

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»,
пр. Індустріальний, 2, Київ, 03056, Україна
director@mitris.com*

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕРАГЕРЦОВЫХ ВОЛН
В АТМОСФЕРЕ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ 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 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 суттєвий вплив на роботу ЦРРЛ.

Проведений авторами аналіз 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, м, 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 [11–18]:

- 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 складе величину 2,3м на частоті 140 ГГц і не перевищуватиме 1,6м 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.

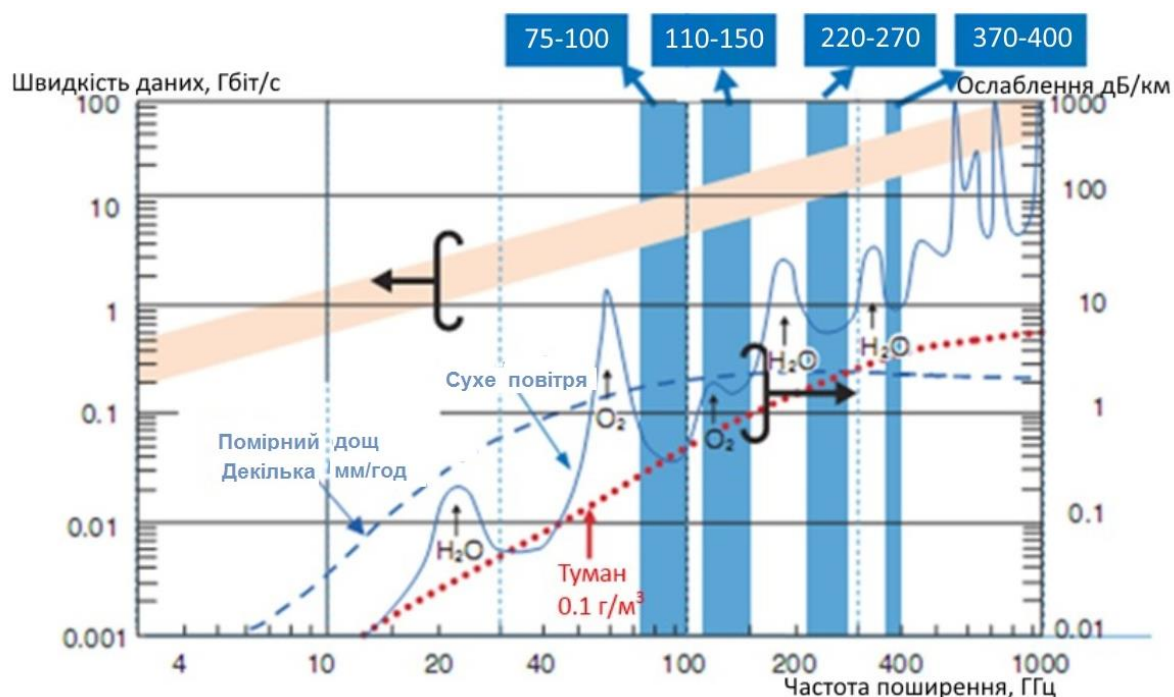


Рисунок 1-а – Залежність значення затухання від частоти з урахуванням впливу дощу, розрахована ІТУ в 1996 році (Рекомендація ІТУ-R P.676)

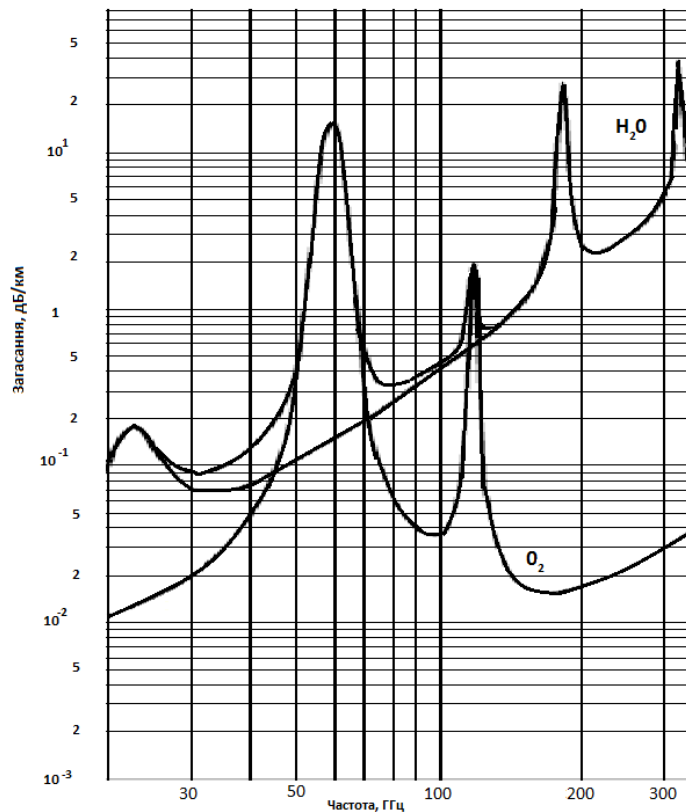


Рисунок 1-б – Залежність величини затухання від частоти без врахування впливу дощу, розрахована ІТУ в 1996 році (Рекомендація ІТУ-R P.676)

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 значимо, 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: дощ, мряка, сніг, мокрый сніг, крупа, град, льодяний дощ. 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.

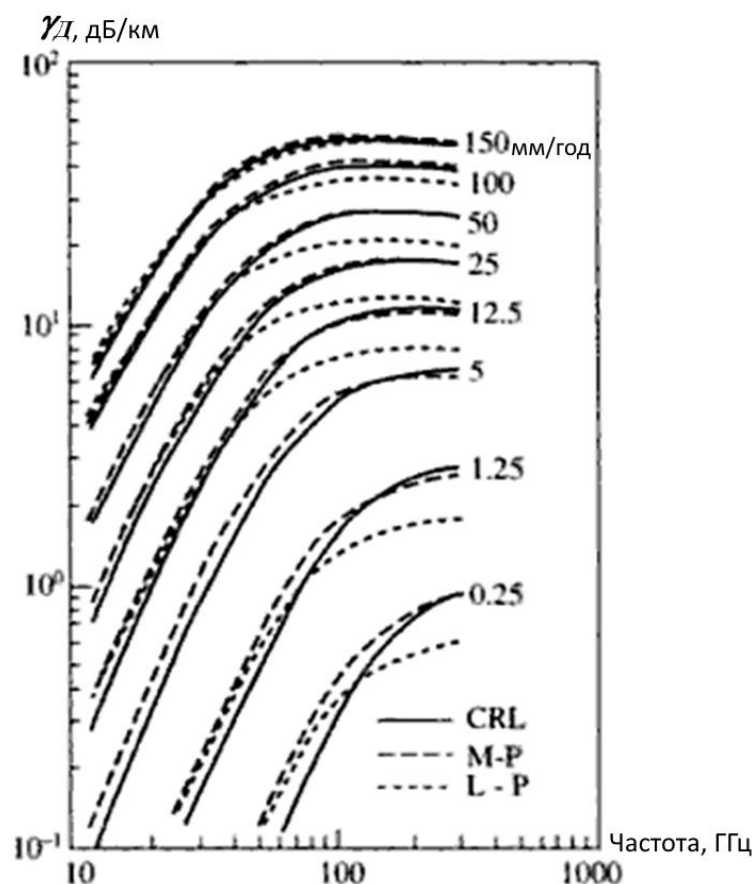


Рисунок 2 – Частотні характеристики згущання в залежності від закону розподілу крапель води в дощі: CRL – CRL модель, заснована на спостереженні згущання терагерцових хвиль в атмосфері, M-P – модель Маршала-Палмера, L-P – модель Ло-Парсона

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 згущання хвиль у надвисокочастотному і терагерцовому 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.

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

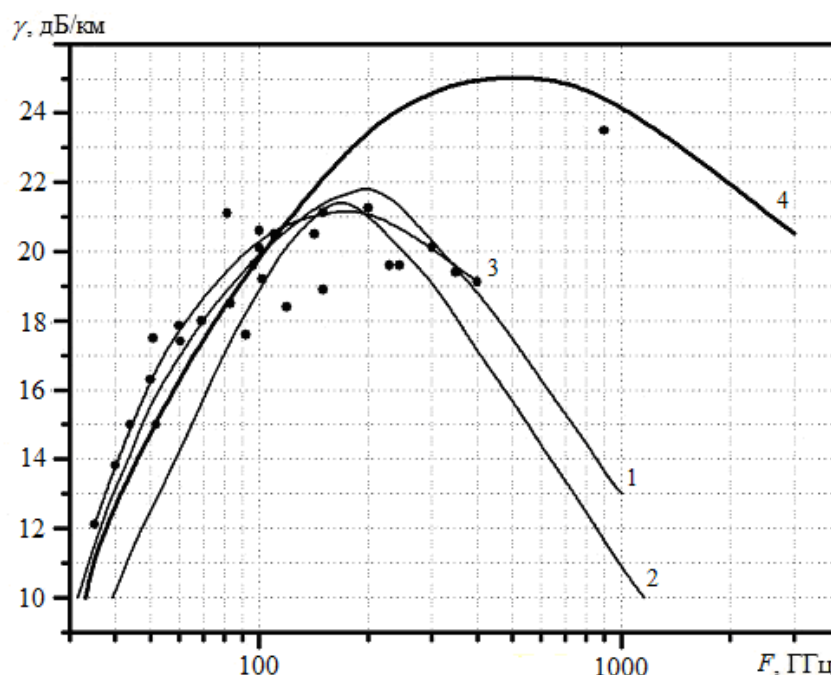


Рисунок 3 – Частотна залежність погонного затухання хвиль у надвисокочастотному і терагерцевому діапазонах у дощі з інтенсивністю $I_d = 50$ мм/год

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 надширокопосмугових 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. М.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. М.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 ГГц–375 ГГц // 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. Рюенко // 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. Bezprovodni systemy zv'yazku subte-rahertsovoho ta terahertsovoho diapazoniv // Tsyfrovі tekhnolohiyi. – 2014. – Vyp. 16. – S. 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. 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 dosyahnen' 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 Ukrayiny. – 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. 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. 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 rasprostranenyi radyovoln, trebuyushchiesya dlya razrabotky system svyazy Zemlya-Kosmos, rabotayushchykh v dyapazone 20 THts–375 THts. Rekomendatsyya 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 rasprostranenyia 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. Malyschenko Yu.Y. Chastotnyy khod koeffytsyenta oslablenyya radyovoln myllymetrovoho y submyllymetrovoho dyapazonov v dozhdnyakh pry uchete melkokapel'noy fraktsyy v funktsyyi raspredelenyya dozhdnykh kapel' po razmeram / Yu. Y. Malyschenko, A. N. Roenko // YRE NAN Ukrayny. – ISSN 1028–821X. – Radyofyzyka y elektronika. – 2012. – Т. 3(17), # 1. – С. 36–40.

21. Babkyn Yu. S. Yzmerenye oslablenyya v dozhdnyakh / 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.