

УДК 621.396

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕДАЧИ МОДУЛИРОВАННЫХ IR-UWB СИГНАЛОВ СИСТЕМОЙ РАДИОСВЯЗИ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА

НАРЫТНИК Т.Н.¹⁾, АВДЕЕНКО Г.Л.¹⁾, САЙКО В.Г.²⁾, КОРСУН В.И.³⁾

¹⁾Научно-исследовательский институт телекоммуникаций НТУУ «КПИ»,
пер. Индустриальный, 2, Киев, 03056, Украина director@mitris.com

²⁾ Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,
ул. Владимирская, 60, Киев, 01033, Украина, vgsaiko@gmail.com

³⁾ Український державний центр радіочастот
Україна, Київ, 03179, пр. Перемоги, 151, e-mail: korsun@ucrf.gov.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕДАВАННЯ МОДУЛЬОВАНИХ IR-UWB СИГНАЛІВ СИСТЕМОЮ РАДІОЗВ'ЯЗКУ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДІАПАЗОНУ

НАРИТНИК Т.М.¹⁾, АВДЕЄНКО Г.Л.¹⁾, САЙКО В.Г.²⁾, КОРСУН В.І.³⁾

¹⁾Науково-дослідний інститут телекомунікацій НТУУ «КПІ»,
пров. Індустріальний, 2, Київ, 03056, Україна, director@mitris.com

²⁾ Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
вул. Володимирська, 60, м. Київ, 01033, Україна, vgsaiko@gmail.com

³⁾ Український державний центр радіочастот
Україна, Київ, 03179, пр. Перемоги, 151, e-mail: korsun@ucrf.gov.ua

STUDY OF TRANSMISSION OF MODULATED IR-UWB SIGNALS OF THE TERAHERTZ RADIO COMMUNICATION SYSTEM

NARYTNIK T.N.¹⁾, AVDEENKO G.L.¹⁾, SAIKO V.G.²⁾, KORSUN V.I.³⁾

¹⁾Research Institute of Telecommunications, NTUU "KPI",
Industrialny lane, 2, Kiev, 03056, Ukraine, director@mitris.com

²⁾Kyiv National Taras Shevchenko University,
Solomyanska st., 60, Kiev, 01033, Ukraine vgsaiko@gmail.com

³⁾Ukrainian State Center of Radio Frequencies
Ukraine, Kiev, 03179, Victory Ave., 151, e-mail: korsun@ucrf.gov.ua

Аннотация: Представлено имитационную модель импульсной сверхширокополосной линии связи терагерцового диапазона (ТГД). Приводятся результаты исследования характера изменения временной формы (то есть искажений) IR-UWB сигнала пикосекундных продолжительности при его передаче через идеализированную имитационную модель радиолинии ТГД диапазона (от 110 до 170 ГГц) с известными параметрами. Проведены расчёты продолжительности IR-UWB импульса, исходя из того, что скорость передачи информации по беспроводным каналам должна составлять $V = 1$ Гбит / с, и необходимого отношения сигнал / шум на входе IR-UWB приёмника при различных видах модуляции для проведения имитационного моделирования импульсной системы радиосвязи "связи терагерцового диапазона типа «точка-точка». В качестве среды имитационного моделирования избран программный пакет Visual System Simulator САПР AWR Microwave Office ver.12 компании National Instruments. Имитационную модель радиолинии ТВД диапазона построено на базе параметров и структурной схемы макета действующего макета приёмопередатчика ТГД, разработанного авторами. Результаты исследования по передаче UWB сигналу пикосекундной продолжительности через идеализированную модель радиоканала терагерцового канала от 110 до 140 ГГц показывают, что основным видом искажения временной формы импульса является его расширение от начальной длительности 140 пс до 250 пс, которая обусловлена в первую очередь ограничением полосы пропускания в фильтрах нижних частот и полосно-пропускающих фильтрах передающего и приёмного трактов. При необходимости, на основе полученных ре-

зультатов исследования, можно сформулировать требования к параметрам радиолинии ТГД, что будет проектироваться, которые обеспечивают допустимый уровень искажений.

Ключевые слова: терагерцовый диапазон частот, радиорелейные линии связи, импульсные сверхширокополосные сигналы, передатчик, структурная схема симплексной системы радиосвязи, имитационная модель.

Анотація: Представлено імітаційну модель імпульсної надширокопasmової лінії зв'язку терагерцового діапазону (ТГД). Наведено результати дослідження характеру зміни часової форми (тобто спотворень) IR-UWB сигналу пікосекундної тривалості при його передаванні через ідеалізовану імітаційну модель радіолінії ТГД діапазону (від 110 до 170 ГГц) з відомими параметрами. Проведено розрахунки тривалості IR-UWB імпульсу, виходячи з того, що швидкість передавання інформації по бездротовим каналам повинна складати $V = 1$ Гбіт/с, та необхідного відношення сигнал/шум на вході IR-UWB приймача при різних видах модуляції для проведення імітаційного моделювання імпульсної системи радіозв'язку терагерцового діапазону типу «точка-точка». В якості середовища імітаційного моделювання обрано програмний пакет Visual System Simulator САПР AWR Microwave Office ver.12 компанії National Instruments. Імітаційну модель радіолінії ТГД діапазону побудовано на базі параметрів та структурної схеми макету діючого макета прийомо-передавача ТГД, розробленого авторами. Результати дослідження з передачі UWB сигналу пікосекундної тривалості через ідеалізовану модель радіоканалу терагерцового каналу від 110 до 140 ГГц показують, що основним видом спотворення часової форми імпульсу є його розширення від початкової тривалості 140 пс до 250 пс, яка обумовлена в першу чергу обмеженням смуги пропускання у фільтрах нижньої частоти та смугопрпусканних фільтрах передавального та приймального тракту. При необхідності, на основі отриманих результатів дослідження, можна сформулювати вимоги до параметрів радіолінії ТГД, що буде проектуватися, які забезпечують допустимий рівень спотворень.

Ключові слова: терагерцовий діапазон частот, радіорелейні лінії зв'язку, імпульсні надширокопasmові сигнали, передавач, структурна схема симплексної системи радіозв'язку, імітаційна модель.

Abstract: A simulation model of a terahertz pulsed ultra-wideband communication link (TGD) is presented. The results of the study of the nature of the change in the temporal form (i.e. distortion) of the IR-UWB signal of a picosecond duration when it is transmitted through an idealized radio frequency simulation model of the TGD band (from 110 to 170 GHz) with known parameters are given. The duration of the IR-UWB pulse was calculated based on the fact that the information transmission rate over wireless channels should be $V = 1$ Gbit/s, and the required signal-to-noise ratio at the input of the IR-UWB receiver with various types of modulation for simulating a pulse system "terahertz range of the" point-to-point "type of communication. The Visual System Simulator CAD software AWR Microwave Office ver.12 from National Instruments was chosen as the simulation modeling environment. TVD radio frequency simulation model built on the basis of the parameters and block diagram of the layout of the current layout of the TGD transceiver, developed by the authors. The results of the UWB transmission of a picosecond signal via an idealized radio channel model of the terahertz channel from 110 to 140 GHz show that its extension from the initial duration of 140 ps to 250 ps, which is primarily due to the limitation of bandwidth in low-pass filters and bandpass filters of transmitting and receiving paths. If necessary, on the basis of the obtained research results, it is possible to formulate the requirements for the parameters of a TGD radio link that will be designed, which provide an acceptable level of distortion.

Keywords: terahertz frequency range, radio relay communication lines, pulsed ultra-wideband signals, a transmitter, a block diagram of a simplex radio communication system, a simulation model.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

В сучасних безпроводових телекомунікаційних системах переважно застосовують радіосигнали на основі гармонійних (синусоїдальних) носійних коливань, які не є кращими з погляду ефективності перетворення енергії струму в антені в енергію електромагнітних хвиль. Це пов'язане з тим, що згідно з рівняннями Максвелла із теорії електромагнітного поля, випромінювана антеною енергія електромагнітної хвилі пропорційна похідній струму в часі. Синусоїдальне носійне коливання з математичної точки зору є найбільш гладкою періодичною функцією, отже, є найгіршою з погляду ефективності випромінювання радіохвиль. У свою чергу імпульсні надширокопasmові сигнали (IR-UWB сигнали) мають найвищу можливу похідну в часі й тому випромінюються антеною у вигляді радіохвиль більш ефективно, ніж гармонійні коливання [1]. Тому на даний час IR-UWB сигнали привертають дедалі більшу увагу дослідників завдяки ряду переваг перед сигналами на основі гармонійних (синусоїдальних) носійних коливань, а їх властивості широко досліджуються закордонними й вітчизняними фахівцями. Генерація IR-UWB сигналів не представляє особливих технічних труднощів, а основна проблема полягає лише в доступності пристроїв та елементної бази, здатних генерувати імпульси необхідної малої тривалості і заданої амплітуди.

Однією з перспективних сфер застосування імпульсних надширокосмугових сигналів в терагерцовому діапазоні частот (ТДЧ) є системи радіозв'язку (СР) і інфокомунікаційні системи. Зокрема, створення нових за принципами дії, габаритами, заводо захищеністю і енерго-ефективністю апаратно-програмних засобів передавання та приймання інформації підвищеної пропускну здатності з використанням модульованих імпульсних надширокосмугових сигналів в терагерцовому діапазоні частот. Розвиток елементної бази радіоелектронних пристроїв, широке впровадження цифрової техніки для формування і обробки сигналів дозволяють по-новому підійти до вирішення багатьох завдань телекомунікаційних систем, і в першу чергу до задачі збільшення швидкості передачі інформації. Терагерцовий діапазон (0,1 – 3 ТГц) має найбільшу каналну ємність у порівнянні з усіма іншими діапазонами радіочастот, що використовуються для бездротових телекомунікацій. Зазначені обставини роблять цей діапазон унікальним для побудови телекомунікаційних систем і мереж, в тому числі систем для транспортних мереж мобільного зв'язку п'ятого покоління. Сьогодні виникла велика потреба в організації високонадійних однопролітних ліній зв'язку, призначених для високошвидкісної (не менше 0,1–1 Гбіт/с) передачі інформації для мобільних мереж 5G, а також обміну даними між ЕОМ і периферійними пристроями. Для цих цілей в найбільшій мірі підходять системи радіозв'язку терагерцового діапазону частот на основі імпульсних надширокосмугових сигналів. Імпульсні надширокосмугові сигнали (IR-UWB) мають цілий ряд особливостей, що вигідно відрізняють їх від традиційних радіосигналів на основі синусоїдальних носійних коливань.

Однак, у зв'язку з обмеженнями на потужність і смугу займаних частот, ці сигнали розглядаються лише з метою їх застосування в системах радіозв'язку із зоною дії в кілька десятків метрів з метою з'єднання комп'ютерів з периферійним устаткуванням (персональні мережі). Далекий радіозв'язок і, особливо, зв'язок у супутникових та радіорелейних мережах зв'язку за допомогою цих сигналів, практично не розглядається. Виходячи з цього виникає потреба в дослідженнях особливостей побудови безпроводової телекомунікаційної системи терагерцового діапазону, в якій в якості переносника інформації застосовується імпульсний надширокосмуговий сигнал.

Тому метою даної статті є дослідження характеру зміни часової форми (тобто спотворень) IR-UWB сигналу пікосекундної тривалості при його передаванні через ідеалізовану імітаційну модель радіолінії ТГД (від 110 до 170 ТГц) в середовищі AWR Microwave Office з відомими параметрами.

2. ПОБУДОВА ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛЕЙ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДІАПАЗОНУ НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ ІМПУЛЬСНИХ НАДШИРОКОСМУГОВИХ СИГНАЛІВ

Обґрунтуємо вибір тривалості IR-UWB імпульсу виходячи з того, що швидкість передавання інформації V бездротовим каналом повинна складати 1 Гбіт/с.

2.1 Обґрунтування вибору тривалості IR-UWB сигналу

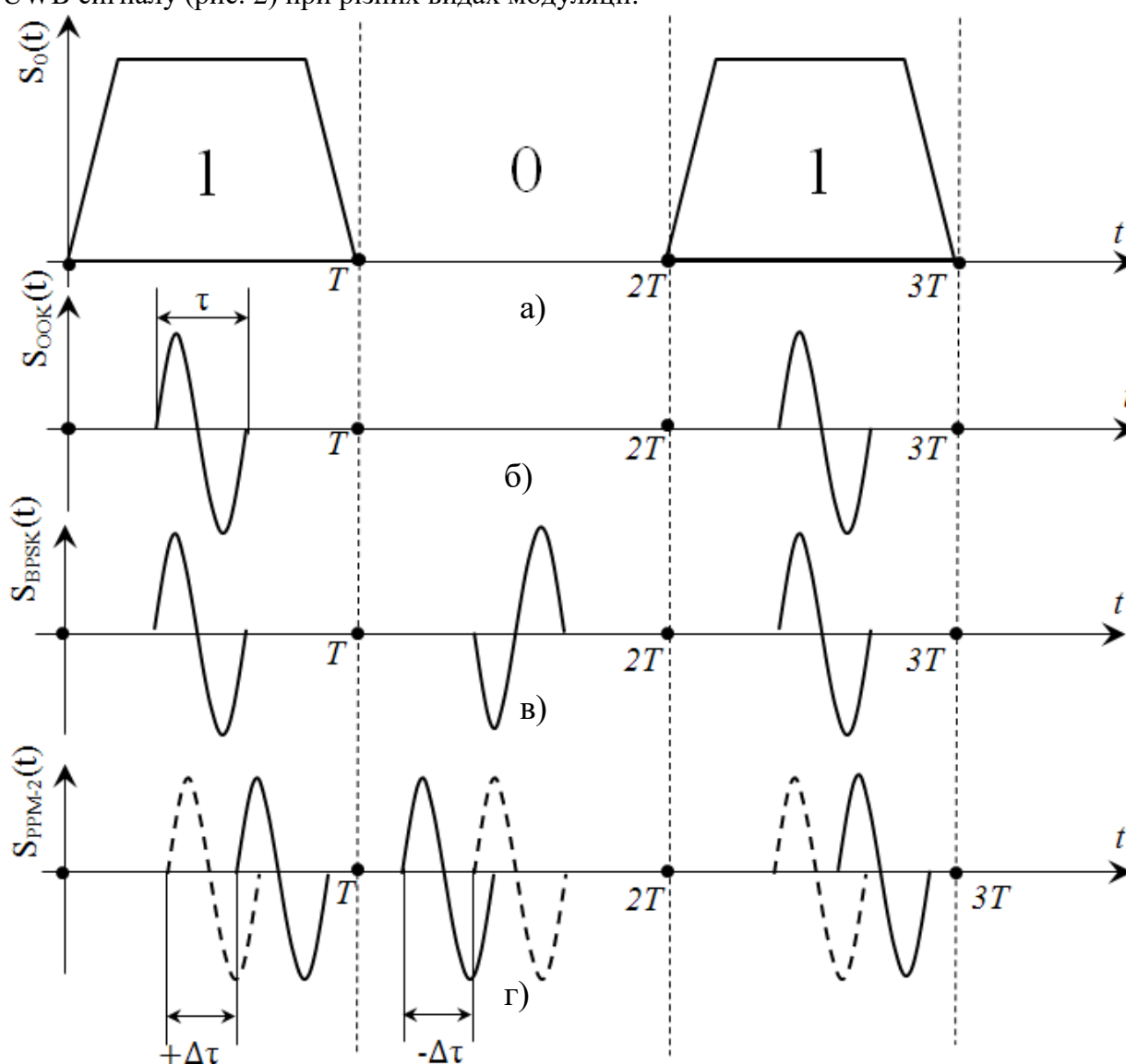
При інформаційній швидкості цифрового потоку, що надходить до передавального тракту IR-UWB СР ТДЧ від мережевого інтерфейсу персонального комп'ютеру або навпаки, тривалість одного елемента інформації, тобто логічного «0» або логічної «1» не повинна перевищувати

$$T = \frac{1}{V} = 10^{-9} \text{ с.} \quad (1)$$

При надходженні до передавального тракту імпульсу логічного «0» або логічної одиниці «1» на його виході формуються IR-UWB сигнали, при цьому, можливі наступні варіанти:

1) логічний «0» або логічна «1» передається за допомогою одного імпульсу IR-UWB сигналу (рис. 1) при різних видах модуляції;

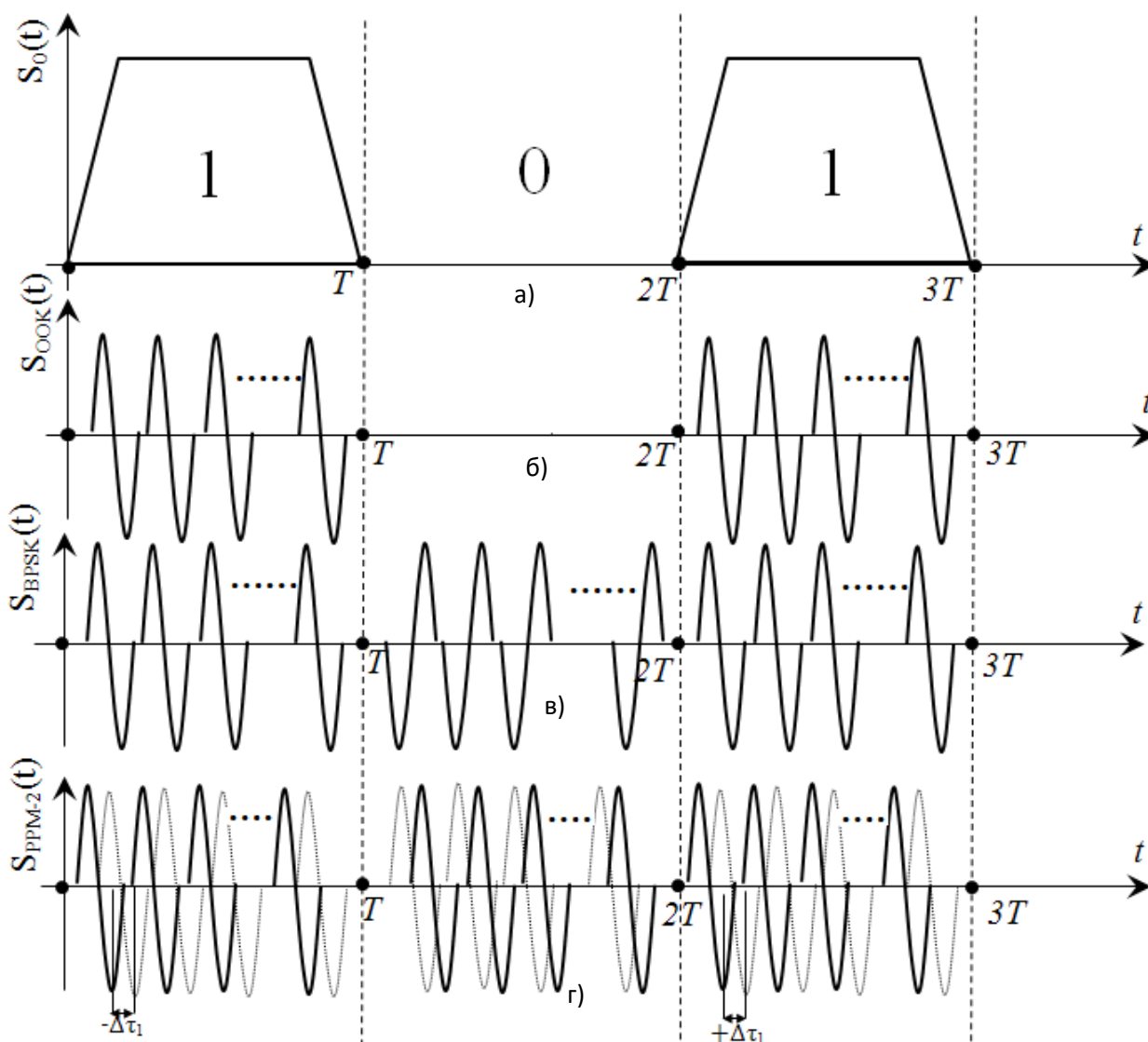
2) Логічний «0» або логічна «1» передається за допомогою декількох імпульсів IR-UWB сигналу (рис. 2) при різних видах модуляції.



а) інформаційний сигнал; б) IR-UWB з модуляцією OOK; в) IR-UWB з модуляцією BPSK; г) IR-UWB з модуляцією 2-PPM

Рисунок 1 – Передавання інформаційної послідовності логічних «1» або логічних «0» у вигляді IR-UWB сигналів

Другий спосіб передавання є більш перспективним, оскільки він по-перше, дозволяє зменшити потужність передавача, а по-друге, у подальшому забезпечити багатоканальний режим роботи системи радіозв'язку шляхом представлення логічного «0» та логічної «1» відповідними адресними кодами відповідного абонента.



а) інформаційний сигнал; б) IR-UWB з модуляцією OOK; в) IR-UWB з модуляцією BPSK; г) IR-UWB з модуляцією 2-PPM

Рисунок 2 – Передавання інформаційної послідовності логічних «1» або логічних «0»

У роботі [2] показано, що при передаванні логічного «0» або логічної «1» декількома IR-UWB сигналами у вигляді моноцикла, відношення енергії біта до спектральної щільності шуму визначається співвідношенням

$$\frac{E_6}{N_0} = \frac{E_s N}{N_0} = \frac{P_s}{P_u} N \geq 10, \quad (2)$$

де E_s – потрібне значення енергії одного моноімпульсу (моноцикла) на прийомі, N_0 – спектральна щільність шумів, P_s – потужність моноімпульсу сигналу, P_u – потужність шуму, N – кількість моноімпульсів на один інформаційний біт.

У логарифмічній формі співвідношення можна представити у вигляді

$$\left(\frac{P_s}{P_u} \right)_{\text{дБ}} = \left(\frac{E_6}{N_0} \right)_{\text{дБ}} - 10 \log(N) \quad (3)$$

Отже, збільшення кількості N IR-UWB сигналів на часовому інтервалі передавання одного біта (логічного «0» або логічної «1») зменшує необхідне відношення сигнал/шум на вході приймального пристрою.

На даний момент часу IR-UWB генератори на основі напівпровідникових пристроїв (лавинний транзистор, тунельний діод, діод з накопиченням заряду) дозволяють генерувати IR-UWB сигнали з найменшою тривалістю, яка складає від 50 до 150 пс. При такій малій тривалості IR-UWB сигналу достатньо важко сформувати IR-UWB сигнал з амплітудою, що перевищує декілька сотень мілівольт. При цьому нижня та верхня межа спектра частот IR-UWB сигналу за рівнем – 3 дБ відповідно до [3] складатиме:

$$f_L = 0,319f_c, f_H = 1,922f_c, \quad (4)$$

де f_c – центральна частота спектра, що визначається за співвідношенням

$$f_c = \frac{1}{\tau}, \quad (5)$$

При $\tau = 50$ пс, отримаємо $f_L = 6,38$ ГГц, $f_H = 38,44$ ГГц.

При $\tau = 125$ пс отримаємо $f_L = 2,55$ ГГц, $f_H = 15,38$ ГГц.

З формули (4) та розрахунків видно, що ширина спектра IR-UWB сигналу за рівнем -3 дБ складатиме $\Delta f_1 = 32,06$ ГГц при $\tau = 50$ пс, а у другому випадку не менш, ніж $\Delta f_1 = 12,83$ ГГц. При використанні субгармонійного перетворення частоти IR-UWB сигналу в передавальному тракті вказану смугу частот необхідно подвоїти, оскільки спектр IR-UWB ТДЧ сигналу матиме верхню та нижню бічні смуги. Відповідно необхідно буде збільшити й смугу пропускання приймального тракту IR-UWB СР ТДЧ, що в свою чергу веде до збільшення рівня власних шумів приймального тракту. Якщо у розрахунках відштовхуватися від рівня – 10 дБ, то вказані смуги пропускання будуть ще більшими.

У даній роботі, відповідно до вищесказаного приймемо, що $\tau = 200$ пс. Тоді $f_L = 1,6$ ГГц, $f_H = 9,61$ ГГц, $\Delta f = 8$ ГГц.

Тоді, при використанні модуляцій ООК, BPSK, M-РАМ кількість моноциклів тривалістю 200 пс, що припадатиме на 1 біт, дорівнюватиме

$$N_1 = \frac{T}{\tau} = \frac{10^{-9}}{0,2 \cdot 10^{-9}} = 5. \quad (6)$$

Таблиця 1 – Результати розрахунку необхідного відношення сигнал/шум на вході IR-UWB приймача

Метод модуляції	$(E_b/N_0)_{\text{дБ}} = 10 \text{ дБ при } \text{BER}=10^{-6}$	N	$\left(\frac{P_s}{P_{ш}}\right)_{\text{дБ}}$, дБ
1	2	3	4
ООК	14,25	5	7,26
BPSK	10,5	5	3,51
2-РАМ	10,25	5	3,26
4-РАМ	14,25	5	7,26
8-РАМ	18,25	5	11,26
2-PPM	14,5	2	11,5
4-PPM	11,5	2	8,5
8-PPM	10	2	7
16-PPM	9	2	6
32-PPM	8	2	5
64-PPM	7,5	2	4,5

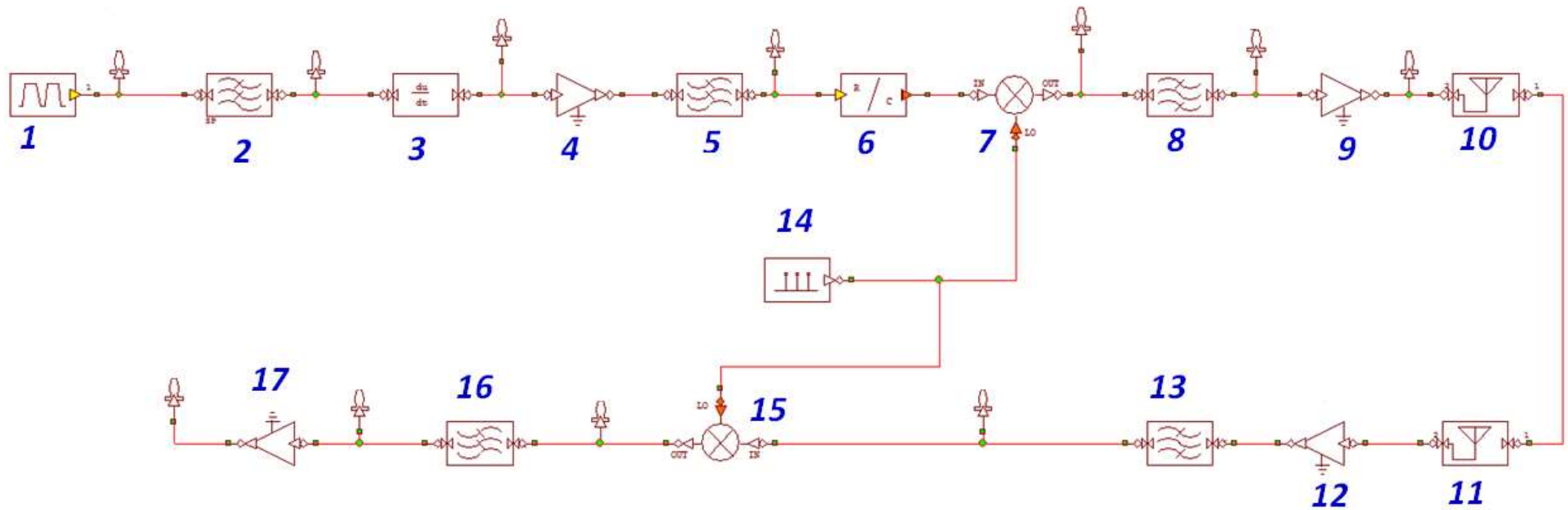


Рисунок 4 – Схема імітаційної моделі радіолінії ТГц діапазону від 110 до 170 ГГц

- | | |
|---|--|
| 1 – генератор імпульсів; | 10 – передавальна антена; |
| 2 – гаусівський ФНЧ | 11 – приймальна антена; |
| 3 – ланцюг диференціювання | 12 – малошумливий підсилювач; |
| 4 – широкопasmовий підсилювач на 10 дБ | 13 – смуговий фільтр від 110 до 140 ГГц приймального тракту; |
| 5 – фільтр нижньої частоти; | 14 – гетеродин на частоту 125 ГГц; |
| 6 – перетворювач дійсних чисел у комплексний базис; | 15 – змішувач «вниз» |
| 7 – змішувач «угору» | 16 – ФНЧ приймального тракту з частотою зрізу 20 ГГц; |
| 8 – смуговий фільтр від 110 до 140 ГГц передавального тракту; | 17 – широкопasmовий підсилювач приймального тракту. |
| 9 – широкопasmовий підсилювач потужності; | |

При використанні багатопозиційної PPM модуляції виходячи з самого принципу модуляції PPM для забезпечення можливості визначення того факту, який інформаційний біт («0» або «1») передається, кожен біт повинен подаватися меншою кількістю IR-UWB сигналів, ніж для модуляцій ООК, BPSK, M-PSK. Нехай кожен біт, тобто логічний «0» або логічний «1» при використанні модуляції PPM буде представлений двома IR-UWB сигналами тривалістю по 200 пс, тобто $N_2 = 2$.

Тоді, згідно з виразом (3) з урахуванням результатів [2] при $T = 1$ нс (що відповідає швидкості передавання 1 Гбіт/с) отримуємо наступні дані для необхідного значення відношення сигнал/шум на вході приймача, що представлені в таблиці 1.

Характеристики РРЛ зв'язку дев'ятьма різними частотами передачі в діапазонах від 110 до 170 ГГц і від 220 до 310 ГГц та характеристики навколишнього середовища, при яких передбачається проведення розрахунків представлені в табл. 2.

Таблиця 2 – Вхідні дані розрахунку радіолінії ТДЧ

Частота передачі f , ГГц	Середньостатистична інтенсивність дощу в Україні $уд$, мм/год	Температура навколишнього середовища T_0 , К	Потужність передавача без ПП $P_{пер}$, мкВт	Потужність передавача з ПП $P_{пер.}$, мВт	Діаметр антен передавача і приймача D , м	Коефіцієнт використання поверхні антени η , рази	Ширина спектра частот Δf , ГГц	Коефіцієнт шуму приймача, дБ
110	35	290	50	50	0,3	0,6	30	6
130	35	290	50	50	0,3	0,6	30	6
145	35	290	50	50	0,3	0,6	30	6
160	35	290	50	50	0,3	0,6	30	6
170	35	290	50	50	0,3	0,6	30	6
220	35	290	50	50	0,3	0,6	30	6
235	35	290	50	50	0,3	0,6	30	6
250	35	290	50	50	0,3	0,6	30	6
275	35	290	50	50	0,3	0,6	30	6
290	35	290	50	50	0,3	0,6	30	6

2.2 Імітаційна модель безпроводової телекомунікаційної системи терагерцового діапазону на основі використання IR-UWB сигналів пікосекундної тривалості

В якості середовища імітаційного моделювання оберемо програмний пакет Visual System Simulator САПР AWR Microwave Office ver. 12 компанії National Instruments, яка має зручний інтерфейс та необхідний функціонал для проведення досліджень НЧ/ВЧ/НВЧ схем на схемотехнічному рівні.

Ідеалізовану імітаційну модель радіолінії ТГЧ діапазону будуватимемо на базі параметрів та структурної схеми макету діючого макета прийомо-передавача ТГЧ [4–14]. Структурна схема симплексної системи радіозв'язку ТГЧ діапазону, імітаційна модель якої була побудована в AWR Microwave Office має вигляд (рис.3).

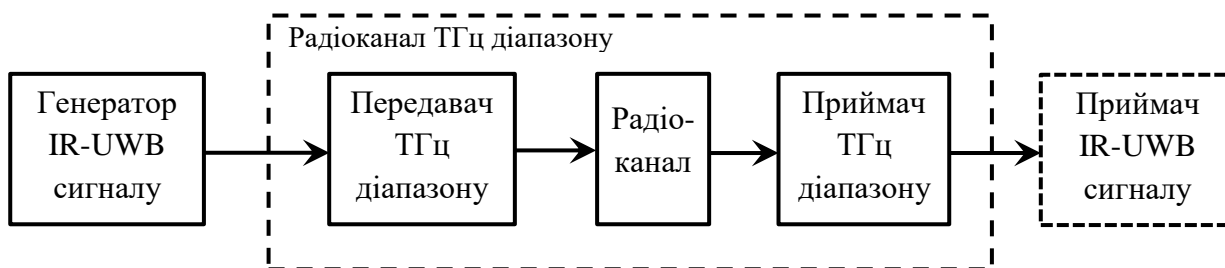


Рисунок 3 – Структурна схема симплексної системи радіозв'язку ТГЧ діапазону

На рис.4 зображено спрощену імітаційну модель симплексної системи радіозв'язку ТГЧ діапазону, структурна схема якої зображена на рис.4.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ БЕЗПРОВОДОВОЇ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДІАПАЗОНУ НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ IR-UWB СИГНАЛІВ ПІКОСЕКУНДНОЇ ТРИВАЛОСТІ

На рис.5 представлена часова форма однополярного імпульсного сигналу на виході генератора прямокутних імпульсів в масштабі часу 200 пс (рис. 5).

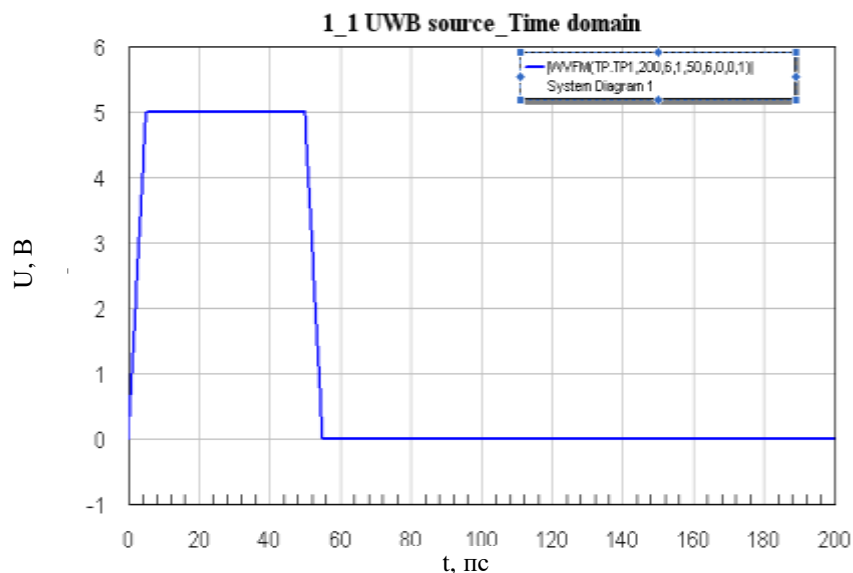


Рисунок 5 – Імпульсний сигнал на виході генератора імпульсів (в масштабі часу 200 пс) передавального тракту

На рис.6 показана порівняльна характеристика прямокутного імпульсу на вході ГФНЧ та гаусівського імпульсу на виході. На рис.7 показано гаусівський моноцикл, що отримано на виході диференціювального кола в масштабі 2 нс.

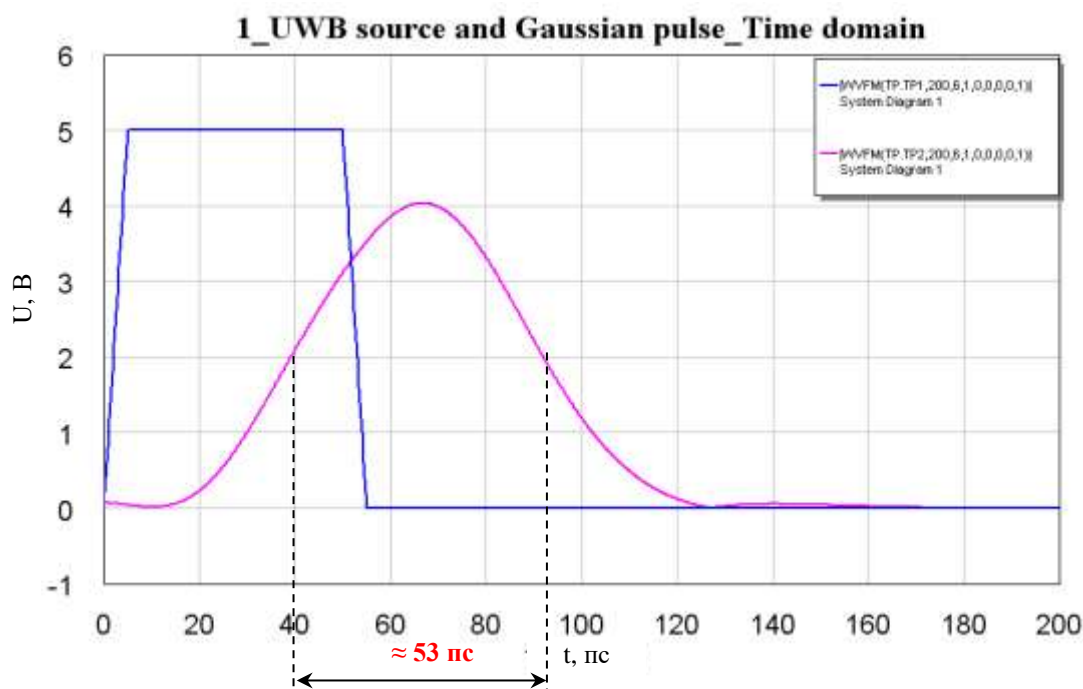


Рисунок 6 – Початковий імпульс та гаусівський імпульс на його основі

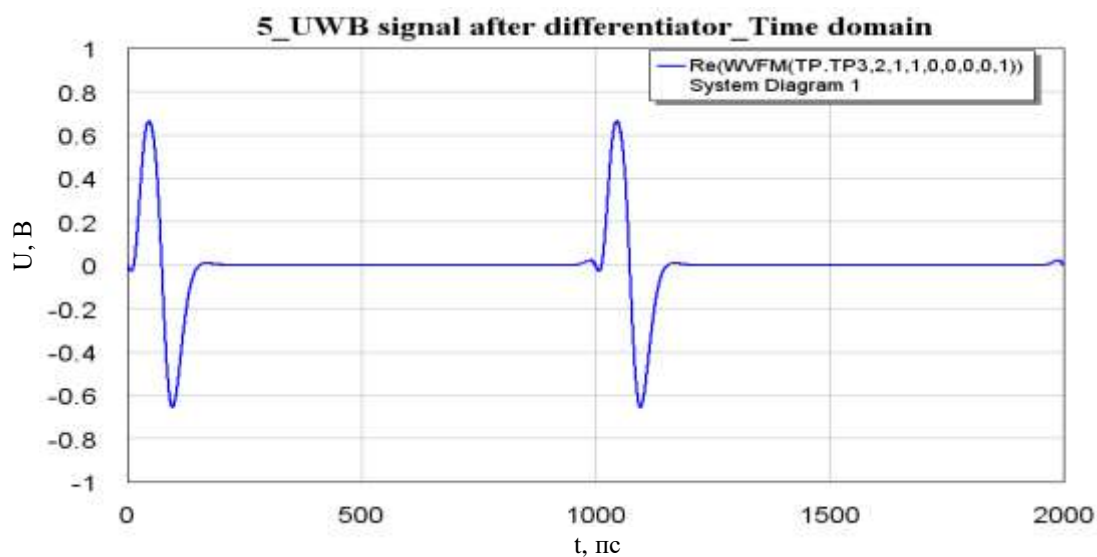


Рисунок 7 – Гаусів моноцикл на виході схеми диференціювання (масштаб 2 нс)

На рис.8 показана періодична послідовність гаусовських імпульсів на виході широкопугового підсилювача частоти, а на рис.9 – ця сама послідовність, але на виході ФНЧ зі смугою пропускання 20 ГГц.

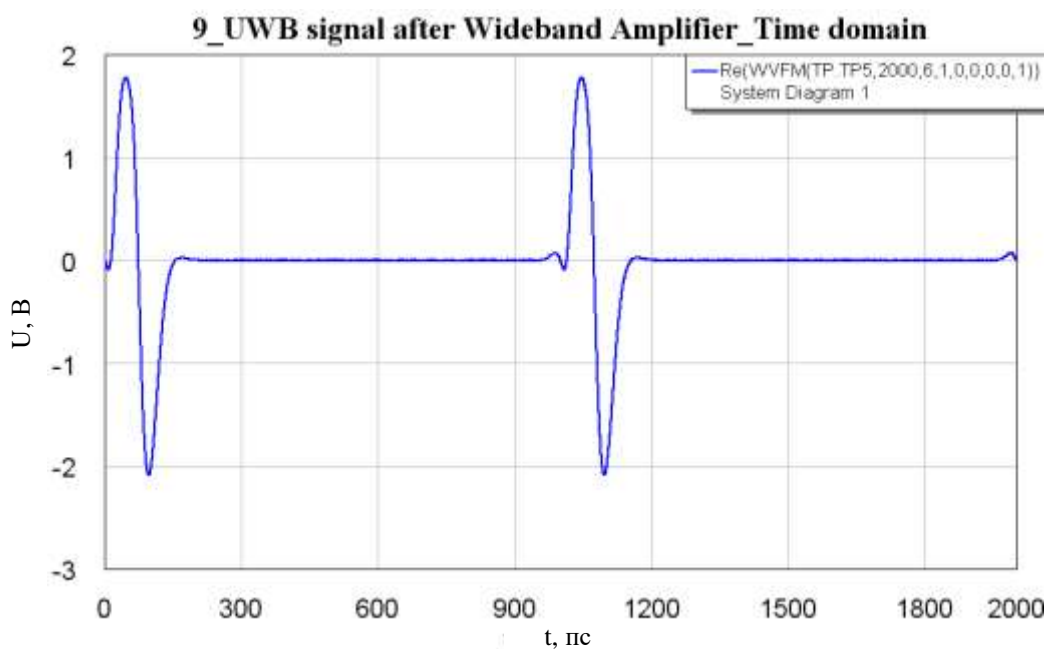


Рисунок 8 – Гаусів моноцикл на виході підсилювача з коефіцієнтом підсилення передавального тракту 10 дБ

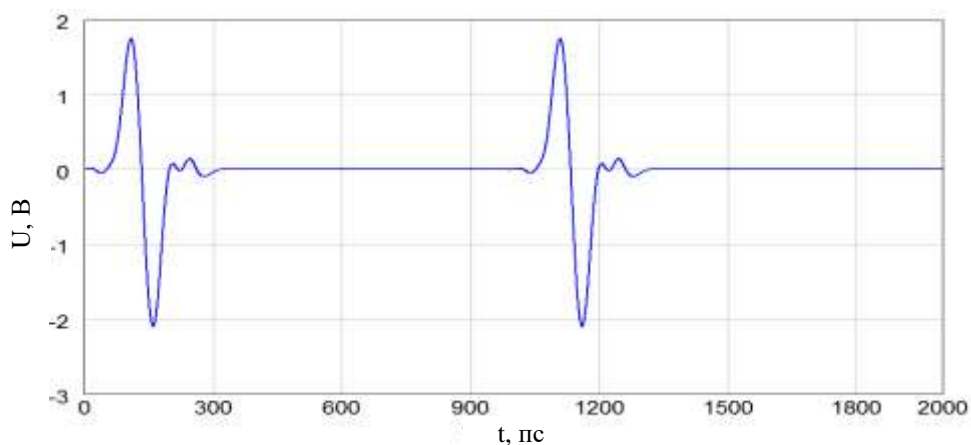


Рисунок 9 – Гаусівський моноцикл на виході фільтра нижньої частоти зі смугою пропускання 20 ГГц передавального тракту

На рис.10 показано спектр IR-UWB сигналу на виході змішувача частоти «вгору».

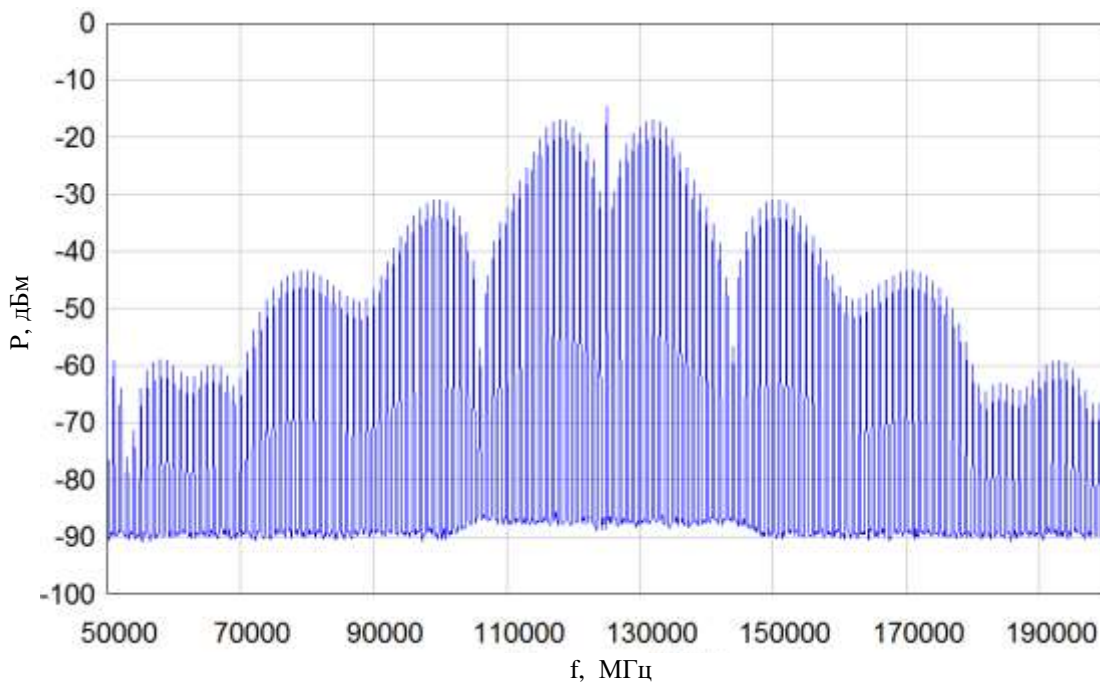


Рисунок 10 – Спектр IR-UWB ТГЧ сигналу після перетворення частоти «вгору»

На рис.11 зображено спектр IR-UWB ТГЧ сигналу після проходження ним смугопроникного фільтра зі смугою пропускання від 110 до 140 ГГц.

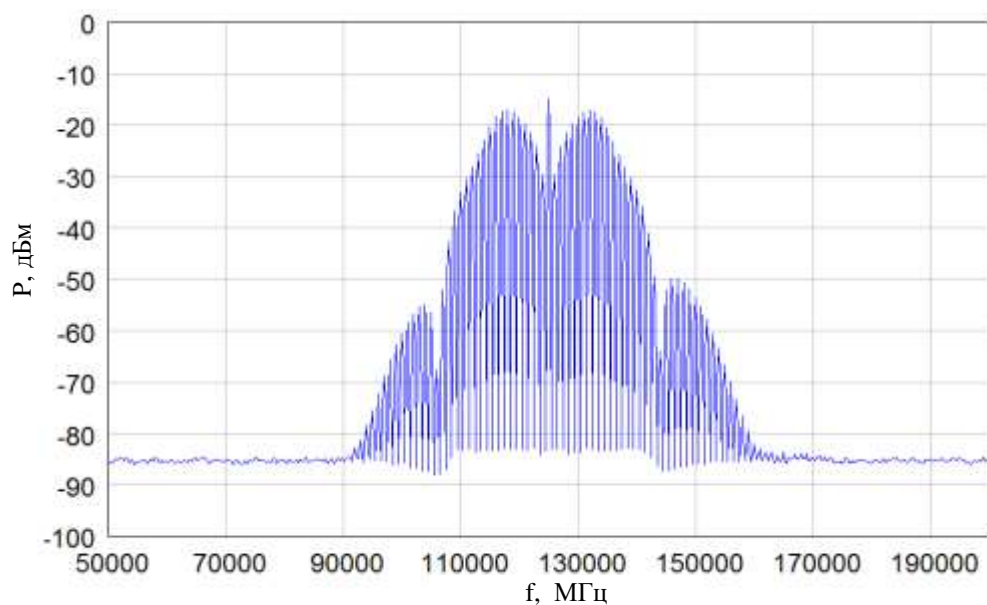


Рисунок 11 – Спектр IR-UWB ТГц сигналу після проходження смугопропускового фільтра від 110 до 140 ГГц передавального тракту.

На рис.12 зображено часову форму сигналу на виході широкосмугового підсилювача потужності передавального тракту в масштабі 200 пс.

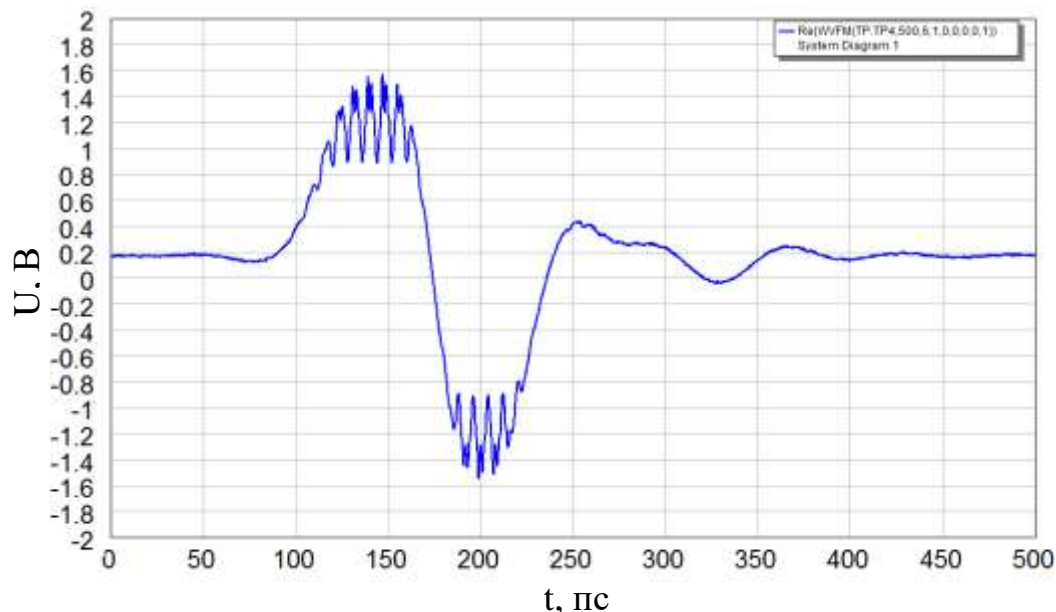


Рисунок 12 – Часова форма сигналу на виході підсилювача потужності передавального тракту (масштаб 200 пс)

На рис.13 показано спектр IR-UWB ТГц сигналу на виході приймальної антени (вході маложумливого підсилювача)) та на виході маложумливого підсилювача.

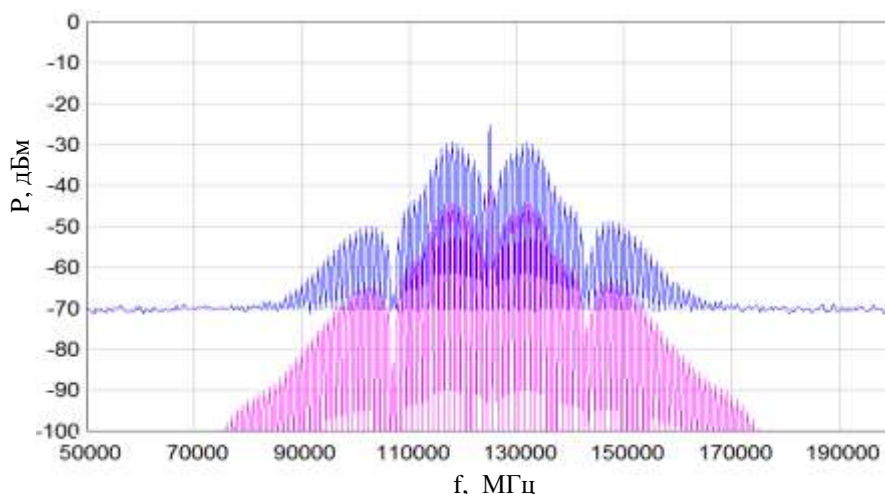


Рисунок 13 – Спектр IR-UWB ТГц сигналу на вході та виході малошумливого підсилювача з коефіцієнтом підсилення 15 дБ приймального тракту

На рис.14 зображено спектр сигналу на виході змішувача частот «униз».

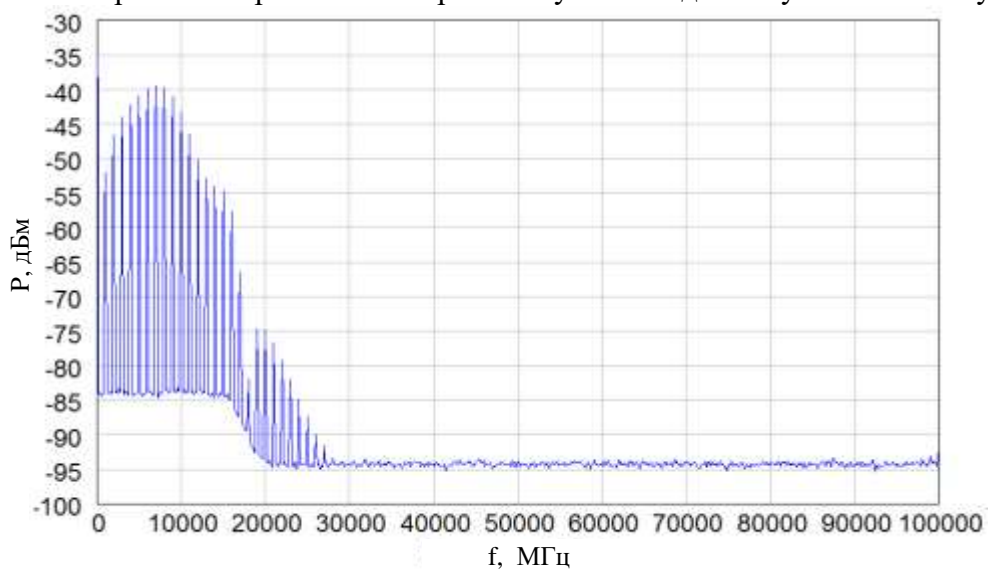


Рисунок 14 – Спектр сигналу на виході змішувача частот «униз»

На рис.15 представлено спектр IR-UWB сигналу на вході та виході ФНЧ приймального тракту зі смугою пропускання 20 ГГц.

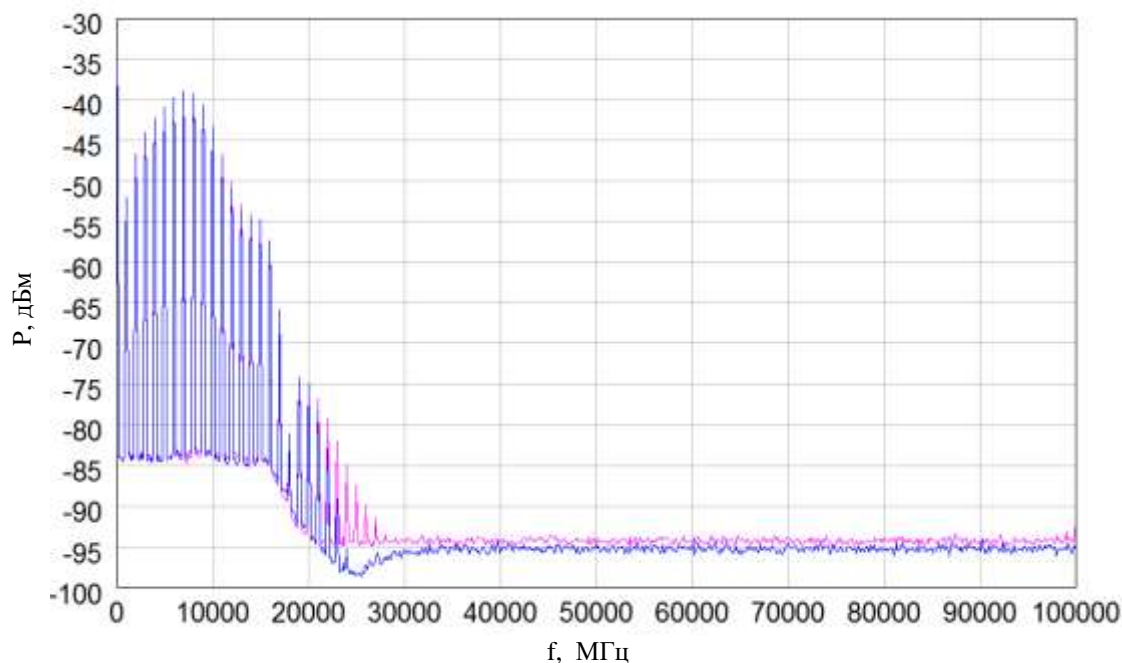


Рисунок 15 – Спектр IR-UWB сигналу на вході та виході ФНЧ приймального тракту зі смугою пропускання 20 ГГц

На рис.16 та рис.17 зображено часову форму IR-UWB сигналу на вході та виході широкопasmового підсилювача приймального тракту в масштабі 2 нс.

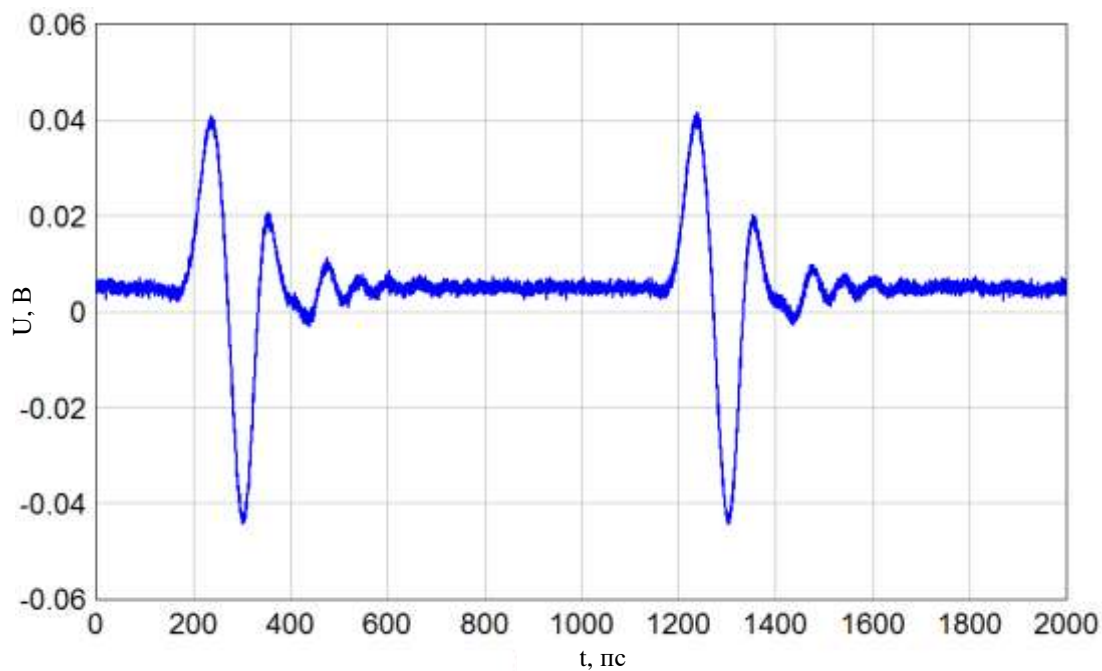


Рисунок 16 – Часова форма IR-UWB сигналу на вході широкопasmового підсилювача приймального тракту в масштабі 2 нс.

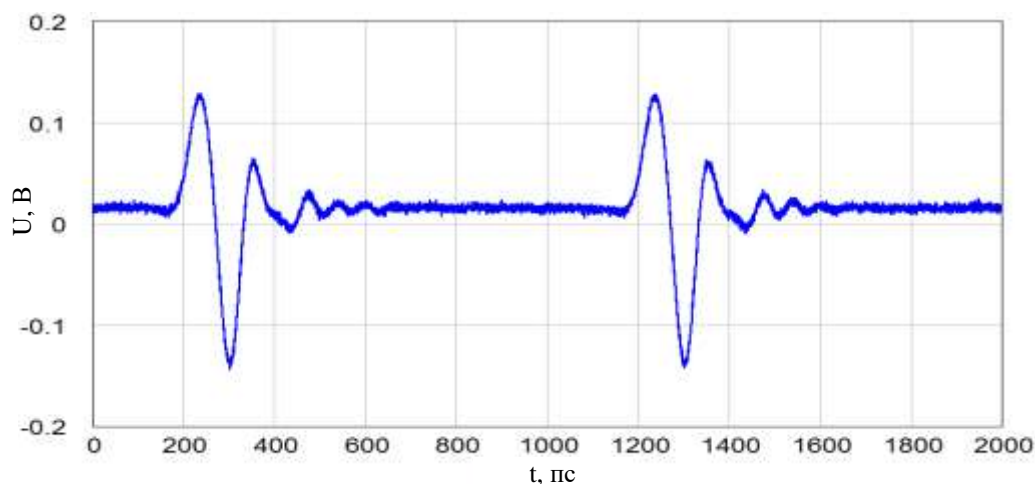


Рисунок 17 – Часова форма IR-UWB сигналу на виході широкосмугового підсилювача приймального тракту в масштабі 2 нс.

4. ВИСНОВОК

Результати моделювання на імітаційній моделі імпульсної надширокопосмугової лінії зв'язку терагерцового діапазону підтверджують можливість передачі IR-UWB сигналу методом гетеродинування. Важливо відзначити, що результати дослідження з передачі UWB сигналу пікосекундної тривалості через ідеалізовану модель радіоканалу терагерцового каналу від 110 до 140 ГГц, показують, що основним видом спотворення часової форми імпульсу є його розширення від початкової тривалості 140 пс до 250 пс, яка обумовлена в першу чергу обмеженням смуги пропускання у фільтрах нижньої частоти та смугопрпускних фільтрах передавального та приймального трактів. Крім того, радіосигнал на виході передавача терагерцового діапазону не можна віднести до класу IR-UWB сигналів за критерієм відносної ширини спектра сигналу, оскільки його відносна смуга частот за рівнем - 10 дБ складає менше одного процента.

Подальші напрямки розвитку телекомунікаційних систем терагерцового діапазону автори вбачають у використанні при побудові передавального тракту приймопередавача елементів оптичної техніки, що дозволить, по-перше, зменшити габарити передавального тракту, по-друге, забезпечити його з'єднання з діючими волоконно-оптичними лініями зв'язку і по-третє, одночасно формувати декілька передавальних каналів зі швидкістю передавання одиниці - десятки гігабіт за секунду у кожному з них. Важливим при цьому є розробка методів та моделей для практичного дослідження ефективності передачі через терагерцовий радіоканал імпульсних надширокопосмугових сигналів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Бунин С.Г. Самоорганізуючіся радіосети со сверхширокополосными сигналами / Бунин С.Г., Войтер А.П., Ильченко М.Е., Романюк В.А. // К.: НПП «Издательство «Наукова думка» НАН України» - 2012 - 444с.
2. Скляр Бернанд. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение, 2-е издание.: Пер. с англ. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2003. – 1104 с.
3. И. Шахнович. Сверхширокополосная связь. Второе рождение? // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. №4, 2001. – с.8-15.
4. Ильченко М.Ю., Кравчук С.О., Наритник Т.М. Беспроводові системи зв'язку субтерагерцового та терагерцового діапазонів // Цифрові технології. – 2014. – Вип. 16. – С.40-59.
5. Наритник Т. М., Кравчук С.О. Телекомунікаційні системи терагерцового діапазону// Монографія.– Житомир: ФОП «Євенок О.О.», 2015.–394с.
6. Наритник Т.М., Сайко В.Г. Беспроводові системи зв'язку терагерцового діапазону // Монографія. -- Deutsch: Видавництво «LAP Lambert Academic Publishing», 2019. – 70 с.
7. Наритник Т.М., Бондарчук С.О., Вальчук Д.С., Піддубний А.В. Аналіз терагерцових технологій та їх застосування для створення інноваційних розробок // Електронне наукове фахове видання – журнал «Проблеми телекомунікацій» – 2017. - С. 50-56.

8. Канал безпроводового широкопугового абонентського доступу до інформаційних ресурсів в терагерцовому діапазоні. Патент України на корисну модель №104299, дата публікації 25.01.2016р., Бюл. №2 з пріоритетом від 25.06.2015 р. Автори: Казіміренко В.Я., Коритова О.А., Сайко В.Г., Наритник Т.Н., Лутчак О.В.

9. Ільченко М. Ю. Передавальний та приймальний радіотракти радіорелейних систем терагерцового діапазону / М. Ю. Ільченко, Т. М. Наритник, В. М. Радзіховський, С. Е. Кузьмін, А. В. Лутчак // Цифрові технології. – 2015., № 17. – С.17-29.

10. Сайко В.Г. Метод визначення оптимальних параметрів вікон прозорості в терагерцовому діапазоні / Сайко В.Г., Лисенко Д.О., Грищенко Л.М., Дакова Л.В., Кравченко В.І.// Телекомунікаційні та інформаційні технології. -- № 1. – 2017. -- С.11-17.

11. Ільченко М.Е. Система параметрів інтегрального приймача субміліметрового діапазону/ М.Е.Ільченко, С.В.Денбновецький, Т.Н.Наритник, А.В.Лутчак, А.В.Май//Цифрові технології. - 2017. - №21.-С. 59-63.

12. Экологически безопасная линия связи с мощностью СШП излучения 70 нановатт для беспроводных локальных сетей / Ильченко М.Е., Нарытник Т.Н., Калинин В.И., Черепенин В.А. Материалы 21-ой Международной Крымской конференции КрыМиКо'2011. -С.355-35.

13. Transceiver for 130-134 GHz band and digital radio relay system. / M.Ye. Ilchenko, T.N. Narytnik, S.Ye. Kuzmin, A.I. Fisun, O.I. Belous, V.N. Radzikhovsky/ Telecommunications and Radio Engineering, Volume 72, Number 17, 2013.-P.1623-1638.

14. Clifford algebra in multiple access noise-signal communication systems. / M. Ye. Ilchenko, T.N. Narytnik, R.M. Didkovsky. / Telecommunications and Radio Engineering, Volume 72, Number 18, 2013.-P.1651-1663

REFERENCES

1. Bunin S.G. Samoorganizujushhiesja radioseti so sverhshirokopolosnymi signalami / Bunin S.G., Vojter A.P., Il'chenko M.E., Romanjuk V.A. // К.: NPP «Izdatel'stvo «Naukova dumka» NAN Ukrainy» - 2012 - 444s.

2. Skljар Bernard. Cifrovaja svjaz'. Teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primenenie, 2-e izdanie.: Per. s angl. – М.: Izdatel'skij dom "Vil'jams", 2003. – 1104 s.

3. I. Shahnovich. Sverhshirokopolosnaja svjaz'. Vtoroe rozhdienie? // JeLEKTRONIKA: Nauka, Tehnologija, Biznes. №4, 2001. – s.8-15.

. Il'chenko M.Ju., Kravchuk S.O., Naritnik T.M. Bezprovodovi sistemi zv'jazku subteragercovogo ta teragercovogo diapazoniv // Cifrovi tehnologii. – 2014. – Vip. 16. – S.40-59.

5. Naritnik T. M., Kravchuk S.O. Telekomunikacijni sistemi teragercovogo diapazonu// Monografija.– Zhitomir: FOP «Evenok O.O.», 2015.–394s.

6. Naritnik T.M., Sajko V.G. Bezprovodovi sistemi zv'jazku teragercovogo diapazonu // Monografija. -- Deutsch: Vidavnistvo «LAP Lambert Academic Publishing», 2019. – 70 s.

7. Naritnik T.M., Bondarchuk S.O., Val'chuk D.S., Pidubnij A.V. Analiz teragercovih tehnologij ta ih zastosuvannja dlja stvorennja innovacijnih rozrobok // Elektronne naukovе fahove vidannja – zhurnal «Problemi telekomunikacij» – 2017. - S. 50-56.

8. Канал безпроводового широкопугового абонентського доступу до інформаційних ресурсів в терагерцовому діапазоні. Патент України на корисну модель №104299, дата публікації 25.01.2016р., Бюл. №2 з пріоритетом від 25.06.2015 р. Автори: Казіміренко В.Я., Коритова О.А., Сайко В.Г., Наритник Т.Н., Лутчак О.В.

9. Il'chenko M. Ju. Peredaval'nij ta priymal'nij radiotrakti radiorelejnih sistem teragercovogo diapazonu / M. Ju. Il'chenko, T. M. Naritnik, V. M. Radzihov'skij, S. E. Kuz'min, A. V. Lutchak // Cifrovi tehnologii. – 2015., № 17. – S.17-29.

10. Sajko V.G. Metod viznachennja optimal'nih parametriv vikon prozorosti v teragercovomu diapazoni / Sajko V.G., Lisenko D.O., Grishhenko L.M., Dakova L.V., Kravchenko V.I.// Telekomunikacijni ta informacijni tehnologii. -- № 1. – 2017. -- S.11-17.

11. Il'chenko M.E. Sistema parametriv integral'nogo priemnika submillimetrovogo diapazonu/ M.E.Il'chenko, S.V.Denbnoveckij, T.N.Narytnik, A.V.Lutchak, A.V.Maj//Cifrovi tehnologii. - 2017. - №21.-S. 59-63.

12. Jekologicheski bezopasnaja linija svjazj s moshhnost'ju SSHP izluchenija 70 nanovatt dlja besprovodnyh lokal'nyh setej / Il'chenko M.E., Narytnik T.N., Kalinin V.I., Cherepenin V.A. Materialy 21-oj Mezhdunarodnoj Krymskoj konferencii KryMiKo'2011. -S.355-35.

13. Transceiver for 130-134 GHz band and digital radiorelay system. / M.Ye. Ilchenko, T.N. Narytnik, S.Ye. Kuzmin, A.I. Fisun, O.I. Belous, V.N. Radzikhovsky/ Telecommunications and Radio Engineering, Volume 72, Number 17, 2013.-P.1623-1638.

14. Clifford algebra in multipleaccess noise-signal communication systems. / M.Ye. Ilchenko, T.N. Narytnik, R.M. Didkovsky. / Telecommunications and Radio Engineering, Volume 72, Number 18, 2013.-P.1651-1663