

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 21

Одеса –2017

Цифрові технології: Збірник / Кол. авт. - ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2017. – Вип. 21– 155 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 № 6 від 4 квітня 2015 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 Осама, 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., к.т.н., 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. 21

Odessa – 2017

UDC 621.37/39

Digital Technologies: Collection / Ukr., Odessa: O.S. Popov Odessa National Academy of Telecommunications, 2017. – No. 21. – 155 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 № 6 dated April 4, 2015**

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 for 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, PhD, 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 № 21

С.

Цифрові системи зв'язку

СИНТЕЗ РОБАСТНОГО МЕТОДА ДЕМОДУЛЯЦІЇ ДИФФЕРЕНЦІАЛЬНО МОДУЛІРОВАННИХ СИГНАЛІВ В КВАЗИСТАЦІОНАРНИХ КАНАЛАХ	
Банкет В.Л., Манаков С.Ю.	9
ДОСЛІДЖЕННЯ ПОШИРЕННЯ ТЕРАГЕРЦОВИХ ХВИЛЬ В АТМОСФЕРІ ДЛЯ ПРОЕКТУВАННЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДІАПАЗОНУ	
Авдєєнко Г.Л., Бунін С.Г., Наритник Т.М.	17
СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ТА РОЗВИТКУ СУПУТНИКОВИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ В СВІТІ І УКРАЇНІ. ЧАСТИНА 2	
Ільченко М. Ю., Капштик С. В., Мельник О. М., Наритник Т. М.	25
ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗДІЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ КОРЕЛЯЦІЙНОГО І ПОЗИЦІЙНОГО МЕТОДІВ	
В.М. Кичак, В.Д. Тромсюк	56
СИСТЕМА ПАРАМЕТРОВ ІНТЕГРАЛЬНОГО ПРИЄМНИКА СУБМІЛЛИМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНА	
Ільченко М.Е., Денбновецкий С.В., Нарытник Т.Н., Лутчак А.В., Май А.В.	59
УВЕЛИЧЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ ЕМКОСТИ ОДНОГО ЭЛЕМЕНТА КОДА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТАЙМЕРНОГО КОДИРОВАНИЯ	
Захарченко Н.В., Голев Д.В., Толкачев А.В., Басов В.Е.	64
АНАЛИЗ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЗОНЫ ОБСЛУЖИВАНИЯ И РАДИОКАНАЛА НАЗЕМНОГО ОБОРУДОВАНИЯ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ В УСЛОВИЯХ РАБОТЫ АНТАРКТИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ «АКАДЕМИК ВЕРНАДСКИЙ»	
Ільченко М.Е., Капштик С.В., Наритник Т.Н. Литвинов В. А. Присяжный В. И.	71

Системи цифрового мовлення

COLOUR APPEARANCE METRIC FOR USE IN VIDEO APPLICATIONS	
Gofaizen O., Pilyavskiy V.	85
ОЦІНКА ТЕХНІЧНОЇ ЯКОСТІ ПОТОКОВОГО ПЕРЕДАВАННЯ МРЕГ-СИГНАЛІВ ЧЕРЕЗ LTE-МЕРЕЖІ	
Баляр В. Б., Дмитренко І. Ю., Станева І.І., Войтко К.В.	96
СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРИНЯТОГО СИГНАЛА В ЗОНЕ ОБСЛУЖИВАНИЯ ОДНОЧАСТОТНОЙ СЕТИ DVB-T2	
Якоб М.И., Демчук Ю.И., Аврам И.А.	108

Радіолокаційні засоби спостереження об'єктів

К ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АФФИННОГО БАЗИСА В РАДИОЛОКАЦИОННЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПОЛЯРИМЕТРАХ	
Корбан В.Х., Корбан Д.В., Дегтярёва Л.Н.	121

Радіомоніторинг телекомунікаційних мереж

ДОВІРЧА ІМОВІРНІСТЬ І ДОВІРЧИЙ ІНТЕРВАЛ СТАТИСТИЧНИХ ОЦІНОК ПАРАМЕТРІВ ДЖЕРЕЛ РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ ПРИ РАДІОМОНІТОРИНГУ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ	
Ільницький А.І., Бурба О.І.	130

Джерела живлення апаратури зв'язку

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕЙСТВУЮЩИХ ЗНАЧЕНИЙ ТОКОВ В ИНВЕРТИРУЮЩИХ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ С ГРАНИЧНЫМ
РЕЖИМОМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

Кадацкий А.Ф., Русу А.П., Криль А.С. 140

DIGITAL TECHNOLOGIES № 21

P.

Digital telecommunication systems

THE SYNTHESIS OF THE ROBUST DEMODULATION METHOD OF THE DIFFERENTIAL MODULATION SIGNALS IN QUASYSTATIONARY CHANNELS

Banket V.L., Manakov S. JU.....9

STUDY TERAHERTZ WAVES PROPAGATION IN THE ATMOSPHERE FOR DESIGN TELECOMMUNICATION SYSTEMS OF TERAHERTZ RANGE

Avdeyenko G., Bunin S., Narytnik T.....17

STATUS AND PROSPECTS OF THE USE AND DEVELOPMENT OF SATELLITE TELECOMMUNICATIONS IN THE WORLD AND IN UKRAINE. PART 2

Ilchenko M., Kapshtyk S., Melnyk A., Narytnyk T.....25

RESEARCH RESOLUTION OF CORRELATION AND POSITION METHODS

V.M. Kychak, V.D. Tromsyuk56

SYSTEM PARAMETERS OF THE INTEGRAL RECEIVER OF THE SUBMILLIMETER RANGE

Ilchenko M., Denbnovetsky S., Narytnik T., Lutchak O., May O.....59

INCREASE INFORMATION CAPACITY OF ONE ELEMENT OF CODE IN THE PROCESS OF USING TIMER CODING

Zakharchenko N.V., Golev D.V., Tolkachev A.V., Basov V.E.....64

ANALYSIS OF THE POTENTIAL SERVICE AREA AND RADIO CHANNEL OF THE GROUND SATELLITE COMMUNICATION EQUIPMENT UNDER WORKING CONDITIONS OF THE ANTARCTIC STATION "ACADEMICIAN VERNADSKY"

Ilchenko M., Kapshtik S., Narytnik T., Litvinov V., Prisyazhnyy V.....71

Digital broadcasting systems

MODERN PROGRESS OF TV COLORIMETRY. PROPOSALS FOR REVISION REPORT ITU-R BT.2380 "ELEMENTS OF TELEVISION COLORIMETRY"

Gofaizen O., Pilyavskiy V.....85

ESTIMATION OF TECHNICAL QUALITY FOR MPEG STREAMING IN LTE NETWORKS

Baliar V. B., Dmitrenko I.Yu., Staneva I.I., Voytko K.V.....96

COMPARATIVE EVALUATION OF RECEIVED SIGNAL PARAMETERS IN SFN DVB-T2 SERVICE AREA

Iacob M.I., Demciuc I.I., Avram I.A..... 108

Radar objects observation facilities

THE POSSIBILITY OF USE AFFINE BASIS IN RADARMETEOROLOGICAL POLARIMETERS

Korban V.CH., Korban D.V., Degtyarova L.M. 130

Radiocommunication networks monitoring

TRUST PROBABILITY AND TRUST INTERVAL OF STATISTICAL ESTIMATES OF PARAMETERS OF RADIO RADIATION SOURCES AT RADIO MONITORING TELECOMMUNICATION NETWORKS

Ilnitskiy A.I., Burba O.I. 121

Power supplies for communications equipment

THE RESEARCH OF EFFECTIVE CURRENTS IN THE BACK-BOOST DC-DC
CONVERTERS WITH BOUNDARY MODE OPERATION

Kadatskyy A.F., Rusu A.P., Kril A.S..... 140

УДК 621.396.43

**ДОСЛІДЖЕННЯ ПОШИРЕННЯ ТЕРАГЕРЦОВИХ ХВИЛЬ
В АТМОСФЕРІ ДЛЯ ПРОЕКТУВАННЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ
ТЕРАГЕРЦОВОГО ДІАПАЗОНУ**

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

*Національний технічний університет України «КПІ»,
пров. Індустріальний, 2, Київ, 03056, Україна
director@mitris.com*

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕРАГЕРЦОВЫХ ВОЛН
В АТМОСФЕРЕ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕЛЕКОМУНИКАЦИОННЫХ СИ-
СТЕМ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА**

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

*Национальный технический университет Украины «КПИ»,
пер. Индустриальный, 2, Киев, 03056, Украина
director@mitris.com*

**STUDY TERAHERTZ WAVES PROPAGATION IN THE ATMOSPHERE FOR DESIGN
TELECOMMUNICATION SYSTEMS OF TERAHERTZ RANGE**

AVDEYENKO G., BUNIN S., NARYTNIK T.

*National Technical University of Ukraine "KPI",
Industrialny lane, 2, Kiev, 03056, Ukraine
director@mitris.com*

Анотація. Обґрунтовано необхідність переходу до використання терагерцового діапазону частот при розгортанні майбутніх радіорелейних ліній зв'язку надвисокої пропускної здатності. Розглянуто основні фактори, що призводять до виникнення завмирань в радіорелейних лініях зв'язку. Показано, що в терагерцовому діапазоні найбільший вплив на енергетичний потенціал радіорелейних ліній чинять затухання в гідро метеорах та газах. Виділено ділянки частот терагерцового діапазону, які найбільше за все придатні для використання в радіорелейних лініях зв'язку.

Ключові слова: гази, гідрометеори, затухання, інформаційна ємність, поширення радіохвиль, проектування, пропускна здатність, радіорелейні лінії зв'язку, терагерцовий діапазон.

Аннотация: Обоснована необходимость перехода к использованию терагерцового диапазона частот при развертывании будущих радиорелейных линий связи сверхвысокой пропускной способности. Рассмотрены основные факторы, приводящие к возникновению замираний в радиорелейных линиях связи. Показано, что в терагерцового диапазона наибольшее влияние на энергетический потенциал радиорелейных линии оказывают затухания в гидрометеорах и газах. Выделены участки частот терагерцового диапазона, наиболее всего пригодны для использования в радиорелейных линиях связи.

Ключевые слова: газы, гидрометеоры, затухание, информационная ёмкость, проектирование, пропускная способность, радиорелейные линии связи, распространение радиоволн, терагерцовый диапазон.

Abstract: The necessity of terahertz frequency range usage for the future ultrahigh capacity radio relay lines deployment is shown. The main factors that give rise to signal fading in the radio-relay links are submitted. It was shown that hydrometeors have greatest impact on the terahertz frequency band radio relay lines power budget. Terahertz frequency bandwidths that are most likely suitable for use in radio relay lines are presented.

Keywords: terahertz range, microwave links, capacity, propagation of radio waves, damping, hydrometeors, gases, information capacity, design.

ВСТУП

Для ефективного проектування безпроводових телекомунікаційних систем терагерцового діапазону знання механізмів поширення терагерцових хвиль в атмосфері є надзвичайно важливим, оскільки вони дозволяють розробнику оцінити надійність та ступінь реалізовано-

сті радіосистеми. Однак ґрунтового дослідження таких механізмів проведено не було. Останні дослідження в даній області були засновані на розгляді тільки окремих систем (наприклад безпроводових мереж WLAN). Тому надзвичайно важливо в умовах сучасного бурхливого освоєння апаратури терагерцового діапазону провідними науково-технічними школами світу [1–9], провести такі дослідження, результати яких можна було б використати для розробки будь-якої безпроводової терагерцової телекомунікаційної системи.

На сьогодні вичерпаність частотного ресурсу нижче 30 ГГц при розгортанні цифрових радіорелейних ліній (ЦРРЛ) у великих мегаполісах та зростання об'єму інформації, що повинна передаватися (при швидкості до десятків гігабіт в секунду), вимагає освоєння смуг радіочастот вище за 30 ГГц, наприклад 71–76 ГГц та 81–86 ГГц, радіорелейне обладнання для яких на швидкості до 5 Гбіт/с при максимальній протяжності інтервалу в 5,2 км вже з'явилося на телекомунікаційному ринку [10]. Вказане відноситься також й до більш високого діапазону – терагерцового діапазону електромагнітних хвиль, розробка засобів та технологій ефективного використання якого є запорукою створення майбутніх надвисокошвидкісних транспортних систем передачі даних, які будуть основою для побудови мереж стільникового зв'язку 5G. Зокрема, Хіросімський університет, Національний Інститут інформатики і комунікаційних технологій і корпорація Panasonic на Міжнародній конференції ISSCC 2017 (США, Сан-Франциско, штат Каліфорнія) повідомили про спільно розроблений передавач для лінії зв'язку терагерцового діапазону, який дозволяє передавати цифрові дані зі швидкістю 105 Гбіт/с на один канал в смузі частот від 290 до 315 ГГц. Отримана продуктивність більше, чим на порядок вище, ніж у мобільних мереж п'ятого покоління (5G) [11].

Відмітимо також, що існуючі діапазони частот нижче 30 ГГц вже майже повністю використовуються, що спричиняє великі проблеми при необхідності створення нових безпроводових ліній високошвидкісного зв'язку. Терагерцовий діапазон (100–3000 ГГц), який сьогодні в більшій його частині поки що не ліцензується, дозволяє в значній мірі вирішити вказану проблему. При цьому необхідним і доцільним є дослідження особливостей поширення терагерцових хвиль в атмосфері в широкому діапазоні частот для подальшого використання отриманих результатів при проектуванні ефективних надширококутових телекомунікаційних систем.

ОСОБЛИВОСТІ ПОШИРЕННЯ ТЕРАГЕРЦОВИХ ХВИЛЬ В АТМОСФЕРІ

На поточний момент в світовій практиці не існує універсального методу, що забезпечуватиме надійне прогнозування якісних показників ЦРРЛ. Це призводить до великої похибки результатів розрахунку якісних показників за методами різних фірм, що використовують різні підходи в оцінці впливу факторів поширення радіохвиль на стійкість роботи ЦРРЛ. Також при поширенні електромагнітних хвиль в атмосфері є декілька відомих видів замирань сигналу, що актуальні в діапазоні до 30 ГГц, які в діапазоні терагерцових хвиль будуть мати мінімальні значення, а деякими взагалі можливо знехтувати. Відповідно певні види замирань, що не є критичними та суттєвими в більш низьких частотних діапазонах, навпаки будуть мати суттєвий вплив на роботу ЦРРЛ.

Проведений авторами аналіз показав, що в діапазоні частот 30–300 ГГц з відомих типів замирань (рефракційні замирання внаслідок екрануючого впливу перешкод, рефракційні замирання інтерференційного типу, інтерференційні замирання внаслідок відбиття від неоднорідностей шарів тропосфери, замирання внаслідок екрануючого впливу неоднорідностей шарів атмосфери, замирання внаслідок впливу діаграм спрямованості антен (для терагерцового діапазону – це неточність юстировки антен, а також вітрової навантаженості на антенні опори), замирання внаслідок послаблення радіосигналу гідрометеорами (дощ, т, сухий та мокрий сніг, град, туман, хмари), замирання внаслідок поглинання радіосигналу в газах, замирання радіосигналу в піщаних та пилових бурях) найбільш вагомими, які слід враховувати при проектуванні, є наступні [11–18]:

- замирання внаслідок послаблення сигналу гідрометеорами;

- завмирання внаслідок поглинання радіосигналу в газах (в першу чергу парах води та молекулярному кисні);
- завмирання внаслідок впливу діаграм спрямованості антен.

Робота радіорелейних ліній на таких високих частотах (особливо в терагерцовому діапазоні) через високу спрямованість антен кореспондуючих станцій дозволяє практично не враховувати інтерференцію електромагнітних хвиль, відбитих від перешкод в зоні поширення сигналу, яка виникає особливо в умовах щільної міської забудови. Розраховане значення найбільшого значення радіусу першої зони Френеля посередині траси довжиною 5 км складає величину 2,3 м на частоті 140 ГГц і не перевищуватиме 1,6 м на частоті 300 ГГц і, отже, це дає право не враховувати рефракцію і інтерференційні завмирання при розрахунку енергетичного бюджету цифрових радіорелейних ліній терагерцового діапазону, що планується.

ЗАТУХАННЯ ТЕРАГЕРЦОВИХ ХВИЛЬ ВНАСЛІДОК ПОГЛИНАННЯ РАДІОСИГНАЛУ В ГАЗАХ

Затухання в атмосфері терагерцових хвиль до частот 300 ГГц виникає здебільшого внаслідок присутності в повітрі парів кисню та води. Інші гази вносять незначний внесок в величину затухання терагерцових хвиль. На рисунку 1 зображено результати дослідження залежності величини затухання радіохвиль від частоти, проведене у 1996 р. Міжнародним союзом електрозв'язку (ITU) при нормальних параметрах атмосфери (температура 15 °С, тиск 1013 гПа (10^2 Па) та густині водяного пару 7.5 г/м³) в безпосередній близькості від Землі. Одна крива демонструє вплив кисню (крива O₂ – сухе повітря), інша – вплив парів води.

Результати показали, що піки затухання внаслідок резонансної взаємодії радіохвилі з молекулою кисню утворилися в смузі частот 50–70 ГГц з максимумом на частоті 60 ГГц та на частоті 118 ГГц. Піки затухання внаслідок взаємодії електричних моментів води та радіохвилі утворилися на частоті 22,2 ГГц та на частоті 183 ГГц. На інших частотах спостерігалися менші значення затухання, тому діапазони між піками і назвали радіовікнами. Іншими словами, вибираючи частоти, що знаходяться у радіовікні, можна суттєво зменшити вплив параметрів атмосфери на радіолінію.

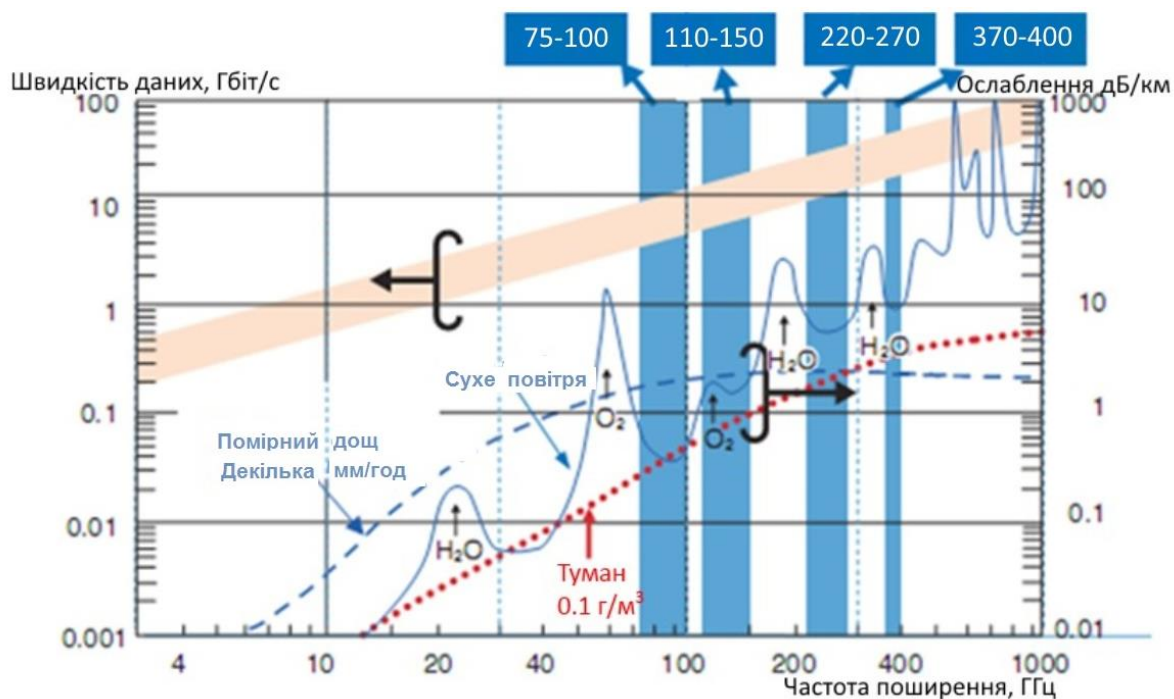


Рисунок 1-а – Залежність значення затухання від частоти з урахуванням впливу дощу, розрахована ITU в 1996 році (Рекомендація ITU-R P.676)

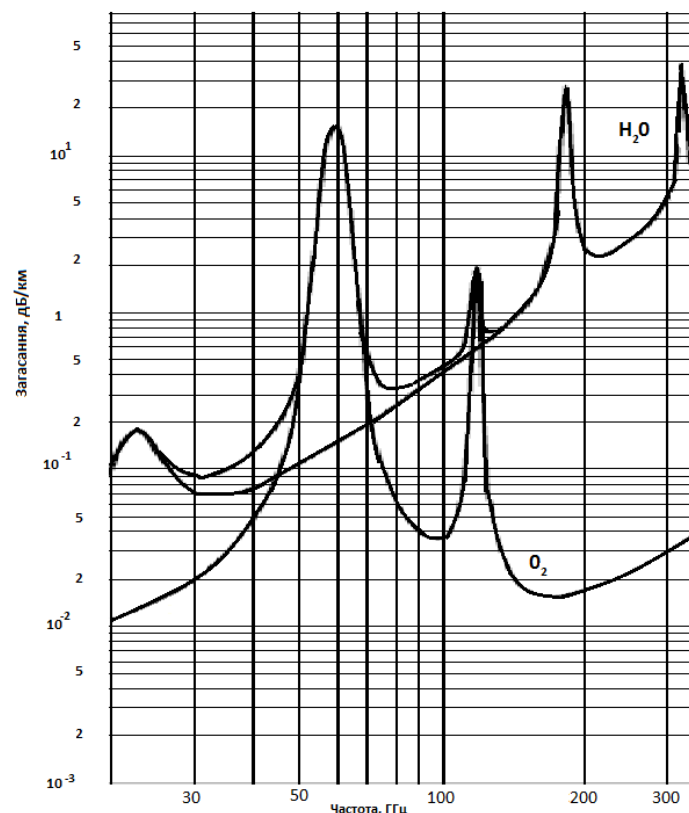


Рисунок 1-б – Залежність величини затухання від частоти без врахування впливу дощу, розрахована ІТУ в 1996 році (Рекомендація ІТУ-R P.676)

Точні розрахунки затухання в молекулах кисню та води були отримані з тих же досліджень 1996 року (пізніше результати увійшли до Рекомендації ІТУ-R P.676). При цьому зазначимо, що для відстаней до 5 км, які характерні для радіорелейних ліній в терагерцовому діапазоні, працює модель, для якої затухання в газах γ_g (дБ/км) отримується як сума затухань в сухому повітрі γ_0 та затухання в парах води γ_w .

ЗАТУХАННЯ ТЕРАГЕРЦОВИХ ХВИЛЬ ВНАСЛІДОК ПОСЛАБЛЕННЯ РАДІОСИГНАЛУ ГІДРОМЕТЕОРАМИ

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

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

$$\gamma_d = aR^b.$$

Коефіцієнти a та b залежать від розподілу розмірів крапель води. На рис. 2 зображено частотні характеристики затухання для дощу з різними інтенсивностями дощу з різними законами розподілу крапель води. По осі x відкладена частота, по осі y – коефіцієнт затухання. Параметром залежності виступає інтенсивність дощу. Представлені моделі більш докладно розглянуто в Рекомендації ІТУ-R P.838 [11].

Проаналізувавши залежності на рис. 2 можна зробити логічний висновок, що при збільшенні частоти терагерцових хвиль, затухання в дощі також монотонно збільшується, досягаючи десятків децибел на кілометр.

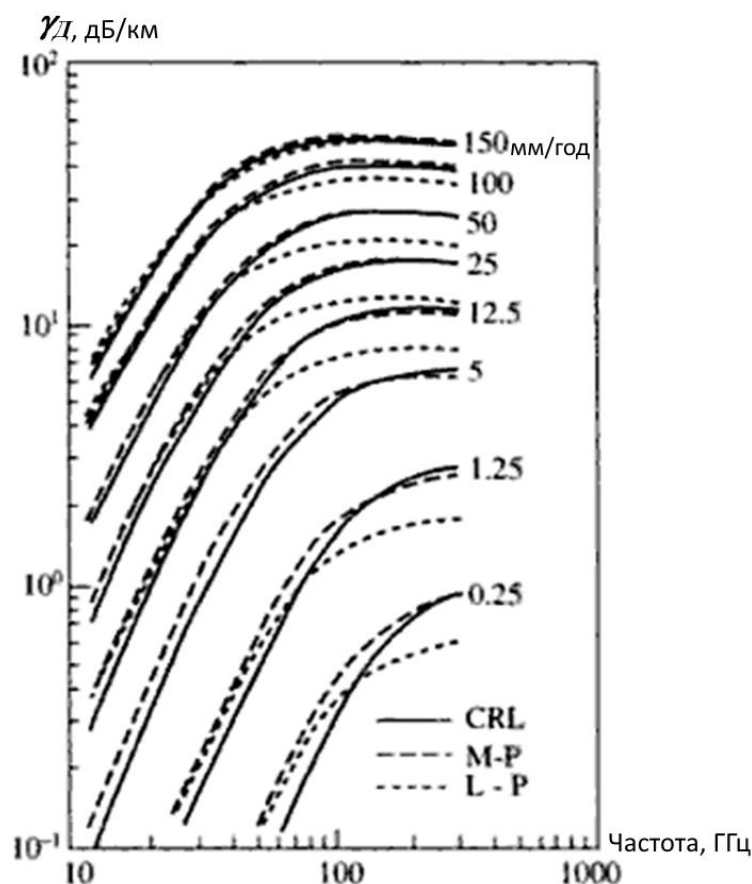


Рисунок 2 – Частотні характеристики затування в залежності від закону розподілу крапель води в дощі: CRL – CRL модель, заснована на спостереженні затування терагерцових хвиль в атмосфері, М-Р – модель Маршала-Палмера, L-Р – модель Ло-Парсона

В роботі [19] проведені дослідження частотної залежності коефіцієнта ослаблення радіохвиль субтерагерцового та терагерцового діапазонів у дощах при врахуванні дрібноканалної фракції як функції розподілу крапель за розмірами. З переходом від надвисокочастотного діапазону на більш високі частоти субтерагерцового діапазону розміри дрібних дощових крапель (діаметром 0,05 мм-0,6 мм) у порівнянні з довжиною хвилі, і в них виникають відомі резонанси Ми, які також надають досить сильний вплив на електромагнітне випромінювання.

Результати обчислень коефіцієнтів ослаблення у дощах різної інтенсивності (2,5 мм/год. – слабкий дощ; 12,5 мм/год. – помірний дощ; 50 мм/год. – зливи) при температурі 20°C, які виконано на основі запропонованої нової функції розподілу [19], що враховує наявність дрібних дощових крапель, та експериментальні дані з джерел [20, 21] представлені в таблиці.

На рис. 3 показана частотна залежність погонного затування хвиль у надвисокочастотному і терагерцевому діапазонах у дощі з інтенсивністю $I_d = 50$ мм/год (точками представлено дані з наданих джерел).

Проведений розрахунок дав задовільний збіг з існуючими експериментальними даними при різних інтенсивностях дощу на частотах до 300 ГГц.

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

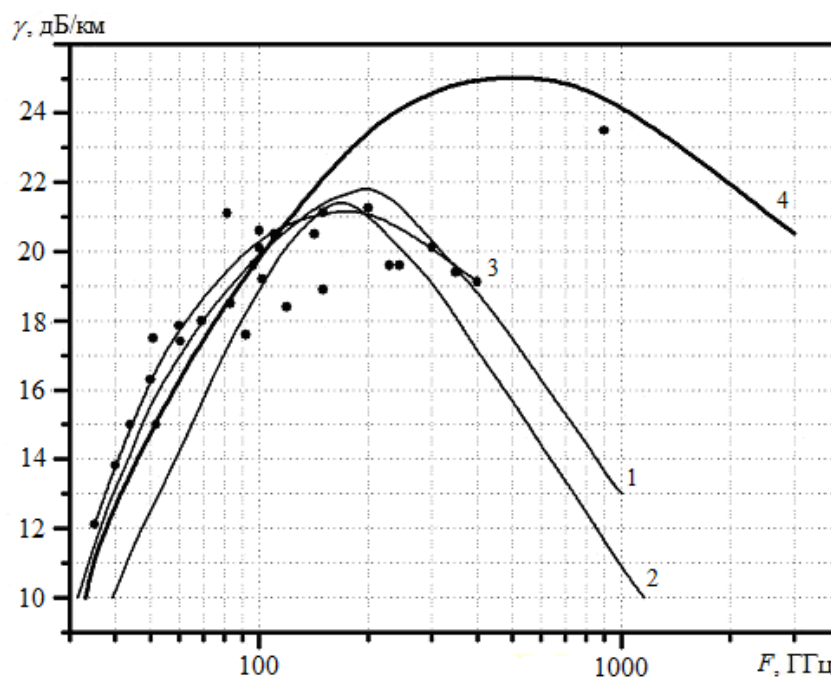


Рисунок 3 – Частотна залежність погонного затухання хвиль у надвисокочастотному і терагерцевому діапазонах у дощі з інтенсивністю $I_d = 50$ мм/год

У випадку з туманом, для якого характерними є краплі води діаметром 0,1 мм і менше, що сконцентровані в обмеженому просторі і розподілені по закону Райлеха, затухання терагерцевих хвиль до частот 300 ГГц незначні.

Значення коефіцієнтів послаблення для різних параметрів атмосфери наведено у таблиці.

Таблиця – Коефіцієнт послаблення γ (дБ/км) для різних параметрів атмосфери

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

ВИСНОВОК

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

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

Показано, що робота радіорелейних ліній в терагерцовому діапазоні дозволяє практично не враховувати рефракцію та інтерференцію електромагнітних хвиль, відбитих від перешкод в зоні поширення сигналу, що виникає особливо в умовах щільної міської забудови. Це пов'язано по перше з тим, що терагерцові хвилі мають низьку здатність до «огинання» перешкод, по друге, на поточний момент частоти від 30 до 300 Гц застосовуються на відносно невеликих відстанях (до 5 км), що дозволяє при плануванні прольотів уникнути потрапляння перешкод в зону прямої видимості антен та першу зону Френеля.

Виходячи із результатів проведених досліджень, можна вважати найбільш придатними і перспективними при проектуванні високошвидкісних надширокосмугових безпроводових телекомунікаційних систем частотні діапазони 110–150 ГГц і 220–270 ГГц, де можна використовувати великі смуги частот шириною 40–50 ГГц для суттєвого збільшення інформаційної ємності, підвищення скритності та захисту від виявлення і несанкціонованого доступу інформації, що передається.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ільченко М.Ю., Кравчук С.О., Наритник Т.М. Безпроводові системи зв'язку субтерагерцового та терагерцового діапазонів // Цифрові технології. – 2014. – Вип. 16. – С.40–59.
2. M.Ye. Ilchenko, T.N. Narytnik, A.I. Fisun, & O.I. Belous Terahertz range telecommunication systems // Telecommunications and Radio Engineering, 70(16):1477–1487 (2011).
3. В.М. Исаев, И.Н. Кабанов, В.В. Комаров, В.П. Мещанов. Современные радиоэлектронные системы // Доклады ТУСУРа, № 4 (34), декабрь 2014.
4. Кравчук С.О. Наритник Т.Н. Телекомунікаційні системи терагерцового діапазону. Монографія. – Житомир: ФОП «Євенок О.О.». – 2015. – 394 с.
5. Огляд досягнень в терагерцових комунікаційних системах / І.М. Майборода, І.П. Стороженко, В.П. Бабенко, М.В. Кайдаш // ISSN 2409-7470. Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України. – 2016. – № 1 (27).
6. М.Е. Ильченко, Т.Н. Нарытник, Б.Н. Шелковников, В.И. Христенко. Радиотелекоммуникационные системы терагерцового диапазона // Электроника и связь 3. Тематический выпуск «Электроника и нанотехнологии», 2011.
7. 300 GHz transmission system / C. Jastrow, K. Munter, R. Piesiewicz, T. Kurner, M. Kochand, T. Kline-Ostmann // Electronics Letters. – 2008. – vol. 44, No. 3. – p.75–77.
8. Peter H. Siegel. Terahertz technology // IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques.-2002.-vol.50, No.3-p.910-928.
9. M.Ye. Ilchenko, T.N. Narytnik, S.V. Denbnovetskii, O.V. MayMay, O.V. Lutchak, A.I. Fisun, O.I. Belous. Modelling of functional units of the terahertz band transmitting and receiving radio paths // Telecommunication and Radio engineering, 75 (x): 1–13(2016).
10. <http://watson-telecom.ru/radiodostup/ppc/alcoma-al80ge.html>
11. Радиокommunikации догоняют по быстродействию оптоволокно. – Компьютерное обозрение.- 2017. http://ko.com.ua/radiokommunikacii_dogonyayut_po_bystrodejstviyu_optovolokno_118895?BPCTRY=1.
12. Recommendation ITU-R P.838-3. Specific attenuation model for rain for use in prediction methods / Intern. Telecommunication Union. – Geneva, 2005.
13. Данные о распространении радиоволн, требующиеся для разработки систем связи Земля-Космос, работающих в диапазоне 20 ТГц–375 ТГц // Рекомендация ITU-R P.1621-1.
14. Характеристики и приложения фиксированной беспроводной связи системы, работающей в частотном диапазоне между 57 ГГц и 134 ГГц. Версия Отчета ITU-RF.2107-01(ITU-R F.2107-1 «Characteristics and applications of fixed wireless systems operating in frequency ranges between 57 GHz and 134 GHz», 2011).
15. ITU-R P.676-5 «Attenuation by atmospheric gases», 2001.
16. ITU-R P.837-4 «Characteristics of precipitation for propagation modeling», 2003.
17. Sekine M. Rain attenuation of centimeter, millimeter and submillimeter waves / M. Sekine, G. Lind // 12th European Microwave Conf.: proc. – Helsinki, 1982. – P. 584–589.
18. Сухонин Е. В. К проблеме распространения миллиметровых волн в осадках / Е. В. Сухонин // Успехи радиоэлектроники. – 2002. – № 9. – С. 72–79.
19. Ugai S. Fine structure of rainfall / S. Ugai, K. Kato // Annales des Telecommunications. – 1977. – 32, N 11–12. – P. 422–429.

20. Малышенко Ю.И. Частотный ход коэффициента ослабления радиоволн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов в дождях при учёте мелкокапельной фракции в функции распределения дождевых капель по размерам / Ю. И. Малышенко, А. Н. Роечко // ИРЭ НАН Украины. – ISSN 1028–821X. – Радиофизика и электроника. – 2012. – Т. 3(17), № 1. – С. 36–40.

21. Бабкин Ю.С. Измерение ослабления в дождях / Ю. С. Бабкин, А. В. Соколов, Е. В. Сухонин // Радио-техника и электроника. – 1970. – 15, № 12. – С. 2451–2453. 201. Weibull raindrop-size distribution and its application from 30 GHz to 1000 GHz / M. Sekine, S. Ishii, S. I. Hwang, S. Sayama // Intern. J. Infrared and Millimeter Waves. – 2007. – 28, N 5. – P. 383–392.

REFERENCES

1. Il'chenko M.Yu., Kravchuk S.O., Narytnyk T.M. Bezprovodovi systemy zv'yazku subte-rahertsovoho ta terahertsovoho diapazoniv // Tsyfrovi tekhnolohiyi. – 2014. – Vyp. 16. – S. 40–59.
2. M.Ye. Ilchenko, T.N. Narytnyk, A.I. Fisun, & O.I. Belous. Terahertz range telecommunication systems // Telecommunications and Radio Engineering, 70(16):1477–1487 (2011).
3. V.M. Ysaev, Y.N. Kabanov, V.V. Komarov, V.P. Meshchanov. Sovremennyye radyoelektronnyye systemy // Doklady TUSURa, # 4 (34), dekabr' 2014
4. Kravchuk S.O. Narytnyk T.N.vTelekomunikatsiyini systemy terahertsovoho diapazonu. Monohrafiya. – Zhytomyr: FOP «Yevenok O.O.» – 2015. – 394 s.
5. Ohlyad dosyahnent' v terahertsovykh komunikatsiynykh systemakh / I. M. Mayboroda, I. P. Storozhenko, V. P. Babenko, M. V. Kaydash // ISSN 2409-7470. Zbirnyk naukovykh prats' Natsional'noyi akademiyi Natsional'noyi hvardiyi Ukrainy. – 2016. – # 1 (27)
6. M.E. Yl'chenko, T.N. Narytnyk, B.N. Shelkovnykov, V.Y. Khrystenko. Radyotelekomunikatsionnyye systemy terahertsovoho dyapazona. Elektronika y svyaz' 3. Tematycheskyy vypusk «Elektronika y nanotekhnolohyy», 2011.
7. 300 GHz transmission system / C. Jastrow, K. Munter, R. Piesiewicz, T. Kurner, M. Kochand, T. Kline-Ostmann // Electronics Letters. – 2008. – vol. 44, No. 3. – p.75–77.
8. Peter H. Siegel. Terahertz technology // IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques. – 2002. – vol. 50, No. 3. – p. 910–928.
9. M.Ye. Ilchenko, T.N. Narytnyk, S.V. Denbnovetskii, O.V. MayMay, O.V. Lutchak, A.I. Fisun, O.I. Belous. Modelling of functional units of the terahertz band transmitting and receiving radio paths. Telecommunication and Radio engineering, 75 (x): 1–13(2016).
10. <http://watson-telecom.ru/radiodostup/ppc/alcoma-al80ge.html>
11. Radyokommunikatsyy dohonyayut po bystrodeystviyu optovolokno. – Komp'yuternoe obozrenye. 2017. http://ko.com.ua/radiokommunikacii_dogonyayut_po_bystrodejstviyu_optovolokno_118895?BPCTRY=1.
12. Recommendation ITU-R P.838-3. Specific attenuation model for rain for use in prediction methods / Intern. Telecommunication Union. – Geneva, 2005.
13. Dannye o rasprostranenny radyovoln, trebuyushchyesya dlya razrabotky system svyazy Zemlya-Kosmos, rabotayushchykh v dyapazone 20 THts–375 THts. Rekomendatsiya ITU-R P.1621-1.
14. Kharakterystyky y prylozhenyya fyksyrovannoy besprovodnoy svyazy systemy, rabotayushchey v chastotnom dyapazone mezhdz 57 HHts y 134 HHts. Versyya otcheta ITU-R F.2107-01 (ITU-R F.2107-1 «Characteristics and applications of fixed wireless systems operating in frequency ranges between 57 GHz and 134 GHz», 2011).
15. ITU-R P.676-5 «Attenuation by atmospheric gases», 2001.
16. ITU-R P.837-4 «Characteristics of precipitation for propagation modeling», 2003.
17. Sekine M. Rain attenuation of centimeter, millimeter and submillimeter waves / M. Sekine, G. Lind // 12th European Microwave Conf.: proc. – Helsinki, 1982. – P. 584–589.
18. Sukhonyn E. V. K probleme rasprostranennyya myllymetrovykh voln v osadkakh / E. V. Sukhonyn // Uspekhy radyoelektroniky. – 2002. – # 9. – С. 72–79.
19. Ugai S. Fine structure of rainfall / S. Ugai, K. Kato // Annales des Telecommunications. – 1977. – 32, N 11–12. – P. 422–429.
20. Malysenko Yu.Y. Chastotnyy khod koeffytsyenta oslablenyya radyovoln myllymetrovoho y submyllymetrovoho dyapazonov v dozhdnykh pry uchete melkokapel'noy fraktsyy v funktsyyi raspredelenyya dozhdnykh kapel' po razmeram / Yu. Y. Malysenko, A. N. Roenko // YRE NAN Ukrainy. – ISSN 1028–821X. – Radyofyzyka y elektronika. – 2012. – Т. 3(17), # 1. – С. 36–40.
21. Babkyn Yu. S. Yzmerenye oslablenyya v dozhdnykh / Yu. S. Babkyn, A. V. Sokolov, E. V. Sukhonyn // Radyotekhnika y eektronika. – 1970. – 15, # 12. – С. 2451–2453. 201. Weibull raindrop-size distribution and its application from 30 GHz to 1000 GHz / M. Sekine, S. Ishii, S. I. Hwang, S. Sayama // Intern. J. Infrared and Millimeter Waves. – 2007. – 28, N 5. – P. 383–392.