

УДК 621.391

д-р техн. наук Сайко В. Г. ORCID: 0000-0002-3059-6787 (ВІТІ ім. Героїв Крут)
Романов Д. О. ORCID: 0009-0008-5522-7591 (ВІТІ ім. Героїв Крут)
канд. техн. наук, професор Наритник Т. М. ORCID: 0000-0001-8071-6356 (ІЕЗ УАННП)
канд. техн. наук Комаров В. О. ORCID: 0000-0002-4929-4527 (ВІТІ ім. Героїв Крут)
д-р філософії Фомін М. М. ORCID: 0000-0002-6864-4238 (ВІТІ ім. Героїв Крут)

АНАЛІЗ ПЕРСПЕКТИВ ВИКОРИСТАННЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДІАПАЗОНУ ЧАСТОТ ДЛЯ БЕЗПРОВОДОВИХ МЕРЕЖ ЗВ'ЯЗКУ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Частоти від 100 ГГц до 3 ТГц є перспективними діапазонами для нового покоління систем безпроводового зв'язку через широкі смуги спектра. Ці частоти також пропонують потенціал для революційних застосувань, які стануть можливими завдяки новому мисленню та прогресу в пристроях, схемах, програмному забезпеченні, обробці сигналів і системах. Але перехід до реального використання терагерцового діапазону як частотного ресурсу при наданні послуг зв'язку для додатків у мережах безпроводового зв'язку спеціального призначення супроводжується безліччю проблем управління спектром, мережевого аналізу, проєктування та оптимізації архітектури цих мереж.

Новизна цієї роботи обумовлена тим, що, незважаючи на те, що в останні роки було опубліковано ряд публікацій оглядового характеру вітчизняних та зарубіжних авторів, у аспектах розвитку та специфіки можливих застосувань безпроводових мереж зв'язку терагерцового діапазону частот при вирішенні задач силовими структурами та силами спеціальних операцій не розглядалася. Особливу увагу автори акцентували на висвітленні вітчизняних розробок у галузі безпроводових систем доступу терагерцового діапазону.

Метою роботи є аналітичний огляд особливостей переходу до реального використання терагерцового діапазону частот як частотного ресурсу при наданні послуг зв'язку ресурсомісткими додатками безпроводових мереж зв'язку для перспективних застосувань під час вирішення спеціальних задач силовими структурами.

У роботі зроблено систематизований аналіз та класифікацію основних сфер перспективних застосувань безпроводових мереж зв'язку терагерцового діапазону частот при вирішенні задач силовими структурами спеціального призначення та наведено науково-дослідні задачі для переходу до реального використання терагерцового діапазону частот як частотного ресурсу при наданні послуг зв'язку для додатків спеціального призначення.

Розроблені в цій роботі авторські пропозиції для перспективних застосувань терагерцових мереж зв'язку силами спеціальних операцій або спеціального призначення є теоретичною основою створення методичного апарату для обґрунтування рекомендацій щодо вибору перспективних застосунків при використанні терагерцових мереж зв'язку силами спеціальних операцій при вирішенні задач спеціального призначення.

***Ключові слова:** терагерцовий діапазон частот, безпроводові мережі зв'язку, мережі зв'язку спеціального призначення, аналітичний огляд, застосування мереж спеціального призначення.*

V. Saiko, D. Romanov, T. Narytnyk, V. Komarov, M. Fomin Analysis of prospects for the use of the terahertz frequency range for special purpose wireless communication networks.

Frequencies from 100 GHz to 3 THz are promising ranges for a new generation of wireless communication systems due to wide spectrum bands. These frequencies also offer the potential for revolutionary applications made possible by new thinking and advances in devices, circuits, software, signal processing and systems. But the transition to the real use of the terahertz range as a frequency resource in the provision of communication services for applications in special purpose wireless communication networks is accompanied by many problems of spectrum management, network analysis, design and optimization of the architecture of these networks.

The novelty of this work is due to the fact that, despite the fact that in recent years a number of review publications by domestic and foreign authors have been published, but in the aspects of development and specifics of possible applications of wireless communication networks of the terahertz frequency range in solving problems with power structures and forces special operations were not considered. The authors focused special attention on highlighted domestic developments in the field of wireless access systems in the terahertz range.

The purpose of the work is an analytical review of the features of the transition to the real use of the terahertz frequency range as a frequency resource in the provision of communication services by resource-intensive applications by wireless communication networks for promising applications in solving special problems by power structures.

In the work, a systematic analysis and classification of the main areas of promising applications of wireless communication networks of the terahertz frequency range in solving problems by special-purpose power structures is made, and scientific research tasks are given for the transition to the real use of the terahertz frequency range as a frequency resource in the provision of communication services for special purpose applications.

The author's proposals developed in this work for promising applications of terahertz communication networks by special operations forces or special purpose forces are the theoretical basis for creating a methodological apparatus for substantiating recommendations for the selection of promising applications when using terahertz communication networks by special operations forces when performing special purpose tasks.

Keywords: *terahertz frequency range, wireless communication networks, special purpose communication networks, analytical review, application of special purpose networks.*

Постановка завдання у загальному вигляді

На сьогодні велика увага приділяється використанню терагерцових сигналів у різних сферах, таких як радіозв'язок, ближня радіолокація та спектроскопія. Це пояснюється тим, що такі сигнали мають численні переваги порівняно з радіосистемами, що використовують сигнали у високочастотному діапазоні до 100 ГГц. Водночас у всьому світі зростає зацікавленість у використанні терагерцового діапазону частот (від 0,1 ТГц до 3 ТГц), який, по-перше, мало використовувався для радіозв'язку та радіолокації, по-друге, має велику інформаційну ємність, і, по-третє, не вимагає ліцензування у більшості країн. Цей діапазон займає значну частину електромагнітного спектра між інфрачервоним і мікрохвильовим діапазонами. Наразі використання терагерцового випромінювання ще досить обмежене і переважно на демонстраційному рівні, незважаючи на його великий потенціал для технічних та біомедичних застосувань.

Перехід до терагерцового діапазону дозволяє вирішити проблеми зі збільшенням швидкості передачі інформації завдяки використанню ширших спектрів частот (декілька десятків ГГц) і забезпечення електромагнітної сумісності радіоелектронних пристроїв, а також зменшує ймовірність радіозавад. Прикладом успішного використання терагерцового діапазону є запуск першого у світі експериментального китайського штучного супутника Землі з бортовим ретранслятором терагерцового діапазону для тестування мереж зв'язку 6G. Порівняно з іншими методами збільшення пропускної здатності, цей метод унікальний, оскільки більшість сучасних методів мають свої обмеження. Терагерцовий діапазон є перспективним для створення компактних заводо захищених високошвидкісних безпроводових пристроїв та систем зв'язку, оскільки він не схильний до впливу існуючих засобів радіоелектронної боротьби. Однак використання терагерцового діапазону також ускладнює роботу мереж зв'язку через швидке ослаблення сигналу у середовищі, ефект молекулярної абсорбції та використання спрямованих антен.

Аналіз публікацій за темою досліджень

Більшість статей щодо застосування терагерцових технологій у телекомунікаційних системах обмежується оглядом окремих вузлів та елементною базою.

В [1] розглянуто телекомунікаційні системи терагерцового діапазону, показано переваги та можливості, яких можна досягнути із використанням терагерцової технології. Також розглянуто експериментальні результати українських науковців у цій галузі, основних виробників радіоелектронних пристроїв та список їхньої продукції, що працює у терагерцовому діапазоні.

У роботах [2; 3] наведено аналітичний огляд теоретичних і експериментальних досліджень у галузі систем зв'язку суб- і терагерцового діапазону. Подальша перспектива застосування телекомунікаційних систем суб- і терагерцового діапазонів вбачається у створенні швидкодіючих широкосмугових радіоелектронних компонентів, включаючи підсилювачі потужності та малошумні підсилювачі і розвиток на цій основі методів побудови систем множинного доступу й інших телекомунікаційних систем суб- і терагерцового діапазонів нового покоління. Наведено результати розробки вітчизняного

експериментального зразка цифрової радіолінії із гігабітною пропускнуою здатністю, що функціонує в терагерцовому діапазоні і який може бути використаний в надвисокошвидкісних розподільчих мережах мобільного зв'язку нового покоління 5G для забезпечення передавання та приймання цифрової інформації зі швидкістю до 1 Гбіт/с у діапазоні частот 128–134 ГГц на дальності зв'язку в межах 1 км.

У [4] наведено інноваційні технологічні рішення та компоненти для мереж зв'язку терагерцового діапазону частот, шляхи використання телекомунікаційного зв'язку терагерцового діапазону частот, проблемні питання впровадження та напрямки подальших досліджень мереж зв'язку терагерцового діапазону частот.

У роботі [5] наведено огляд досягнень і проблем в області терагерцових комунікацій, орієнтованих на швидкість передавання даних близько 100 Гбіт/с. Подано короткий огляд напівпровідникових приладів із граничною частотою, що знаходиться в терагерцовому діапазоні.

Огляд, присвячений досягненням у галузі розробки та застосування ліній зв'язку терагерцового діапазону частот, а також перспектив розвитку представлених технологій та компонентної бази, наведено у [6].

Створено експериментальні стенди 3D терагерцового ЛЧМ-радіолокатора, проведено дослідження побудованого ЛЧМ-радару з обмеженням у часі частоти биття від трьох шарів відбиття [7; 8].

У роботі [9] наведено методи застосування гібридних технологій для реалізації телекомунікаційних систем міліметрового діапазону.

В [10] наведено результати дослідження ключових особливостей терагерцових систем, аналізу найбільш перспективних наукових програм та можливі відкриті питання дослідження.

Глибокий аналіз особливостей застосування засобів терагерцового діапазону наведено в [11], а також підходить до того, як зменшити енергоспоживання та підвищити продуктивність у кількох проблемних областях. Описано багато технічних проблем і можливостей для безпроводового зв'язку та додатків зондування вище 100 ГГц, а також представлено ряд багатообіцяючих відкриттів, нових підходів і останніх результатів, які допоможуть у розробці та впровадженні безпроводових мереж нового покоління.

Дослідженню можливостей використання терагерцового діапазону в гетерогенній транспортній розподільчій мережі мобільного зв'язку присвячено цикл публікацій [12–18].

Отже, новизна цієї роботи обумовлена тим, що, незважаючи на те, що в останні роки було опубліковано ряд публікацій оглядового характеру вітчизняних та зарубіжних авторів [1–18], в аспектах розвитку та специфіки можливих застосувань безпроводових мереж зв'язку терагерцового діапазону частот при вирішенні задач силовими структурами та силами спеціальних операцій не розглядалася.

Постановка завдання

Не ставлячи за мету охопити весь спектр питань, пов'язаних із перевагами і проблемами терагерцових мереж зв'язку, в цій роботі наводиться аналітичний огляд та авторські пропозиції основних перспективних застосунків і найбільш основних дослідницьких завдань при використанні безпроводових мереж зв'язку для вирішення задач спеціального призначення. Таким чином, представлена робота поєднує попередні дослідження в різних галузях знань, що має спростити входження в таку багатогранну область, як побудова та аналіз терагерцових безпроводових мереж зв'язку спеціального призначення для вирішення професійних задач силами спеціальних операцій.

Виклад основного матеріалу

Перспективні застосування для терагерцових мереж зв'язку спеціального призначення

Поява терагерцових мереж зв'язку уможливорює відразу кілька груп ресурсомістких додатків для застосування під час вирішення професійних задач силовими структурами спеціального призначення. Деякі з них являють собою логічний розвиток поширених додатків з урахуванням особливостей терагерцових мереж зв'язку. Інші ж, навпаки, стали принципово можливими лише з появою безпроводових мереж зв'язку в терагерцовому діапазоні частот [2; 3]. У цьому підрозділі наведено основні напрями з обох категорій, а також запропоновано сценарії використання для терагерцових мереж зв'язку спеціального призначення (рис. 1). Далі зупинимось на деяких із них.



Рис. 1. Основні перспективні сфери використання безпроводових мереж зв'язку терагерцового діапазону для спеціальних задач силових структур

Інформаційний водоспад

Мале територіальне охоплення терагерцових мереж зв'язку, обумовлене швидким загасанням сигналу на великій відстані поширення в середовищі, потребує перегляду концепції «малих стільників». З одного боку, використання терагерцового діапазону для таких стільникових мереж виглядає перспективно через велику потенційну ємність мережі, яку можна створити. З іншого боку, реальний радіус дії стільників за допомогою існуючого обладнання обмежений кількома метрами. Таким чином, повне покриття навіть обмеженої території терагерцовими стільниками виявляється економічно не вигідним через велику

кількість необхідних точок доступу і високу вартість окремих точок доступу, особливо при вирішенні спеціальних завдань.

У зв'язку з цим було запропоновано спосіб «інформаційного водоспаду», який передбачає розміщення невеликої кількості терагерцових точок доступу в зонах з найбільш інтенсивним потоком користувачів: на початковій, середній та кінцевій точках маршруту руху колони сил спеціального призначення, у місцях дислокації такої колони, вузьких коридорах або місцях з високою прохідністю тощо.

Отже, незважаючи на те, що повне покриття заданої зони недосяжне, значна частина потоку спеціального призначення періодично опиняється в зоні покриття хоча б однієї терагерцової точки доступу. Наші попередні дослідження показують, що середній час між потраплянням у зону покриття хоча б однієї терагерцової точки доступу становить від декількох десятків секунд до декількох хвилин. Це спостереження лежить в основі способу «інформаційного водоспаду» – точки доступу великої ємності, яка протягом короткого часу, поки користувач перебуває в зоні покриття (приблизно кілька хвилин), організовує передачу великої кількості даних з/на користувальницький термінал. Постійне перенаправлення «важкого» трафіку, який кешується (наприклад, відео), на терагерцові точки доступу дозволяє значно зменшити навантаження на стільникову мережу і звільнити ресурси для тих абонентів, які в конкретний момент не знаходяться в зоні покриття жодної з терагерцових точок доступу.

Високозахищені мережі

Можливість створення високонаправлених діаграм з високою ємністю терагерцових мереж зв'язку дозволяє використовувати ці системи для організації надійних з'єднань. Зазвичай це включає створення дуже вузького променя між рухомими комплексами радіозв'язку (РКР) і пристроями користувачів, такими як мобільні телефони або термінали, які знаходяться в прямій видимості один до одного. Це створює систему, яка може бути прослухана тільки терміналом, розташованим на відрізку між РКР і телефоном/терміналом. Однак цей відрізок є коротким і зазвичай видимим користувачам й камерам РКР. Крім того, за допомогою відповідних кодів можна зробити злам такої лінії зв'язку практично неможливим, забезпечуючи теоретичну стійкість системи. Це означає, що ймовірність успішного дешифрування переданого повідомлення практично дорівнює ймовірності вгадати це повідомлення.

Радіорелейні системи терагерцового діапазону частот

Однією з перспективних сфер застосування терагерцових технологій є системи телекомунікацій [1–18]. Зокрема передбачається створення нових за габаритами, заводо захищеністю та енергоефективністю пристроїв суб- і терагерцового діапазону для транспортних мереж мобільного зв'язку нового покоління, високошвидкісної передачі відеосигналів, радіорелейних систем прямої видимості, транспортних мереж мобільного зв'язку нового покоління та радарів високоточного виявлення і розпізнавання малорозмірних швидкісних цілей, сенсорів для отримання більш точної та детальної оперативної інформації про стан контрольованого об'єкта або місцевості.

Такі розробки ведуться в США під егідою DARPA, в Німеччині, Англії, Китаї для застосування як у військових, так і у цивільних цілях.

В [2; 3] для систем радіозв'язку на основі аналізу наявної електронної арсенід-галієвої елементної бази, теоретичних і експериментальних досліджень проведено проектування основних вузлів і приймально-передавального модуля телекомунікаційної системи із гігабітною пропускною здатністю до 1200 Мбіт/с в діапазоні частот 130–134 ГГц у складі: частотні перетворювачі (перетворювач вниз та змішувач частоти) із субгармонійною накачкою, гетеродин, що використовує високостабільний задаючий кварцовий генератор з подальшим ланцюгом помножувальних і підсилювальних каскадів, смугопропускний фільтр з використанням тонкої металевої пластини в Е-площині хвилеводного каналу 1,6 мм × 0,8 мм,

конічна рупорна антена з діелектричним лінзовим концентратором, а також формувачів радіосигналів. Проведено експериментальні дослідження лабораторного зразка цифрової симплексної радіорелейної системи терагерцового діапазону частот 130–134 ГГц і отримано наступні результати: пропускна канална здатність до 1200 Мбіт/с; значення ймовірних бітових помилок BER не більше ніж 10^{-6} (вид модуляції – КАМ-64); дальність зв'язку в нормальних умовах в межах 1 км при коефіцієнті підсилення системи на рівні 50 дБ (рис. 2).



Рис. 2. Зовнішній вигляд лабораторного зразка цифрової симплексної радіорелейної системи терагерцового діапазону

На рисунку 3 наведено нову схему організації цифрового радіорелейного зв'язку для передачі інформації на пункт управління 1 мережею цифрової радіорелейної станції (ЦРС) терагерцового діапазону через вузлову приймально-передавальну ЦРС 4 та приймально-передавальні модулі 2, 3 на 0,13 ТГц. Такий варіант можна використати при розгортанні польового вузла зв'язку спеціального призначення.

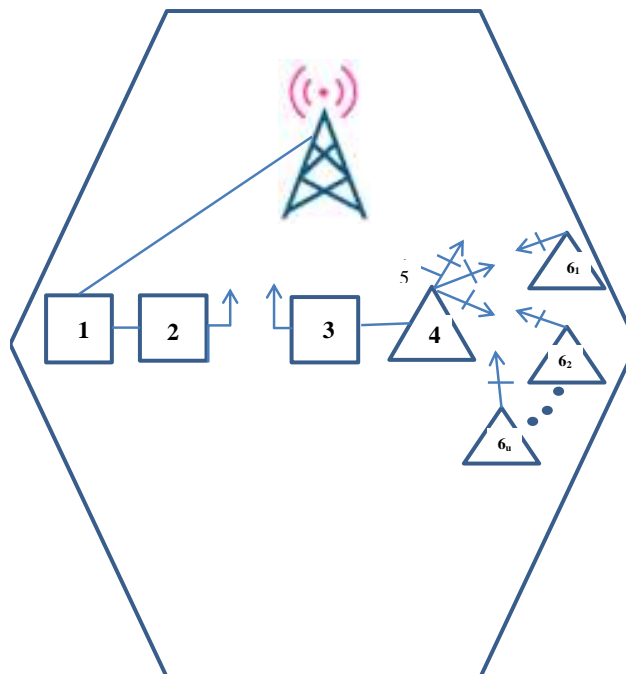


Рис. 3. Схема організації цифрового радіорелейного зв'язку для передачі інформації на пункт управління мережею ЦРС терагерцового діапазону через вузлову ЦРС та приймально-передавальні модулі

Вузлова ЦРС 4 (див. рис. 3) «точка-багатоточка» є пакетною та має на кожному з N -напрямків пропускну здатність 2,4 Гбіт/с. Пакетна технологія дозволяє «послідовно»

передавати потоки зі швидкістю 2,4 Гбіт/с на приймально-передавальні модулі терагерцового діапазону частот 2, 3 (див. рис. 3), який весь трафік $N \cdot 2,4$ Гбіт/с передає на пункт управління мережею 1 ЦРС б_{1..n} терагерцового діапазону, тому передача мультимедійної, графічної й іншої інформації здійснюється в терагерцовому діапазоні. Висока скритність передачі інформації забезпечується особливостями терагерцового діапазону хвиль.

Мережі зв'язку систем безпеки особливо важливих об'єктів спеціального призначення

Відоме інноваційне рішення з використанням терагерцового діапазону частот, яке відноситься до техніки захисту території, що охороняється від несанкціонованого проникнення порушника і може бути використано на особливо важливих військових і державних об'єктах [19].

Спосіб захисту сфокусованим випромінюванням субтерагерцового діапазону зон і об'єктів від несанкціонованого проникнення, в якому визначають місцезнаходження приховано розташованого порушника за допомогою терагерцових датчиків і вплив на нього здійснюють електромагнітним випромінюванням установки субтерагерцового діапазону з урахуванням відбиття електромагнітного випромінювання від різних поверхонь, відрізняється від відомих тим, що робочу частоту випромінювання вибирають в частотному діапазоні «вікна прозорості» 94–96 ГГц, розраховують місце розташування об'єктно-орієнтованої поверхні, яка відбиває промінь та знаходиться на високо піднятій аероплатформі, і кут напрямку впливу на порушника з урахуванням відбиття електромагнітного випромінювання від поверхні на високо піднятій аероплатформі. При цьому спочатку промінь джерела електромагнітного випромінювання субтерагерцового діапазону частот направляється на поверхню, що знаходиться на високо піднятій аероплатформі, а потім сфокусований промінь потрапляє на місце розташування порушника для створення поблизу його знаходження області заданої підвищеної щільності потоку енергії випромінювання.

В основі роботи технічного рішення спрямованої енергії покладено високотемпературний розігрів повітряного простору (понад 900 градусів за шкалою Кельвіна) за допомогою вузьконаправленого радіовипромінювання, частота якого відповідає частоті максимального поглинання енергії молекулами атмосферного кисню і водяної пари.

Принцип дії полягає в наступному: потужний передавач генерує вузький спрямований (шириною до 0,5 градуса) радіопромінь у частотному діапазоні «вікна прозорості» 94–96 ГГц, який проникає в шкіру людини на глибину до 0,5 мм, нагріваючи її до 45 °С і вище. При цьому в людини виникає нестерпний біль. Больова реакція на випромінювання інтенсивністю до 100 Вт/м² достатньо вагома, щоб заставити порушника покинути зону, що охороняється.

Реакція на випромінювання виникає протягом 2-3 секунд, стає нестерпною через 5 секунд і зникає після відключення генератора або після того, як порушник залишить зону опромінення. Якщо порушник не покине зону охорони протягом 250 секунд, він отримає опік шкіри (рис. 4). Прогнозована дальність ураження живої сили противника – в межах 1 км і більше.

Технічний результат, на отримання якого спрямоване технічне рішення, – зменшення масо-габаритних характеристик і енергоспоживання компонентів і підсистем завдяки застосуванню твердотільних підсилювальних пристроїв, що дозволяє потенційно зменшити масо-габаритні характеристики системи та енергоспоживання компонентів. Також при цьому спрощується процес технічної експлуатації системи.

В наш час спільно фахівці та науковці Військового інституту телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут та СП «Інститут електроніки та зв'язку Української академії наук» пропонують до виконання в стислі терміни науково-дослідну роботу «Випромінююча телекомунікаційна система субтерагерцового діапазону для захисту особового складу в бойових операціях». Така випромінююча система, яка базується на використанні наявного

науково-технічного та виробничо-технологічного потенціалу і знаходиться на рівні кращих зарубіжних зразків, призначена для використання в Збройних Силах й інших силових структурах України як високоефективна енергетична зброя та радіоелектронний засіб стримування нового покоління.

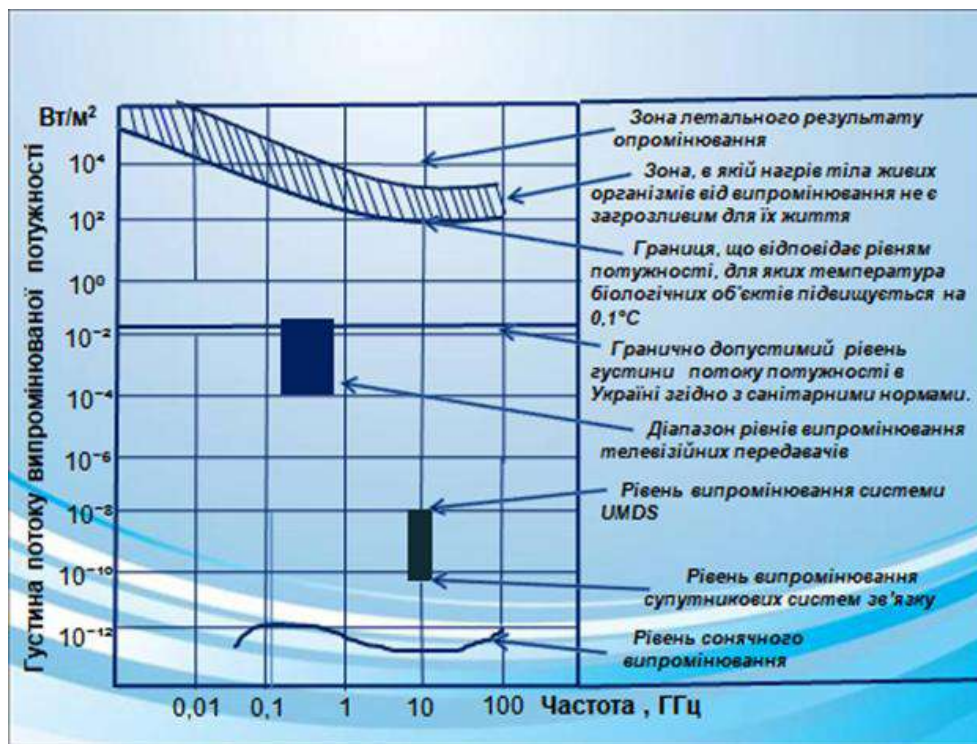


Рис. 4. Діаграма впливу мікрохвильового опромінення

Системи міжсупутникового зв'язку

Відоме вітчизняне рішення, яке є каналом міжсупутникового зв'язку в терагерцовому діапазоні частот, що включає в себе два геостационарних супутники зв'язку – ведучий і ведений, міжсупутниковий двосторонній зв'язок, наземні пункти зв'язку, відрізняється від відомих рішень тим, що в системі міжсупутникового зв'язку двосторонній канал зв'язку базується на каналі передачі в терагерцовому діапазоні частот, а на геостационарних супутниках зв'язку розміщені апаратура перенесення стандартного частотного діапазону в терагерцовий частотний діапазон та антени передачі інформації в терагерцовому діапазоні частот [20].

Радіолокатори для високоточних систем наведення і керування

Для високоточних систем наведення та керування розроблено нове апаратно- та схемотехнічне рішення приймально-передавального модуля терагерцового діапазону (рис. 5), яке базується на застосуванні сучасних інтегральних мікросхем терагерцових трансиверів в діапазоні 119–126 ГГц трансивера та плати формування та обробки сигналів (плата синтезатора частоти), що інтегровані між собою відповідними інтерфейсами і сумісні з використаним налагоджувальним набором Sirad Easy компанії Silicon Radar [21–23].

Проведено математичне та імітаційне моделювання електричних схем вузлів приймально-передавального модуля терагерцового діапазону з використанням САПР NI Multisim, а також за допомогою САПР Altium Designer зпроектовано 2D- та 3D-моделі плат, на основі яких виготовлено та здійснено монтаж електронних компонентів на друковану плату терагерцового трансивера та друковану плату формування та обробки сигналів приймально-передавального модуля терагерцового діапазону. Вперше розроблено макетний зразок

приймально-передавального модуля терагерцового діапазону (119–126 ГГц) для високоточних систем наведення і керування, у якого основні надвисокочастотні вузли (змішувач частот, гетеродин, підсилювач тощо) реалізовані за кремній-германієвою технологією SiGe повністю в межах однієї малогабаритної інтегральної мікросхеми з інтегрованою антеною (габаритні розміри не перевищують по діаметру 35 мм та по довжині 10 мм), що забезпечує при вихідній потужності 3 мВт необхідну (в межах до 100–300 м) дальність дії модуля в складі радара ближньої дії при оптимальних значеннях енергетичного ресурсу радіолінії при практичній відсутності можливості виявлення і несанкціонованого доступу до інформації, що передається в терагерцовому діапазоні частот.



Рис. 5. Пристрої провідних світових виробників на основі ІМС компанії Silicon Radar

Стратосферні системи зв'язку

Іншим прикладом корисного використання технології терагерцового діапазону частот є її застосування у стратосферних системах зв'язку. Останнім часом ця концепція здобуває все більшу популярність. Суть стратосферних систем зв'язку полягає у розташуванні приймально-передавального обладнання, тобто базових станцій, на безпілотних стратосферних платформах, таких як повітряні кулі, дрони, дирижаблі й т. ін., які летять на висоті 18–25 км, не перешкоджаючи цивільній авіації. На таких висотах швидкість вітру досить низька, а густина повітря значно менша, ніж на Землі. Застосування стратосферних систем зв'язку має численні переваги, зокрема підвищений кут огляду порівняно з наземними системами. Для забезпечення зв'язку зі стратосферною станцією доцільно використовувати терагерцові системи через їхні переваги, такі як низька завантаженість діапазону, можливість використання широких смуг частот, спрощена процедура виділення частот у багатьох країнах і значне зменшення розмірів антенних систем, які можуть формувати вузькі діаграми напрямленості. Широке використання стратосферних телекомунікаційних систем зв'язку відкриває великі можливості для оперативного зв'язку військових цілей, забезпечення зв'язку у зонах, постраждалих від стихійних лих або військової агресії. Для ефективної роботи систем зв'язку в терагерцовому діапазоні необхідні відповідні засоби, спрямовані на цей діапазон.

Дослідні науково-технічні задачі для терагерцових мереж зв'язку спеціального призначення

Крім описаних вище переваг, безпроводові мережі зв'язку, що працюють у терагерцовому діапазоні частот, мають ряд особливостей, які, у свою чергу, ведуть до набору

дослідницьких завдань, що стоять перед розробниками (рис. 6). Рішення описаних нижче завдань є критично важливим для побудови терагерцових мереж спеціального призначення та підтримки перерахованих категорій застосунків (див. рис. 1).



Рис. 6. Дослідні науково-технічні задачі для мереж зв'язку терагерцового діапазону частот спеціального призначення

Далі зупинимося спочатку на особливостях терагерцового діапазону частот, а потім на деяких науково-дослідницьких задачах.

Особливості терагерцового діапазону частот

Покриття мобільних мереж у терагерцовому діапазоні буде обмежено застосуванням базових станцій з малим та надмалим радіусом дії через ослаблення сигналів в атмосфері Землі та гідрометеорах. Ослаблення терагерцового діапазону хвиль в атмосфері зростає зі збільшенням частоти сигналів, що використовується. Якщо затухання в атмосфері перевищує 10 дБ на відстані 1 км, безпроводовий зв'язок у мережі для радіусів стільників в одиницях кілометрів буде вкрай утруднений.

Субтерагерцовий діапазон має значне загасання сигналів через вплив дощу, що дає майже постійне питоме ослаблення на частотах вище 100 ГГц із втратами від 0,8 дБ/км до 50 дБ/км залежно від інтенсивності дощу відповідно до рекомендації ITU-R P. 838-3 [25].

Вікно прозорості терагерцового діапазону в смузї частот між 252 ГГц і 296 ГГц може забезпечувати дальність зв'язку від базової станції мережі мобільного зв'язку, що не перевищує 2 км, при цьому ослаблення внаслідок впливу атмосфери Землі становить 10 дБ [26].

При використанні в мережах діапазону частот між 192 ГГц і 298 ГГц дальність зв'язку в мережах може становити більше 2 км, а при використанні діапазону частот 121–154 ГГц – понад 8 км. Згасання в атмосфері у терагерцовому діапазоні перевищує 10 дБ/км на всіх частотах вище 351 ГГц. Слід також наголосити, що дальність зв'язку в мережах зменшуватиметься, коли спостерігатимуться опади, наприклад, дощ.

Крім забезпечення обмежених дальностей зв'язку та надзвичайно високих швидкостей передачі даних, квазіоптична природа терагерцових діапазонів частот має багатообіцяючі можливості для функцій зондування, візуалізації та позиціонування (3CLP) у мережах нового покоління, які активно досліджуються.

Таким чином, виходячи з властивостей для вже використовуваного спектра, нижня частина спектра (діапазони частот нижче 6 ГГц та субміліметрового діапазону) забезпечує середні швидкості передачі даних та можливості вимірювання параметрів сигналів з більш високою надійністю та нижчою роздільною здатністю. Між тим викликає зростаючий інтерес верхня частина діапазонів спектра (діапазон субтерагерцовий і терагерцовий), яка забезпечує високу швидкість передачі даних і зондування з високою роздільною здатністю, але зі зменшенням дальності зв'язку і більш переривчастими каналами.

Крім того, використання для більшості послуг субтерагерцового і терагерцового діапазонів частот може допомогти вирішити проблему нестачі спектра для безпроводового зв'язку, яка спостерігається в смугах нижче 6 ГГц. Таким чином, враховуючи особливі переваги, які можуть бути отримані для послуг зв'язку, зондування та формування зображень у терагерцовому діапазоні, спільне використання різних діапазонів забезпечує місцевизначення абонента при наданні послуг зв'язку з високою роздільною здатністю до 1 см у терагерцовому діапазоні. Такі сценарії не тільки забезпечують більш високу ефективність використання спектра, але й відкривають шлях для нових можливостей, що впливають із можливості виконання завдань скоординованого зондування та зв'язку для мереж безпроводового зв'язку спеціального призначення.

Науково-дослідницькі задачі

Побудова детальних моделей для каналів зв'язку терагерцових мереж спеціального призначення

Безліч різноманітних ефектів має бути враховано при побудові детальної моделі терагерцового каналу зв'язку. По-перше, суттєвий вплив частотно-залежного ефекту молекулярної абсорбції призводить до бажання використовувати так звані «вікна прозорості» — частотні діапазони всередині терагерцового спектра, в яких вплив ефекту молекулярної абсорбції мінімальний. Проте навіть у «вікнах прозорості» вплив молекулярної абсорбції на поширення сигналу не нульовий. Через це, при розгляді навіть найпростіших моделей поширення (наприклад, «Free Space Path Loss») стосовно терагерцових частот, потрібно додавання ще одного компонента (експоненційно залежить від дистанції між передавачем і приймачем) до рівняння [27]. Далі, так як більша частина аналізованих сценаріїв використання терагерцових мереж зв'язку передбачає зв'язок всередині приміщень, всі складні ефекти поширення терагерцового сигналу всередині будівель (такі як віддзеркалювання сигналу від стін та інших об'єктів, ослаблення сигналу при проходженні крізь об'єкти і багато іншого) мають бути враховані. У зв'язку зі складністю цієї задачі, на сьогодні відомі лише кілька аналітичних моделей поширення терагерцового сигналу всередині будівель [28; 29]. Нарешті, володіючи довжиною хвилі в частках міліметра, терагерцовий сигнал розсіюється при контакті практично з будь-яким твердим предметом, як усередині приміщення, так та за його межами. Нарешті, використання спрямованих антен вимагає значно складнішого підходу до аналізу інтерференції в каналі, яка викликана багатопроменевим поширенням корисного сигналу, і впливом сусідніх точок доступу/абонентів. В результаті, існує два основних підходи до побудови моделей каналів для

терагерцових мереж зв'язку. Перший підхід передбачає детальне моделювання простору навколо приймача і передавача з метою побудови всіх можливих (або найімовірніших) траєкторій поширення сигналу. Такий підхід, при правильному застосуванні, дозволяє отримувати результати з високою точністю, проте є обчислювально складним і не може бути використаний для побудови широко застосованих моделей, так як найменша зміна сценарію призводить до необхідності моделювати поширення сигналу ще раз. Другий підхід заснований на «усередненні» множини результатів, отриманих першим підходом, з метою побудови стохастичної моделі каналу, що застосовується для широкого набору сценаріїв, нехай і на шкоду точності результатів, що видаються моделлю у кожному конкретному сценарії.

Застосунки одночасної локалізації та картування (Simultaneous Localization And Mapping, SLAM) у міліметровому або терагерцовому діапазоні дозволяють відновлювати тривимірні карти околиць у невідомих середовищах. SLAM заснований на концепції, згідно з якою пристрій, що володіє сенсорами, переміщаючись в невідомому середовищі, розпізнає навколишні об'єкти (орієнтири) і згодом відновлює 2D- або 3D-карту навколишнього середовища для подальшого підвищення точності локалізації. Поточна точна технологія SLAM (для автоматичного створення внутрішніх та зовнішніх карт) вимагає як високої роздільної здатності при вимірюванні відстані (дальності), так і дуже високих куткових дозволів, які традиційно досягаються за допомогою лазерних та оптичних технологій. Хоча лідари та оптичні камери можуть забезпечувати високу роздільну здатність, вони не можуть працювати в несприятливих погодних умовах (туман, дощ, хмари тощо) та в умовах низького зовнішнього освітлення.

Розробка нових алгоритмів множинного доступу до середовища передачі

Далі не можна не зазначити одну з найбільш складних проблем при розробці терагерцових мереж зв'язку – створення ефективних алгоритмів множинного доступу. Більшість існуючих безпроводових мереж оперують з антенами слабкої спрямованості, що дозволяє передавати сигнальні повідомлення відразу великому числу сусідів. Терагерцові мережі зв'язку, навпаки, характеризуються дуже вузькими променями діаграм спрямованості, що призводить до складнощів при пошуку та підтримці стабільного з'єднання до сусідів, особливо якщо обрані вузли поки що не спілкувалися один з одним і нічого не знають про взаємне розташування.

Також у діапазоні міліметрових і субтерагерцових хвиль мережі повинні використовуватися в поєднанні з масивним MIMO, особливо в застосуваннях з великою пропускну здатністю. Зі збільшенням кількості антенних елементів та переходом у більш високочастотний діапазон сигнальні промені MIMO стануть надзвичайно вузькими. Отже, буде складно генерувати кілька дуже вузьких променів, які точно спрямовані на кількох користувачів одночасно, тому що в багатьох сценаріях буде важко отримати точну інформацію про стан каналу. У таких випадках для надійного формування променя можуть бути розроблені покращені схеми NOMA спільно з розрахованим на багато користувачів попереднім кодуванням. Маючи можливості NOMA, MU-MIMO може використовувати модифіковану схему попереднього кодування. Замість формування дуже вузьких і точних променів, націлених на кожного користувача окремо, прекодер MU-MIMO тепер може генерувати ширші промені для націлювання на групу користувачів, які додатково мультиплекуються за допомогою NOMA. Збільшення ширини променя робить його більш стійким до змін параметрів каналу, наприклад, викликаним мобільністю користувача або затримкою вимірювання та зворотного зв'язку. Міжкористувацькі завади всередині групи додатково придушуюватимуться приймачем NOMA за допомогою переданих сигнатур NOMA. Аналогічні ідеї можуть бути додатково застосовані при спільній передачі з кількома базовими станціями. Таким чином, для ефективної роботи терагерцової мережі зв'язку потрібно

створення інноваційних алгоритмів та протоколів встановлення і підтримки з'єднання, а також організації множинного доступу в канал зв'язку.

Підтримка передачі при блокуванні прямої видимості

У реальних умовах найбільші труднощі системам терагерцового діапазону частот у більшості випадків привносять рухливі перешкоди, такі як люди і транспортні засоби, які є блокаторами поширення радіосигналу. У випадку, якщо обладнання тимчасово потрапляє в стан блокування радіосигналу деяким об'єктом, то залежно від середовища розповсюдження сигналу та відстані між мобільним пристроєм і базовою станцією NR BS (англ. New Radio Base Station) цей пристрій може або випасти із зони покриття BS, або знизити свою схему модуляції та кодування так, щоб ймовірність помилки на рівні каналу не перевищувала наперед визначеного цільового значення.

Відомо рішення з одночасним підключенням користувача до кількох базових станцій мережевої інфраструктури в умовах їх щільного розміщення, що враховує блокування каналу прямої видимості перешкод при передачі на край високих частотах [30]. Однак складність його технічної реалізації на існуючій інфраструктурі мобільного зв'язку 5G призводить до додаткових затримок перемикавання каналів, оскільки рішення приймаються віддалено, та відповідно знижує загальну ефективність системи. Це пов'язано з тим, що існуюча централізована архітектура інфраструктури мереж мобільного зв'язку на сьогодні є вразливою з точки зору перевантаження обчислювальних ресурсів і тому вона не гарантує безперервне надання сервісів IoT, у випадку коли у головних серверах виникають збої програмного забезпечення. Тому, зростаюча потреба в різноманітних додатках, що потребують високої пропускної здатності, таких як мобільне потокове відео та обробка великих даних, потребує зміни принципів управління радіоресурсами в мережах мобільного зв'язку, щоб уникнути їхнього дефіциту ресурсів для забезпечення новітніх сервісів для абонентів.

З цієї точки зору представляють інтерес нові технічні рішення, запропоновані авторами в [31; 32], і рішення з інтегрованими інтелектуальними поверхнями, що реконфігуруються (Reconfigurable Intelligent Surface, RIS), які можна використовувати для допомоги у швидкому формуванні променя з використанням точного позиціонування або подолання ефектів блокування завдяки збору даних про канали в системах міліметрових та терагерцових діапазонах хвиль. Інтелектуальні поверхні, що реконфігуруються, відносно недавно стали багатообіцяючою парадигмою проєктування безпроводових мереж і режимів безпроводової передачі [33; 34]. Вони також можуть створювати інтелектуальне радіосередовище (або інтелектуальні радіоканали), тобто поширенням радіохвиль у навколишньому середовищі можна керувати для створення персоналізованого каналу зв'язку. В узагальненій моделі RIS-мережа формується між декількома БС для створення великомасштабних інтелектуальних радіоканалів, що обслуговують кількох користувачів. За відсутності керованого середовища архітектура безпроводової системи та режим передачі можуть бути оптимізовані тільки відповідно до статистичних властивостей фізичних каналів та/або інформацією, що повертається від приймача до передавача. У керованому середовищі RIS-мережі спочатку сприймають дані середовища знаходження і повертають в систему. Виходячи з цих даних, система оптимізує режим передачі та параметри RIS по інтелектуальних радіоканалах на стороні передавача, каналу та приймача. Завдяки підтримці формування променя, пов'язаної з RIS, використання інтелектуальних радіоканалів може значно покращити якість зв'язку, продуктивність системи, покриття стільника та якість зв'язку на межі стільника в безпроводових мережах. Тим не менш, через велику кількість елементів, що відбивають промені на RIS, оцінка каналу виявляється складним завданням. Крім того, потенціал RIS для локалізації отримав лише обмежене висвітлення в літературі, включаючи попередні дослідження, в яких RIS працює в режимі прийому як лінза [33] та в режимі відображення [34].

Висновки

1. Терагерцові мережі зв'язку мають ряд істотних переваг порівняно з сантиметровими та міліметровими мережами, в основному викликаними більшою шириною смуги пропускання каналу. Як проілюстровано в цій роботі, подібні переваги дозволяють терагерцовим мережам більш ефективно підтримувати деякі категорії застосунків при вирішенні задач силовими структурами спеціального призначення, у той час як окремі застосунки та сценарії використання стають можливими тільки при використанні безпроводових мереж, що працюють у терагерцовому діапазоні частот. Водночас, побудова та аналіз терагерцових мереж зв'язку для вирішення задач спеціального призначення вимагає вирішення ряду дослідницьких та інженерних завдань, частина з яких також описана в цій роботі.

2. Розроблені в цій роботі системні пропозиції для перспективних застосувань терагерцових мереж зв'язку силами спеціальних операцій або спеціального призначення є теоретичною основою створення методичного апарату:

- для обґрунтування рекомендацій щодо вибору перспективних застосувань терагерцових мереж зв'язку силами спеціальних операцій при виконанні задач спеціального призначення;

- для обґрунтування вимог до випробувальної бази експериментального дослідження.

3. Нині активно досліджуються чотири напрями вирішення критичної проблеми обмеження дальності зв'язку в терагерцовому діапазоні, а саме: проектування фізичного рівня з урахуванням відстані, використання антен ultra-massive MIMO, рефлекторних решіток, що віддзеркалюють, та інтелектуальних поверхонь RIS, що віддзеркалюють.

Напрямок подальшої роботи є розробка мобільної автономної безпроводової мережі зв'язку терагерцового діапазону частот системи безпеки особливо важливих об'єктів спеціального призначення з підтримкою мобільної мережі нового покоління.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Наритник Т. М. Аналіз терагерцових технологій та їх застосування для створення інноваційних розробок. *Електронне наукове фахове видання – журнал «Проблеми телекомунікацій»*. 2017. № 1 (20). С. 25–30. URL: <http://pt.journal.kh.ua> (дата звернення: 10.01.2024).
2. Кравчук С. О., Наритник Т. М. Телекомунікаційні системи терагерцового діапазону: монографія. Житомир: ФОП «Євенок О. О.», 2015. 208 с.
3. Сайко В. Г., Наритник Т. М. Безпроводові системи зв'язку терагерцового діапазону: монографія. Німеччина: видавництво LAP Lambert Academic Publishing, 2019. 69 с.
4. Сайко В. Г., Одарченко Р. С., Абакумова А. О., Наритник Т. М., Наконечний В. С., Домрачев В. М., Толюпа С. В., Заблоцький В. Ю., Баховський П. Ф. Мережі мобільного зв'язку нового покоління 4G/5G/6G: монографія. Київ: ТОВ «Про формат», 2021. 200 с.
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. Вип. 1. С. 45–48.
6. Исаев В. М., Кабанов И. Н., Комаров В. В., Мещанов В. П. Современные радиоэлектронные системы терагерцового диапазона. *Доклады ТУСУРа*. 2014. № 4 (34). С. 5–21.
7. Косовець М. А., Товстенко Л. М. Класичні параметричні методи цифрового спектрального аналізу характеристических функцій 3D терагерцового ЛЧМ радіолокатора. *Зв'язок*. 2016. № 4. С. 53–58.
8. Косовець Н. А., Павлов О. И. Моделирование нелинейных элементов цифрового 3D радара. *Зв'язок*. 2016. № 2. С. 40–47.
9. Кременецька Я. А. Радиюфотонні технології та пристрої телекомунікацій: монографія. К.: Друк «ТОВ Три К», 2019. 220 с.

10. Mohammed H. Alsharif. Toward 6G Communication Networks: Terahertz Frequency Challenges and Open Research Issues. *Computers, Materials & Continua*. 2021. vol. 66. no 3. pp. 2831–2839.
11. T. S. Rappaport. 6G and beyond: Terahertz communications and sensing. 2019 Brooklyn 5G Summit Keynote, Apr. 2019. [Online]. Available: URL: <https://ieeetv.ieee.org/conference-highlights/keynotetedrappaport-terahertz-communication-b5gs-2019> (дата звернення 10.01.2024).
12. Сайко В. Г., Наритник Т. М., Грищенко Л. М., Дакова Л. В., Лисенко Д. О., Кравченко В. І. Використання розподілених транспортних радіомереж терагерцового діапазону в рамках побудови мереж мобільного зв'язку нового покоління. *Зв'язок*. 2016. № 6. С. 16–21.
13. Сайко В. Г., Лисенко Д. О., Грищенко Л. М., Дакова Л. В., Кравченко В. І. Метод визначення оптимальних параметрів вікон прозорості в терагерцовому діапазоні. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. 2017. № 1. С. 11–17.
14. V. Saiko, V. Nakonechnyi, S. Toliupa, D. Serhrii. The method for reducing probability of incorrect data reception in radio channels of terahertz frequency range. *14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TSCET) Conference Proceedings*. Lviv-Slavske, Ukraine, February 20–24. 2018. S 11. № 215. # 174. 1043–1046.
15. Сайко В. Г., Наритник Т. М. Радіоканал доступу терагерцового діапазону для безпроводних радіосистем 5-го покоління. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: технічні науки*. 2018. Том 29 (68). № 1, частина 1. С. 51–55.
16. Сайко В. Г., Наритник Т. М., Баховський П. Ф. Надвисокошвидкісний канал радіодоступу терагерцового діапазону для мобільних мереж 4-го та 5-го поколінь. *Технічні вісті*. 2018. № 1 (47). С. 50–55.
17. Сайко В. Г., Наритник Т. Н., Лутчак А. В. Анализ технических решений создания коммуникационных каналов в нелицензионном частотном диапазоне. *Цифрові технології*. 2016. № 20. С. 30–45.
18. Сайко В. Г., Наконечний В. С., Толюпа С. В., Даков С. Ю. Терагерцовий канал радіодоступу для комплексів безпеки систем виявлення прихованих об'єктів. *Кібербезпека: освіта, наука, техніка*. 2018. № 1(1). С. 17–25.
19. Спосіб захисту сфокусованим випромінюванням субтерагерцового діапазону зон і об'єктів від несанкціонованого проникнення: пат. 138429 Україна: МПК (2006): G08B15/00. № 201905643; заявл. 24.05.2019; опубл. 25.11.2019, Бюл. № 22.
20. Система низькоорбітального супутникового зв'язку із міжсупутниковими каналами зв'язку терагерцового діапазону: пат. 142478 Україна. № 201911325; заявл. 21.11.2019; опубл. 10.06.2020, Бюл. № 11.
21. Kosovets M. A., Pavlov O. I., Tovstenko L. N. Integral-differential models of characteristic functions of 3D terahertz FMCW radar. *Proceedings of the International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT'2015)*. 21–24 April. 2015. Kharkiv. Ukraine, 2015. pp. 225–227.
22. M. Kosovets, O. Pavlov, L. Tovstenko. Studying the properties of different materials using Terahertz 3D Imager Radar. *Proceedings of the International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT'2017)*. 24–27 May. 2017. Kyiv. Ukraine. 2017. pp. 406–410.
23. 2023 IEEE International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo) - #61577 is now published in IEEE Xplore.
24. Ильченко М. Е., Кравчук С. А. Телекоммуникационные системы на основе высотных аэроплатформ. К.: НПП «Издательство «Наукова думка» НАН України». 580 с.
25. Рекомендация ИТУ-R P.838-3. Модель погонного ослабления в дожде, используемая в методах прогнозирования. (Вопрос МСЭ-R 201/3).
26. White paper on RF enabling 6G – Opportunities and challenges from technology to spectrum. *6G Research Visions*. April 2021. No. 13.
27. Jornet J. M., Akyildiz I. F. Channel Modeling and Capacity Analysis for Electromagnetic Wireless Nanonetworks in the Terahertz Band. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2011. Vol. 10. Pp. 3211–3221.
28. Priebe S., Kurner T. Stochastic Modeling of THz Indoor Radio Channels. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2013. Vol. 12. Pp. 4445–4455.

29. Han C., Bicen A. O., Akyildiz I. F. Multi-Ray Channel Modeling and Wideband Characterization for Wireless Communications in the Terahertz Band. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2015. Vol. 14. Pp. 2402–2412.

30. 3GPP TS 37.340 V15.2.0: NR: Multi-connectivity; Overall description, Rel. 15 – 2018. URL: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/37_series/37.340/ (accessed: 31.07.2019).

31. Сайко В., Наритник Т. Модель побудови бездротової терагерцової мережі з підвищеною надійністю зв'язку. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*. 2023. № 2(2), С. 166–181. URL: <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20230202.16> (дата звернення: 10.03.2024).

32. Сайко В. Г., Наритник Т. М., Баховський П. Ф. Модель підвищення показників якості обслуговування гетерогенної мережної інфраструктури терагерцового діапазону. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. серія: технічні науки*. 2023. Том 34 (73). № 1. С. 51–55.

33. Hu S., Rusek F., Edfors O. Beyond Massive MIMO: The Potential of Positioning With Large Intelligent Surfaces. *IEEE Trans. Signal Process.* 2018. 66 (Apr), 1761–1774.

34. He J., Wymeersch H., Sanguanpuak T., Silvén O., Juntti M. Adaptive beamforming design for mmwave RIS-aided joint localization and communication. *IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)*. 2020.