

УДК 621.396.43

ОБҐРУНТУВАННЯ ЧАСТОТНИХ ДІАПАЗОНІВ ДЛЯ ВИСОКОШВИДКІСНИХ БЕЗПРОВОДОВИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДІАПАЗОНУ



[Г.Л. Авдеєнко](#), [С.Г. Бунін](#), [Т.М. Наритник](#), [А.В. Єрмаков](#)

Національний технічний університет України
«КПІ імені Ігоря Сікорського»

[В.В. Волков](#)

Одеський обласний радіотелевізійний передавальний центр

Abstract – The necessity of terahertz frequency range use for the future ultrahigh-speed radio relay lines deployment is shown. Based on the conducted literature analysis, it is shown that in 30-300 GHz frequency range the most important type of signal fading that should be taken into account for radio link design are fading due to signal attenuation by hydrometeors (rain drops) and fading due to the absorption of radio signals in atmospheric gases. The features of the terahertz wave attenuation by hydrometeors, in particular in rains, of variable intensity are considered in detail. Based on the results of the conducted researches, we get that frequency ranges 110-150 GHz and 220-310 GHz are most suitable and promising frequency bands for design of ultra high-speed and ultra-wideband wireless telecommunication systems. This is because radio link designers can use large bandwidths of 40-90 GHz in transceivers and receivers in order to increase significantly the information capacity, the secrecy and protection against detecting and unauthorized access to transmitted information. The results of range calculations of the radio relay line of terahertz frequency band for 2 GHz and 40 GHz receiver's band of are shown. This calculations show the possibility of creating radio relay lines with point-to-point range of at least 1 km.

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 гідрометеорах. Виділено ділянки частот терагерцового діапазону, які найбільш за все придатні для використання в радіорелейних лініях зв'язку.

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 терагерцовом диапазоне наибольшее влияние на энергетический потенциал радиорелейных линии оказывают затухания в гидрометеорах. Выделены участки частот терагерцового диапазона, наиболее всего пригодные для использования в радиорелейных линиях связи.

Вступ

В даний час в мережах зв'язку існує нагальна потреба в широкосмутовому безпроводовому обладнанні, здатному підтримувати високі швидкості передачі даних та нестисненого HD-відео. Тому у розробників телекомунікаційної апаратури є ве-

ликий інтерес до високошвидкісних безпроводових технологій терагерцового діапазону частот, оскільки вони можуть забезпечити достатню пропускну здатність каналів передачі.

Частотний діапазон в смузі від 57 до 66 ГГц, так званий діапазон 60 ГГц, закріплений в стандартах IEEE 802.15.3c і IEEE 802.15.ad (WiGig), в основному використовується для внутрішнього застосування при розгортанні офісних мереж, так як атмосферне резонансне загасання в кисні дуже велике (на рівні 16 дБ/км). Для великих відстаней при організації фіксованого безпроводового доступу (FWA), для транспортної розподільчої мережі мобільного зв'язку (mobile backhaul) четвертого (4G) та п'ятого покоління (5G), для високопродуктивних обчислювальних машин за кордоном активно впроваджуються безпроводові системи в діапазонах частот 71-76 ГГц, 81-86 ГГц, 92-95 ГГц та в діапазоні 120 ГГц, оскільки атмосферне загасання в цих діапазонах частот значно менше (близько 1 дБ/км), ніж у діапазоні частот 60 ГГц. Ведуться роботи з дослідження частотних діапазонів вище 200 ГГц для безпроводових телекомунікацій з використанням останніх досягнень в комбінації технологій електроніки та фотоніки. Ключовими елементами такої системи є створені на базі розроблених монолітних (інтегральних) мікросхем радіоелектронні приймально-передавальні пристрої, здатні формувати і передавати достатньо потужні для цього частотного діапазону модульовані сигнали зі швидкістю 10 Гбіт/с і приймати сигнали з досить високою чутливістю.

Науково-дослідний Інститут телекомунікацій НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського» разом з Інститутом електроніки та зв'язку Української академії наук також приймають активну участь у дослідженні властивостей терагерцового діапазону, розробці радіоелектронних компонентів та створенні на цій основі телекомунікаційної апаратури різного призначення, зокрема приймально-передавального тракту терагерцового діапазону, що працює в діапазоні 130-132 ГГц [23-24].

I. Актуальність проблематики досліджень

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, 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 електро-магнітних 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 діапа-

зону, який дозволяє передавати цифрові дані зі швидкістю 105 Гбіт/с на один канал в смузі частот від 290 до 315 ГГц. Отримана продуктивність вище на порядок, ніж у мобільних мереж п'ятого покоління (5G) [11].

В даний час в Україні для роботи систем фіксованого безпроводового зв'язку фіксованої служби виділені і використовуються окремі смуги частот в діапазоні від 60 МГц до 95 ГГц з урахуванням умов їх використання. Постановою Кабінету Міністрів України №838 від 05.09.2012р. до Плану використання радіочастотного ресурсу України (розділ II - перспективні технології) внесена радіотехнологія радіорелейного зв'язку в діапазонах частот 94,1-100 ГГц; 102-105 ГГц; 106,5-109,5 ГГц; 111,8-113 ГГц; 130-134 ГГц; 141-148,5 ГГц, тобто і в терагерцовому діапазоні.

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 надширококутних телекомунікаційних систем.

II. Особливості поширення терагерцових хвиль в атмосфері

На поточний момент в світовій практиці не існує універсального методу, що забезпечуватиме надійне прогнозування якісних показників цифрових радіорелейних ліній (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 завмирань 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 завмирань, що не є критичними та суттєвими в більш низьких частотних діапазонах, навпаки будуть мати значний вплив на роботу ЦРРЛ.

Проведений авторами аналіз робіт [11-19] показав, що в діапазоні частот 30-300 ГГц з відомих типів завмирань (рефракційні завмирання внаслідок екрануючого впливу перешкод, рефракційні завмирання інтерференційного типу, інтерференційні завмирання внаслідок відбиття від неоднорідностей шарів тропосфери, завмирання внаслідок екрануючого впливу неоднорідностей шарів атмосфери, завмирання внаслідок впливу діаграм спрямованості антен (для терагерцового діапазону – це неточність юстировки антен, а також вітрової навантаженості на антенні опори), завмирання внаслідок послаблення радіосигналу гідрометеорами (дощ, сухий та мокрий сніг, град, туман, хмари), завмирання внаслідок поглинання радіосигналу в газах, завмирання радіосигналу в піщаних та пилових бурях) найбільш вагомими, які слід враховувати при проектуванні, є наступні:

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

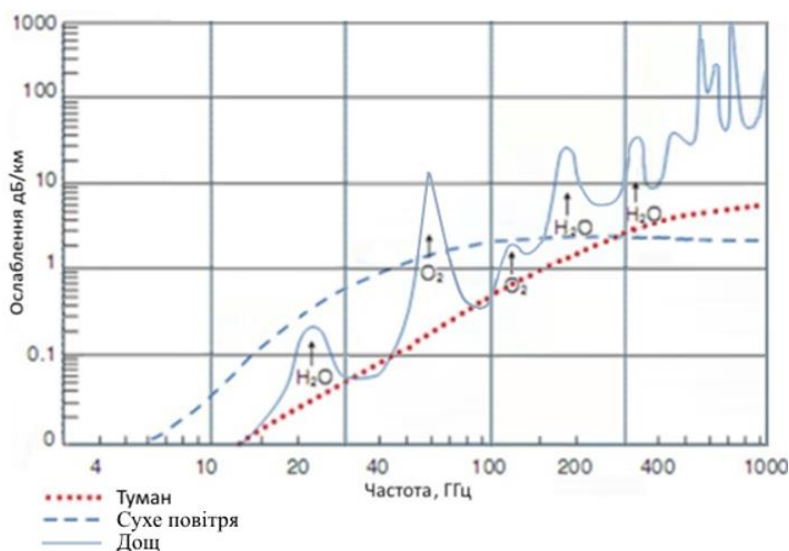
Робота радіорелейних ліній на таких високих частотах (особливо в терагерцовому діапазоні) через високу спрямованість антен кореспондуючих станцій дозволяє практично не враховувати інтерференцію електромагнітних хвиль, відбитих від перешкод в зоні поширення сигналу, яка виникає особливо в умовах щільної 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.

III. Особливості затухання терагерцових хвиль внаслідок поглинання радіосигналу в газах

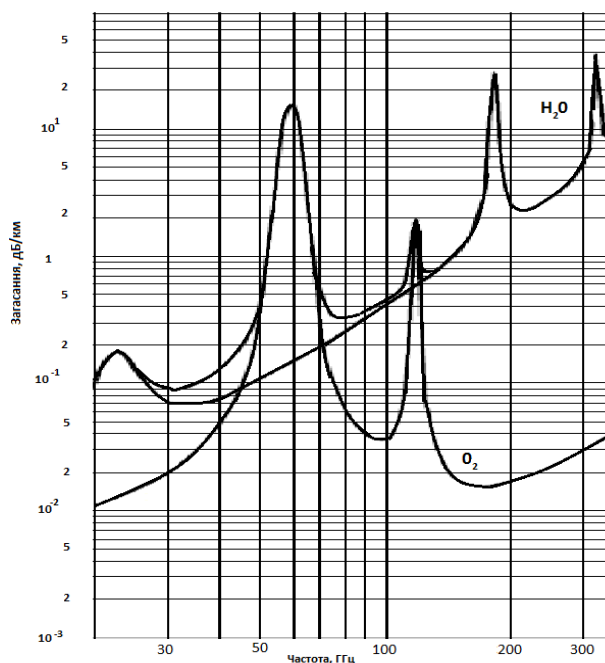
Затухання в атмосфері терагерцових хвиль до частот 300 ГГц виникає здебільшого внаслідок присутності в повітрі парів кисню та води. Інші гази вносять незначний внесок в величину затухання терагерцових хвиль. На рис. 1 зображено результати дослідження залежності величини затухання радіохвиль від частоти, проведене 1996 року Міжнародним союзом електрозв'язку (далі ІТУ) при нормальних параметрах атмосфери (температура 15 С°, тиск 1013 hPa (10² Pa) та густині водяного пару 7.5 г/м³) в безпосередній близькості від Землі. Одна крива досліджувала 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 величини затухання, тому діапазони між піками і назвали радіовікнами. Іншими словами, вибираючи частоти, що знаходяться у радіовікні, можна суттєво зменшити вплив параметрів атмосфери на радіолінію.

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 .



а)



б)

Рис. 1. Залежність величини затухання від частоти з врахуванням (а) та без врахування (б) впливу дощу, розрахована ІТУ в 1996 році (Rec.676)

IV. Особливості затухання терагерцових хвиль внаслідок послаблення радіосигналу гідрометеорами

Погонне затухання у дощі γ_d (дБ/км) визначається інтенсивністю дощу R (мм/час). На рис. 2 зображено частотні характеристики затухання для дощу з різними інтенсивностями та законами розподілу крапель води (різними моделями).

Представлені моделі більш докладно розглянуто в рекомендації Р.838 ІТУ-Р [11]. Проаналізувавши залежності на рис. 2, можна зробити логічний висновок, що при збільшенні частоти терагерцових хвиль, згасання в дощі також монотонно збільшується, досягаючи десятків децибел на кілометр.

В роботі [19] проведені дослідження частотної залежності коефіцієнта ослаблення радіохвиль суб- 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 0,05-0,6 мм) порівняні з довжиною хвилі, і в них виникають відомі резонанси Ми, які також надають досить сильний вплив на електромагнітне випромінювання.

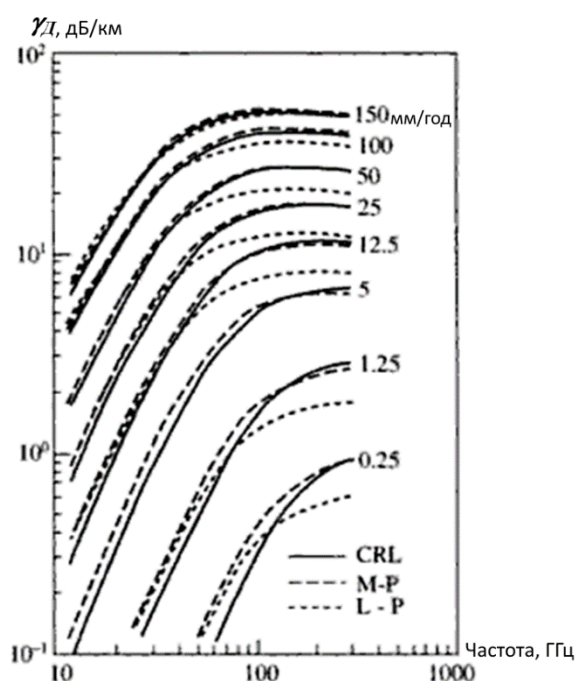


Рис. 2. Частотні характеристики згасання в залежності від закону розподілу крапель води в дощі: CRL – CRL модель, яка заснована на спостереженні згасання терагерцових хвиль в атмосфері, M-P – модель Маршала-Палмера, L-P – модель Ло – Парсона

Результати обчислень коефіцієнтів ослаблення у дощах різної інтенсивності (2,5 мм/год. – слабкий дощ; 12,5 мм/год. – помірний дощ; 50 мм/год. – зливи) при температурі 20°C, які зроблені на основі запропонованої нової функції розподілу [19], що враховує наявність дрібних дощових крапель, і експериментальні дані з джерел [20, 21] представлені в табл. 1.

На рис. 3 показана частотна залежність погонного згасання хвиль у надвисоко-частотному і терагерцовому діапазонах у дощі з інтенсивністю $I_d=50$ мм/год (точками представлені експериментальні дані). Проведений розрахунок дав задовільний збіг з

існуючими експериментальними даними при різних інтенсивностях дощу на частотах до 300 ГГц.

Таблиця 1. Результати обчислень коефіцієнтів ослаблення у дощах різної інтенсивності

Вид атмосфери	Частота радіосигналу, ГГц							
	30	60	90	120	140	165	250	300
1. Дощ слабкий (1 ÷ 5 мм/год)	0,9	2,1	3,4	4,7	5,4	7,1	9,8	14,3
2. Дощ сильний (20 ÷ 40 мм/год)	7,0	14,0	15,2	16,3	17,0	20,2	30,5	42,3
3. Мокрий сніг (10 мм/год)	1,7	4,9	7,7	10,7	12,4	15,3	22,8	28,7
4. Хмари потужні купчасті	3,5	8,0	9,5	12,9	15,1	18,9	27,5	33,2
5. Газ (кисень)	-	15,0	0,05	1,8	0,5	0,02	0,02	0,03
6. Газ (водяна пара)	0,07	0,1	0,2	0,5	0,8	2	2,5	5,5

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

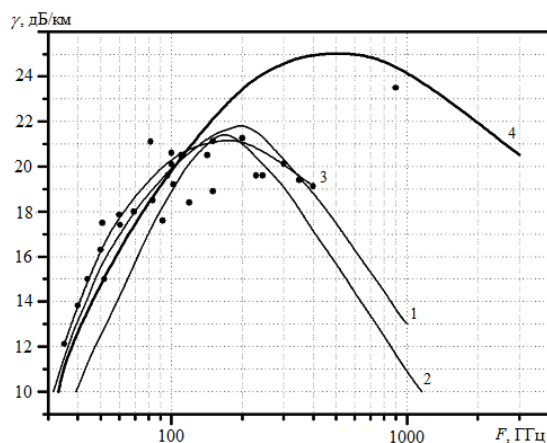


Рис. 3. Частотна залежність погонного затухання хвиль у надвисокочастотному і терагерцевому діапазонах у дощі з інтенсивністю $I_d=50$ мм/год

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

В табл. 2 та табл. 3 представлено результати розрахунків дальності дії безпроводової системи терагерцового діапазону 130 ГГц для випадків наявності дощу (із середньою інтенсивністю 35 мм/год) та відсутності дощу для смути робочих частот приймача 2ГГц та 40 ГГц, вихідної потужності передавача 50 мкВт та 50 мВт, коефіцієнті підсилення антен передавача та приймача, рівному 49 дБ, коефіцієнті шуму приймача 12 дБ, модуляції QPSK та відношенні SNR на вході приймача, рівному 16 дБ. В обох випадках погонне загасання в газах атмосфери відповідно до рис.1 прийнято рівним $\gamma_{\text{атм}} = 0,9$ дБ/км.

Таблиця 2. Результати розрахунків дальності дії безпроводової системи терагерцового діапазону для смути робочих частот приймача 2ГГц

$\Delta f = 2$ ГГц	Дальність прольоту РРЛ, км			
	При вихідній потужності передавача 50мкВт		При вихідній потужності передавача 50 мВт	
Погодні умови	Відстань, км (SNR = 16 дБ)	Сумарне ослаблення, дБ	Відстань, км (SNR = 16 дБ)	Сумарне ослаблення, дБ
Без дощу	1,50	139,599	13,58	169,601
В дощі	0,591	139,602	1,92	169,385

Таблиця 3. Результати розрахунків дальності дії безпроводової системи терагерцового діапазону для смути робочих частот приймача 40 ГГц

$\Delta f = 40$ ГГц	Дальність прольоту РРЛ, км			
	При вихідній потужності передавача 50 мкВт		При вихідній потужності передавача 50 мВт	
Погодні умови	Відстань, км (SNR = 16 дБ)	Сумарне ослаблення, дБ	Відстань, км (SNR = 16 дБ)	Сумарне ослаблення, дБ
Без дощу	0,377	126,587	6,393	156,588
В дощі	0,247	126,585	1,274	156,598

Висновки

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

Показано, що робота радіорелейних ліній в терагерцовому діапазоні дозволяє практично не враховувати рефракцію та інтерференцію електромагнітних хвиль, 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 надширококутових безпроводових телекомунікаційних систем частотні діапазони 110-150 ГГц і 220-310 ГГц, де можна використовувати великі смуги частот шириною 40-90 ГГц для суттєвого збільшення інформаційної ємності, підвищення скритності та захисту від виявлення і несанкціонованого доступу інформації, що передається.

Список літератури:

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. Ilchenko M.Ye., Narytnik T.N., Fisun A.I., Belous O.I. Terahertz range telecommunication systems // Telecommunications and Radio Engineering. – 2011. – 70(16). – P.1477-1487.
3. Бунин С.Г., Долженко Д.О., Висоцький М.В., Плотник К.О. Застосування надширококутових імпульсних радіосигналів у супутникових системах і системах дальнього радіозв'язку // Наукові Вісті. – 2010. – № 6(74). – С. 5 – 10.
4. Кравчук С.О. Наритник Т.Н. Телекомунікаційні системи терагерцового діапазону. – Житомир: ФОП «Євенок О.О.».–2015.– 204.
5. Майборода І.М., Стороженко І.П., Бабенко В.П., Кайдаш М.В. Огляд досягнень в терагерцових комунікаційних системах // Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України. – 2016. – № 1 (27). – С.45-48.
6. Ильченко М.Е., Нарытник Т.Н., Шелковников Б.Н., Христенко В.И. Радиотелекоммуникационные системы терагерцового диапазона // Электроника и связь. – 2011. – №3. – С.205-210.
7. Jastrow C., Munter K., Piesiewicz R., Kurner T., Kochand M., Kline-Ostmann T. 300 GHz transmission system // 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. Ilchenko M.Ye., Narytnik T.N., Denbnovetskii S.V., May O.V., Lutchak O.V., Fisun A.I., Belous O.I. Modelling of functional units of the terahertz band transmitting and receiving radio paths // Telecommunication and Radio engineering. – 2016. – Vol.7, №1 – P.20-22.
10. ALCOMA AL80GE Technology for the Next Generation Networks. [Електронний ресурс]. – ALCOMA, 2017. – Режим доступу: <http://www.alcoma.com/media/document/brochure-en-alcoma-al80ge-150309.pdf>
11. Радиокommunikации догоняют по быстродействию оптоволокно [Електронний ресурс] // Компьютерное обозрение. – 2017 – Режим доступу до ресурсу http://ko.com.ua/radiokommunikacii_dogonyayut_po_bystrodejstviiyu_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. – 9 p.

13. Данные о распространении радиоволн, требующиеся для разработки систем связи Земля- Космос, работающих в диапазоне 20 ТГц-375 ТГц. Рекомендация МСЭ-R P.1621-1. – Женева, 2005. – 15 с.

14 Recommendation ITU-R F.2107-1 «Characteristics and applications of fixed wireless systems operating in frequency ranges between 57 GHz and 134 GHz» / Intern.Telecommunication Union.– Geneva 2011. – 35 p.

15. Recommendation ITU-R P.676-5 «Attenuation by atmospheric gases»/Intern. Telecommunication Union. – Geneva, 2001. – 21 p.

16. Recommendation ITU-R P.837-4 «Characteristics of precipitation for propagation modeling» / Intern. Telecommunication Union. – Geneva, 2003. – 8 p.

17. *Sekine M, Lind G.* Rain attenuation of centimeter, millimeter and submillimeter waves // 12th European Microwave Conf.: proc. – Helsinki, 1982.– P.584–589.

18. *Сухонин Е.В.* К проблеме распространения миллиметровых волн в осадках // Успехи радиоэлектроники – 2002. – № 9. – С. 72–79.

19. *Ugai S., Kato K.* Fine structure of rainfall // Annales des Telecommunications. – 1977. – Vol. 32, №11–12. – P.422–429.

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

21. *Бабкин Ю.С., Соколов А.В., Сухонин Е.В.* Измерение ослабления в дождях // Радиотехника и электроника. – 1970. – № 12. – С.2451–2453.

22. *Вишневский В., Фролов С., Шахнович И.* Радиорелейные линии связи в миллиметровом диапазоне: новые горизонты скорости // Электроника и связь – 2011. – №1. – С. 90-97.

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

24. *Ильченко М.Е., Нарытник Т.Н., Радзиховский В.Н.* Проектирование передающего и приемного радиотрактов радиорелейных систем терагерцового диапазона // Электросвязь. – 2016. – №2. – С. 42-49.