

ВАСИЛЬКІВСЬКИЙ Микола

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0002-6586-2563>e-mail: mvasykivskyi@gmail.com**КОЛОМІЄЦЬ Альона**

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0002-7665-6247>e-mail: alona.kolomiets.vnt@gmail.com**БУДАШ Михайло**

Вінницький національний технічний університет

e-mail: mika@budash.dp.ua

ОЦІНЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ РАДІОТРАКТІВ ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ 5G/6G

Здійснено дослідження параметрів радіотракту для обґрунтування можливості розширення інтегрованого багаторівневого спектра 5G/6G та підвищення ефективності станційного обладнання інфокомунікаційних систем наступного покоління. В роботі наведено результати досліджень пропускної здатності каналу передачі в ТГц-діапазоні, враховуючи потужність передачі та шуми компонентів сучасних телекомунікаційних систем, а також вплив атмосферного згасання. Здійснено представлення ідеї нового спектра, можливості та проблеми використання ТГц-діапазону як для зв'язку, так і для сканування. Також здійснено опис процесу моделювання та вимірювання нових каналів поряд з високочастотними діапазонами, для сценаріїв із великими апертурними решітками, неназемними мережами та скануванням у міліметрових та ТГц-діапазонах. Визначено вдосконалені методи вирішення технічних проблем, виявлених в системах 5G, такі як мобільність та покриття, а також проблеми реалізації телекомунікаційного обладнання. Визначено, що використання спектра міліметрового діапазону буде значно покращено за рахунок вдосконалення технологій, пов'язаних з матеріалами, радіочастотними компонентами та обробкою сигналів. Таким чином, з'являється можливість досягнення надвисокої швидкості передачі даних та високоточної роздільної здатності сканування.

Ключові слова: радіотракт, обладнання інфокомунікаційних систем наступного покоління, система 5G, надвисока швидкість передачі даних, високоточна роздільна здатність сканування.

VASYLKIVSKYI Mykola, KOLOMIETS Alyona, BUDASH Mykhailo
Vinnytsia National Technical University

EVALUATION OF RADIO PATH PARAMETERS OF INFOCOMMUNICATION SYSTEMS 5G/6G

A study of the parameters of the radio path was carried out to substantiate the possibility of expanding the integrated multi-level spectrum of 5G/6G and increasing the efficiency of the station equipment of the next generation information communication systems. The paper presents the results of research into the bandwidth of the transmission channel in the THz range, taking into account the transmission power and noise of the components of modern telecommunication systems, as well as the influence of atmospheric attenuation. The idea of a new spectrum, possibilities and problems of using the THz range for both communication and scanning were presented. It also describes the process of modeling and measuring new channels along high-frequency bands, for scenarios with large aperture arrays, non-terrestrial networks, and scanning in millimeter and THz bands.

Improved methods for solving technical problems identified in 5G systems, such as mobility and coverage, as well as implementation problems of telecommunications equipment, are identified. In particular, to facilitate the optimal design of radio technologies in 6G systems, it is necessary to model transmission channels with higher accuracy. In addition, to improve the transmission characteristics of millimeter waves, improvements are needed in the radio signal beamforming technology, in particular in beamforming during the scanning process. It is determined that the use of the millimeter range spectrum will be significantly improved due to the improvement of technologies related to materials, radio frequency components and signal processing. Thus, it becomes possible to achieve ultra-high data transfer speed and high-precision scanning resolution.

A study of the theoretical foundations of the creation of new devices, the design of electronic, photonic and hybrid receivers, large-sized antenna arrays, gratings on a common crystal or case, and new technologies for the formation of materials for the manufacture of gratings, which ensure the rapid development of communication technologies in the THz range, was carried out. time identified the need for further research in the field of designing powerful high-frequency devices, new materials for antennas and RF transistors, receiver architecture, channel modeling, grating signal processing, and energy efficiency issues. The 6G radio path has been studied, which will contain new capabilities and provide new services using new wireless technologies. It is determined that the 6G system will include many new elements, such as new spectrum, new channels, new materials, new antennas, new computing technologies and new end devices. THz spectrometry at 6G has been found to have many potential applications in health care, industry, food quality control, and the environment, as the vibrational and rotational frequencies of most molecules lie in the THz range. THz spectrometry is of considerable interest due to its ability to provide continuous real-time information through dynamic, non-invasive, passive and non-contact measurements. Of particular note is that THz spectrometry provides results comparable to professional CT or MRI machines, but with a much safer and more portable functional process.

Keywords: radio path, next-generation information communication system equipment, 5G system, ultra-high data transfer rate, high-precision scanning resolution.

Постановка проблеми

Головною умовою успішного розвитку кожного покоління бездротових систем є достатня ширина спектра робочих частот. По-перше, завжди бажано мати ширший робочий спектр для підтримання можливості підвищення швидкості передачі даних і пропускної здатності мережі. По-друге, глобально уніфікований

спектр дозволить досягти більшої економії за рахунок масштабів як інфраструктури, так і абонентського обладнання. При цьому дуже важливо узгоджувати робочий спектр інфокомунікаційного обладнання бездротового зв'язку через ІТУ-R та Всесвітню конференцію радіозв'язку (WRC). По-третє, багатосмугові радіотехнології дозволять нам і надалі використовувати існуючі та нові діапазони частот. По-четверте, глобальний роумінг та стандартизація технологій мають вирішальне значення для повсюдного надання послуг та забезпечення доступності додатків. І по-п'яте, критично важливі єдині правила розподілу та регулювання спектра залишаються унікальною проблемою, з якою ми стикаємося, використовуючи радіочастотний спектр.

Тому в інфраструктурі бездротового зв'язку спектр є важливим компонентом. Наприклад, смуги нижче 1 ГГц використовувалися в першому поколінні мереж (1G), тоді як в 2G і 3G спектр, що використовується для систем міжнародного рухомого електрозв'язку (ІМТ), був розширений до діапазону 3 ГГц. У поколінні мереж 5G С-діапазон є найбільш широко задіяним діапазоном у всьому світі для початкового розгортання мережі, а підтримка діапазону міліметрових хвиль з частотою до 52,6 ГГц заявлена в релізі 3GPP 15/16 (2020). Очікується, що в майбутніх версіях 5G ця підтримка буде розширена приблизно до 100 ГГц. В радіотехнологіях 6G з підвищеними швидкостями передачі даних та новими послугами передбачається розширення радіоспектру до ще більш високих частотних діапазонів, включаючи терагерцовий. Наступне покоління бездротових систем, що займають більш високочастотні смуги спектра, відкриє нові можливості як якісніших послуг зв'язку, так нових послуг, крім зв'язку.

Аналіз останніх джерел

Поширення радіохвиль це основа основ бездротового зв'язку. Перш ніж будувати та експлуатувати реальні системи, необхідно розробити відповідні моделі радіоканалів враховуючи принципи поширення радіохвиль. Ці моделі мають відображати ключові процеси поширення сигналів та дозволять надійно оцінювати та порівнювати різні системи. Кожне покоління бездротової системи використовує різні смуги частот для комерційних цілей. Отже модель каналу, пов'язана саме з цими смугами, є невід'ємною частиною розвитку технологій [1, 2].

При проектуванні системи на основі технології 6G необхідно використовувати правильну модель каналу. Це пов'язано з тим, що при моделюванні каналів 6G неминуче виникають серйозні проблеми, пов'язані з новими елементами системи, такими як новий спектр, сценарії використання та антени. В ТГц-діапазоні застосовується інший коефіцієнт втрат у тракту, ніж у міліметровому діапазоні. З розвитком нових технологій частіше моделі поширення стала модель фазообертача з кутовою залежністю, включена в реконфігуровану інтелектуальну поверхню (RIS) [3]. Крім того, в сценаріях сканування, таких як сканування навколишнього середовища за допомогою відображення променю, замість формули поширення, що використовується в традиційному зв'язку, повинна бути включена формула поширення відбитого сигналу на основі принципів радара. Ці проблеми впливають на моделювання каналів та вимагають не лише модифікації формул та параметрів. Крім того, традиційні методології моделювання можуть не відповідати новим характеристикам каналів.

Загалом розподіл спектра тісно пов'язаний зі сценаріями використання та ключовими показниками ефективності мережі. Отже, багато аспектів використання спектра 5G (такі як eMBB, mMTC та URLLC) отримають продовження в 6G. Крім того, розподіл спектра наголошує на наступності політики та правил у галузі радіозв'язку, оскільки життєвий цикл виділеного спектра триває десятиліття. Це означає, що концепція використання багаторівневої структури частотних діапазонів у 5G, як і раніше, застосовуватиметься для 6G.

Крім того, у міру появи нових вимогливих до смуги пропускання додатків, таких як голографічний зв'язок, поряд з новими послугами та функціями, такими як сканування з високою роздільною здатністю, очікується, що система 6G буде використовувати набагато ширшу смугу пропускання – вище, ніж навіть смуга міліметрового. діапазону, і вищу частоту – аж до ТГц-діапазону чи навіть спектра видимого світла. Тому в конкретних варіантах використання телекомунікаційного обладнання 6G необхідно уважно враховувати вимоги до спектра, які пред'являються новими технологіями, послугами та функціями 6G.

У порівнянні з низькочастотними діапазонами ТГц-діапазон має очевидні переваги для систем та мереж зв'язку з дуже високою швидкістю передачі даних і сканування з надвисокою роздільною здатністю. Однією з найбільш примітних особливостей ТГц-діапазону є його здатність забезпечувати надшироку смугу пропускання та достатній ресурс спектра для майбутнього 6G. В рамках цих вимог необхідні додаткові середні смуги, щоб забезпечити безперервне та рентабельне покращення пропускну здатності та покриття при розгортанні мереж 6G.

Метою роботи є дослідження параметрів радіотракту для обґрунтування можливості розширення інтегрованого багаторівневого спектра 5G/6G та підвищення ефективності станційного обладнання інфокомунікаційних систем наступного покоління.

Виклад основного матеріалу

Прорив у галузі радіотехнологій та їх інноваційне використання при розгортанні макросот у діапазоні міліметрових хвиль стануть ключем до надання нових послуг та додатків 6G, таких як визначення місця розташування та сканування з високою роздільною здатністю, а також для задоволення більш високих вимог до пропускну здатності. Терагерцова ділянка спектра також повинна бути включена до сфери впливу технології 6G, оскільки вона має великий потенціал використання для широкого переліку додатків зв'язку та сканування. На рис. 1 показано потенційні потреби в спектрі та можливості мереж 6G.



Рис. 1. Особливості використання частотного ресурсу для мереж 6G

Новою можливістю 6G є сканування навколишнього середовища (включаючи точне позиціонування, візуалізацію тощо), і діапазон міліметрових хвиль забезпечує достатній спектр досягнення сантиметрової роздільної здатності сканування. Відповідно до теорії електромагнітного зображення, три аспекти роздільної здатності сканування: роздільну здатність по дальності, кутову роздільну здатність та роздільну здатність зміщення (cross-range) можна розрахувати за допомогою наступних формул [4]:

$$\Delta L = \frac{c}{2 \times \Delta F}, \tag{1}$$

де ΔL – значення розширення за дальністю;
 c – значення швидкості світла;
 ΔF – значення смуги спектру.

$$\Delta \varphi = 1.22 \times \frac{\lambda}{\gamma}, \tag{2}$$

де $\Delta \varphi$ – значення кутового розширення;
 λ – значення довжини хвилі;
 γ – значення апертури антени.

Потім роздільну здатність поперечного зміщення (поперечну роздільну здатність) можна розрахувати як

$$2d \times \tan(0,5 \times \delta), \tag{3}$$

де d – відстань сканування.
 δ – значення кутової роздільної здатності.

Використовуючи вказані формули, можна зробити висновок, що для досягнення роздільної здатності в 10-сантиметровому діапазоні потрібна безперервна смуга пропускання не менше 1,5 ГГц (тобто $3 \times 10^8 / 0,5 \times 10 \times 10^{-2}$). Для більш високої роздільної здатності потрібна ще більша смуга пропускання, яку середній діапазон не може забезпечити.

Для досягнення поперечної роздільної здатності 10-сантиметрового рівня, кутова роздільна здатність повинна становити $0,01^\circ$ для відстані сканування 10 м. При використанні міліметрових хвиль з частотою близько 60 ГГц необхідна апертура антени для досягнення такого кутової роздільної здатності, становить 0,6 м. І навпаки, використання середніх частот, таких як 6 ГГц, призводить до збільшення необхідної апертури антени до 6 м. На практиці це складно реалізувати.

Враховуючи підвищене згасання сигналів в ТГц-діапазоні у порівнянні із міліметровим діапазоном хвиль, все ж таки є можливості знайти відповідні діапазони для ефективного передавання даних. Результати оцінювання теоретичної пропускної здатності каналу передачі в ТГц-діапазоні, враховуючи потужність передачі

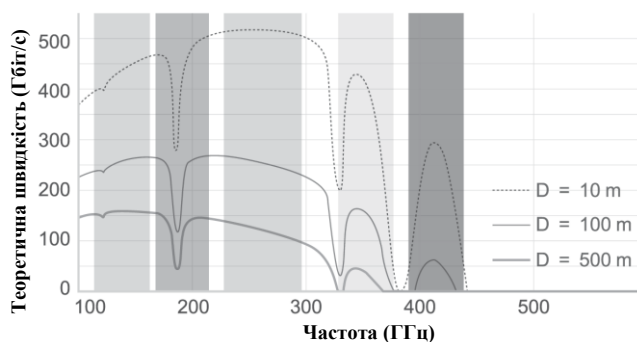


Рис. 2. Оцінка теоретичної пропускної спроможності каналу передачі у ТГц-діапазоні (D – відстань передачі)

та шуми компонентів сучасних технологій, а також вплив атмосферного згасання подано на рис. 2 [5].

З цих результатів можна зробити висновок, що кількість потенційних вікон частотних діапазонів з кращими характеристиками поширення відносно велика (наприклад, 140, 220 та 300 ГГц). Ці частотні діапазони можна використовувати для передачі на середні (наприклад, 200 м) або короткі (менше 10 м) відстані, уникаючи частотних областей з високим атмосферним поглинанням. Крім того, довжини хвиль у ТГц-діапазоні набагато менші, ніж у діапазоні міліметрових хвиль, і в одній платформі може бути розміщено більше антен, що зменшить згасання при поширенні та розширить покриття.

При дослідженні характеристик фізичного середовища використовуючи моделі фізичного каналу, які базуються на багатопробному двоспрямовану поширенні електромагнітних хвиль, можна поділити на три типи: детермінована модель, стохастична модель на основі геометрії (GBSM) та негеометрична стохастична модель [6]. У детермінованій моделі фізичні параметри розповсюдження повністю фіксовані. Отже, у конкретних сценаріях може бути реконструйовано реальні фізичні канали. Детерміновані моделі включають СЕМ, моделі трасування променів та вимірювання. GBSM – це бездротовий канал, що моделюється за допомогою розподілу кластерів, які генеруються випадковим чином за допомогою заданої функції щільності ймовірності. Завдяки своєму стохастичному характеру GBSM краще описує поширення у групі фізичних середовищ, ніж детерміновані моделі, і цілком підходить для статистичної оцінки, такої як системне моделювання. Модель 3GPP – це типовий приклад GBSM. Квазидетермінована модель будується з використанням комбінації детермінованих моделей та стохастичних моделей. Домінуючі шляхи розраховуються за допомогою детермінованої моделі, а шляхи розсіювання генеруються за допомогою стохастичних моделей.

На основі вимірювань та трасування сигналів у смугах частот від 6 ГГц до 100 ГГц в області 5G сформовано моделі у смугах вищих частот до 100 ГГц, як показано в табл. 1. Основними методиками моделювання каналів у цих стандартах є стохастичне та квазидетерміноване моделювання. Ці методики відображають суть статистичних моделей завмирань, а також деякі з фактично вимірні характеристики поширення для певних конструкцій антен, таких як крос-поляризаційні.

Статистичні моделі можуть описувати канал більш просто та ефективно та доречні для великомасштабного моделювання через їх низьку обчислювальну складність. Визначено, що стохастичні моделі не можуть виразити детерміновані параметри, що стосуються конкретної системи або сценарію, такі як геометрична інформація, що стосується параметрів багатопробного каналу або розташування пристроїв зв'язку та розсіювачів. Проте детерміноване відображення каналу визначало передумови проектування каналів і систем протягом останніх десятиліть. Потреба у такому моделюванні переважно виникає під час планування мережі, коли геометрична схема розміщення стільникових вузлів зумовлює зміни базових станцій.

У новій мережі 6G певні методи (такі як RIS, локалізація та візуалізація) тісно пов'язані з конкретними середовищами, які можуть бути відтворені за допомогою стохастичних моделей. Тому ми очікуємо на появу детермінованих методик моделювання каналів, які можуть призвести до більш точної оцінки.

Таблиця 1

Методики стандартизації каналів 5G

Модель каналу	Організація	Методика
3GPP 38.901	3GPP	Стохастична модель
METIS	METIS	Стохастична, на основі карти або гібридна модель
MiWEBA	MiWEBA	Квазидетермінована модель каналу
ITU-R M	ITU	Стохастична модель
COST2100	COST	Стохастична модель
IEEE 802.11	IEEE	Квазидетермінована або трасування сигналів
NYU WIRELESS	NYU	Стохастична
QuADriGa	Fraunhofer HHI	Стохастична або квазидетермінована
5G mmWave	NIST	Стохастична
Channel Model Alliance		
mmMAGIC	mmMAGIC	Стохастична або сувора перевірка
IMT-2020	IMT-2020	Стохастична

Наприклад, у зв'язку з розробкою нових антен та технологій інтеграції ми припускаємо, що великі антенні решітки, такі як ELAA, значно вплинуть на моделювання каналів та оцінку продуктивності. Великі антенні ґратки створюють нові проблеми при моделюванні, такі як сферичні хвилі ближнього поля та нестационарні канали [3]. Раніше достатньо було просто моделювати дальнє поле, яке можна було апроксимувати за допомогою повних хвиль. Однак ближнє поле тепер надто велике, щоб його можна було ігнорувати, і тому потрібно враховувати сферичні хвилі. Ці особливості поширення відкривають нові можливості підвищення пропускної здатності каналів. Просторово-часові характеристики каналів з множиною антен є ключовими факторами, що визначають продуктивність просторово-часової обробки. Отже, дослідження каналів з великою антеною ґраткою повинні бути зосереджені на просторово-часових характеристиках каналів з множиною антен. Слід зазначити, що ці характеристики сильно залежать від

навколишнього середовища, і це особливо вірно для розподілу розсіювання, які важко описати за допомогою стохастичних моделей. Крім того, ці характеристики значно збільшують складність моделювання. У світлі цього майбутні дослідження повинні бути зосереджені на тому, щоб спочатку визначити, як ці характеристики каналу впливають на продуктивність зв'язку, після чого можна буде визначити ступінь, в якому ці характеристики моделюватимуться в каналі.

Алгоритм та продуктивність нових сценаріїв використання 6G (наприклад, сканування) сильно залежать від розташування об'єкту дослідження та навколишнього середовища. Отже, перевагу надають детермінованим моделям, пов'язаним з географічним положенням. Але це ще не все; типове застосування сканування та візуалізації має враховувати ефекти поширення (такі як дифракція), коли розмір об'єкта приблизно дорівнює довжині хвилі, і в цьому випадку важко виконувати моделювання за допомогою звичайного методу геометричної оптики. Як показано на рис. 3 очікується, що методологія обчислювального електромагнетизму (СЕМ) описуватиме фізичні явища, такі як дифракція. Деякі технології, такі як метод кінцевих елементів, метод кінцевих різниць у часовій області та метод моментів використовуються в СЕМ.

Моделі з підвищеною точністю та детермінованими рівнями зумовлять більш високу обчислювальну складність, яка, у свою чергу, набагато перевершить можливості оцінки системи. Тому ми представляємо еволюцію моделей поширення у відповідних стандартах від 1G до 5G. Як показано на рис. 4 дослідження моделі каналу історично мали тенденцію фокусуватися на поліпшенні детермінованих рівнів в умовах обмеження складності. Отже, це може бути потенційним напрямком розвитку гібридної моделі, в яку включено множину механізмів, але ваги механізмів варіюються відповідно до різних сценаріїв застосування та критеріїв оцінки.

Порівняно зі смугою частот нижче 100 ГГц, для терагерцової смуги властиві більш високі втрати на трасі поширення радіосигналів у вільному просторі. Крім того, ТГц-хвилі збуджують молекули газу в атмосфері. При цьому через молекулярне поглинання частина потужності сигналу буде перетворена на кінетичну енергію молекул газу. Воно має високу частотну

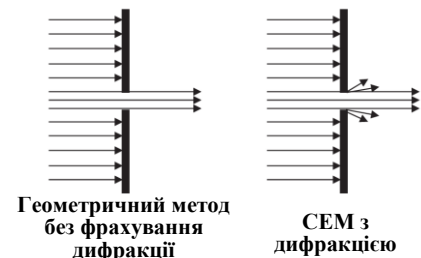


Рис. 3. Порівняння моделей дифракції

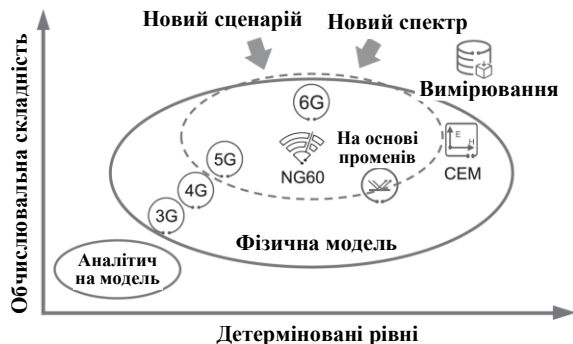


Рис. 4. Аналіз технологій моделювання каналів 6G

з іншого боку, канал ТГц-діапазону також характеризується параметрами поширення сигналів, які відрізняються від каналу міліметрового діапазону. Зазвичай компонент багатопроменевого поширення складається з шляхів прямого поширення, шляхів дзеркального відображення та шляхів розсіювання. Високий К-фактор (у середньому 13 дБ у конференц-залі на частоті 140 ГГц згідно з вимірюваннями Huawei [4]) показує співвідношення потужності між шляхами прямого та непрямого розповсюдження. Вимірювання терагерцових каналів показують, що для них більш виражено пряме поширення. Поверхня об'єктів завод, яка є гладкою на нижчих частотах, стає шорсткою в ТГц-діапазоні, оскільки хвилі ТГц-діапазону мають співрозмірну довжину з висотою мікронерівності поверхні. Ця шорсткість призводить до втрат при відображенні, а також розсіює потужність по шляхах розсіювання, що зрештою послаблює багатопроменеове поширення і робить

вибірковість, оскільки різні молекули газу мають різні резонансні частоти, які відповідають різним пікам молекулярного поглинання, як показано на рис. 5. У ТГц-діапазоні переважає ефект поглинання водяної пари, тоді як ефект поглинання кисню переважає в діапазоні міліметрових хвиль. Відповідно до закону Бера-Ламберта, втрати потужності через молекулярне поглинання експоненційно зростають із збільшенням відстані передачі. В результаті ефект молекулярного поглинання призводить до виражених частотно-вибіркових і залежних від відстані втрат на молекулярне поглинання в каналах ТГц-діапазону.

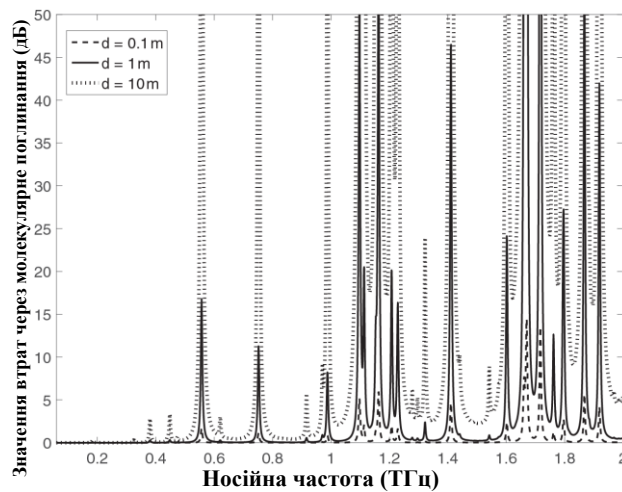


Рис. 5. Оцінювання втрат потужності сигналів через молекулярне поглинання у ТГц-діапазоні

канал розрідженим. Проте деякі вимірювання показують, що в нижній частині ТГц-діапазону, наприклад 140 ГГц і 220 ГГц, в приміщенні ще є багатопроменеве поширення сигналів.

Більш того, різні розподіли багатопроменевого поширення сигналів привносять нові фактори сильно- і малозначимі параметри моделі в ТГц-діапазоні.

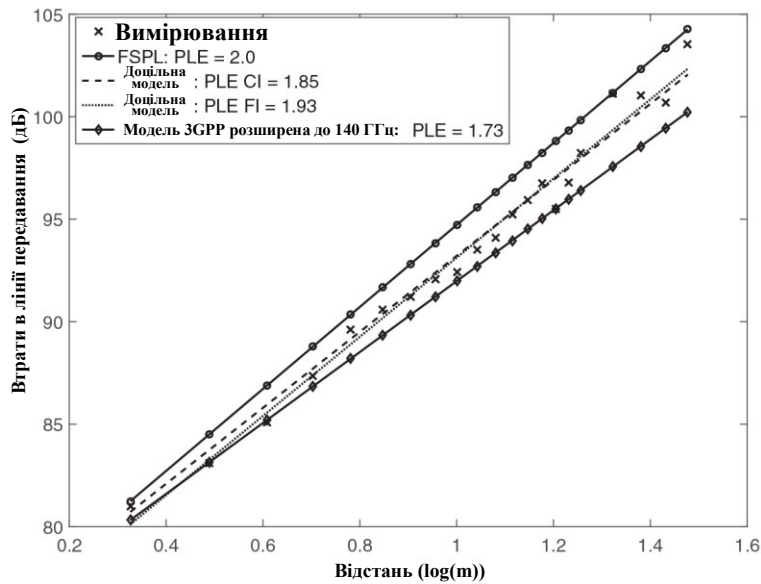


Рис. 6. Порівняння результатів вимірювань моделі втрат у лінії передавання, у вільному просторі та моделі 3GPP TR 38.901

Наприклад, при оцінюванні моделі втрат у радіотракті були проведені вимірювання поширення сигналу типової внутрішньої точки доступу (InH) розташованої в будівлі на частоті 140 ГГц, як показано на рис. 6 та в табл. 2.

Було проведено порівняння зі значенням, знайденим за формулою втрат тракту 3GPP TR 38.901 InH, розширеного до 140 ГГц. Вимірювання показало ступінь втрат у тракті (path loss exponent, PLE) трохи вище, ніж у моделі 3GPP, і нижче, ніж PLE під час поширення у вільному просторі. Це означає, що слабкий хвилеводний ефект можна спостерігати і в субТГц-діапазоні. Для малозначимих параметрів, отриманих у типових сценаріях InH, вимірювання також вказують на помітну відмінність від існуючих стандартів моделі каналу [4], як показано в табл. 3. Тому більш точні та репрезентативні параметризовані моделі каналів для нового спектра вище 100 ГГц ще необхідно глибоко дослідити та змоделювати.

Таблиця 2

Втрати у тракті на частоті 140 ГГц у сценаріях InH

Втрати при розповсюдженні (дБ)		Затухання в тіні (дБ)
Вимірювання Huawei	$PL_{InH140} = 32.4 + 18.5 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log(f_{140})$	$\delta_{SF} = 0.8$
Модель 38.901, розширена до 140 ГГц	$PL_{InH140} = 32.4 + 17.3 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log(f_{140})$	$\delta_{SF} = 3$

Таблиця 3

Малозначимі параметри на частоті 140 ГГц у сценаріях InH

Сценарій		Пряме розповсюдження в будівлі	
		Модель 3 GPP, розширення до 140 ГГц	Вимірювання
Розкид затримки (DS)	$\mu_{lg DS}$	-7.71	-8.70
$lg DS = \log_{10}(DS / 1s)$	$\delta_{lg DS}$	0.18	0.50
Розкид AOA(ASA)	$\mu_{lg ASA}$	1.37	1.29
$lg ASA = \log_{10}(ASA / 1^\circ)$	$\delta_{lg ASA}$	0.37	0.30
Розкид ZOA(ZSA)	$\mu_{lg ZSA}$	0.88	0.73
$lg ZSA = \log_{10}(ZSA / 1^\circ)$	$\delta_{lg ZSA}$	0.18	0.15

Нові вимоги до мобільного зв'язку 6G зумовили дослідження нових технологій, таких як ELAA,

RIS, зв'язок пристрій-пристрій у міліметровому діапазоні, інтегрований наземний зв'язок у міліметровому діапазоні та сканування у міліметровому та ТГц-діапазоні.

Звичайно, нові сценарії застосування та архітектури антени також створюють нові проблеми для моделювання каналів. Наприклад, ELAA може ефективно збільшити пропускну здатність каналу та пікову швидкість користувача. Однак через збільшення апертури антенної решітки збільшується відстань ближньої зони, і це не можна ігнорувати, оскільки тепер деякі користувачі будуть знаходитися в області ближнього поля. З цієї причини модель каналу з плоскою хвилею, що використовується в системах 5G, може виявитися незастосовною. Таким чином, нам необхідно всебічно змоделювати та вивчити характеристики поширення нового каналу зі сферичними хвилями та метод оцінювання функціоналу каналу.

Іншою характерною особливістю каналу поширення ELAA є нестационарність у просторових сферах. Іншими словами, при збільшенні апертури антенних решіток різні ґратки можуть мати різні характеристики каналу поширення, такі як потужність, кластери, кут приходу та ранг.

Деякі нові сценарії застосування, такі як інтегрований наземний зв'язок, створили великі проблеми для систем тестування каналів. Показовим прикладом є той факт, що звичайне вимірювання параметрів каналу вимагає високого відношення сигнал/шум та високої точності синхронізації, що важко досягти в наземних мережах. Низьке відношення сигнал-шум ускладнює отримання інформації про просторове багатопроменеве поширення. Крім того, системи тестування інтегрованих наземних каналів повинні враховувати вплив атмосферних умов, таких як вітер, хмари, дощ і сніг.

На відміну від інших діапазонів електромагнітного випромінювання, ТГц-діапазон має унікальні можливості менш небезпечного сканування, оскільки при цьому використовується неіонізуюче випромінювання з малою глибиною проникнення [5]. ТГц-спектрометрія в 6G має безліч потенційних застосувань у галузі охорони здоров'я, промисловості, контролю якості харчових продуктів та навколишнього середовища, оскільки частоти вібрації та обертання більшості молекул лежать у ТГц-діапазоні. ТГц-спектрометрія викликає значний інтерес завдяки своїй здатності надавати безперервну інформацію в реальному часі за допомогою динамічних, неінвазивних, пасивних та безконтактних вимірювань. Особливо слід зазначити, що ТГц-спектрометрія дає результати співрозмірні з професійними апаратами КТ або МРТ, але з набагато безпечнішим і портативнішим функціональним процесом, як показано на рис. 7.

Хоча ТГц-діапазон забезпечує розширену смугу пропускання та вдосконалені апертури антени, діапазони міліметрових хвиль більш пристосовані до недосконалих умов навколишнього середовища, таких як пил, туман і т. д., що робить їх зручним варіантом для сканування навколишнього середовища поза приміщеннями таких як картографування та електромагнітна реконструкція зображень.

Для підтримки швидкого розвитку технологій зв'язку в ТГц-діапазоні необхідні дослідження та розробки, що ведуть до прориву у створенні нових пристроїв, такі як проектування електронних, фотонних та гібридних приймачів, великогабаритні антенні решітки, ґратки на спільному кристалі або корпусі та нові технології матеріалів для виготовлення ґраток. У той же час необхідні подальші дослідження в галузі проектування потужних високочастотних пристроїв, нових матеріалів для антен та РЧ-транзисторів, архітектури приймачів, моделювання каналів, обробки сигналів решітки та питань енергоефективності.

Хоча ІТУ-R виділив смуги понад 230 ГГц для рухомих служб у діапазоні частот 100 – 450 ГГц, правила та політика для галузі ІМТ не зрозумілі і ще не уніфіковані на міжнародному рівні. Консультації на рівні ІТУ та WRC повинні відбуватись разом, щоб сприяти досягненню консенсусу. Очікується, що 6G міститиме нові можливості та надаватиме нові послуги з використанням нових бездротових технологій. На додаток до розробок, зроблених в області бездротової передачі, система 6G буде включати безліч нових елементів, таких як новий спектр, нові канали, нові матеріали, нові антени, нові обчислювальні технології і нові кінцеві пристрої.

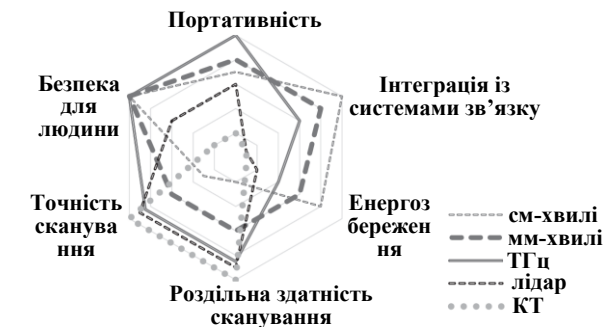


Рис. 7. Порівняння функціональних параметрів систем сканування

Висновки

Здійснено представлення ідеї нового спектра, можливості та проблеми використання ТГц-діапазону як для зв'язку, так і для сканування. Також здійснено опис процесу моделювання та вимірювання нових каналів поряд з високочастотними діапазонами, для сценаріїв із великими апертурними решітками, наземними мережами та скануванням у міліметрових та ТГц-діапазонах.

Визначено вдосконалені методи вирішення технічних проблем, виявлених в системах 5G, такі як мобільність та покриття, а також проблеми реалізації телекомунікаційного обладнання. Зокрема, для полегшення оптимального проектування радіотехнологій у системах 6G потрібно здійснювати моделювання каналів передавання з більш високою точністю. Крім того, для покращення характеристик передачі міліметрових хвиль необхідні удосконалення в технології формування променя радіосигналу, зокрема при

формуванні променю під час процесу сканування. Визначено, що використання спектра міліметрового діапазону буде значно покращено за рахунок вдосконалення технологій, пов'язаних з матеріалами, радіочастотними компонентами та обробкою сигналів. Таким чином, ми зможемо досягти надвисокої швидкості передачі даних та високоточної роздільної здатності сканування.

Література

1. Yu Z., Chen Y., Wang G., Gao W., Han C. Wideband channel measurements and temporal-spatial analysis for terahertz indoor communications, in Proc. 2020 IEEE International Conference on Communications Workshops. IEEE, 2020, pp. 1–6.
2. Chen W., Bai L., Tang W., Jin S., Jiang W. X., Cui T. J. Angle-dependent phase shifter model for reconfigurable intelligent surfaces: Does the angle-reciprocity hold? IEEE Communications Letters, 2020.
3. Васильківський М. В. Оцінювання енергетичних характеристик радіоканалів міліметрового діапазону / М. В. Васильківський, О. І. Мельничук, О. В. Стальченко // Матеріали I Міжнародної науково-технічної конференції "Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем (СПРН-2019)", Вінниця, 14-16 листопада 2019 р. – С. 80–81.
4. Васильківський М. В. Оптимізація параметрів інфокомунікаційних мереж п'ятого покоління / М. В. Васильківський, С. О. Болдинюк // Матеріали I Міжнародної науково-технічної конференції "Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем (СПРН-2019)", Вінниця, 14-16 листопада 2019 р. – С. 68–69.
5. Кичак В. М. Технології надпровідних приймачів терагерцового діапазону / В. М. Кичак, М. В. Васильківський // Матеріали тринадцятої міжнародної науково-технічної конференції "Перспективи телекомунікацій", 15–19 квітня 2019 р. – Київ : Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського". – С. 222–224.

References

1. Yu Z., Chen Y., Wang G., Gao W., Han C. Wideband channel measurements and temporal-spatial analysis for terahertz indoor communications, in Proc. 2020 IEEE International Conference on Communications Workshops. IEEE, 2020, pp. 1–6.
2. Chen W., Bai L., Tang W., Jin S., Jiang W. X., Cui T. J. Angle-dependent phase shifter model for reconfigurable intelligent surfaces: Does the angle-reciprocity hold? IEEE Communications Letters, 2020.
3. Vasykivskiy M. V. Otsiniuvannia enerhetychnykh kharakterystyk radiokanaliv milimetrovoho diapazonu / M. V. Vasykivskiy, O. I. Melnychuk, O. V. Stalchenko // Materialy I Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii "Suchasni problemy infokomunikatsii, radioelektroniky ta nanosystem (SPIRN-2019)", Vinnytsia, 14-16 lystopada 2019 r. – S. 80–81.
4. Vasykivskiy M. V. Optyimizatsiia parametriv infokomunikatsiinykh mrezh piatoho pokolinnia / M. V. Vasykivskiy, S. O. Boldyniuk // Materialy I Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii "Suchasni problemy infokomunikatsii, radioelektroniky ta nanosystem (SPIRN-2019)", Vinnytsia, 14-16 lystopada 2019 r. – S. 68–69.
5. Kychak V. M. Tekhnolohii nadprovidnykh pryimachiv terahertsovoho diapazonu / V. M. Kychak, M. V. Vasykivskiy // Materialy tryndtsiatoi mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii "Perspektyvy telekomunikatsii", 15–19 kvitnia 2019 r. – Kyiv : Natsionalnyi tekhnichniy universytet Ukrainy "Kyivskiy politekhnichniy instytut imeni Ihoria Sikorskoho". – S. 222–224.