

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ЗВ'ЯЗКУ ім. О.С. ПОПОВА**

**ISSN 2313-7010 (Online)**  
**ISSN 2307-9754 (Print)**

# **ЦИФРОВІ ТЕХНОЛОГІЇ**

**НАУКОВЕ ВИДАННЯ**

**ЗБІРНИК**

**Видається з 2007 року**

**Випуск 22**

**Одеса –2017**

**Цифрові технології:** Збірник / Кол. авт.- ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2017. – Вип. 22. – 146 с., іл.

Надано результати досліджень у сфері цифрових інформаційних та телекомунікаційних технологій науково-педагогічних працівників, провідних спеціалістів, інженерів та аспірантів Одеської національної академії зв'язку (ОНАЗ) ім. О.С. Попова, а також наукових працівників та вчених навчальних закладів і науково-дослідних організацій, які займаються теоретичними дослідженнями та практичними розробками за напрямком цифрових технологій.

Збірник розрахований на наукових та науково-педагогічних працівників, інженерів, аспірантів та студентів навчальних закладів.

**Затверджено як фахове видання. Постанова президії ВАК України  
від 29.12.2014 № 1548**

**Включено у російський індекс наукового цитування (РИНЦ)  
згідно з договором № 521-08/2013**

**Друкується відповідно до рішення Науково-технічної ради  
Одеської національної академії зв'язку ім. О.С. Попова,  
протокол № 5 від 20 грудня 2017 р.**

**Редакційна колегія:**

**головний редактор:** Воробієнко П.П., д.т.н., професор, ректор ОНАЗ ім. О.С. Попова; (Україна);

**заступник головного редактора, науковий редактор:** Гофайзен О.В., д.т.н., професор, завідувач кафедри телебачення та радіомовлення ОНАЗ ім. О.С. Попова;

**відповідальний секретар:** Каптур В.А., к.т.н., с.н.с., проректор з наукової роботи ОНАЗ ім. О.С. Попова,;

**члени редакційної колегії:**

Банкет В.Л., д.т.н., професор, професор кафедри теорії електричного зв'язку ім. А.Г. Зюко ОНАЗ ім. О.С. Попова (Україна);

Вікулін І.М., д.ф.-м.н., професор, завідувач кафедри фізики оптичного зв'язку ОНАЗ ім. О.С. Попова (Україна);

Вуд Девід, Ph.D., Технології та інновації, EBU (Швейцарія);

Дош Крістоф, віце-голова Дослідної комісії 6 ITU-R (Німеччина);

Захарченко М.В., д.т.н., професор, завідувач кафедри інформаційної безпеки та передачі даних ОНАЗ ім. О.С. Попова (Україна);

Кадацький А.Ф., д.т.н., професор, завідувач кафедри теорії електричних кіл та електроживлення ОНАЗ ім. О.С. Попова (Україна);

Мохамед Хассан Хессайн Алі, Ph.D., радник Міністра науки і телекомунікацій (Республіка Судан);

Рудий Е.М., д.т.н., професор, професор кафедри інформаційної безпеки та передачі даних ОНАЗ ім. О.С. Попова (Україна);

Скачков В.В., д.т.н., професор, провідний науковий співробітник науково-дослідної лабораторії Військової академії (м. Одеса);

Сукачов Е.О., д.т.н., професор, професор кафедри технічної електродинаміки та систем радіозв'язку ОНАЗ ім. О.С. Попова (Україна);

Троцишин І.В., д.т.н., професор, професор кафедри волоконно-оптичних ліній зв'язку ОНАЗ ім. О.С. Попова (Україна);

Турабі Осам, Ph.D., співробітник підрозділу «Радіотехніка та телевізійні системи» Нільського Центру дослідження технологій (Республіка Судан);

Холод Олександр, д.т.н., керівник служби міжнародного частотного планування у Федеральному офісі зв'язку (Швейцарія);

Цалієв Т. А., д.т.н., професор, професор кафедри технічної електродинаміки та систем радіозв'язку ОНАЗ ім. О.С. Попова (Україна);

**технічний редактор:** Пилявський В.В., викл. кафедри телебачення та радіомовлення ОНАЗ ім. О.С. Попова

**Статті друкуються мовою оригіналу**

**Адреса редакції:**

Одеська національна академія зв'язку ім. О.С.Попова,

вул. Кузнечна, 1, Одеса, 65029, Україна,

тел: (048)720-78-93; тел/факс (048)723-35-26, факс: (048)723-62-69, e-mail: onat@onat.edu.ua

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 13151-2035Р

видано Міністерством юстиції України 13 серпня 2007 року

Одеська національна академія зв'язку ім. О.С.Попова, 2017

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE

O.S. POPOV ODESSA NATIONAL ACADEMY OF TELECOMMUNICATIONS

ISSN 2313-7010 (Online)  
ISSN 2307-9754 (Print)

# DIGITAL TECHNOLOGIES

SCIENTIFIC EDITION

COLLECTION

Published since 2007

**Issue No. 22**

**Odessa – 2017**

UDC 621.37/39

**Digital Technologies:** Collection / Ukr., Odessa: O.S. Popov Odessa National Academy of Telecommunications, 2016. – No. 22. – 146 p.

The results of studies in the field of digital information and communication technologies research and teaching staff, leading experts, engineers and graduates of O.S. Popov Odessa National Academy of Telecommunications (ONAT), as well as researchers and scientists of educational institutions and research organizations involved in scientific research and practical developments in the direction of digital technology are presented.

The collection is designed for scientific and pedagogical workers, engineers, graduate students and students of educational institutions

**Certified as professional edition. Resolution of the Presidium  
of the Higher Attestation Commission of Ukraine of 29.12.2014 № 1548**

**Included in the Russian Science Citation Index (RISC)  
under the contract № 521-08/2013**

**Printed in accordance with the decision the Scientific and Research Board  
of O.S. Popov Odessa National Academy of Telecommunications,  
protocol № 5 dated December 20, 2017**

**Chief Editor:** Vorobiyenko Petro, ScD, Professor, Rector of O.S. Popov ONAT (Ukraine)

**Deputy Chief Editor, Science editor:** Gofaizen Oleg, ScD, Professor, Head of Television and Radio Department, O.S. Popov ONAT (Ukraine)

**Executive Secretary:** Kaptur Vadim, PhD, Senior Researcher, Pro-Rector rfor Scientific Work, O.S. Popov ONAT (Ukraine)

**Members of Editor Staff:**

Banket Victor, ScD, Professor, Telecommunication Theory Department, O.S. Popov ONAT (Ukraine)

Vikulin Ivan, ScD, Professor, Head of Department of Physics of Optical Communication, O.S. Popov ONAT (Ukraine)

Wood David, PhD, Technologies and Innovations (EBU, Switzerland)

Dosch Christoph, Vice-Chairman of ITU-R Study Group 6 “Broadcasting service” (IRT, Germany)

Zakharchenko Mykola, ScD, Professor, Head of Department of Information Security and Data Transmission, O.S. Popov ONAT (Ukraine)

Kadatsky Anatoly, ScD, Professor, Head of Department of Electric Circuits Theory and Power Supply, O.S. Popov ONAT (Ukraine)

Mohammad Hassan Ali, PhD, Counselor of Minister of Science and Communications (Republic of the Sudan)

Rudy Eugene, ScD, Professor, Department of Information Security and Data Transmission, O.S. Popov ONAT (Ukraine)

Skachkov Valery, ScD, Professor, Leading Researcher of Scientific Laboratory, Military Academy (Odessa, Ukraine)

Sukachov Edward, ScD, Professor, Department of Technical Electrodynamics and Radiocommunication Systems, O.S. Popov ONAT (Ukraine)

Trotsishin Ivan, ScD, Professor, Department of Fiber Optic Telecommunication lines, O.S. Popov ONAT (Ukraine)

Osama Turabi, PhD, Radio Engineering and Television Systems, Nile Center for Technology Research (Republic of the Sudan)

Kholod Alexander, ScD, International Frequency Planning, Federal Office of Communications (Switzerland)

Tsaliev Tamerlan, ScD, Professor, Department of Technical Electrodynamics and Radiocommunication Systems, O.S. Popov ONAT (Ukraine)

**Technical editor:** Pilyavskiy Volodymyr, Television and Radio Department, O.S. Popov ONAT (Ukraine)

**Articles published in the original language**

**Address of Editorial Office:**

O.S. Popov Odessa National Academy of Telecommunications,

Kuznechna st., 1, Odessa, 65029, Ukraine,

tel: (048) 720-78-93; tel/fax (048) 723-35-26, fax: (048) 723-62-69, e-mail: onat@onat.edu.ua

State Registration Certificate KB № 13151-2035R

issued by the Ministry of Justice of Ukraine August 2007

*O.S. Popov Odessa National Academy of Telecommunications, 2016*

ЦИФРОВІ ТЕХНОЛОГІЇ № 22

*Системи цифрового зв'язку*

C.

ЧАСТОТНО-СЕЛЕКТИВНЫЕ СВОЙСТВА АКТИВНОГО ФИЛЬТРА ЧМ НФ СИГНАЛОВ ДЛЯ МНОГОЧАСТОТНЫХ МЕТОДОВ ПЕРЕДАЧИ Банкет В.Л., Манаков С.Ю. ....	9
СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ТА РОЗВИТКУ СУПУТНИКОВИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ В СВІТІ І УКРАЇНІ. ЧАСТИНА 3 Ільченко М. Ю., Капштик С. В., Мельник О. М., Наритник Т. М. ....	14
ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕДАВАННЯ ІМПУЛЬСНОГО НАДШИРОКОСМУГОВОГО СИГНАЛУ РАДІОЛІНІЄЮ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДІАПАЗОНУ Авдєєнко Г.Л., Бунін С.Г., Наритник Т.М. ....	28
ВЫСОКОСТАБИЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА С КВАЗИОПТИЧЕСКИМ ОТКРЫТЫМ РЕЗОНАТОРОМ ДЛЯ СУММИРОВАНИЯ МОЩНОСТЕЙ Ільченко М.Е., Денбновецкий С.В., Нарытник Т.Н., Май А.В., Кузьмичёв И.К. ....	42
МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ ЯВИЩА ЗАВМИРАННЯ СИГНАЛУ НА ВХОДІ РАДІОПРИЙМАЧА Рожновський М.В., Фокін Р.А. ....	52
ЗАСТОСУВАННЯ ОРТОГОНАЛЬНИХ ГАРМОНІЧНИХ СИГНАЛІВ УЗАГАЛЬНЕНОГО КЛАСУ В СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧІ ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ PLC Орешков В.І. ....	56

*Системи цифрового мовлення*

NORMATIVE SUPPORT OF EFFICIENT INTRODUCTION AND FURTHER PROGRESS OF DIGITAL TELEVISION AND MULTIMEDIA BROADCASTING TECHNOLOGIES Gofaizen O.V, Baliar V.B, Pyliavskyi V.V. ....	63
ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПЛАНУВАННЯ МЕРЕЖІ ПРИ ПЕРЕХОДІ НА ЦИФРОВЕ НАЗЕМНЕ ЗВУКОВЕ МОВЛЕННЯ Кольцова О.С., Маковецько Д.О. ....	71
ОЦІНКА ХАРАКТЕРИСТИК ГРУБОЇ СИНХРОНІЗАЦІЇ СИГНАЛІВ СИСТЕМ ЦИФРОВОГО ТЕЛЕБАЧЕННЯ, БАЗОВАНИХ НА ТЕХНОЛОГІЇ OFDM Баляр В. Б., Станєва І.І. ....	80

*Антенні системи*

ЧАСТОТНІ ВЛАСТИВОСТІ ШИРОКОСМУГОВОЇ ДВО КІЛЬЦЕВОЇ ФРАКТАЛЬНОЇ АНТЕНИ Цалієв Т.А., Куцук К.В. ....	89
--	----

*Цифрові методи захисту інформації*

АНАЛІЗ ДІЮЧИХ ПРОТОКОЛІВ КРИПТОГРАФІЧНОГО ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРОННИХ ТРАНЗАКЦІЙ	
--	--

Йона Л. Г., Кюне О. О.....	96
КВАНТОВИЙ ПРОТОКОЛ РОЗДІЛЕННЯ СЕКРЕТУ З ПАРАМИ ПЕРЕПЛУТАНИХ КУТРИТИВ НА ОСНОВІ ПІНГ-ПОНГ ПРОТОКОЛУ	
Лімарь І.В.....	103
КРИПТОГРАФИЧЕСКИЙ ПРОТОКОЛ ДОКАЗАТЕЛЬСТВА С НУЛЕВЫМ РАЗГЛАШЕНИЕМ НА ЭЛЛИПТИЧЕСКИХ КРИВЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОДНОСТОРОННЕЙ ХЭШ-ФУНКЦИИ	
Онацкий А.В., Жарова О.В.....	111

*Математичні методи*

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ДІЮЧИХ ЗНАЧЕНЬ СТРУМІВ В ІМПУЛЬСНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧАХ ПОСТІЙНОЇ НАПРУГИ ІНВЕРТУЮЧОГО ТИПУ З ГРАНИЧНИМ РЕЖИМОМ ФУНКЦІОНУВАННЯ	
Єрикаліна Т.М.....	119
АНАЛІЗ БЛОКОВ МБФ РАНГУ 6	
Ткаченко В.Г., Жмурко Ю.В. ....	131

*Цифрові системи зв'язку*

C.

FREQUENCY-SELECTIVE PROPERTIES OF ACTIVE FILTERS OF CPFM SIGNALS FOR MULTI-FREQUENCY TRANSMISSION METHODS Banket V.L., Manakov S. Yu. ....	9
STATUS AND PROSPECTS OF THE USE AND DEVELOPMENT OF SATELLITE TELECOMMUNICATIONS IN THE WORLD AND IN UKRAINE. PART 3 Ilchenko M., Kapshtyk S., Melnyk A., Narytnyk T.....	14
SIMULATION OF PULSED ULTRA WIDEBAND SIGNAL TRANSMISSION IN TERAHERTZ RANGE RADIO LINK G. Avdeyenko, S. Bunin, T. Narytnik.....	28
HIGH-STABLE TERAHERTZ ZONE RANGE GENERATOR WITH QUASIOPTIC OPEN RESONATOR FOR POWER AMOUNT Ilchenko M., Denbnovetsky S., Narytnik T., May O., Kuzmichov I. ....	42
MODELLING AND ANALYSIS OF THE SIGNAL FADING PHENOMENON AT THE RADIO RECEIVER INPUT Rozhnovskiy M.V., Fokin R.A.....	52
APPLICATION GENERALIZED CLASS ORTHOGONAL HARMONIC SIGNALS FOR PLC TECHNOLOGY TRANSMISSION SYSTEMS Oreshkov V.I. ....	56

*Digital broadcast systems*

NORMATIVE SUPPORT OF EFFICIENT INTRODUCTION AND FURTHER PROGRESS OF DIGITAL TELEVISION AND MULTIMEDIA BROADCASTING TECHNOLOGIES Gofaizen O.V, Baliar V.B, Pyliavskiy V.V. ....	63
DETERMINATION OF PARAMETERS OF PLANNING NETWORKS DURING THE TRANSITION TO DIGITAL TERRESTRIAL SOUND BROADCASTING Koltsova O.S., Makoveyenko D.O. ....	71
ESTIMATION OF COARSE SYNCHRONIZATION PERFORMANCE FOR SIGNALS OF DIGITAL TELEVISION SYSTEMS BASED ON OFDM TECHNOLOGY Baliar V. B., Staneva I.I. ....	80

*Антенні системи*

FREQUENCY PROPERTIES OF BROADBAND TWO RING FRACTAL ANTENNA Tsaliev T.A., Kutsuk K.V. ....	89
--	----

*Цифрові методи захисту інформації*

ANALYSIS OF ACTIVE CRYPTOGRAPHIC PROTOCOLS FOR PROTECTION OF ELECTRONIC TRANSACTIONS Yona L. G., Kuehne O. O. ....	96
THE PING-PONG-BASED QUANTUM SECRET SHARING PROTOCOL WITH PAIRS OF ENTANGLED QUTRITS Limar I. ....	103

CRYPTOGRAPHIC PROTOCOL ZERO-KNOWLEDGE PROOF  
ON ELLIPTIC CURVES USING ONE-WAY HASH FUNCTION

Onatskiy A.V., Zharova O.V. .... 111

*Mathematical models*

MATHEMATICAL MODELS OF ACTIVE CURRENT VALUES IN DC-DC CONVERTER  
OF THE BACK-BOOST TYPE WITH THE BOUNDARY MODE OPERATION

Yerykalina T.N. .... 119

ANALYSIS OF MBF BLOCKS RANK 6

Tkachenco V.G., Zhmurko Y.V. .... 131

УДК 621.396.43

**ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕДАВАННЯ ІМПУЛЬСНОГО НАДШИРОКОСМУГОВОГО СИГНАЛУ РАДІОЛІНІЄЮ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДІАПАЗОНУ**

АВДЄЄНКО Г.Л., БУНІН С.Г., НАРИТНИК Т.М.

*Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
пер. Індустріальний, 2 Київ, 03056, Україна  
e-mail: director@mitris.com*

**ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕДАЧИ ИМПУЛЬСНОГО СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОГО СИГНАЛА РАДИОЛИНИЕЙ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА**

АВДЕЕНКО Г.Л., БУНИН С.Г., НАРЫТНИК Т.Н.

*Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»  
пер. Индустриальный, 2, Киев, 03056, Украина  
e-mail: director@mitris.com*

**SIMULATION OF PULSED ULTRA WIDEBAND SIGNAL TRANSMISSION IN TERAHERTZ RANGE RADIO LINK**

G. AVDEYENKO, S. BUNIN, T. NARYTNIK

*National Technical University of Ukraine  
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"  
Industrial lane, 2, Kiev, 03056, Ukraine  
e-mail: director@mitris.com*

**Анотація.** Наведені результати моделювання передавання методом гетеродинавання імпульсного надширокосмугового сигналу (IR-UWB) радіолінією терагерцового діапазону. Описано результати досліджень моделі генератора IR-UWB, побудовану за допомогою інструментарію САПР Microwave office, з тривалістю імпульсу 500 пс та частотою повторення імпульсів 20 МГц, який виконаний для отримання гаусівського моноциклу. Вперше наведено результати досліджень (зміни часової форми) при передаванні отриманого 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.

**Ключові слова:** Терагерцовий діапазон, імпульсні надширокосмугові сигнали, імітаційне моделювання, генератор IR-UWB, радіолінія, метод гетеродинавання, передавальний і приймальний тракту.

**Аннотация.** Представлены результаты моделирования передачи методом гетеродинаования импульсного сверхширокополосного сигнала (IR-UWB) по радиолинии терагерцового диапазона. Описаны результаты исследований модели генератора IR-UWB, построенного с помощью инструментария САПР Microwave Office, с длительностью импульса 500 пс и частотой повторения импульсов 20 МГц, который выполнен для получения гауссовского моноцикла. Впервые отображены результаты исследований (изменения временной формы) при передаче полученного моноцикла передающим трактом и его приём приёмным 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 приёма импульсных сверхширокополосных сигналов.

**Ключевые слова:** терагерцовый диапазон, импульсные сверхширокополосные сигналы, имитационное моделирование, генератор IR-UWB, радиолиния, метод гетеродинаования, передающий и приёмный тракты.

**Abstract.** Simulation results of pulsed ultra wideband signal (IR-UWB) heterodyne transmission by a terahertz radio link are presented. IR-UWB generator model with a pulse duration of 500 ps and a repetition rate of 20 MHz, which is performed to obtain a Gaussian monocycle is constructed and described with the help of the Microwave Office CAD. For the first time the research results in the transmission of the IR-UWB monocycle by the transmission path and

its reception by the receiver path in 130.4-131.5 GHz range are presented. On basis of the obtained research results, the requirements to the terahertz range radio link parameters in order to provide acceptable reception quality of IR-UWB signals are formulated.

**Keywords:** terahertz range, pulsed ultra wideband signals, simulation, IR-UWB generator, radio link, heterodyne method, transmit and receive paths.

## ВСТУП

Сучасні радіосистеми надширококутвого зв'язку, що працюють в діапазоні дециметрових хвиль, можуть використовувати незначну потужність випромінювання IR-UWB передавачів, а отже й дальність дії систем IR-UWB повинна бути максимально обмежена для забезпечення виконання норм електромагнітної сумісності. Оскільки в цьому діапазоні частот працює дуже багато радіоелектронних пристроїв різних радіотехнічних систем (мобільний зв'язок, радіо- та телевізійне мовлення, безпроводовий доступ до Інтернет по технології Wi-Fi, радіорелейний зв'язок, УКХ-радіозв'язок, системи радіозв'язку спеціального призначення), необхідно використовувати для передавання IR-UWB сигналів вільні ділянки радіоспектра. Враховуючи, що на даний момент в світі федеральною комісією США в галузі зв'язку (FCC) встановлено допустимі норми на спектральну щільність випромінювання IR-UWB сигналів на рівні – 41,3 дБм/МГц в смузі частот 3,1–10,6 ТГц [1] для забезпечення електромагнітної сумісності, максимальна дальність дії систем зв'язку на базі IR-UWB як правило не перевищує декілька десятків метрів. Отже, кардинально збільшити дальність дії систем радіозв'язку на базі IR-UWB сигналів можна лише шляхом використання вільних ділянок радіоспектра. З точки зору авторів даної НДР, саме діапазон терагерцових частот (0,1–3 ТГц) через свою велику частотну ємність та незайнятість є перспективним для розробки та розгортання IR-UWB систем зв'язку задля дослідження всіх їх переваг та недоліків. Важливо відмітити, що задача генерації IR-UWB коливань на відміну від генерації гармонійних коливань безпосередньо в терагерцовому діапазоні є надто складною задачею, тому, найбільш доцільним і перспективним шляхом побудови систем IR-UWB зв'язку є генерація IR-UWB сигналів в діапазоні деци- та/або сантиметрових хвиль з подальшим їх перенесенням в терагерцовий діапазон методом гетеродинавання в передавальному тракті системи зв'язку та зворотного перенесення сигналу з терагерцового діапазону в діапазон деци- або сантиметрових хвиль в приймальному тракті цієї системи. Тому, метою даної роботи є дослідження характеру зміни часової форми (тобто впливу спотворень) IR-UWB сигналу при його передаванні через ідеалізовану імітаційну модель радіолінії терагерцового діапазону з відомими параметрами. На основі отриманих результатів дослідження буде сформульовано вимоги до параметрів радіолінії терагерцового діапазону (ТГц), що її проектують, які забезпечують допустимий рівень спотворень.

## ВИБІР СЕРЕДОВИЩА ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТА МОДЕЛІ РАДІОЛІНІЇ ТЕРАГЕРЦОВОГО (ТГц) ДІАПАЗОНУ

В якості середовища імітаційного моделювання оберемо програмний пакет Visual System Simulator САПР AWR Microwave Office v. 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 макету діючого макета прийомо-передавача ТГц (розташований в 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. Сікорського» 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. [2, 3]. Даний макет прийомо-

мо-передавача непогано зарекомендував себе при проведенні практичних досліджень з передачі/приймання багаточастотних сигналів цифрового телебачення стандартів DVB-S та DVB-C [3, 4].

Структурна схема симплексної системи радіозв'язку ТГц діапазону, імітаційна модель якої була побудована в AWR Microwave Office має вигляд (рис. 1):

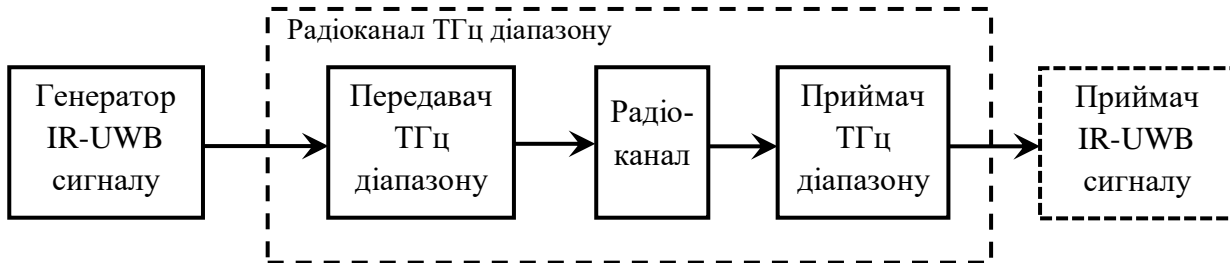


Рисунок 1 – Структурна схема симплексної системи радіозв'язку ТГц діапазону

### 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 зв'язку. Імітаційна модель генератору IR-UWB сигналів, яка побудована за допомогою інструментарію САПР Microwave Office, зображена на рис. 2. До складу моделі входять генератор прямокутних імпульсів, гаусівський фільтр нижніх частот, диференційний ланцюг.

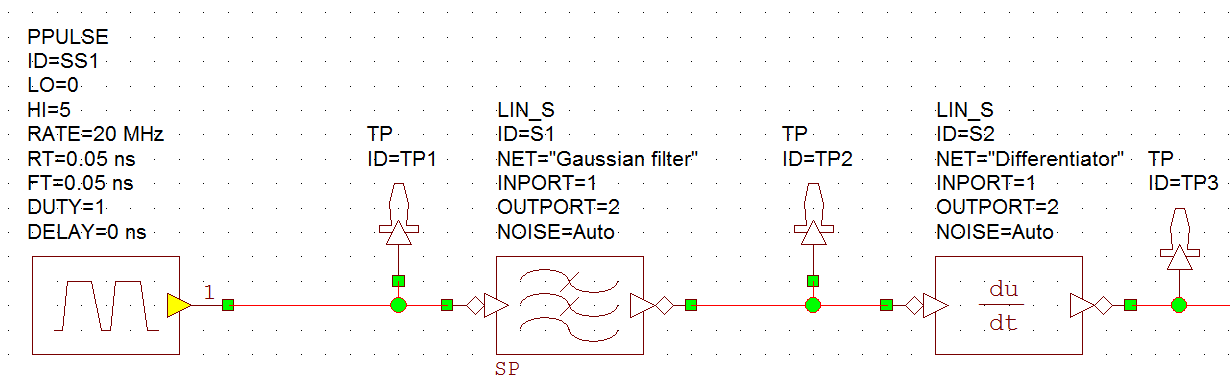


Рисунок 2 – Структурна схема імітаційної моделі генератору IR-UWB

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):  $T_R = 50$  пс;

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

Тривалість імпульсу (DUTY) = 1% або  $0,5$  нс =  $500$  пс.

Часова форма надкороткого прямокутного (трапеційного) імпульсного сигналу на виході блоку PPULSE зображено на рис. 3 та рис. 4.

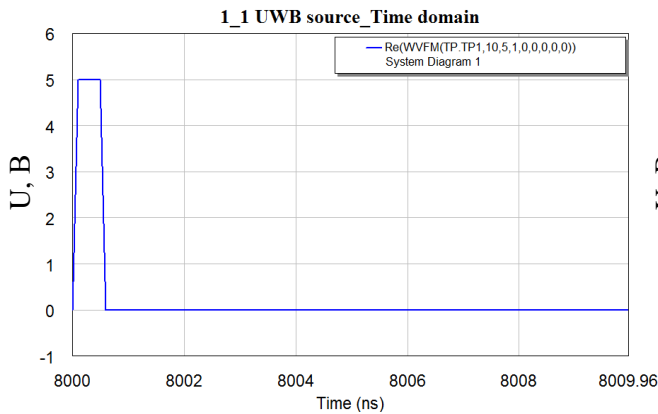


Рисунок 3 – Осцилограма надкороткого імпульсного сигналу на виході імпульсного генератору (в масштабі 10 нс)

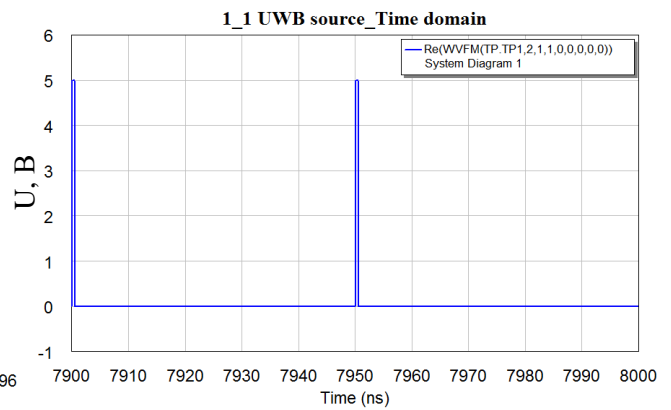


Рисунок 4 – Осцилограма надкороткого імпульсного сигналу на виході імпульсного генератору (в масштабі 100 нс)

Спектр надкороткого імпульсного сигналу прямокутної форми показано на рис. 5.

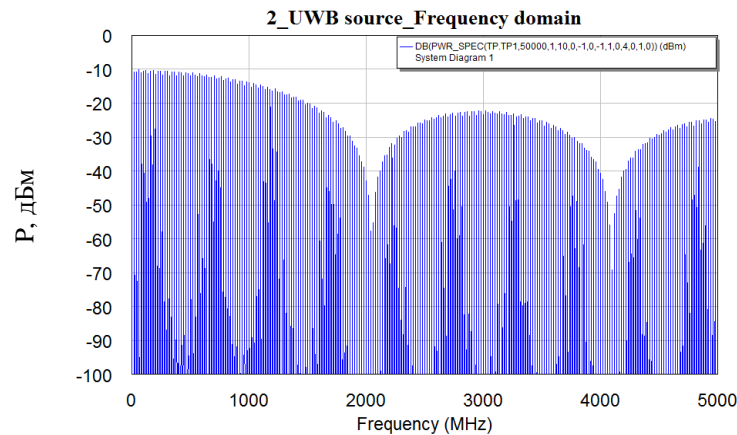


Рисунок 5 – Спектр надкороткого імпульсного сигналу на виході блоку PPULSE

За допомогою майстра синтезу фільтрів iFilter Wizard синтезуємо гаусівський фільтр нижніх частот. Електрична схема фільтра на зосереджених елементах відображена на рис. 6, а його АЧХ коефіцієнта передачі (параметр  $S_{21}$ ) та АЧХ коефіцієнта відбиття по входу (параметр  $S_{11}$ ) показані на рис. 7.

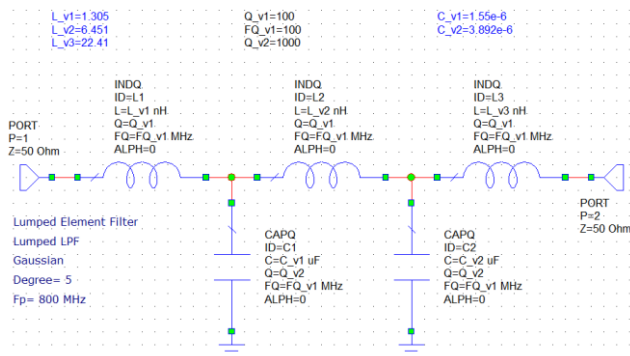


Рисунок 6 – Електрична схема гаусівського ФНЧ 5-го порядку на зосереджених елементах. Частота зрізу ГФНЧ складає 800 МГц

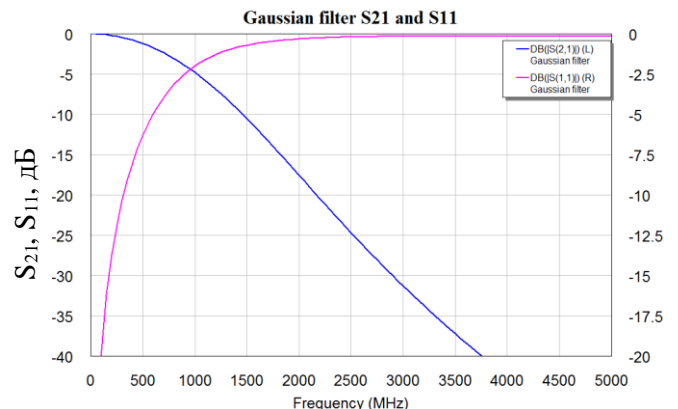


Рисунок 7 – АЧХ гаусівського фільтра та частотна характеристика його коефіцієнта відбиття по входу

Осцилограма надкороткого гаусівського імпульсу показана на рис. 8 та рис. 9.

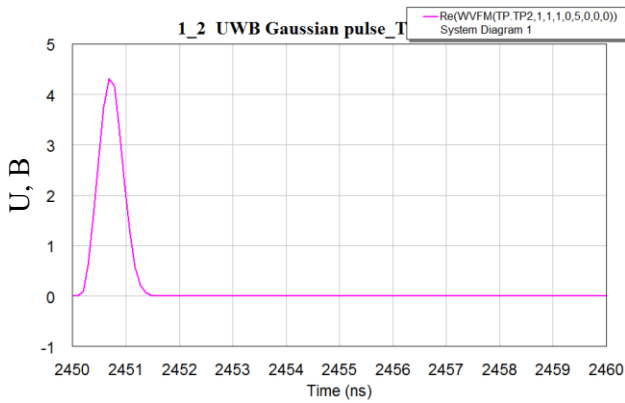


Рисунок 8 – Осцилограма надкороткого гаусівського імпульсу(в масштабі 10 нс)

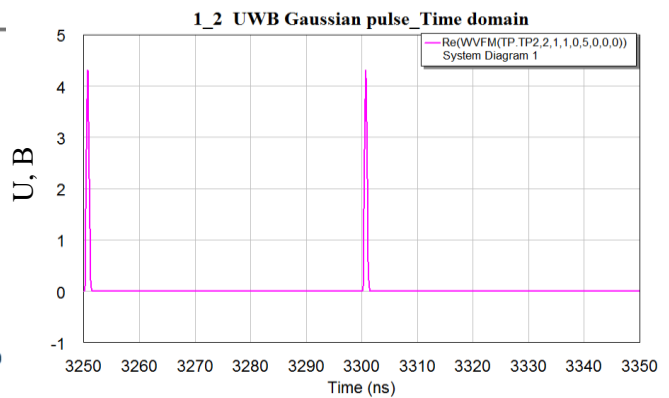


Рисунок 9 – Осцилограма гаусівського імпульсу (в масштабі 100 нс)

Спектр надкороткого гаусівського імпульсу зображено на рис. 10.

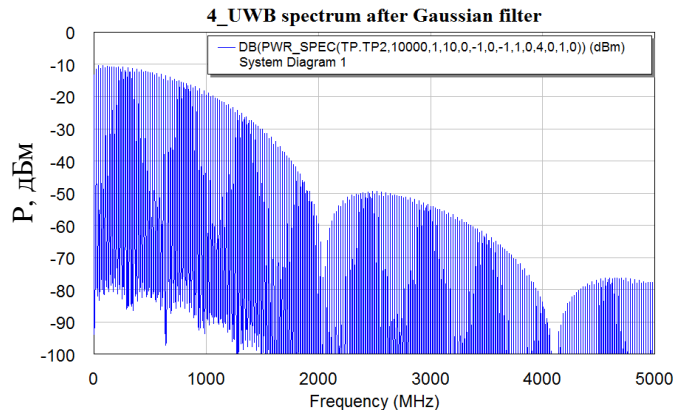


Рисунок 10 – Спектр надкороткого гаусівського імпульсу

Для отримання гаусівського моноциклу необхідно «пропустити» гаусівський імпульс через диференційний ланцюг, один з варіантів якого показаний на рис. 11,а. На рис. 11,б зображено АЧХ коефіцієнта передачі диференційного ланцюга.

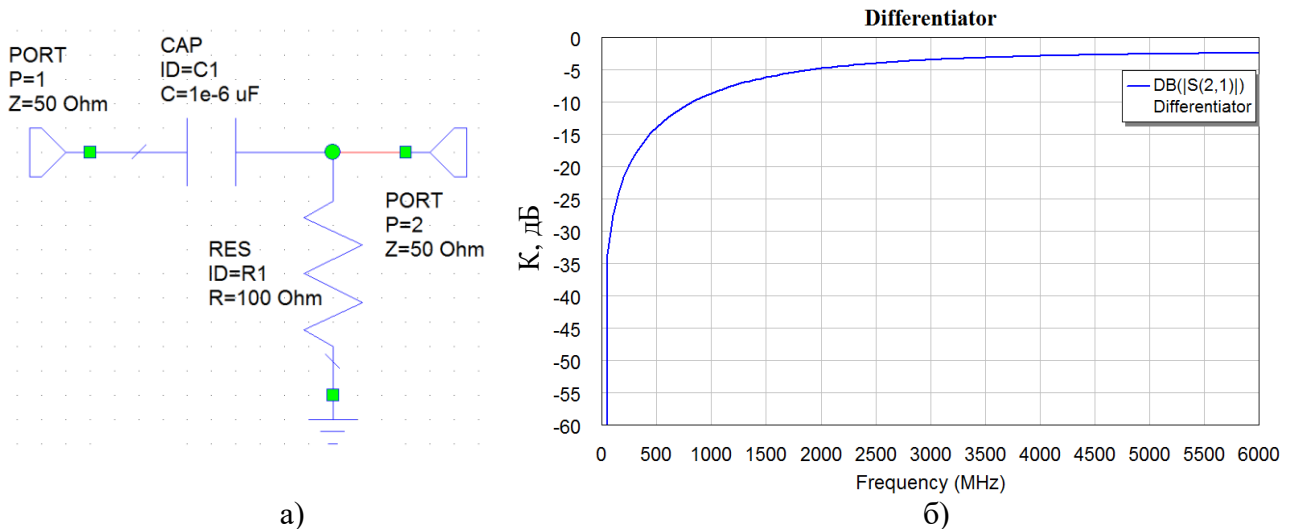


Рисунок 11 - Диференційний ланцюг (а) та АЧХ його коефіцієнта передачі (б).

Осцилограма гаусівського моноциклу на виході диференційного ланцюга зображена на рис. 12, рис. 13.

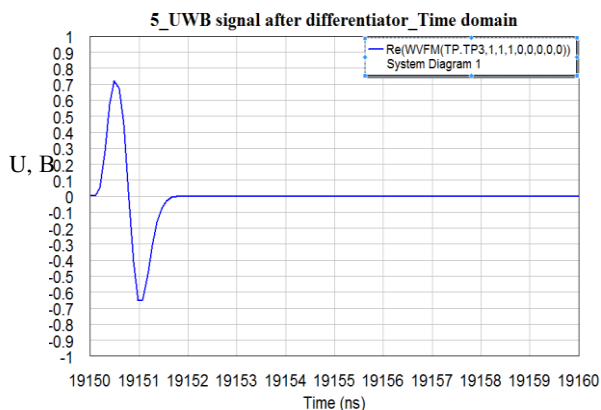


Рисунок 12 – Осцилограма гаусівського моноциклу на виході диференціатора (на інтервалі 10 нс)

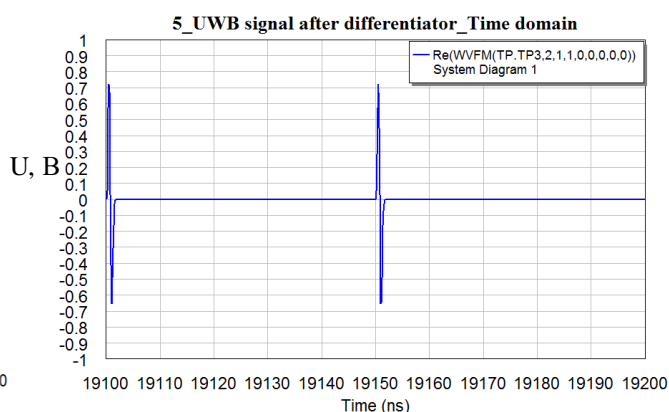


Рисунок 13 Осцилограма гаусівського моноциклу на виході диференціатора (на інтервалі 100 нс)

### 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. 14.

Відповідно до рис. 14, до складу імітаційної моделі входять: ідеалізована модель ширококутвого підсилювача радіочастоти на базі ІМС GALI-5, модель атенюатора (ATTEN), модель ширококутвого змішувача радіочастот (MIXER\_B), модель гетеродина (TONE), модель смугового фільтра (BPF).

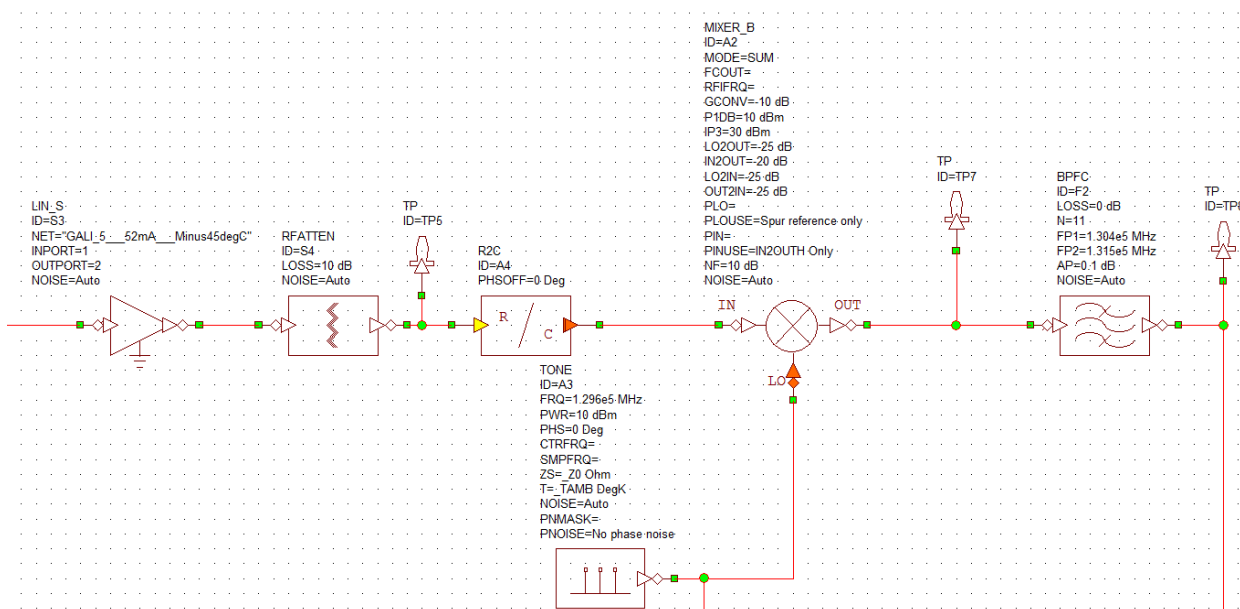


Рисунок 14 – Імітаційна модель передавального тракту терагерцового діапазону

На рис. 15 та рис. 16 зображено осцилограми гаусівського моноциклу на виході ланцюга «підсилювач-атенюатор».

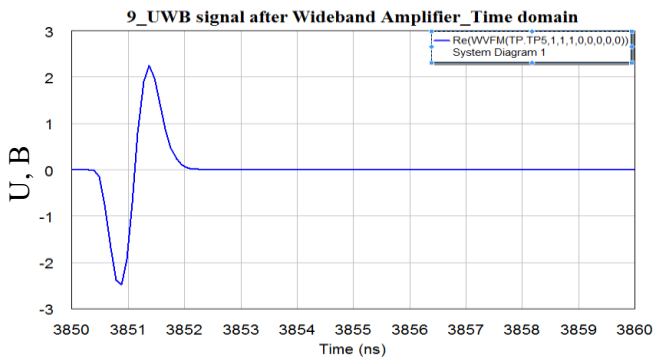


Рисунок 15 – Осцилограма гаусівського моноциклу на виході ланцюга «підсилювач-атенюатор» (в масштабі 10 нс)

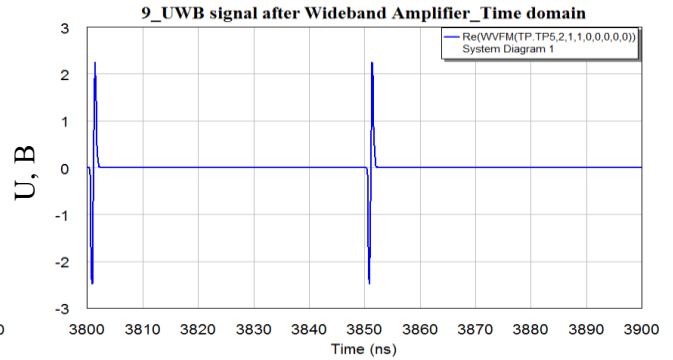


Рисунок 16 – Осцилограма гаусівського моноциклу на виході ланцюга «підсилювач-атенюатор» (в масштабі 100 нс)

Параметри гетеродинного тракту відповідно до рис. 14 складають: частота гетеродина  $f_{\text{ГЕТ}}=129,6$  ГГц, потужність гетеродина  $P_{\text{out}} = 10$  дБм.

Параметри ідеалізованої моделі широкосмугового змішувача радіочастот «угору» відповідно до рис. 14:

Втрати перетворення  $L = 10$  дБ;

Точка компресії по рівню 1 дБ  $P_{1\text{out}} = 10$  дБм;

Точка IP3  $P_{\text{IP3}} = 30$  дБм

Розв'язка «Гетеродин – Вихід» : 25 дБ;

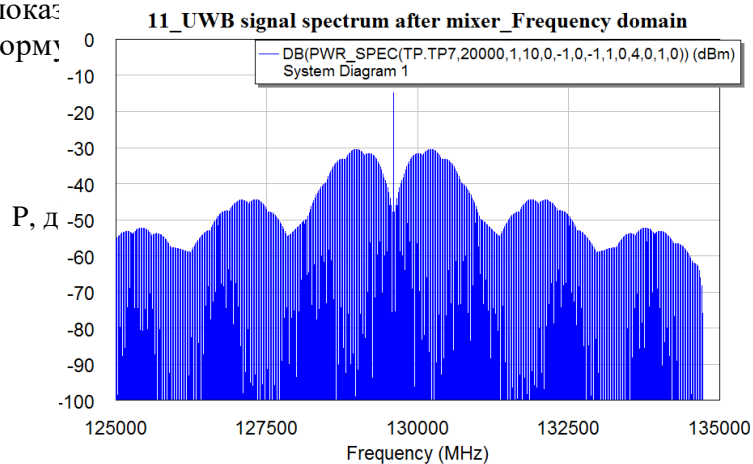
Розв'язка «РЧ вхід – Вихід»: 20 дБ;

Розв'язка «Гетеродин – РЧ вхід»: 25 дБ;

Розв'язка «Вихід – РЧ вхід »: 25 дБ;

Коефіцієнт шуму змішувача: 10 дБ.

На рис. 17 показані часові форми



сигналу змішувача, а на рис. 18, показані частотні форми.

Рисунок 17 - Спектр IR-UWB сигналу після гетеродинування в передавальному тракті (частота гетеродина  $f_{\text{ГЕТ}} = 129,6$  ГГц)

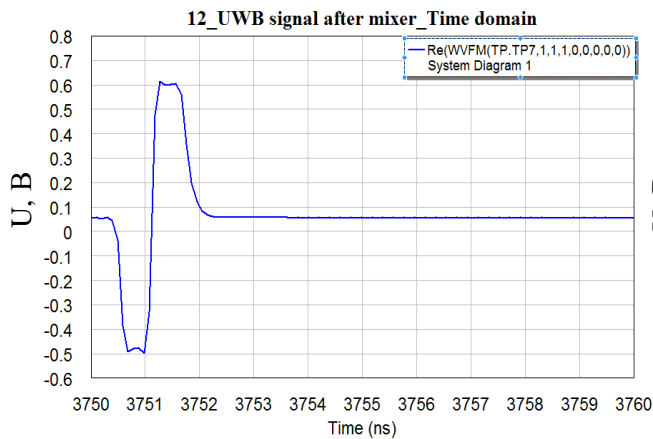


Рисунок 18 – Часова форма сигналу на виході змішувача передавального тракту (в масштабі 10 нс)

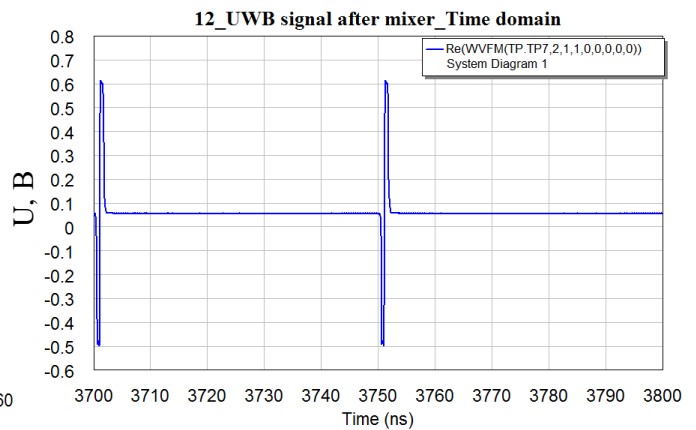


Рисунок 19 – Часова форма сигналу на виході змішувача передавального тракту (в масштабі 100 нс)

На рис. 20 зображено наскрізну АЧХ макету прийомо-передавача терагерцового діапазону.

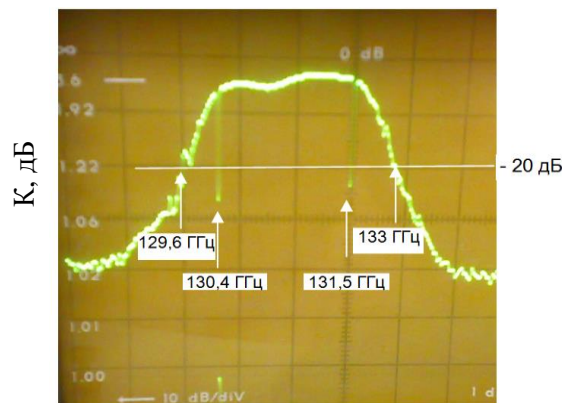


Рисунок 20 - Наскрізна АЧХ макету прийомо-передавача терагерцового діапазону

Оскільки АЧХ, що її зображено на рис. 20, визначається в першу чергу «поведінкою» АЧХ коефіцієнтів передачі смугових фільтрів передавального та приймального трактів, для простоти приймемо однаковою модель смугового фільтра для передавального та приймального трактів. Виконаємо цю модель у вигляді фільтра Чебишева 11-го порядку зі смугою пропускання 130,4 – 131,5 ГГц за рівнем  $-3$  дБ. АЧХ коефіцієнта передачі такого фільтра показана на рис. 21.

Спектр радіосигналу на виході смугового фільтра передавального тракту матиме вигляд, показаний на рис. 22. Часова форма радіоімпульсу на виході смугового фільтра передавального тракту показана на рис. 23 та рис. 24.

### МОДЕЛЬ ПРИЙМАЛЬНОГО ТРАКТУ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДІАПАЗОНУ

Приймальний тракт терагерцового діапазону з'єднується з передавальним трактом терагерцового діапазону через атенюатор номіналом 20 дБ, який імітує безпроводову лінію передачі (втрати в середовищі поширення та коефіцієнти підсилення передавальної та приймальної антен) без шумів. Структурна схема ідеалізованої імітаційної моделі передавального тракту показана на рис. 25.

– гетеродина 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;

Приймальний тракт складається з:

– двокаскадного широкосмугового підсилювача радіочастоти на базі ІМС GALI-5 з коефіцієнтом підсилення 40 дБ;

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

– детектора обвідної сигналу.

Спектр радіосигналу після проходження смугового фільтра приймального тракту зображений на рис. 26, а часові форми цього ж самого сигналу – відповідно на рис. 27 та рис. 28.

Спектр IR-UWB сигналу на виході змішувача частоти «униз» показано рис. 29, а осцилограми вихідного сигналу змішувача приймального тракту – на рис. 30 та рис. 31.

На рис. 32, рис. 33, рис. 34 відповідно показано спектр IR-UWB сигналу та його осцилограми на виході підсилювача радіочастоти.

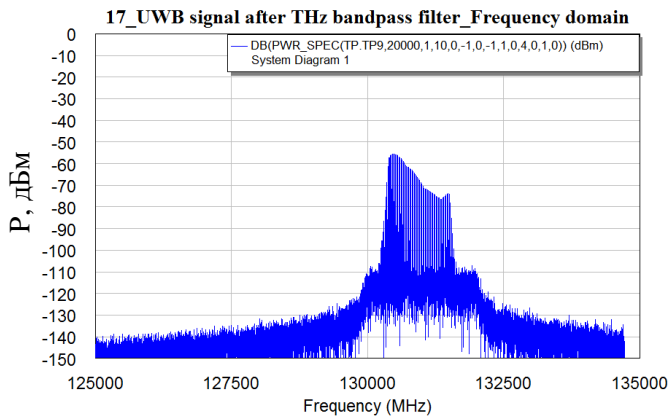


Рисунок 26 – Спектр IR-UWB сигналу на виході смугового фільтра передавального тракту радіолінії ТГц діапазону

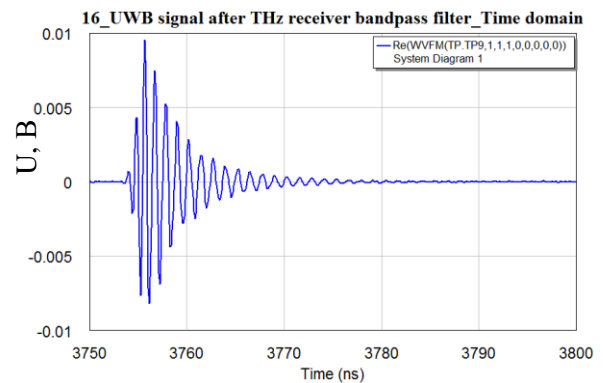


Рисунок 27 – Часова форма IR-UWB сигналу на виході смугового фільтра приймального тракту радіолінії ТГц діапазону (в масштабі 50 нс)

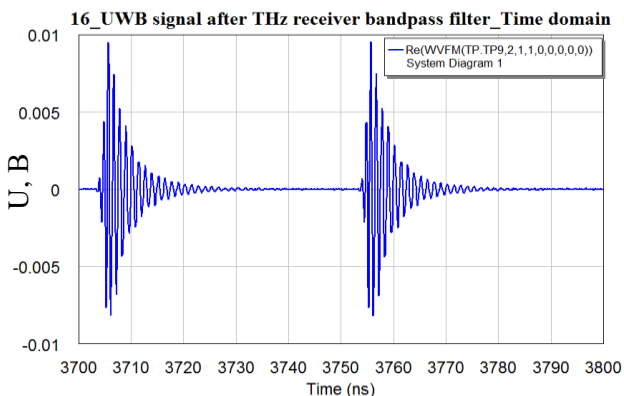


Рисунок 28 – Часова форма IR-UWB сигналу на виході смугового фільтра приймального тракту радіолінії ТГц діапазону (в масштабі 100 нс)

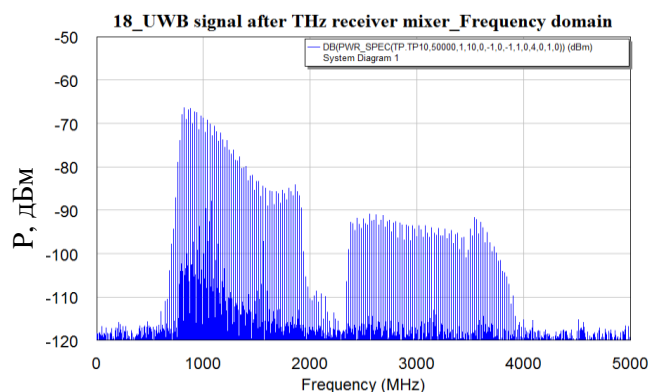


Рисунок 29 – Спектр IR-UWB сигналу на виході змішувача «вниз» в приймальному тракті радіолінії терагерцового діапазону

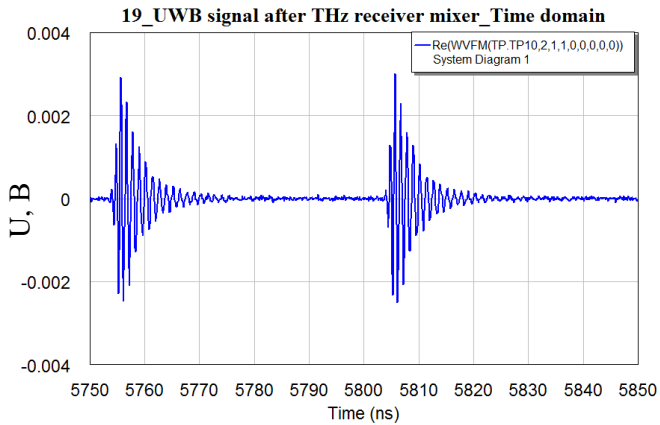


Рисунок 30 – Осцилограма IR-UWB сигналу на виході змішувача «вниз» в приймальному тракті радіолінії терагерцового діапазону (в масштабі 100 нс)

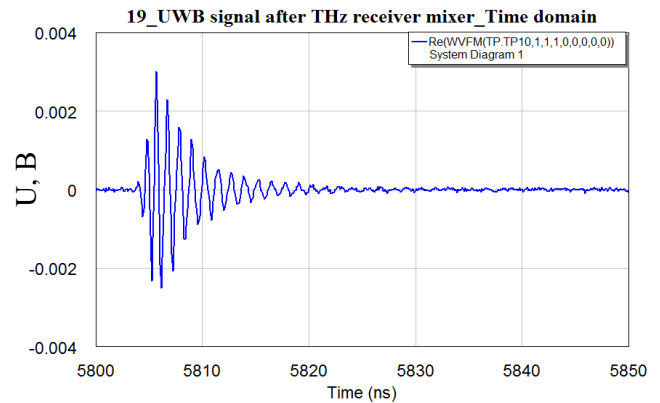


Рисунок 31 – Осцилограма IR-UWB сигналу на виході змішувача «вниз» в приймальному тракті радіолінії терагерцового діапазону (в масштабі 50 нс)

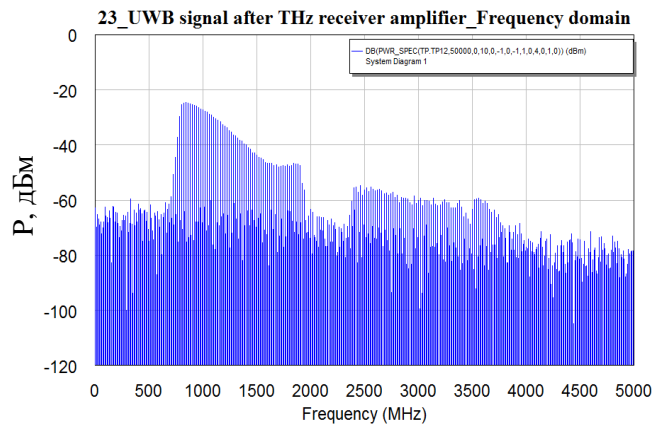


Рисунок 32 – Спектр IR-UWB сигналу на виході широкосмугового підсилювача в приймальному тракті радіолінії терагерцового діапазону

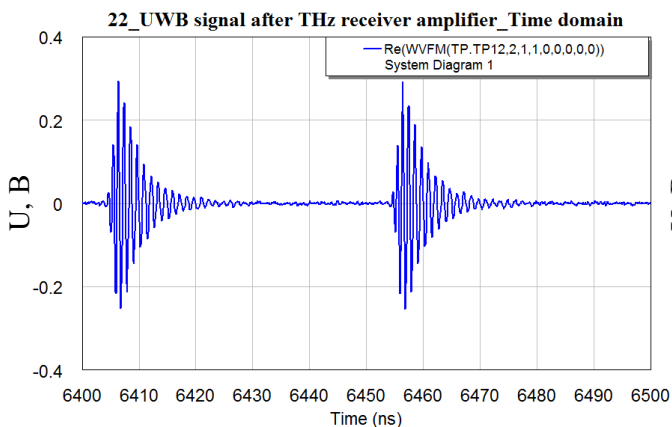


Рисунок 33 – Осцилограма IR-UWB сигналу на виході змішувача «вниз» в приймальному тракті радіолінії терагерцового діапазону (в масштабі 100 нс)

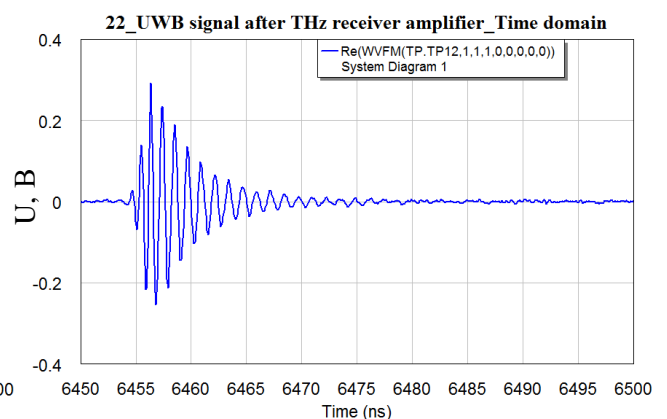


Рисунок 34 – Осцилограма IR-UWB сигналу на виході змішувача «вниз» в приймальному тракті радіолінії терагерцового діапазону (в масштабі 50 нс)

Після проходження підсилювача радіочастоти, IR-UWB сигнал відфільтровується від продуктів перетворення, що виникли в змішувачі за допомогою фільтра нижньої частоти, АЧХ якого зображена на рис. 35. Відповідно спектр IR-UWB показаний на рис. 36.

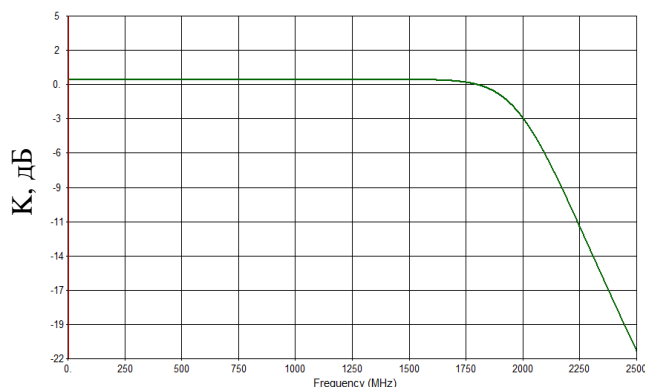


Рисунок 35 – АЧХ фільтра нижніх частот

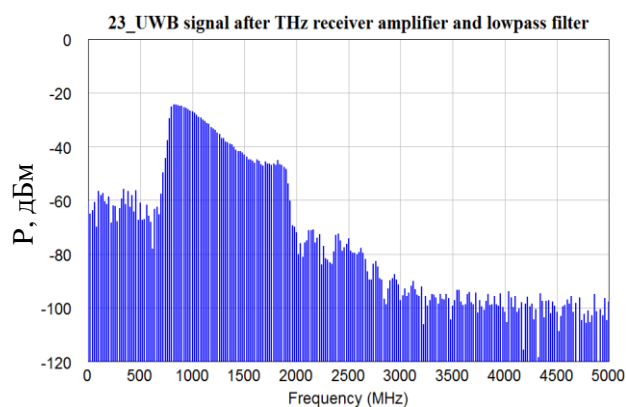


Рисунок 36 – Спектр UWB сигналу на виході ФНЧ

На рис. 37 показано часову форму обвідної IR-UWB сигналу на виході детектору обвідної. Далі цей сигнал можна подати на цифрову частину приймального тракту для демодуляції та перетворення в необхідний цифровий код.

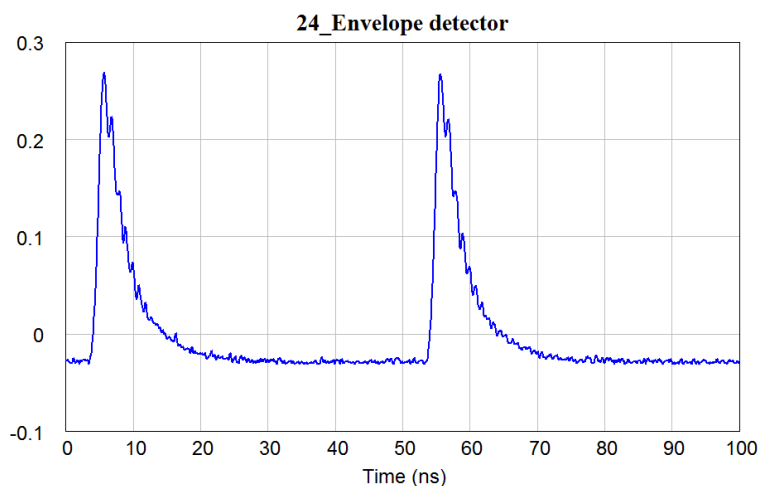


Рисунок 37 – Часова форма інформаційного сигналу на виході детектору обвідної

## ВИСНОВКИ

Результати імітаційного моделювання підтверджують можливість передачі IR-UWB сигналу методом гетеродинування через макет прийомо-передавача терагерцового діапазону в діапазоні частот 130,4–131,5 ГГц.

Порівнюючи часові форми IR-UWB сигналів на вході (рис. 2 та рис. 37) та виході радіо-лінії 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 спектра UWB сигналу в смуговому фільтрі передавального та приймального тракту.

Важливо відзначити, що радіосигнал на виході передавача терагерцового діапазону не можна віднести до класу надширокосмугових (UWB) сигналів за критерієм відносної ширини спектра сигналу, оскільки його відносна смуга частот за рівнем -10 дБ складає:

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{f_B - f_H}{f_0} \times 100 \% = 0,88 \%$$

де  $f_H = 130,37$  ГГц;  $f_B = 131,53$  ГГц;  $f_0 = \frac{f_H + f_B}{2} = 130,95$  ГГц – відповідно нижня, верхня границі спектра сигналу. У той же час за іншим критерієм, будь-який сигнал із смугою частот більше 500 МГц також можна вважати надширокосмуговим [1].

Для того, щоб можна було вважати радіосигнал на виході передавача терагерцового діапазону надширокосмуговим, його відносна смуга частот повинна складати не менше, ніж

$$\frac{\Delta f}{f} = 20 \% .$$

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.

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 малошумливих підсилювачів приймального тракту,
- гетеродинів передавального та приймального трактів.

## ЛІТЕРАТУРА

1. M. Ghavami, L. B. Michael, R. Kohno, Ultra Wideband Signals and Systems in Communication Engineering, John Wiley and Sons Ltd., 2004. <http://booksbw.com/books/technics/ghavami-m/2004/files/uwbsignstemsin%D1%81om2004.pdf>

2. Завершені науково-дослідні роботи КПІ ім. Ігоря Сікорського. Цифрова радіорелейна система терагерцового діапазону з використанням наноелектронних компонентів [Електронний ресурс] / Київ. КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2012. – Режим доступу: <http://report.kpi.ua/uk/0111U002470> . – Дата звернення 21.10.2017 р.

3. Завершені науково-дослідні роботи КПІ ім. Ігоря Сікорського. Розробка радіолінії із гігабітною пропускнуою здатністю терагерцового діапазону для надвисокошвидкісних розподільчих мереж доступу [Електронний ресурс] / Київ. КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2012. – Режим доступу: <http://report.kpi.ua/uk/0115U002330>. – Дата звернення 21.10.2017р.

4. Gleb Avdeyenko, Anton Ermakov, Theodor Narytnik The research of transmission of DVB-C television signals based on the prototype of transceiver operating in the lower part of terahertz band// Information and Telecommunication Sciences, 2016, Volume 7, Number 2, pp.81- 90. <http://mitris.com/files/Research%20of%20DVB-C%20transmission.pdf>.

5. Авдєєнко Г. Л. Дослідження багатоканальних сигналів цифрового телебачення DVB-C при їх передаванні по приймально-передавальному тракту терагерцового діапазону / Г. Л. Авдєєнко, Б. Ю. Набока, Т. М. Наритник // Цифрові технології. -2016. - №19 – с.26-33. [http://mitris.com/files/%D0%96%D1%83%D1%80%D0%BD%D0%B0%D0%BB%20%D0%A6%D0%B8%D1%84%D1%80%D0%BE%D0%B2%D1%96%20%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D1%96%D1%97\\_2016\\_19\\_5.pdf](http://mitris.com/files/%D0%96%D1%83%D1%80%D0%BD%D0%B0%D0%BB%20%D0%A6%D0%B8%D1%84%D1%80%D0%BE%D0%B2%D1%96%20%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D1%96%D1%97_2016_19_5.pdf).

6. И. Шахнович. Сверхширокополосная связь. Второе рождение //Электроника. Наука. Технологии. Бизнес.4/2001. – С.8–15.

#### REFERENCES

1. M. Ghavami, L. B. Michael, R. Kohno, Ultra Wideband Signals and Systems in Communication Engineering, John Wiley and Sons Ltd., 2004. <http://booksbw.com/books/technics/ghavami-m/2004/files/uwbsignstemsin%D1%81om2004.pdf>

2. Zaversheni naukovo-doslidni roboty KPI im. Ihorya Sikors'koho. Tsyfrova radioreleyna systema terahertsovoho diapazonu z vykorystannyam nanoelektronnykh komponentiv [Elektronnyy resurs] / Kyiv. KPI im. Ihorya Sikors'koho, 2012. – Rezhym dostupu: <http://report.kpi.ua/uk/0111U002470>. – Data zvernennya 21.10.2017r.

3. Zaversheni naukovo-doslidni roboty KPI im. Ihorya Sikors'koho. Rozrobka radioliniyi iz hihabitnoyu propusknoyu zdadnistyu terahertsovoho diapazonu dlya nadvysokoshvydkisnykh rozpodil'chykh merezh dostupu [Elektronnyy resurs] / Kyiv. KPI im. Ihorya Sikors'koho, 2012. – Rezhym dostupu: <http://report.kpi.ua/uk/0115U002330>. – Data zvernennya 21.10.2017r.

4. Gleb Avdeyenko, Anton Ermakov, Theodor Narytnik The research of transmission of DVB-C television signals based on the prototype of transceiver operating in the lower part of terahertz band// Information and Telecommunication Sciences, 2016, Volume 7, Number 2, pp.81–90. <http://mitris.com/files/Research%20of%20DVB-C%20transmission.pdf>.

5. Avdyeyenko H. L. Doslidzhennya bahatokanal'nykh syhnaliv tsyvrovoho teleba-chennya DVB-C pry yikh peredavanni po pryymal'no-peredaval'nomu traktu terahertsovoho diapazonu / H. L. Avdyeyenko , B.Yu.Naboka, T. M. Narytnyk // Tsyfrovi tekhnolohiyi. – 2016. – #19 – s. 26–33.[http://mitris.com/files/%D0%96%D1%83%D1%80%D0%BD%D0%B0%D0%BB%20%D0%A6%D0%B8%D1%84%D1%80%D0%BE%D0%B2%D1%96%20%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D1%96%D1%97\\_2016\\_19\\_5.pdf](http://mitris.com/files/%D0%96%D1%83%D1%80%D0%BD%D0%B0%D0%BB%20%D0%A6%D0%B8%D1%84%D1%80%D0%BE%D0%B2%D1%96%20%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D1%96%D1%97_2016_19_5.pdf).

6. Y.Shakhnovych. Sverkhshyrokopolosnaya svyaz'. Vtoroe rozhdenye?//Электроника. Наука. Tekhnolohyy. Byznes.4/2001.S.8-15.