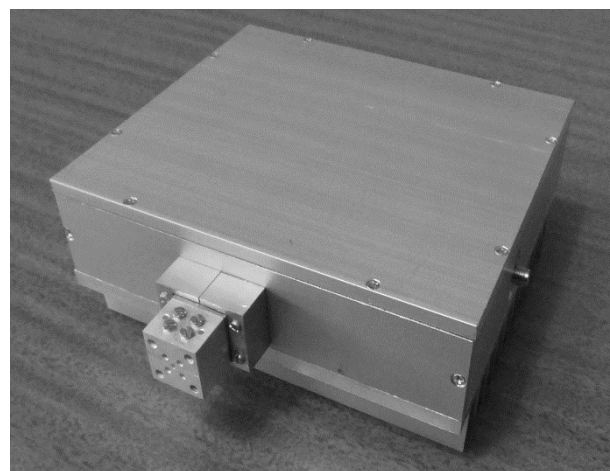


Рис. 1.2. Зовнішній вигляд приймального (передавального) тракту

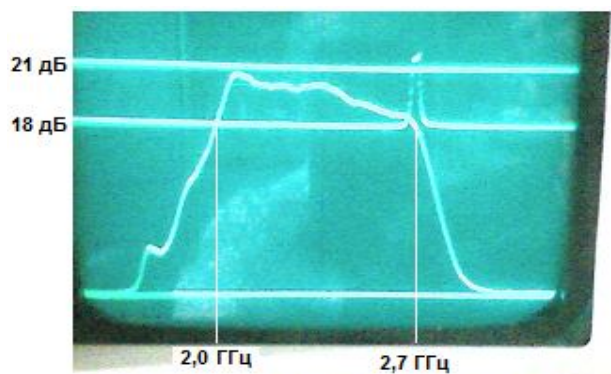


Рис. 1.3. Наскрізна частотна характеристика коефіцієнта передачі приймально-передавального тракту



Рис. 1.4. Фотографія приймально-передавального тракту радіорелейної системи

Для забезпечення якісної роботи приймача і передавача були розроблені вторинні джерела живлення, які формують необхідні високостабільні напруги для всіх вузлів трактів.

Виміряна наскрізна частотна характеристика коефіцієнта передачі  $K(f)$  показана на рис. 1.3. Як видно з вимірної частотної залежності  $K(f)$ , приймальнопередавальний тракт терагерцового діапазону має сумарний коефіцієнт передачі не менше 18 дБ, при цьому нерівномірність коефіцієнта передачі в робочому діапазоні частот не перевищує 3 дБ.

## 1.2. Експериментальні дослідження

Проведено експериментальні дослідження коефіцієнта передачі приймальнопередавального тракту радіорелейної системи в цілому (рис. 1.4).

Крім того, було проведено експериментальні дослідження лабораторного зразка цифрової симплексної радіорелейної системи терагерцового діапазону (рис. 1.5) у складі: приймальний і передавальний радіотракти в діапазоні частот 130÷134 ГГц, цифрові модеми. Випробування системи було проведено відповідно до схеми, показаної на рис. 1.6.

Експериментальні дослідження трактів радіорелейної системи показали наступні значення основних показників в робочому діапазоні частот:

- Шумова температура приймального тракту  $T_{\text{шх}}=5000 \text{ К}$ ;
- Вихідна потужність передавального тракту  $P_{\text{вих}}=40 \text{ мкВт}$ .

Отримані наступні результати:

- Пропускна канална здатність до 1200 Мбіт/с;
- Значення ймовірних бітових помилок BER не більше  $10^{-6}$ ;
- Дальність зв'язку в нормальних умовах в межах 1 км;
- Коефіцієнт посилення системи на рівні 50 дБ;
- Вид модуляції – КАМ-64.

## 1.3. Висновки

Визначено та обґрунтовано параметри основних вузлів приймальнопередавального тракту радіорелейної системи в діапазоні частот 130÷134 ГГц. Розроблено структурну схему радіорелейної лінії в терагерцовому діапазоні з пропускною спроможністю до 2,4 Гбіт/с і досліджені розрахункові характеристики її приймальнопередавального тракту.

На основі узагальнення результатів, аналізу наявної радіоелектронної елементної бази і теоретичних досліджень проведено проектування основних вузлів і всього приймальнопередавального тракту



Рис. 1.5. Зовнішній вигляд лабораторного зразка цифрової симплексної радіорелейної системи терагерцового діапазону

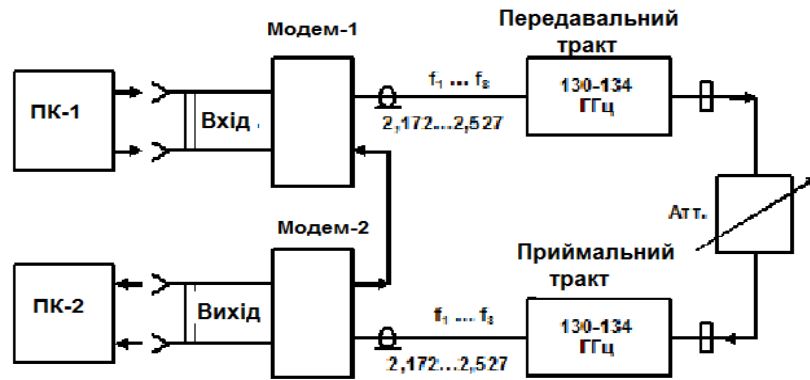


Рис. 1.6. Схема випробованої телекомунікаційної системи

телекомунікаційної системи з гігабітною пропускною спроможністю в діапазоні частот 130÷134 ГГц в складі: частотних перетворювачів з субгармонічним накачуванням, гетеродин, що використовує високостабільний задаючий кварцовий генератор з наступним ланцюгом помножуючих і підсилювальних каскадів, смуго-пропускаючий фільтр з використанням тонкої металевої пластини в Е площині волноводного каналу 1,6÷0,8 мм.

Вперше в практичному плані виготовлені основні вузли приймальнопередального тракту і проведені експериментальні дослідження лабораторного зразка цифрової симплексної радіорелейної системи терагерцового діапазону в складі приймального і передавального радіотракту в діапазоні частот 130÷134 ГГц і цифрового модему з пропускною каналною здатністю до 1200 Мбіт/с.

Створені передавальні і прийомні радіотракту терагерцового діапазону можуть бути використані для побудови телекомунікаційних систем і мереж, в тому числі радіорелейних систем прямої видимості для транспортних мереж мобільного зв'язку наступного покоління. Забезпечення пропускної здатності радіолінії десятків Гбіт/с і більше, яке потрібно в перспективі, можливо за рахунок використання терагерцового діапазону довжин хвиль, де може бути забезпечена висока швидкість передачі інформації, а також висока надійність радіолінії зв'язку при досить малих вазі і габаритах приймальнопередального тракту і антенної системи.

## 2. Дослідження передачі телевізійних сигналів стандарту DVB-C по приймальнопередальному тракту терагерцового діапазону

### 2.1. Експериментальна установка

Метою дослідження є оцінка зміни параметрів багатоканального сигналу цифрового телебачення стандарту DVB-C при його передачі через макет

приймальнопередального тракту діапазону 130 ГГц. Стандарт DVB-C для проведення досліджень було обрано через можливість формування сигналів з різною позиційністю модуляції (від QAM-64 до QAM-256), що дозволило дослідити вплив параметрів окремих вузлів макету на параметри сигналів, що передавалися через нього.

Для дослідження було зібрано експериментальну установку, до складу якої увійшли прийомопередавач, підсистема формування телевізійних сигналів стандарту DVB-C, підсистема вимірювання параметрів сигналів стандарту DVB-C. Дослідження проводилось поетапно: було використано одноканальний, двохканальний та трьохканальний сигнали DVB-C.

### 2.2. Методика проведення дослідження та його результати

Для дослідження зміни параметрів багатоканальних сигналів цифрового телебачення стандарту DVB-C при їх передаванні по приймальнопередальному тракту терагерцового діапазону було зібрано експериментальну установку, структурну схему якої наведено на рис. 2.1. Як можна побачити з рис. 2.1, заміри параметрів сигналів DVB-C виконувались на вході тракту передавача та на виході тракту приймача терагерцового діапазону. При цьому вихід передавача з'єднується з входом приймача хвилеводною лінією.

На всіх етапах дослідження використовувалась наступна вимірювальна апаратура:

- аналізатор сигналів цифрового телебачення ST-2 ROVER;

- ресивер цифрового кабельного телебачення Homecast стандарту DVB-C, що підключений до телевізору Samsung. Ресивер використовувався для визначення параметру якості сигналу DVB-C (Quality) у відносній шкалі відсотків на вході передавача та виході приймача тракту терагерцового діапазону;

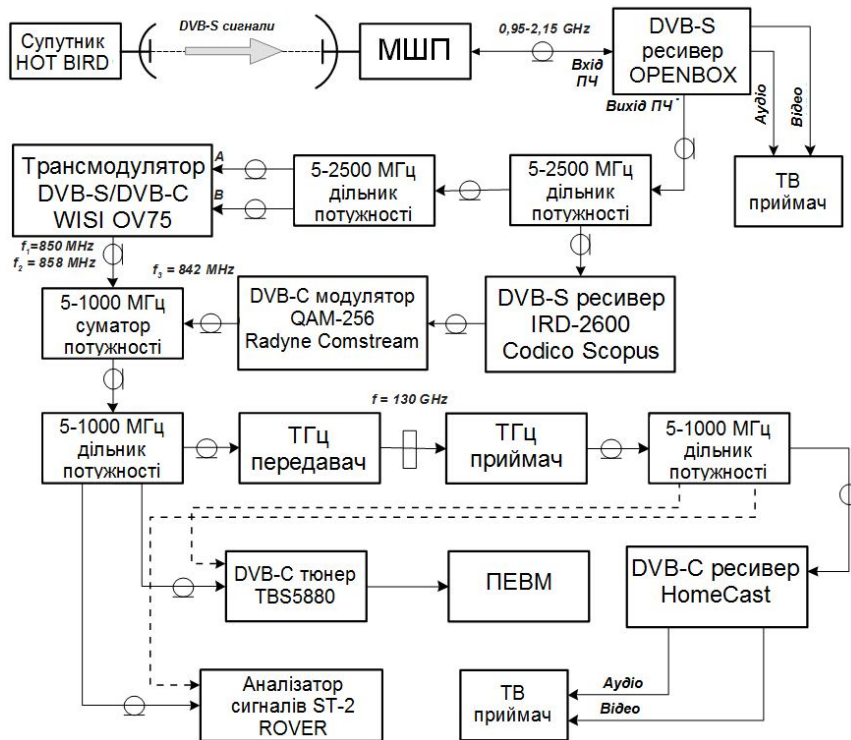


Рис. 2.1. Структурна схема експериментальної установки для дослідження багатоканальних сигналів цифрового телебачення стандарту DVB-C

- тюнер ефірного та кабельного цифрового телебачення QBox TBS5880, що підключений до комп'ютера за допомогою USB-кабелю. Тюнер призначений для отримання зображення констеляційних діаграм та числових показників якості демодуляції/декодування телевізійних сигналів стандарту DVB-C на вході передавача та виході приймача тракту терагерцового діапазону. Спрощена структурна схема прийомопередавача терагерцового діапазону та його фотографія відповідно зображені на рис. 2.2 та рис. 2.3.

Аналізатор сигналів ST-2 ROVER дозволяє виміряти наступні параметри сигналів стандарту DVB-C на вході передавача та виході приймача тракту терагерцового діапазону:

- рівень сигналу (LEV), дБм;
- відношення потужності несеного коливання до потужності шуму (C/N), дБ;
- запас завадостійкості (N. MAR), дБ;
- коефіцієнт нерівномірності спектру (FLAT), дБ;
- коефіцієнт бітової помилки (BER).

Треба відмітити, що оскільки аналізатор сигналів ROVER ST-2 працює в режимі емуляції, то він видає значення потужності сигналу в середньому на 15 дБ менше значення, отриманого за допомогою тюнера TBS5880.

Дослідження зміни параметрів багатоканального сигналу цифрового телебачення стандарту DVB-C при його передачі по приймальнопередавальному тракту терагерцового діапазону проводилось для трьохканального сигналу DVB-C (рис. 2.4). Формування сигналів стандарту DVB-C здійснювалося за допомогою трансмодулятора WISI OV75 та модулятора QAM-256 Radyne Comstream з сигналів телевізійного мовлення стандарту DVB-S, параметри яких також вказано в табл. 2.1. Вказані сигнали стандарту DVB-S були прийняті на дзеркальну антену з конвертором від супутника HOT BIRD (13 E).

За допомогою трансмодулятора та модулятора можна було змінювати наступні параметри сигналу DVB-C: модуляцію (QAM-16, QAM-32, QAM-64, QAM-128, QAM-256), швидкість (символьна, бітова в залежності від модуляції та завадостійкого кодування), проміжну частоту (в діапазоні 47-862 МГц).

Кожен з трьох зображених на рис. 2.4 телевізійних сигналів стандарту DVB-C в свою чергу містить в собі транспортний потік MPEG, в якому передаються 5-6 ТВ програм стандартної чіткості у відкритому доступі.

На рис. 2.5 та рис. 2.6 наведено констеляційні діаграми сигналів DVB-C, притаманні для всіх етапів проведення дослідження.

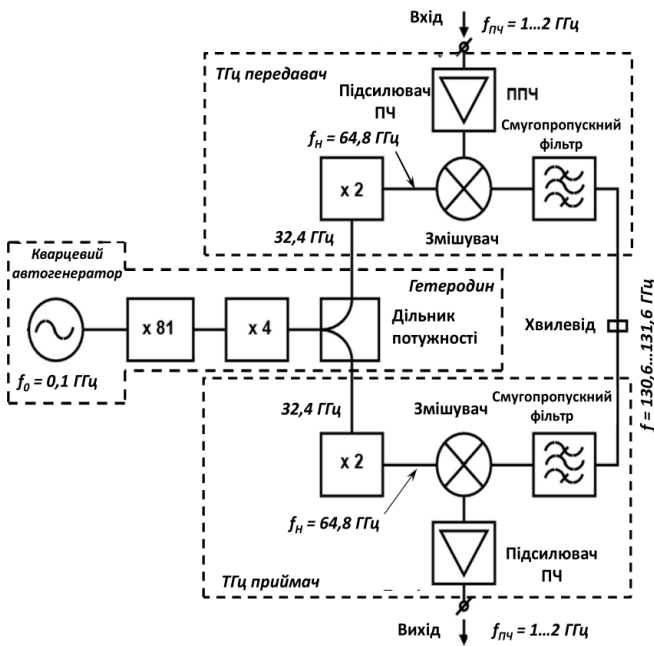


Рис. 2.2. Спрощена структурна схема прийомопередавача терагерцового діапазону

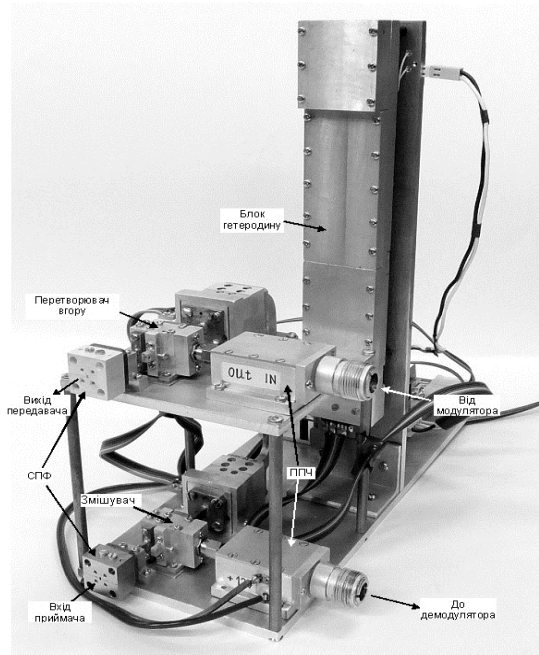


Рис. 2.3. Фотографія прийомопередавача терагерцового діапазону

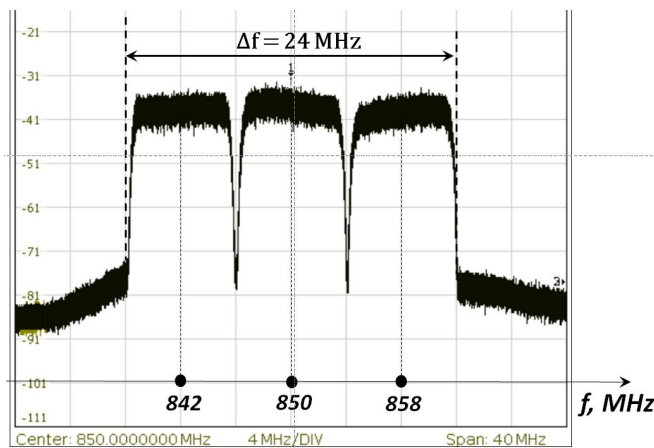


Рис. 2.4. Спектр 3-х каналного ТВ сигналу стандарту DVB-S

Таблиця 2.1

Вхідні параметри сигналів цифрового телебачення стандарту DVB-S від супутника HOT BIRD

Номер каналу	Вхідний сигнал, МГц	Проміжна частота, МГц	Символьна швидкість, Ксим/сек	Бітова швидкість, Мбіт/сек	Модуляція	FEC		Інформаційна швидкість, Мбіт/сек	Ширина спектру, МГц
						Conv.	R.S.		
1	11179	1429	27500	55	QPSK	3/4	188/204	38,015	36
2	11137	1387	27500	55	QPSK	3/4	188/204	38,015	36
3	11334	1584	27500	55	QPSK	3/4	188/204	38,015	36

З виходу QAM модулятора RADYNE COMSTREAM QAM-256 та виходу трансмодулятора WISI OV75 (рис. 2.1) телевізійні канали поступають на суматор, на виході якого сформований багатоканальний (3-х каналний) телевізійний сигнал надходить на вхід приймальнопередатального трак-

ту терагерцового діапазону. Результати вимірювання параметрів 3-х каналного телевізійного сигналу стандарту DVB-S наведені в табл. 2.2.

Аналізуючи результати, можна зробити висновок, що усі параметри сигнали в середньому погіршилися на 4÷5 дБ в порівнянні з попереднім дослі-

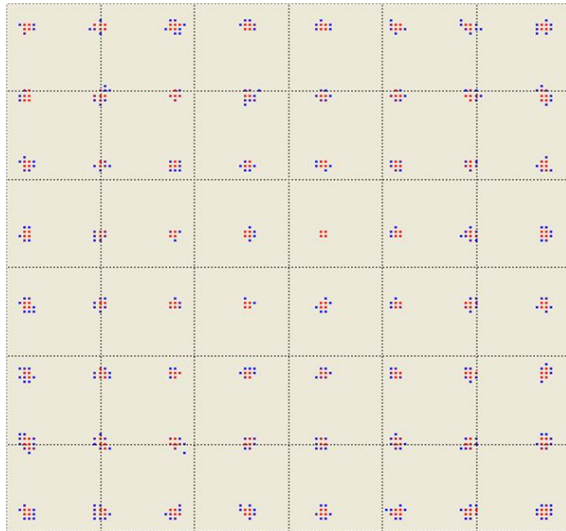


Рис. 2.5. Констеляційна діаграма сигналу DVB-C при модуляції QAM-64

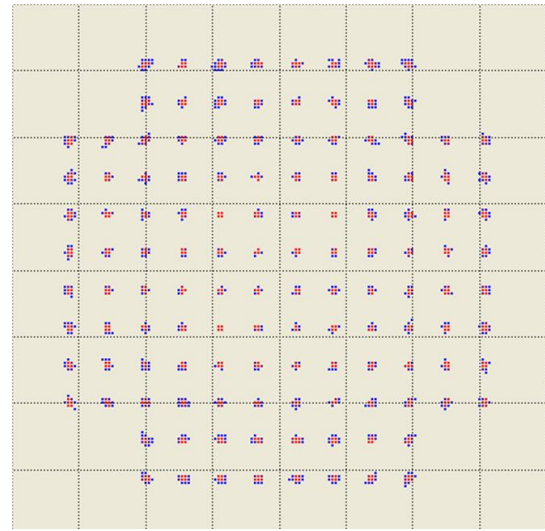


Рис. 2.6. Констеляційна діаграма сигналу DVB-C при модуляції QAM-128

Таблиця 2.2

Параметри трьох телевізійних каналів сигналу цифрового телебачення стандарту DVB-C, які виміряні тюнером TBS8550

Показники каналу		Значення замірів на вході передавача терагерцового діапазону			Значення замірів на виході тракту терагерцового діапазону		
Частота, МГц	Модуляція	LEV, dBm	SNR, dB	BER	LEV, dBm	SNR, dB	BER
842	QAM-64	-51	38,60	$<10^{-8}$	-60	33,71	$<10^{-8}$
	QAM-128	-54	42,12	$<10^{-8}$	-57	39,43	$<10^{-8}$
	QAM-256	-32	38,60	$<10^{-8}$	-54	36,80	$<10^{-8}$
850	QAM-64	-38	38,60	$10^{-4}$	-57	37,60	$7 \cdot 10^{-4}$
	QAM-128	-54	43,43	$<10^{-8}$	-54	39,00	$<10^{-8}$
	QAM-256	-32	38,60	$<10^{-8}$	-54	37,40	$<10^{-8}$
858	QAM-64	-38	38,00	$<10^{-8}$	-57	34,57	$<10^{-8}$
	QAM-128	-54	42,12	$<10^{-8}$	-54	39,43	$<10^{-8}$
	QAM-256	-32	38,60	$10^{-3}$	-54	36,80	$1,5 \cdot 10^{-3}$

дом (передачі двох сигналів DVB-C), при цьому в найгіршому випадку при модуляції QAM-256 параметр BER за вимірюваннями супутникового тюнеру TBS5880 зменшився, а якість сигналу стала на рівні 33÷53 %.

### 2.3. Висновки

Результати дослідження параметрів багатоканального сигналу цифрового телебачення стандарту DVB-C по приймальнопередавальному тракту терагерцового діапазону показали, що використання нижньої частини терагерцового діапазону частот (130 ГГц) зі смугою 24 МГц дозволяє передати три канали телевізійного мовлення стандарту DVB-C з загальною швидкістю транспортного потоку на рівні

125 МБіт/с з високою суб'єктивною якістю відтворення ТВ програм. При цьому позитивний результат проведеного дослідження підтвердив можливість використання гетеродина, побудованого на використанні високостабільного задаючого кварцового генератора з наступним ланцюгом помножуючих і підсилюючих каскадів в передавальному та приймальному трактах терагерцового діапазону з сигналами багатопозиційної модуляції QAM-64, QAM-128 та QAM-256. Подальшим напрямком дослідження є збільшення (більше 3-х) кількості сигналів багатопозиційної модуляції, що передаватимуться через радіолінію терагерцового діапазону і визначення зміни параметрів цих сигналів а також якості їх прийому та демодуляції.

### 3. Імітаційне моделювання передавання імпульсного надширокопasmового сигналу радіолінією терагерцового діапазону

Враховуючи, що на даний момент в світі федеральною комісією США в галузі зв'язку встановлено допустимі норми на спектральну щільність випромінювання UWB сигналів на рівні – 41,3 дБм/МГц в смузі частот 3,1÷10,6 ГГц для забезпечення електромагнітної сумісності, максимальна дальність дії систем зв'язку на базі UWB як правило не перевищує декілька десятків метрів. Отже, кардинально збільшити дальність дії систем радіозв'язку на базі UWB сигналів можна лише шляхом використання вільних ділянок радіоспектру. З точки зору авторів даної статті, саме діапазон терагерцових частот (0,1÷3 ТГц) через свою велику частотну ємність та незайнятість є перспективним для розробки та розгортання UWB систем зв'язку задля дослідження всіх їх переваг та недоліків [9]. Важливо відмітити, що задача генерації UWB коливань на відміну від генерації гармонійних коливань безпосередньо в терагерцовому діапазоні є надто складною задачею, тому, найбільш доцільним і перспективним шляхом побудови систем UWB зв'язку є генерація UWB сигналів в діапазоні деци- та/або сантиметрових хвиль з подальшим їх перенесенням в терагерцовий діапазон методом гетеродинування в передавальному тракту системи зв'язку та зворотного перенесення сигналу з терагерцового діапазону в діапазон деци- або сантиметрових хвиль в приймальному тракту цієї системи. Тому метою даного пункту роботи є дослідження характеру зміни часової форми (тобто спотворень) IR-UWB сигналу при його передаванні через ідеалізовану імітаційну модель радіолінії терагерцового діапазону з відомими параметрами.

В якості середовища імітаційного моделювання оберемо програмний пакет Visual System Simulator САІР АWR Microwave Office ver.10 компанії National Instruments, яка має зручний інтерфейс та необхідний функціонал для проведення досліджень НЧ/ВЧ/НВЧ схем на схемо- та системотехнічному рівнях.

Ідеалізовану імітаційну модель радіолінії терагерцового (ТГц) діапазону будуватимемо на базі параметрів та структурної схеми діючого макета прийомопередавача ТГц (розташований в 501 ауд. 30к НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»), який був розроблений в результаті виконання держбюджетних НДР №2424п «Цифрова радіорелейна система терагерцового діапазону з використанням наноелектронних компонентів» (номер державної реєстрації 0111U002470), виконаної в НТУУ «КПІ ім. І. Сікор-

ського» в 2011÷2012 рр. та НДР №2846п «Розробка радіолінії із гігабітною пропускною здатністю терагерцового діапазону для надвисокошвидкісних розподільчих мереж доступу», виконаної в НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» (номер державної реєстрації 0115U002330) в 2015-2016 рр. [7]. Даний макет прийомопередавача непогано зарекомендував себе при проведенні практичних досліджень з передачі/прийому багаточастотних сигналів цифрового телебачення стандартів DVB-S та DVB-C.

Структурна схема симплексної системи радіозв'язку ТГц діапазону, імітаційна модель якої була побудована в АWR Microwave Office, показана на рис. 3.1.

#### 3.1. Модель генератору IR-UWB

В якості IR-UWB сигналу оберемо так званий гаусівський моноцикл, який досить широко використовується в якості випромінювального сигналу в техніці UWB. Імітаційна модель генератору IR-UWB сигналів, яка побудована за допомогою інструментарію САІР Microwave Office, зображена на рис. 3.2. До складу моделі входять генератор прямокутних імпульсів, гаусівський фільтр нижніх частот (ГФНЧ), диференційний ланцюг.

Параметри джерела надкоротких імпульсних сигналів (блок PPULSE):

- Частота повторення імпульсів (RATE):  
 $f = 20$  МГц;

- Період повторення імпульсів:  $T = 50$  нс;

- Тривалість переднього фронту імпульсу (RT):  
 $TR = 50$  пс;

- Тривалість заднього фронту імпульсу (FT):  
 $TF = 50$  пс;

- Тривалість імпульсу (DUTY) = 1% або 500 пс.

За допомогою майстра синтезу фільтрів iFilter Wizard синтезуємо гаусівський фільтр нижніх частот. Електрична схема фільтру на зосереджених елементах відображена на рис. 3.3, а його АЧХ коефіцієнту передачі (параметр  $S_{21}$ ) та АЧХ коефіцієнту відбиття по входу (параметр  $S_{11}$ ) показані на рис. 3.4.

Осцилограма надкороткого прямокутного імпульсу та надкороткого гаусівського імпульсу показані на рис. 3.5, а спектр гаусівського імпульсу – на рис. 3.6.

Для отримання гаусівського моноциклу необхідно «пропустити» гаусівський імпульс через диференційний ланцюг, один з варіантів якого показаний на рис. 3.7, а. На рис. 3.7, б зображено АЧХ коефіцієнту передачі диференційного ланцюга.

Осцилограма гаусівського моноциклу на виході диференційного ланцюга зображена на рис. 3.8, а а його спектр зображений на рис. 3.8, б.



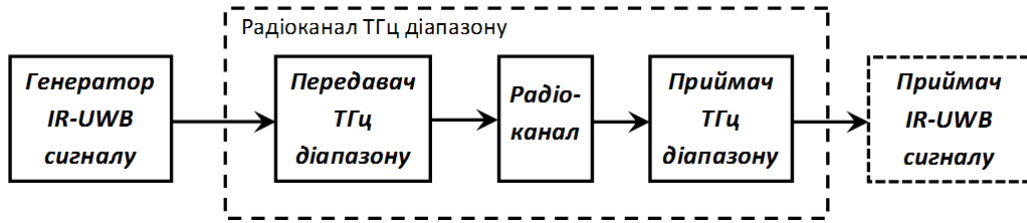


Рис. 3.1. Структурна схема симплексної системи радіозв'язку ТГц діапазону

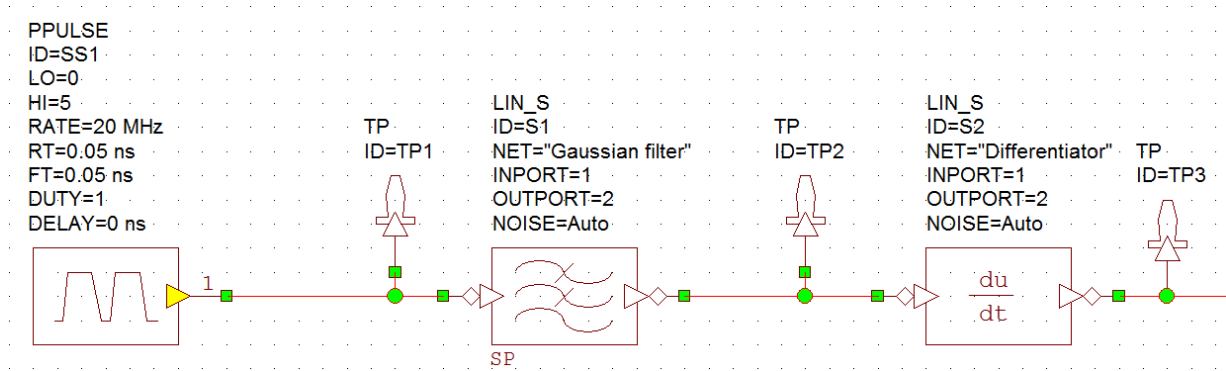


Рис. 3.2. Структурна схема імітаційної моделі генератора IR-UWB

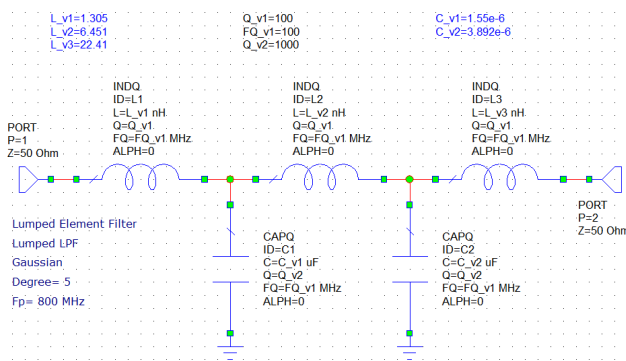


Рис. 3.3. Електрична схема гаусівського ФНЧ 5-го порядку на зосереджених елементах. Частота зрізу ГФНЧ складає 800 МГц

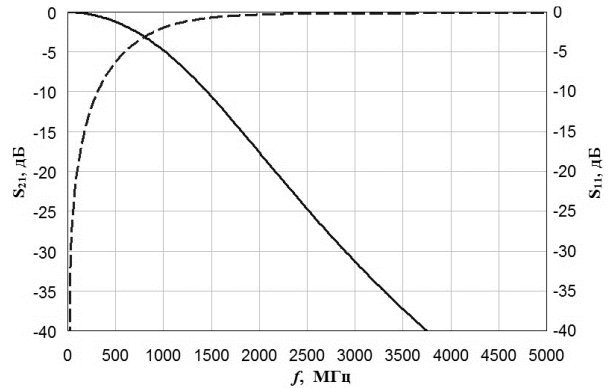


Рис. 3.4. АЧХ гаусівського фільтру (суцільна лінія) та частотна характеристика його коефіцієнту відбиття по входу (штрих-пунктирна лінія)

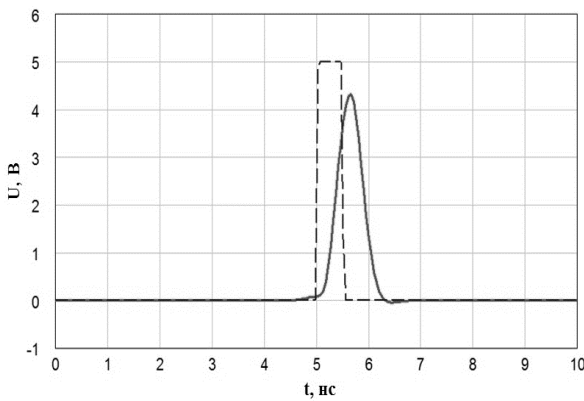


Рис. 3.5. Осцилограма надкороткого гаусівського імпульсу (в масштабі 10 нс) до (штрихова лінія) та після (суцільна лінія) фільтру Гаусса

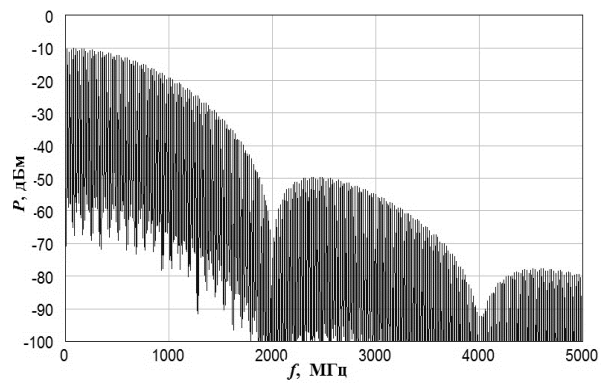


Рис. 3.6. Спектр надкороткого гаусівського імпульсу

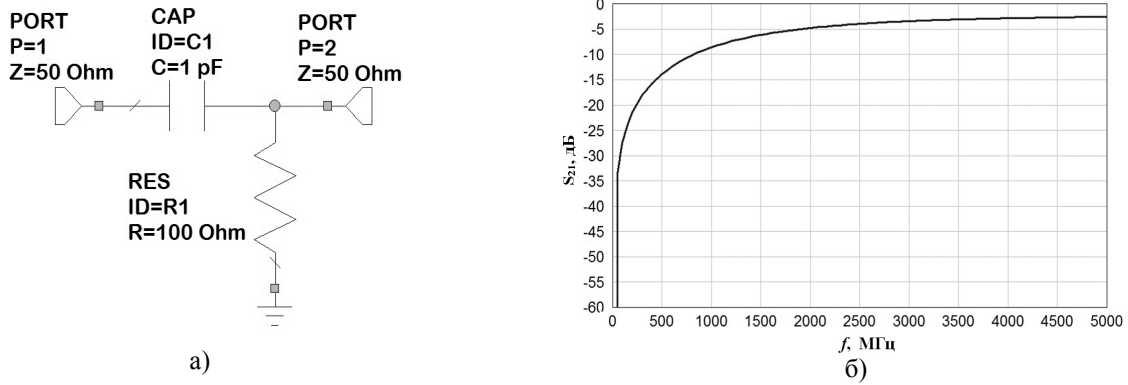


Рис. 3.7. Диференційний ланцюг (а) та АЧХ його коефіцієнту передачі (б)

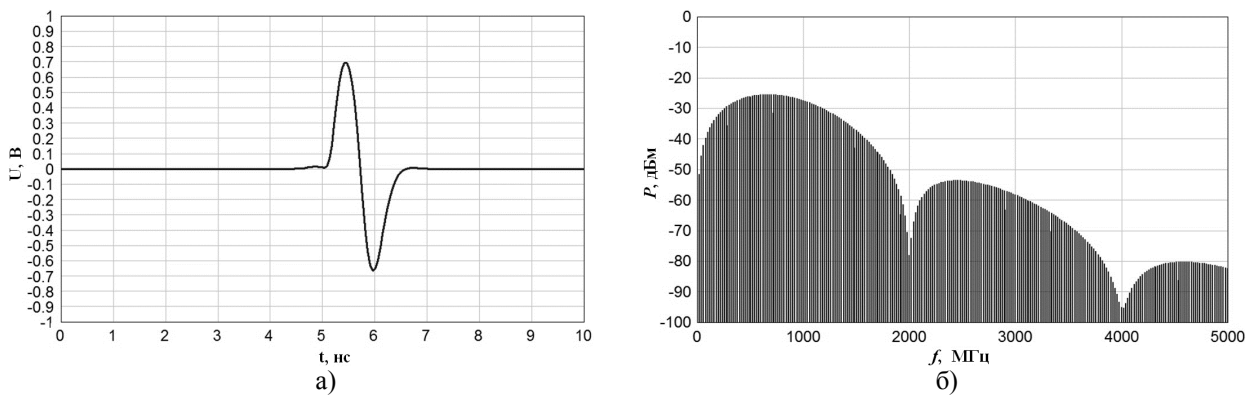


Рис. 3.8. Осцилограма гаусівського моноциклу (а) та його спектр (б) на виході диференційного кола

### 3.2. Модель передавального тракту терагерцового діапазону

Отриманий моноцикл далі надходить на вхід передавального тракту терагерцового діапазону, імітаційна модель якого в САПР Microwave Office відповідно зображена на рис. 3.9.

Відповідно до рис. 3.9, до складу імітаційної моделі входять: ідеалізована модель широкосмугового підсилювача радіочастоти на базі IMC GALI-5, модель атенуатора (ATTEN), модель широкосмугового змішувача радіочастот (MIXER\_B), модель гетеродина (TONE), модель смугового фільтру (BPFC).

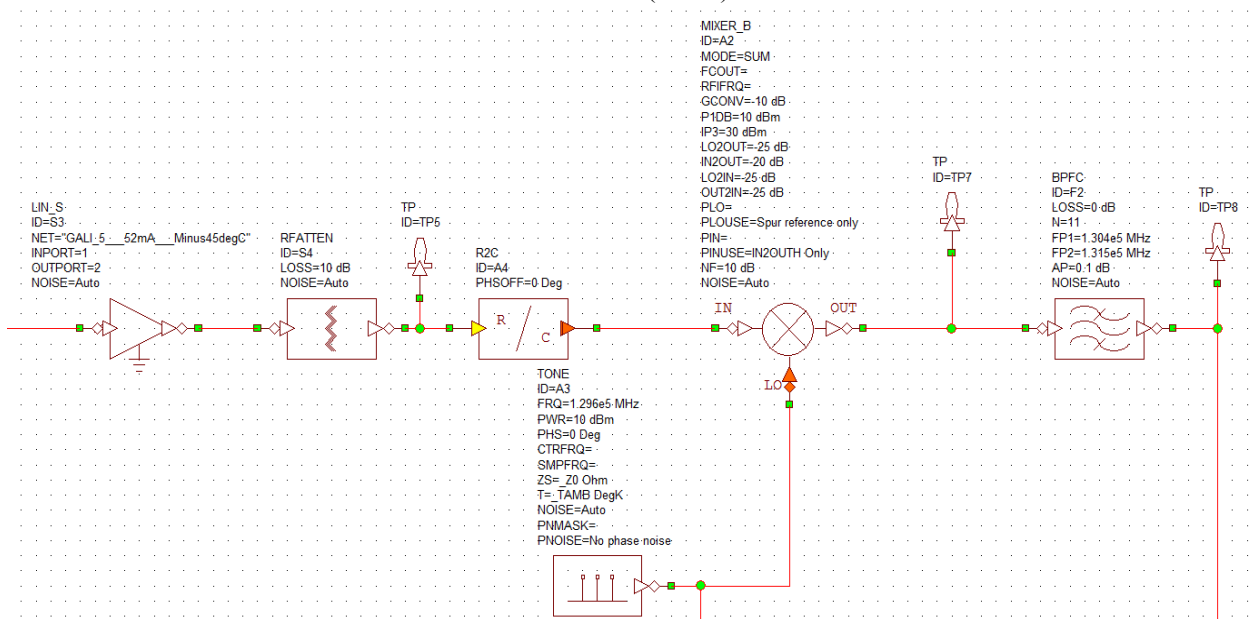


Рис. 3.9. Імітаційна модель передавального тракту терагерцового діапазону

На рис. 3.10,а показано часову форму сигналу на виході змішувача передавального тракту ТГц діапазона, а на рис. 3.10,б відповідно спектр цього сигналу.

Виконана модель АЧХ передавального тракту у вигляді фільтру Чебишева 11-го порядку зі смугою пропускання 130,4÷131,5 ГГц за рівнем  $-3$  дБ та спектр сигналу на виході такого фільтру показані відповідно на рис. 3.11 та рис. 3.12.

Часова форма радіоімпульсу на виході смугового фільтру передавального тракту показана на рис. 3.13 та рис. 3.14.

### 3.3. Модель приймального тракту терагерцового діапазону

Приймальний тракт терагерцового діапазону з'єднується з передавальним трактом терагерцового діапазону через атенуатор номіналом 20 дБ, який імітує безпроводову лінію передачі (втрати в сере-

довищі поширення та коефіцієнти підсилення передавальної та приймальної антен) без шумів. Структурна схема ідеалізованої імітаційної моделі приймального тракту показана на рис. 3.15.

Приймальний тракт складається з:

- гетеродину на частоту 129,6 ГГц (його параметри такі ж самі, що й для передавального тракту) з вихідною потужністю +10 дБм;

- змішувача радіочастоти «вниз» (його параметри такі ж самі, що й для передавального тракту) з втратами перетворення 10 дБ;

- двокаскадний широкосмуговий підсилювач радіочастоти на базі ІМС GALI-5 з коефіцієнтом підсилення 40 дБ;

- фільтру нижньої частоти 11-го порядку з характеристикою Баттерворта на частоту зрізу 2000 МГц;

- детектору обвідної сигналу.

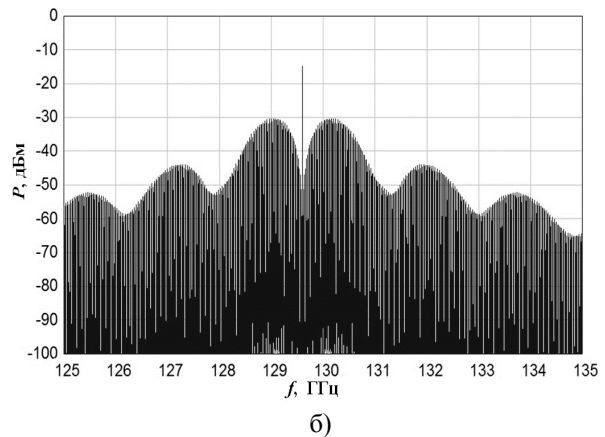
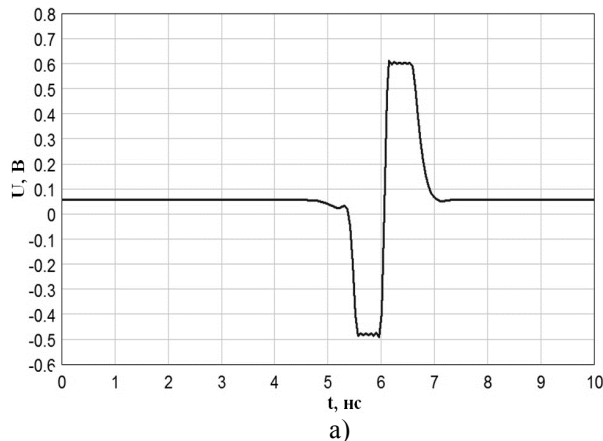


Рис. 3.10. Спектр UWB сигналу після гетеродинування в передавальному тракту (частота гетеродину  $f_{\text{гет}} = 129,6$  ГГц)

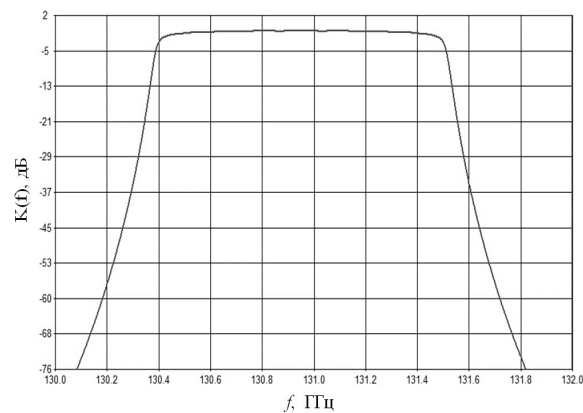


Рис. 3.11. АЧХ смугового фільтру передавального тракту та приймального тракту радіолінії ТГц діапазону

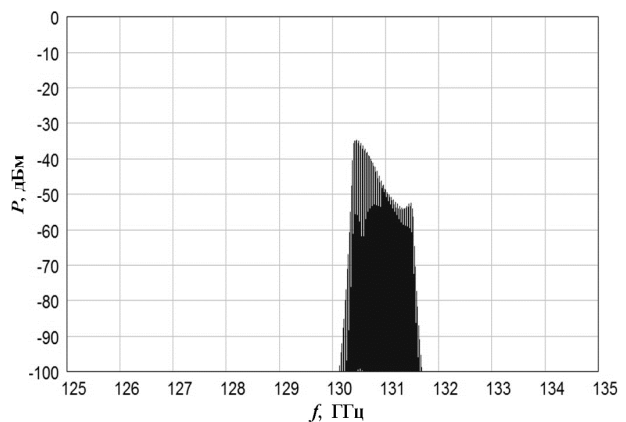


Рис. 3.12. Спектр UWB сигналу на виході смугового фільтру передавального тракту радіолінії ТГц діапазону

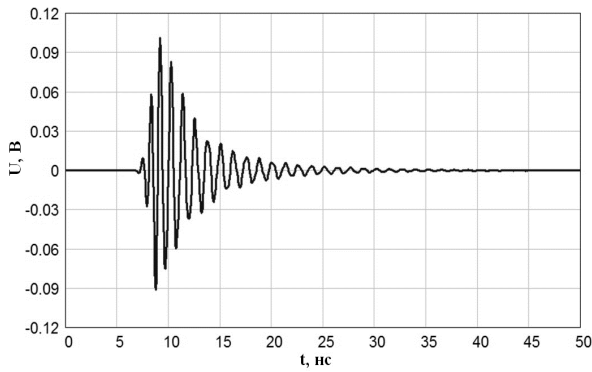


Рис. 3.13. Часова форма UWB сигналу на виході смугового фільтру передавального тракту радіолінії ТГц діапазону (в масштабі 50 нс)

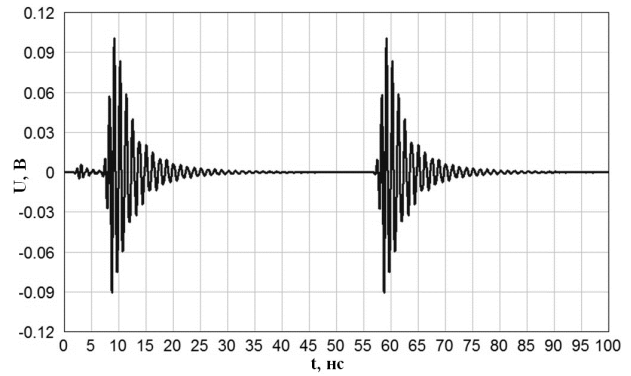


Рис. 3.14. Часова форма UWB сигналу на виході смугового фільтру передавального тракту радіолінії ТГц діапазону (в масштабі 100 нс)

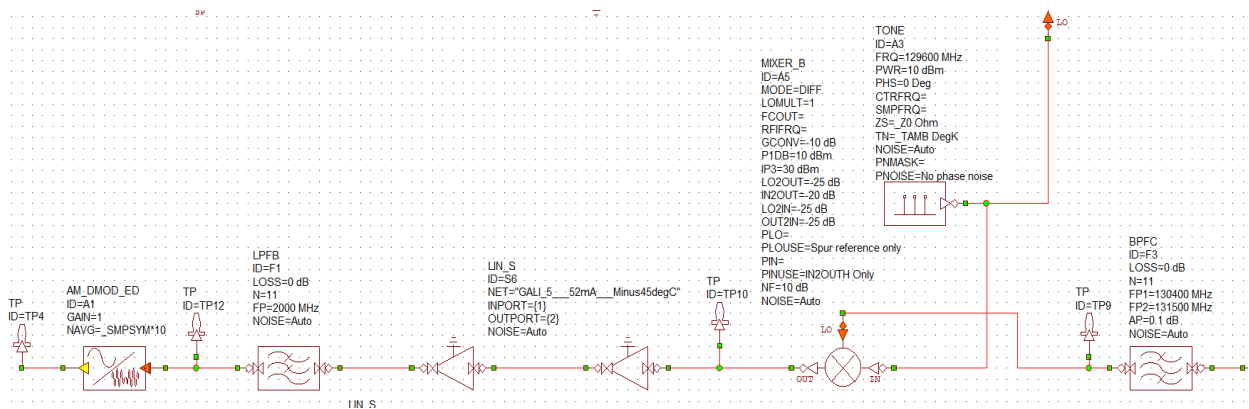


Рис. 3.15. Структурна схема приймального тракту терагерцового діапазону

Спектр радіосигналу після проходження смугового фільтру приймального тракту зображений на рис. 3.16, а часова форма цього ж самого сигналу – відповідно на рис. 3.17.

Спектр IR-UWB сигналу на виході змішувача частоти «уніз» показано рис. 3.18, а осцилограму вихідного сигналу змішувача приймального тракту – на рис. 3.19.

Після проходження підсилювача радіочастоти, UWB сигнал відфільтровується від продуктів перетворення, що виникли в змішувачі за допомогою фільтру нижньої частоти, АЧХ якого зображена на рис. 3.20. Відповідно спектр UWB після фільтрації показаний на рис. 3.21.

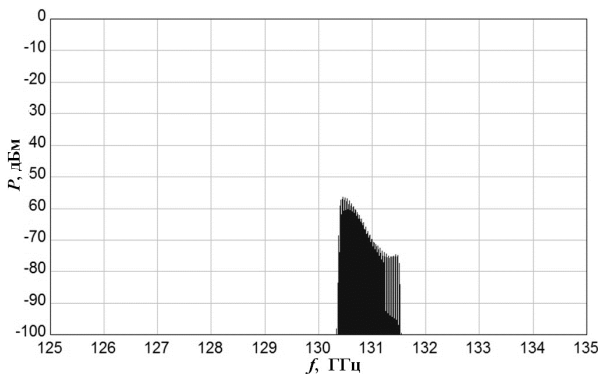


Рис. 3.16. Спектр «UWB» сигналу на виході смугового фільтру приймального тракту радіолінії ТГц діапазону

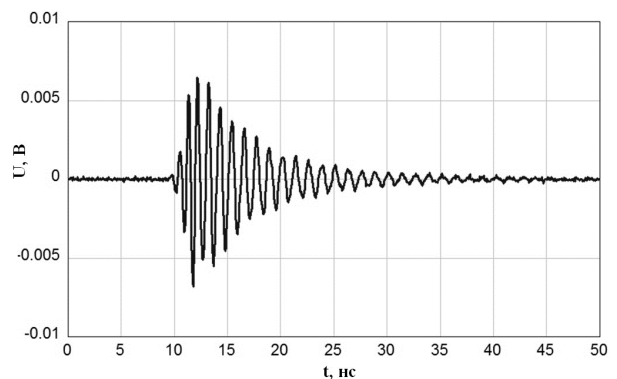


Рис. 3.17. Спектр «UWB» сигналу на виході смугового фільтру приймального тракту радіолінії ТГц діапазону (в масштабі 50 нс)

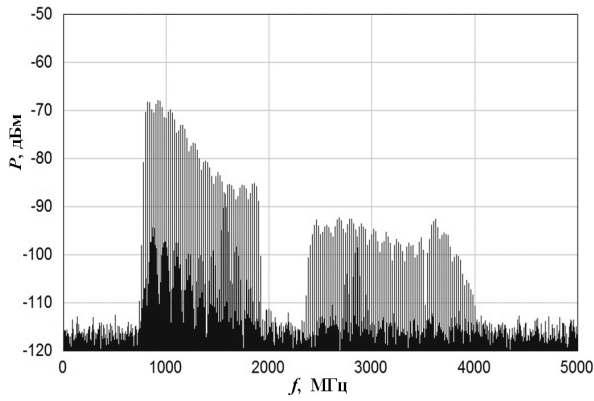


Рис. 3.18. Спектр UWB сигналу на виході змішувача «вниз» в приймальному тракті радіолінії терагерцового діапазону

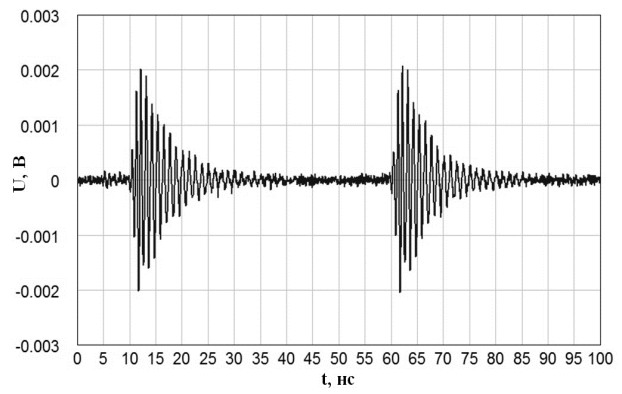


Рис. 3.19. Осцилограма UWB сигналу на виході змішувача «вниз» в приймальному тракті радіолінії терагерцового діапазону (в масштабі 100 нс)

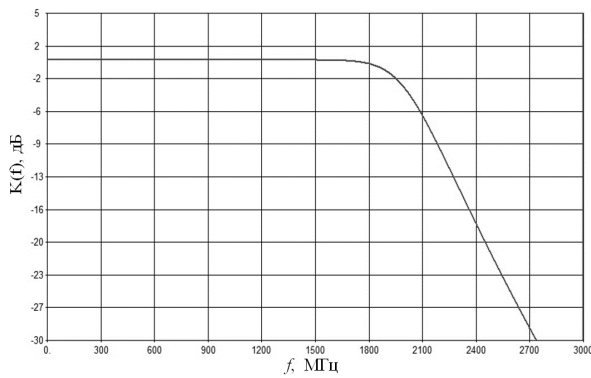


Рис. 3.20. АЧХ фільтра нижніх частот

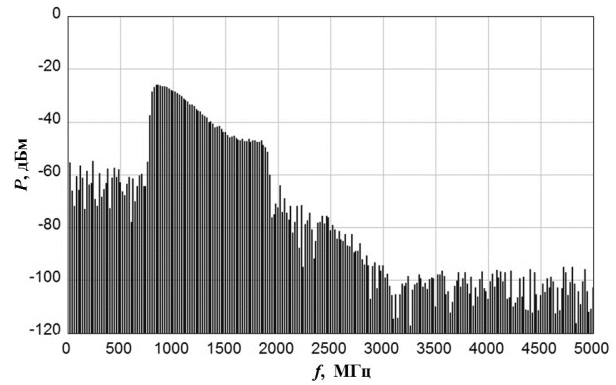


Рис. 3.21 Спектр UWB сигналу на виході ФНЧ

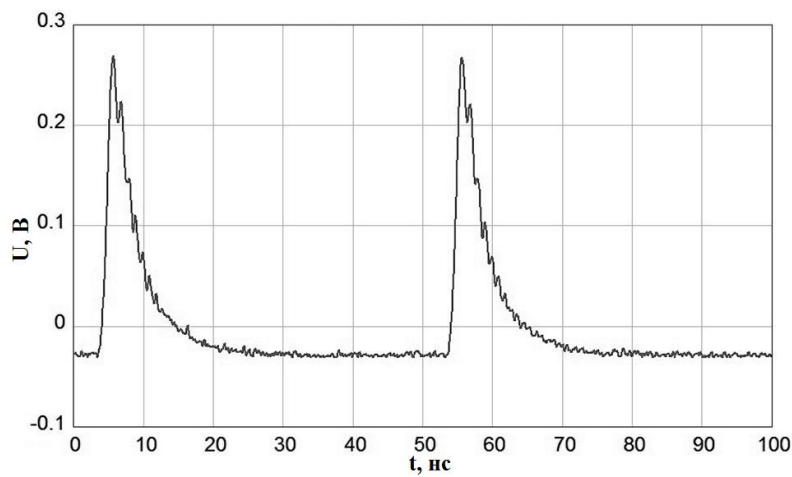


Рис. 3.22. Часова форма інформаційного сигналу на виході детектору обвідної

На рис. 3.22 показано часову форму обвідної UWB сигналу на виході детектору обвідної. Далі цей сигнал можна подати на цифрову частину приймального тракту для демодуляції та перетворення в необхідний цифровий код.

### 3.4. Висновки

Результати імітаційного моделювання підтверджують можливість передачі IR-UWB сигналу методом гетеродинування через макет прийомопереда-

вача терагерцового діапазону в діапазоні частот 130,4-131,5 ГГц.

1. Порівнюючи часові форми IR-UWB сигналів на вході (див. рис. 3.5 та рис. 3.22) та виході радіолінії ТГц діапазону можна побачити суттєве розширення IR-UWB сигналу в часовій області, що складає майже в 30 разів: від 0,5 нс до 15 нс. Це обумовлено, в першу чергу, обмеженням спектру UWB сигналу в смуговому фільтрі передавального та приймального тракту.

2. Важливо відзначити, що радіосигнал на виході передавача терагерцового діапазону не можна віднести до класу надширокосмугових (UWB) сигналів за критерієм відносної ширини спектру сигналу, оскільки його відносна смуга частот за рівнем – 10 дБ складає менше одного процента.

В нашому випадку, це означає, що необхідно, по перше, зменшити тривалість гаусівського моноциклу, наприклад, до 50-100 пс, а по-друге значно розширити смугу частот смугових фільтрів передавального та приймального трактів до меж приблизно 130,5 – 160,5 ГГц.

3. Таким чином, перенесення IR-UWB сигналу в діапазон терагерцових частот в передавачі та зворотній перенос в приймачі при розробці радіолінії ТГц діапазону ставить нові завдання, суть яких полягає в розробці:

– широкосмугових змішувачів терагерцового діапазону «вгору» та «вниз» відповідно для передавального та приймального трактів радіолінії терагерцового діапазону,

– смугових фільтрів з широкою смугою пропускання,

– широкосмугових підсилювачів потужності передавального тракту,

– широкосмугових малOSHумливих підсилювачів приймального тракту,

– гетеродинів передавального та приймального трактів.

### Загальні висновки

Розробки нашого наукового колективу КПІ ім. Горького використовуються:

- ВАТ «Меридіан» ім. С. П. Корольова (м. Київ) у рамках виконання робіт по проектуванню контрольно-вимірювальної апаратури субтерагерцового діапазону;

- на виробничій базі конструкторського бюро «Пошпещмаш» шляхом використання уніфікованого пристрою завадостійкої передачі інформації у високошвидкісних каналах радіорелейного зв'язку терагерцового діапазону хвиль;

- Одеським обласним радіотелевізійним передавальним центром (м.Одеса) для створення засо-

бів передачі для побудови надвисоко-швидкісних (понад 1 Гбіт/с) транспортних розподільчих мереж - на виробничій базі ТОВ «Науково-виробниче підприємство «КОНУС»».

Згідно з ліцензійним договором №Л/16-7 від 18.11.2016 надані права на використання об'єкта права інтелектуальної власності патенту України № 93139 від 25.09.2014 р. на корисну модель «Канал передачі даних в терагерцовому діапазоні з пропускною здатністю більше 1 Гбіт/с».

Розроблено новий розділ «Проектування радіорелейних систем терагерцового діапазону» з навчальної дисципліни «Безпроводові телекомунікаційні системи ТКС-1» та лабораторну роботу для практикуму «Дослідження передавання радіосигналів цифрового телебачення по радіорелейній лінії терагерцового діапазону» з навчальної дисципліни «Телекомунікаційні безпроводові системи-1» Видано 7 монографій та навчальних посібників відповідно до вимог Міністерства освіти та науки України.

Отримано 7 патентів України на винаходи на корисну модель та 2 рішення про видачу патентів України на винаходи.

Опубліковано 26 статей (з них 15 – в журналах, що входять до науково-метричних баз даних Web of Science та Scopus з індексом SNIP  $\geq 0,8$  (Source Normalized Impact per Paper). Опубліковано 56 доповідей на 6 міжнародних науково-технічних та практичних конференціях.

За результатами проведених досліджень до Плану використання радіочастотного ресурсу України (розділ II) Постановою Кабінету Міністрів України №838 від 05.09.2012 р. внесена радіотехнологія радіорелейного зв'язку в діапазонах частот 94,1-100 ГГц; 102-105 ГГц; 106,5-109,5 ГГц; 111,8-113 ГГц; 130-134 ГГц; 141-148,5 ГГц.

Для розробки радіолінії із гігабітною пропускною здатністю терагерцового діапазону для надвисокошвидкісних розподільчих мереж доступу вибрано частотний діапазон 130-134 ГГц.

Створена нова продукція і вперше отримано експериментальний зразок цифрової радіолінії із гігабітною пропускною здатністю, що функціонує в терагерцовому діапазоні і який може бути використаний в надвисокошвидкісних розподільчих мережах мобільного зв'язку нового покоління для забезпечення передавання та приймання цифрової інформації зі швидкістю до 1 Гбіт/с в діапазоні частот 130 – 134 ГГц на дальності зв'язку в межах 1 км.

Уперше в Україні виконана розробка прийомо-передавача терагерцового діапазону 130-134 ГГц, а також цифрової лінії зі швидкістю передавання та приймання до 1 Гбіт/с, які на даний момент часу не мають прямих аналогів. Відзначимо, що більш інтенсивне практичне застосування вказаних науко-

емних вітчизняних розробок при налагодженні процесу їх промислового виробництва могло б забезпечити прорив у розвитку економіки країни та галузі телекомунікацій в цілому.

Подальші напрямки розвитку телекомунікацій терагерцового діапазону автори вбачають у:

1) необхідності розробки підсилювачів потужності на одиниці – десятки мілліват для передавального тракту та малощумливого підсилювача для приймального тракту, що дозволить підвищити енергетичний потенціал радіолінії і таким чином збільшити відстань між кореспондуючими станціями терагерцового діапазону, що в перспективі надало б можливість використовувати вказані розробки на лініях місцевого і зонового радіорелейного зв'язку та мобільного зв'язку;

2) поступовому переході при побудові передавального тракту приймопередача на елементи оптичної техніки (високостабільні лазери, модулятори, фільтри, пристрої складання та поділу потужності), що дозволить, по-перше, зменшити габарити передавального тракту, по-друге, забезпечити його з'єднання з діючими волоконнооптичними лініями зв'язку і по-третє, одночасно формувати декілька передавальних каналів зі швидкістю передавання одиниці – десятки гігабіт за секунду у кожному з них;

3) практичному освоєнні інших ділянок терагерцового спектру, зокрема 220÷250 ГГц, 290÷310 ГГц, 375÷450 ГГц;

4) практичному дослідженні ефективності передачі через терагерцовий радіоканал імпульсних надширококомунікаційних сигналів.

## Література

1. THz photonic wireless links with 16-QAM modulation in the 375-450 GHz band [Text] / S. Jia, X. Yu, H. Hu, J. Yu, P. Guan, F. Da Ros, M. Galili, T. Morioka, L. K. Oxenkowe // *Optics Express*. – 2016. – Vol. 24, No. 21. – P. 23777-23783.

2. Towards MMIC-Based 300GHz Indoor Wireless Communication Systems [Text] / I. Kallfass, I. Dan, S. Rey, P. Harati, J. Antes, A. Tessmann, S. Wagner, M. Kuri, R. Weber, H. Massler, A. Leuther, T. Merkle, T. Kürner // *IEICE Trans. Electron.* – 2015. – Vol. E98-C, No. 12. – P. 1081-1090.

3. Wireless sub-THz communication system with high data rate [Text] / S. Koenig, D. Lopez-Diaz, J. Antes, F. Boes, R. Henneberger, A. Leuther, A. Tessmann, R. Schmogrow, D. Hillerkuss, R. Palmer, T. Zwick, C. Koos, W. Freudel, O. Ambacher, J. Leuthold, I. Kallfass // *Nature photonics*. – 2013. – Vol. 7, No. 12. – P. 977-981.

4. 400-GHz Wireless Transmission of 60-Gb/s Nyquist-QPSK Signals Using UTC-PD and Heterodyne Mixer [Text] / Y. Xianbin, R. Asif, M. Piels, D. Zibar, M. Galili, T. Morioka, P. U. Jensen, L. K. Oxenkowe // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2016. – Vol. 6, No. 6. – P. 765-770.

5. Семенова, В. Терагерцовые Технологии для Телекоммуникаций [Текст] / В. Семенова, В. Беспалов // *Фотоника*. – 2015. – № 3/51. – С. 126-141.

6. Громов, П. Японский терагерцовый модем превысил скорость в 100 Гбит [Электронный ресурс] / П. Громов // *Конференция Solid-State Circuits Conference (ISSCC), СанФранциско, февраль-2017*. – Режим доступа: <https://hightech.fm/2017/02/06/thz-transmitter>. – 6.02.2017.

7. Авдєєнко, Г. Л. Терагерцові технології в телекомунікаційних системах. Частина 1. Обґрунтування частотного діапазону, проектування функціональних вузлів телекомунікаційних систем терагерцового діапазону [Текст] / Г. Л. Авдєєнко, С. Г. Бунін, Т. М. Наритник // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2018. – № 4(148). – С. 72-91.

8. Наритник, Т. М. Розробка радіолінії із гігабітною пропускною здатністю терагерцового діапазону для надвисокошвидкісних розподільчих мереж доступу [Електронний ресурс] / Київ. КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2016. – Режим доступу: <http://report.kpi.ua/uk/0115U002330>. – Дата звернення 21.05.2018.

9. Ghavami, M. *Ultra Wideband Signals and Systems in Communication Engineering* [Text] / M. Ghavami, L. B. Michael, R. Kohno. – John Wiley and Sons Ltd., 2007. – 304 p.

## References

1. Jia, S., Yu, X., Hu, H., Yu, J., Guan, P., Da Ros, F., Galili, M., Morioka, T., Oxenkowe, L.K. THz photonic wireless links with 16-QAM modulation in the 375-450 GHz band. *Optics Express*, 2016, vol. 24, no. 21, pp. 23777–23783.

2. Kallfass, I., Dan, I., Rey, S., Harati, P., Antes, J., Tessmann, A., Wagner, S., Kuri, M., Weber, R., Massler, H., Leuther, A., Merkle, T., Kürner, T. Towards MMIC-Based 300GHz Indoor Wireless Communication Systems. *IEICE Trans. Electron*, 2015, vol. E98-C, no. 12, pp. 1081-1090.

3. Koenig, S., Lopez-Diaz, D., Antes, J., Boes, F., Henneberger, R., Leuther, A., Tessmann, A., Schmogrow, R., Hillerkuss, D., Palmer, R., Zwick, T., Koos, C., Freudel, W., Ambacher, O., Leuthold, J., Kallfass, I. Wireless sub-THz communication system

with high data rate. *Nature photonics*, 2013, vol. 7, no. 12, pp. 977-981.

4. Xianbin, Y., Asif, R., Piels, M., Zibar, D., Gali, M., Morioka, T., Jensen, P. U., Oxenkowe, L. K. 400-GHz Wireless Transmission of 60-Gb/s Nyquist-QPSK Signals Using UTC-PD and Heterodyne Mixer. *IEEE Transactions on terahertz science and technology*, 2016, vol. 6, no. 6, pp. 765-770.

5. Semenova, V., Bespalov, V. Teragercovye Tehnologii dlja Telekomunikacij [Terahertz Technologies for Telecommunications]. *Fotonyka – Photonics*, 2015, no. 3/51, pp. 126-141.

6. Hromov, P. Japonskij teragercovyj modem prevysil skorost' v 100 Gbit [Japanese terahertz modem has exceeded the speed of 100 Gbit]. Konferencija Solid State Circuits Conference (ISSCC), SanFrancisko, fevral'-2017. Available at: <https://hightech.fm/2017/02/06/thz-transmitters> (accessed 6.02.2017).

7. Avdyeyenko, G. L., Bunin, S. H., Narytnyk, T. M. Terahertsovi tekhnolohiyi v telekomunikatsiynikh

systemakh. Chastyna 1. Obhruntuvannya chastotnoho diapazonu, proektuvannya funktsional'nykh vuzliv telekomunikatsiynikh system terahertsovoho diapazonu [Terahertz technologies in telecommunication systems. Part 1. Justification of the frequency range, design of functional nodes of terahertz range telecommunication systems]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia - Aerospace technic and technology*, 2018, no. 4(148), pp. 72-91.

8. Narytnyk, T. M. *Rozrobka radiolinyi iz hihabitnoyu propusknoyu zdatnistyu terahertsovoho diapazonu dlya nadvysokoshvydkisnykh rozpodil'chyykh merezh dostupu* [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. Ghavami, M., Michael, L. B., Kohno, R. *Ultra Wideband Signals and Systems in Communication Engineering*. John Wiley and Sons Ltd. Publ., 2007. 304 p.

*Поступила в редакцію 20.05.2018, рассмотрена на редколлегии 12.09.2018*

## ТЕРАГЕРЦОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ. ЧАСТЬ 2. ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕДАЧИ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ СИГНАЛОВ СТАНДАРТА DVB-C И ИМПУЛЬСНОГО СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОГО СИГНАЛА ПО РАДИОЛИНИИ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА

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

Впервые в практическом плане проведенные исследования лабораторного образца цифровой симплексной радиорелейной системы терагерцового диапазона в составе приемного и передающего радиотракта в диапазоне частот 130÷134 ГГц и цифрового модема с пропускным канальным разрешением до 1200 Мбит/с на дальность связи в нормальных условиях в пределах 1 км. Показано, что предложенная телекоммуникационная система, которая реализует концепцию создания программно-определяемых радиосистем на основе технологии Wi-Fi, может высокопроизводительно использоваться в транспортных распределительных сетях мобильной связи следующего поколения с обеспечением соответствующих скоростей передачи, надежности и защищенности. Исследованы параметры многоканального сигнала цифрового телевидения стандарта DVB-C при его передаче через макет приемопередающего тракта диапазона 130ГГц. Результаты исследования показали, что использование нижней части терагерцового диапазона частот (130 ГГц) с полосой 24 МГц позволяет передать три канала телевизионного вещания стандарта DVB-C с общей скоростью транспортного потока на уровне 125 Мбит/с с высоким субъективным качеством воспроизведения ТВ программ. Приведены результаты моделирования передачи методом гетеродинования импульсного широкополосного сигнала (IR-UWB) радиолинии терагерцового диапазона. Впервые приведены результаты исследований (изменения временной формы) при передаче IR-UWB сигнала в виде гауссовского моноцикла передающим трактом и его прием приемным трактом терагерцового диапазона, спроектированным для полосы частот 130,4÷131,5 ГГц. На основе полученных результатов исследований сформулированы требования к параметрам радиолинии терагерцового диапазона для обеспечения приемлемого качества приема импульсных сверхширокополосных сигналов. У разработки приемопередающего тракта радиорелейной системы терагерцового диапазона нет прямых аналогов в настоящее время в Украине, что может обеспечить существенный прорыв в развитии отрасли телекоммуникаций. Полученные результаты исследований также будут способствовать развитию смежных с телекоммуникациями отраслей, в частности: радиоастрономии, межспутниковой связи, радиолокации, медицины и т.д.

**Ключевые слова:** терагерцовые технологии, телекоммуникационные системы, сверхвысокая пропускная способность, приемопередающий тракт, цифровая симплексная радиорелейная система, транспортные



распределительные сети, мобильная связь, многоканальный сигнал цифрового телевидения стандарта DVB-C, импульсный сверхширокополосных сигнал, передача моноцикла радиолнией терагерцового диапазона.

## TERAHERTZ TECHNOLOGIES IN TELECOMMUNICATION SYSTEMS. PART 2. RESEARCH AND SIMULATION OF DVB-C AND PULSED ULTRAWIDEBAND TV SIGNALS TRANSMISSION THROUGH WIRELESS LINK IN TERAHERTZ RANGE

*G. L. Avdeyenko, S. H. Bunin, T. N. Narytnyk*

The laboratory testbed of a digital simplex radio-relay system of the terahertz range has been studied for the first time in practical terms. It consists of the receiver and transmitter parts of 130÷134 GHz frequency range and a digital modem with a channel data transmission of up to 1200 Mbps for a communication point-to-point distance under normal conditions within 1 km. It is shown that the proposed telecommunication system, which implements the concept of the creation of software-defined radio systems based on Wi-Fi technology, can be highly productive in the next generation mobile communication networks providing the appropriate transmission speeds, reliability, and security. It is studied the parameters of multichannel digital TV signal DVB-C standard when it is transmitted through the testbed of the transmitter and receiver parts of 130 GHz band. The results of the research showed that the application of lower part of terahertz frequency band (130 GHz) with a bandwidth of 24 MHz allows the transmission of three DVB-C television broadcasting channels with a total transport speed of 125 Mbit/s with a high subjective quality of TV programs. The results of the simulation of impulse ultrawideband (IR-UWB) signal transmission by the wireless link of terahertz band are presented. The results of researches of changes of IR-UWB Gaussian monocycle in the transmitter part and its reception by the receiver part of 130.4÷131.5 GHz terahertz band are presented for the first time. On the basis of the results of the research, the requirements for parameters of terahertz wireless link are formulated to ensure acceptable quality of ultrawideband impulse signals receiving. Development of the transmitter and receiver parts of radio relay system of the terahertz range has no direct current analogs in Ukraine. It can provide a significant breakthrough in the development of the telecommunications industry. The obtained research results will also contribute to the development of telecommunications-related industries, in particular: radio astronomy, inter-satellite communication, radar systems, medicine, etc.

**Keywords:** terahertz technologies, telecommunication systems, ultra-high bandwidth, transceivers, digital simplex radio relay system, transport distribution networks, mobile communication, DVB-C multichannel digital signal, impulse ultrawideband signal, IR-UWB generator model, monocycle transmission by the terahertz range wireless link.

**Авдєєнко Гліб Леонідович** – старший викладач каф. телекомунікацій Інституту телекомунікаційних систем КПІ ім. Ігоря Сікорського, e-mail: [django2006@ukr.net](mailto:django2006@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](mailto: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](mailto:director@mitris.com).

**Avdeyenko Hlib Leonidovych** – senior teacher at the Department of Telecommunications of the Institute of Telecommunication Systems of Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, e-mail: [django2006@ukr.net](mailto:django2006@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](mailto: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](mailto:director@mitris.com).