

## **ОСОБЛИВОСТІ ПОШИРЕННЯ ТЕРАГЕРЦОВИХ ХВИЛЬ В АТМОСФЕРІ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДІАПАЗОНУ**

**Авдєєнко Г. Л., Бунін С.Г., Наритник Т.Н.**  
*НДІ телекомунікацій КПІ ім. Ігоря Сікорського*  
*E-mail: director@mitris.com*

### **Terahertz waves propagation in the atmosphere for designing telecommunication systems of terahertz range**

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.

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 реалізованості радіосистеми. Тому надзвичайно важливо провести аналіз інформації [1-9], результати якого 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 Гбіт в секунду), вимагає освоєння смуг радіочастот вище за 30 ГГц, наприклад 71-76 ГГц та 81-86 ГГц, радіорелейне обладнання для яких 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 [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 ТГц), 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 надширокосмугових телекомунікаційних систем [3].

Проведений авторами аналіз показав, що в діапазоні частот 30-300 ГГц з відомих типів завмирань 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 в терагерцовому діапазоні через високу спрямованість антен кореспондуючих станцій та незначний радіус першої зони Френеля дозволяє практично не враховувати інтерференцію електромагнітних хвиль, відбитих від перешкод в зоні поширення сигналу

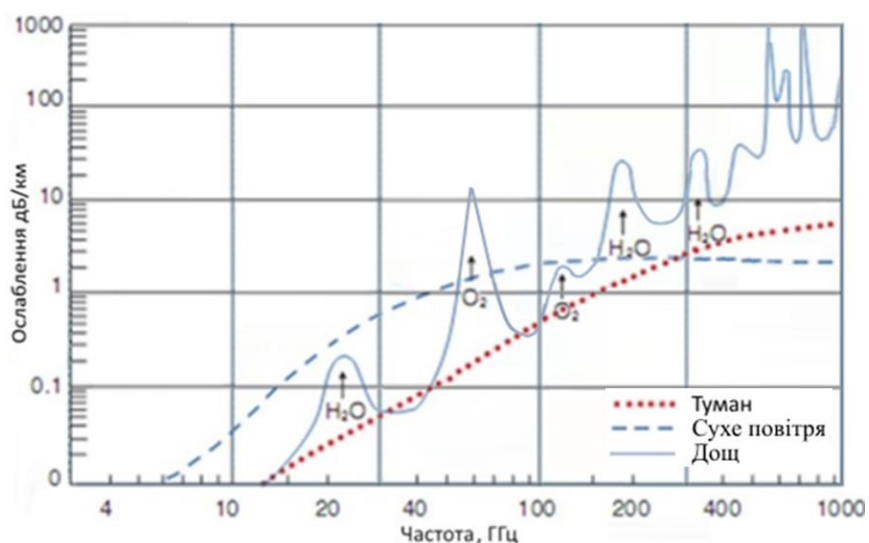


Рис. 1. Залежність величини затушення від частоти з врахуванням впливу дощу, що розрахована ІТУ в 1996 році (Rec.676).

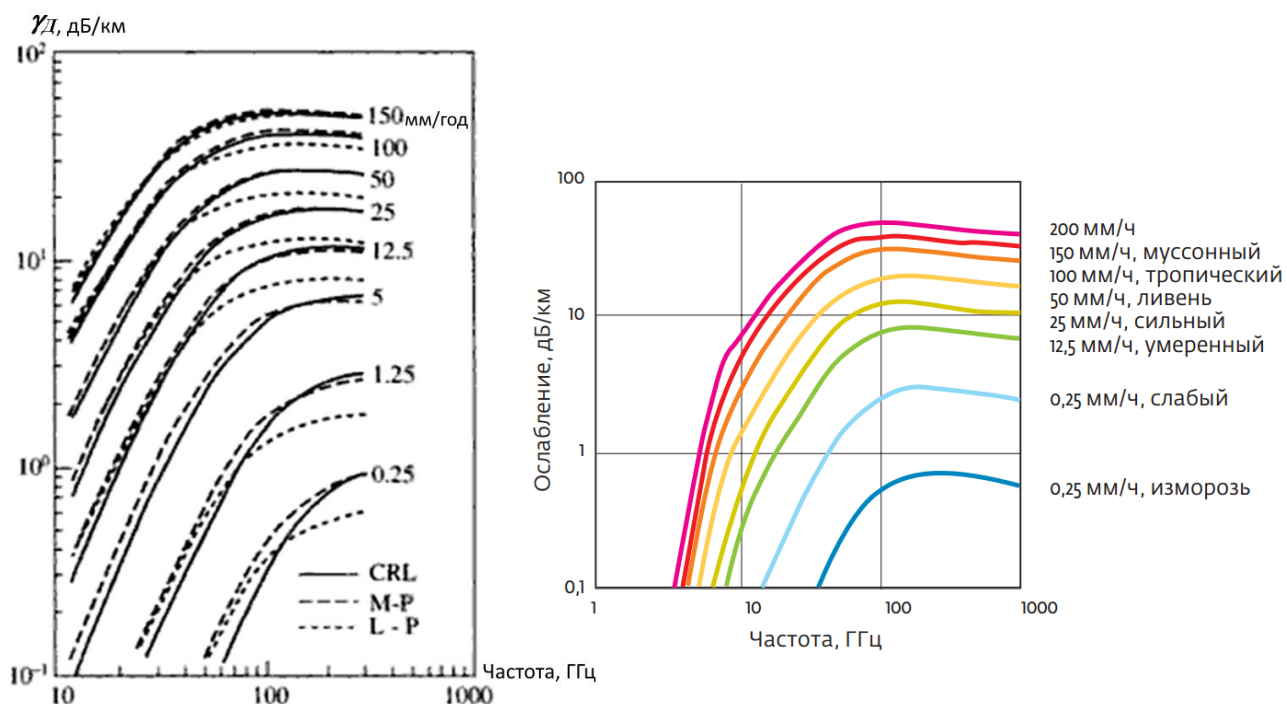


Рис. 2. Частотні характеристики затушення в залежності від закону розподілу крапель води в дощі: CRL – CRL модель, M-P – модель Маршала-Палмера, L-P – модель Ло – Парсона.

Затухання в атмосфері терагерцових хвиль виникає здебільшого в основному через вплив дощу та внаслідок присутності в повітрі парів кисню та води. Інші гази вносять незначний внесок в величину затухання терагерцових хвиль (рис. 1). Обираючи частоти, що знаходяться у радіовікні, можна суттєво зменшити вплив параметрів атмосфери на радіолінію.

На рис. 2 зображено частотні характеристики затухання для дощу з різними інтенсивностями дощу та з різними законами розподілу крапель води. Представлені моделі докладно розглянуто в рекомендації R.838 ITU-R [15,16].

Результати обчислень коефіцієнтів ослаблення у дощах різної інтенсивності, які зроблені на основі функції розподілу [19], що враховує наявність дрібних дощових крапель, і експериментальні дані з джерел [20, 21,22] представлені в таблиці 1.

Таблиця 1. Коефіцієнт послаблення  $\gamma$  (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 сильний ( $20 \div 40$ 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

Виходячи із результатів проведених досліджень, можна вважати найбільш придатними і перспективними при проектуванні високошвидкісних надширококутних безпроводових телекомунікаційних систем частотні діапазони 110-150ГГц і 220-270ГГц, де можна використовувати великі смуги частот шириною 40-50ГГц 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. С.Г.Бунін. Застосування над ширококутних імпульсних радіосигналів у супутникових системах і системах дальнього радіозв'язку.// С.Г.Бунін,Д.О.Долженко ,Висоцький М.В., Плотник К.О./Наукові Вісті № 6(74), 2010, с.5 – 10.
4. Кравчук С.О. Наритник Т.Н. Телекомунікаційні системи і терагерцового діапазону Монографія.-Житомир.- :ФОП «Євенок О.О.».-2015.– 394с.

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. May, O.V. Lutchak, & A.I. Fisun, O.I. Belous. Modelling of functional units of the terahertz band transmitting and receiving radio paths// Telecommucation and Radio engineering – 2016. – Vol.7, №1– p.20-22.
10. PPC Alcoma AL80GE [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://watson-telecom.ru/radiodostup/ppc/alcoma-al80ge.html>
11. Радиокommunikации догоняют по быстродействию оптоволокно [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу [http://ko.com.ua/radiokommunikacii\\_dogonyayut\\_po\\_bystrodejstviyu\\_optovolokno\\_118895?BPCTRY=1](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 МСЭ-R P1621-1.
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.
15. Recomendation ITU-R P.676-5 «Attenuation by atmospheric gases»/Intern. Telecommunication Union. – Geneva, 2001.
16. Recomendation ITU-R P.837-4 «Characteristics of precipitation for propagation modeling» / Intern. Telecommunication Union. – Geneva, 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 миллиметро-вых 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, №11–12.–p.422–429.
20. Малышенко Ю.И. Частотный ход коэффициента ослабления радиоволн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов в дождях при учете 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 // Радиотехника и электроника. – 1970.–15, № 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.