

УДК 621.396.4

Сайко В.Г.

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Наритник Т.М.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

РАДІОКАНАЛ ДОСТУПУ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДІАПАЗОНУ ДЛЯ БЕЗДРОТОВИХ РАДІОСИСТЕМ П'ЯТОГО ПОКОЛІННЯ

У статті наводяться результати аналізу особливостей розповсюдження радіохвиль і технічних аспектів побудови каналу широкошвидкісного доступу терагерцового діапазону. Запропоновано технічне рішення каналу радіодоступу в терагерцовому діапазоні із підвищеною інформаційною ефективністю. Приводиться узагальнений алгоритм прогнозування каналного та часового ресурсів такої мережі. Розроблене рішення дозволяє підвищити ефективність використання інформаційного ресурсу мережі, збільшити відстань до віддаленої абонентської мережі в кілька разів, залежно від співвідношення інформаційних потоків на вході вузла доступу мережі, збільшити кількість точок радіодоступу.

Ключові слова: канал широкошвидкісного доступу, терагерцовий діапазон, підвищена інформаційна ефективність, радіосистеми виявлення прихованих об'єктів, алгоритм прогнозування.

Постановка проблеми. Однією з перспективних сфер застосування терагерцових технологій є системи бездротового зв'язку [1]. Зокрема, передбачається створення принципово нових за габаритами, заводо захищеністю та енергоефективністю пристроїв субміліметрового та терагерцового діапазону для високошвидкісної передачі відеосигналу, для радіорелейних систем прямої видимості, для транспортних мереж мобільного зв'язку п'ятого покоління (5G) і радарів, для високоточного виявлення і розпізнавання малорозмірних швидкісних цілей, а також для радіометричних систем виявлення прихованих об'єктів. Розробка нових типів сенсорів на базі терагерцових технологій дозволить отримувати більш точну і детальну оперативну інформацію про стан контрольованого об'єкта або місцевості. Такі розробки ведуться в США під егідою DARPA, в Англії, Німеччині, Китаї для застосування у військових і цивільних цілях. Розвиток елементної бази радіоелектронних пристроїв, широке впровадження цифрової техніки формування і обробки сигналів дозволяють по-новому підійти до вирішення багатьох завдань, які раніше стримували втілення розробок телекомунікаційних систем суб- і терагерцового діапазонів. Зазначені обста-

вини роблять цей діапазон унікальним для побудови телекомунікаційних систем і мереж, у т. ч. для мереж мобільного зв'язку нового покоління. В останні роки тенденція використання діапазону терагерцових радіохвиль набула, порівняно з минулими роками, стійкого характеру. Це пояснюється успіхами в розробці технічно досконалих пристроїв і систем [1]. Найважливішою їх перевагою є широкий робочий діапазон частот. Вузькі діаграми спрямованості антен у цьому діапазоні сприяють підвищенню скритності зв'язку і придушенню.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вичерпаність ліцензійного частотного ресурсу та стрімке підвищення потреби населення в доступі до інформаційних мереж потребує дослідження використання в мережах доступу неліцензійного частотного ресурсу, зокрема терагерцового частотного діапазону. У безлічі робіт [2–7] висвітлено результати досліджень поширення міліметрових, частково субміліметрових і терагерцових хвиль. Основні особливості терагерцового випромінювання, які відрізняють його від мікрохвильового й оптичного, проявляються, головним чином, під час його взаємодії з речовиною. Зокрема, у терагерцовому діапазоні знаходяться резонанси

обертальних і коливальних переходів молекул багатьох речовин, що дозволяє ідентифікувати діелектричне середовище різного агрегатного стану. Найбільш придатними для освоєння під мобільні телекомунікаційні системи є вікна прозорості, які можна визначити за певним рівнем загасання. Згідно з [7], таким граничним рівнем може бути 100 дБ/км. Тоді маємо п'ять вікон прозорості, пропускна здатність у смугах вікон терагерцового діапазону може досягати сотень Гбіт/с. Причому, чим менша відстань радіотраси, тим меншого впливу зовнішніх факторів і тим більшої пропускної здатності можна досягти. Але покриття послугами значної території мережею каналів терагерцового діапазону ускладнюється відсутністю на сьогодні передавальних трактів прийнятної вартості та потрібної потужності і малошумлячих приймальних трактів. У районних центрах є значна кількість абонентів, територіально дислокованих у центральній частині міста. Якщо в містах-обласних центрах існує досить розвинута оптоволоконна мережа, по якій зазвичай реалізується доступ до інформаційних ресурсів, то в невеликих містах, у районних центрах та прилягаючих сільських населених пунктах, де невелика щільність потенційних абонентів, зазвичай відсутні оптоволоконні мережі, по яким може бути реалізований якісний доступ до інформаційних ресурсів. Вичерпаність ліцензійного частотного ресурсу суттєво ускладнює надання таких послуг на вказаних вище територіях. Тому пропонується для абонентського доступу в каналах мережі backhaul (канал мобільного фіксованого радіодоступу) використовувати неліцензійний частотний ресурс. У даному разі – терагерцовий діапазон (140 ГГц). Значні втрати енергії сигналу такого частотного діапазону на трасі розповсюдження потребують використання антен із коефіцієнтом підсилення до 50 дБ, у діапазоні близько 140 ГГц, кут розкриття діаграми спрямованості менше 1° . У [8] пропонується реалізація доступу в форматі, згідно зі стандартом IEEE 802.11n, із подальшим перенесенням робочого діапазону, в якому використовується програмно-апаратні засоби Wi-Fi, у терагерцовий діапазон – 140 ГГц. Приймальні та передавальні лінійні тракти забезпечують перенесення частотного діапазону близько 2,7 ГГц у діапазон ≈ 140 ГГц під час передачі сигналу і понижують частоту зі ≈ 140 ГГц до $\approx 2,7$ ГГц під час прийому сигналу. Центральна (далі – ЦС) та абонентські станції (далі – АС) з'єднуються каналами мережі backhaul у терагерцовому діапазоні (≈ 140 ГГц). У якості АС використовується

вузол доступу Wi-Fi, до якого підключені приймально-передавальні антени та лінійні тракти АС. Технічним рішенням [9] розширення зони обслуговування (далі – ЗО) точки доступу реалізується створенням однорангової мережі Mesh, доступ до якої надається через вузлову точку доступу, яка може входити до складу АС. Недоліком такого технічного рішення є недостатній розмір ЗО. Збільшення довжини каналу мережі backhaul реалізуються в системі широкосмугового доступу [10].

У [11] запропонований формувач інформаційного потоку, до складу якого входять 8 приймальних та 8 передавальних трактів, що базуються на чіпах Mikrotik R52nM, які частотно-мультиплексовані і за використання модуляції 64-QAM реалізують швидкість потоку даних 1,2 Гбіт/с у форматі 802.11n. Обробка приймального і передавального потоків лінійними трактами дозволяє створити канал передачі терагерцового діапазону, в якому вказаний вище формувач використовується як модем. Підключення такого модему до обох кінців каналу передачі даних дозволяє створити прольот радіорелейної лінії зі швидкістю інформаційного потоку 1,2 Гбіт/с. Такий канал був розроблений для терагерцового діапазону (в діапазоні 140 ГГц) [12–14]. Він складається із приймально-передавальних антен, лінійних трактів та блоків обробки сигналів на базі формувача центральної станції. До формувача інформаційного потоку центральної станції введено n передавальних та n приймальних антен, які обслуговують відповідні ділянки зони покриття, а склад вузлів абонентської мережі відповідає складу та параметрам відповідних частин центральної станції. Інформаційний ресурс через окремий порт підключається до приймально-передавальної антени, яка направлена на відповідну зону покриття. Інформаційні потоки у форматі IEEE 802.11n у кількості до 8 передаються на трасі розповсюдження до приймального вузла відповідної станції. Для більш ефективного використання інформаційного ресурсу під час надання послуг абонентського доступу в якості АС використовувався вузол доступу на базі чіпа Mikrotik R52nM.

Постановка завдання. На сьогодні дослідження сфокусовано на збільшенні пропускної здатності каналу зв'язку у разі використання надширокосмугових сигналів, які займають весь терагерцовий діапазон [1]. Однак, варто зазначити, що в багатьох перспективних додатках для мереж 5 покоління дальність зв'язку відіграє більш значиму роль, ніж швидкість передавання

даних. Таким чином, розробка методів та технічних рішень збільшення радіусу дії окремого вузла зв'язку терагерцового діапазону є важливою науково-технічною задачею.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Під час реалізації широкопasmового доступу абонентів до інформаційних ресурсів інформаційна швидкість в середньому на одного абонента складе близько 3–4 Мбіт/с. Тобто кількість одночасно працюючих абонентів у мережі складе ≈ 40 . Збільшення кількості абонентів вимагає або підвищення наданого інформаційного ресурсу, або зниження інформаційної швидкості потоку, що надається абонентові (зниження якості передачі). Збільшення загального інформаційного ресурсу обмежується параметрами тракту backhaul, зокрема рівнем вихідної потужності підсилювача передавального тракту. Відсутність на сьогодні передавального тракту (вихідного підсилювача) прийнятної вартості та рівня вихідної потужності в терагерцовому діапазоні (140 ГГц) та малошумлячого вхідного підсилювача приймального тракту суттєво обмежує реалізацію потрібного розміру каналу мережі backhaul під час передачі по одному каналу кількох інформаційних потоків.

Технічні аспекти побудови каналу терагерцового діапазону. Реалізація широкопasmового доступу вимагає надання значного інформаційного ресурсу кожному абоненту, що за недостатнього наданого ресурсу породжує зниження ефективності системи в плані надання послуг. Відсутність апаратних засобів приймальних та передавальних трактів прийнятної вартості під час використання в каналах мережі backhaul неліцензійного терагерцового частотного діапазону приводить до суттєвого зменшення довжини каналу мережі backhaul, тобто до зменшення розміру зони мережі. Тому для усунення даних недоліків пропонується нове технічне рішення для збільшення швидкості інформаційного потоку, що надається в середньому кожному абоненту, збільшення кількості абонентів на території, що покривається точкою доступу, і можливість розширення території обслуговування.

Як відомо, розгортання мережі MESH в районі обслуговування точкою доступу Wi-Fi не вирішує проблеми через недостатній інформаційний ресурс каналу у разі використання модему на базі чіпа Mikrotik R52nM у стандарті IEEE 802.11n (150 Мбіт/с). Його підвищення шляхом підключення додаткових інформаційних потоків в одному каналі приводить до зменшення довжини

каналу мережі розміру backhaul та недостатньої енергетики через відсутність апаратних засобів трактів. Крім того, мережа MESH розгортається для розширення розмірів зони обслуговування, що не є предметом даної статті.

У цьому технічному рішенні пропонується створювати не однорангову мережу MESH, а серверну, в якій канали backhaul створюються для додаткових інформаційних потоків, що підключаються до окремих точок доступу. Території покриття такими точками доступу перекриваються. Величина та дислокація перекритої території визначається за результатами дослідження обслуговуваної території.

Як вказано вище, у технічному рішенні [9] пропонується до різних точок доступу підключати один і більше інформаційних потоків. Недоліки такого технічного рішення – недостатній інформаційний ресурс у разі підключення одного потоку та зменшення довжини каналу передачі під час подачі кількох потоків. Ці недоліки, пов'язані із недостатнім енергетичним ресурсом, суттєво обмежують використання однорангової мережі MESH. Тому пропонується його компенсувати подачею різних інформаційних потоків на різні точки доступу. Керування такою системою може виконуватися за принципом серверної мережі.

Територіальна дислокація точок доступу дозволяє: підвищити інформаційний ресурс, що надається абонентам обслуговуваної території; забезпечити утримання енергетичного ресурсу (енергія на біт), тобто довжина каналу backhaul зберігається; забезпечити розширення розміру обслуговуваної території.

На рис. 1 показано принцип обслуговування такою системою, де:

- 1 – центральна станція;
- 2 – територія покриття основним потоком;
- 3 – територія покриття додатковим потоком, тобто територія розширення зони обслуговування;
- 4 – територія підвищення якості інформаційних послуг.

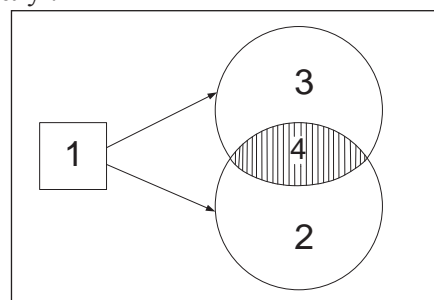


Рис. 1. Структура принципу обслуговування абонентів розробленою системою

Збільшення перетинання територій 2 і 3 приводить до зменшення загальної території обслуговування (тобто зростає розмір території 4 за рахунок зменшення території 3). Це приводить до підвищення інформаційного потоку в основній зоні. Тобто частина інформаційного ресурсу потоку 1–3 передається в зону 2 і збільшує сумарний інформаційний ресурс в основній зоні (зоні 2).

Узагальнений алгоритм прогнозування каналного та часового ресурсів інноваційного технічного рішення. У процесі розгортання системи каналів передачі терагерцового діапазону одне з основних місць займає розподіл каналного і часового ресурсу між окремими секторами (напрямами) системи бездротового зв'язку, що обумовлено зміною якісних і кількісних характеристик трафіку. Ще раз треба зазначити, що особливістю таких радіосистем є те, що доступ до каналів передачі організовується за запитом, переданому передавальною стороною у службовому повідомленні. Іншими словами, маршрутизатор абонентської точки доступу формує розклад можливих передач, тобто виробляє канално-тимчасове прогнозування ресурсу, що призводить до таких негативних наслідків:

- змагальність у передачі даних між окремими напрямками;
- неоптимальне використання канално-часового ресурсу.

Отже, виникає завдання оптимізації прогнозування канално-часового ресурсу в системах даного типу. Необхідність економії канално-часового ресурсу забезпечує підвищення якісних характеристик передачі і прийому сигналів.

Однак, слід зазначити також і про складність вирішення такого завдання, яка обумовлена відсутністю ефективних алгоритмів її рішення. Найбільш ефективним способом прогнозування канално-часового ресурсів є алгоритми теорії послідовних рішень, динамічного програмування Беллмана, наближений «евристичний» метод Боксу. Головний недолік останнього полягає в маловивченості питання збіжності запропонованого алгоритму. Перші два методи не завжди дозволяють отримати точне рішення, що надається для здійснення прогнозування мережі бездротового зв'язку, побудованого за даним типом. Тому пропонується вирішити задачу прогнозування канално-часового ресурсів як оптимізаційну задачу із залученням математичного апарату методу лінійного програмування [15].

Висновки. Таким чином, для підвищення інформаційної ефективності вузла зв'язку у статті запропоновано технічне рішення побудови каналу бездротового ширококутового абонентського доступу до інформаційних ресурсів із використанням каналу терагерцового діапазону, яке зумовлює кращу ефективність системи з погляду дальності зв'язку та пропускної здатності каналу. Таке інноваційне рішення дозволяє підвищити ефективність використання інформаційного ресурсу мережі, збільшити відстань до віддаленої абонентської мережі в кілька разів залежно від співвідношення інформаційних потоків на вході вузла доступу мережі, збільшити кількість точок радіодоступу.

Список літератури:

1. Кравчук С.О., Наритник Т.М. Телекомунікаційні системи терагерцового діапазону: монографія. Житомир: ФОП Євенок О.О., 2015. 208 с.
2. Быстров Р.П., Соколов А.В., Чеканов Р.Н. Дальность действия миллиметровых радиолокационных станций в дождях. Москва: Радиотехника. 2005. № 1. С. 19–23.
3. Быстров Р.П., Соколов А.В. Распространение короткой части миллиметровых и субмиллиметровых волн: возможные области их применения. Москва. Радиотехника. 2006. № 5. С. 11–18.
4. Preissner F.J. Terahertz band. Symp. Millimeter and Submillimeter Wave Propagation and Circuits. AGARD Conf. Proc. 1972. № 245. p. 48/1.
5. Сайко В.Г., Наритник Т.М. Радіоканал доступу терагерцового діапазону. Розбудова економічної освіти та формування основ фінансової грамотності учнівської молоді – основа розвитку громадянського суспільства та становлення економіки знань: Матеріали міжнародної науково – практичної конференції (Київ, 29–30 вересня 2017 р.). Київ: КНУ імені Тараса Шевченка, 2017. С. 149–151.
6. Мальшенко Ю.И., Левадный Ю.В. Оценка воздействия дождей на параметры радиолокационных станций микроволнового диапазона с учетом метеостатистических сведений о продолжительности выпадения дождей. ИРЭАН Украины: Радиофизика и электроника. 2012. № 1. С. 36–40.
7. Grigat M. Link budget considerations for THz Fixed Wireless links. IEEE Trans. on Terahertz science and technology. 2012. Vol. 2. № 2. P. 567–572.
8. Мікрохвильова система ширококутового бездротового доступу з підвищеною щільністю покриття зони обслуговування UMDS-TH: пат. 109005 Україна: МПК H04B 7/00. № u2011600935; заявл. 05.02.16; опубл. 10.08.16, Бюл. № 15. 5 с.

9. Мікрохвильова система широкосмугового бездротового доступу UMDS-Mesh: пат. 110181 Україна: МПК H04B 7/165. № u201603788; заявл. 08.04.16; опубл. 26.09.16, Бюл. № 18. 5 с.
10. Мікрохвильова система широкосмугового доступу UMDS-PP: пат. 114590 Україна: МПК H04B 7/00. № u201603788; заявл. 30.09.16; опубл. 10.03.17, Бюл. № 13. 6 с.
11. Приймально-передавальний формувач інформаційного потоку для каналу зв'язку із підвищеною спектральною ефективністю та пропускнуою здатністю: пат. 84923 Україна: МПК H04B 7/165. № u201303679; заявл. 26.03.13; опубл. 11.11.13, Бюл. № 21. 5 с.
12. Сайко В.Г., Наритник Т.М., Казіміренко В.Я., Дакова Л.В., Грищенко Л.М., 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. Канал безпроводного широкосмугового абонентського доступу до інформаційних ресурсів із використанням каналу терагерцового діапазону: пат. 104299 Україна: МПК H04B 7/165. № u201506281; заявл. 25.06.15; опубл. 25.01.16, Бюл. № 2. 5 с.
14. Сайко В.Г. Радиорелейные системы терагерцового диапазона для радиометрических систем обнаружения скрытых объектов. Проблемы кибербезопасности информационно-телекоммуникационных систем. Материали II науково-практичної конференції (Київ, 23–24 березня 2017 р.). Київ: КНУ імені Тараса Шевченка, 2017. С. 190–193.
15. Вентцель Е.С. Исследование операций: задачи, принципы, методология. Москва, Дрофа, 2006. 206 с.

РАДИОКАНАЛ ДОСТУПА ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛЯ БЕСПРОВОДНЫХ РАДИОСИСТЕМ ПЯТОГО ПОКОЛЕНИЯ

В статье приводятся результаты анализа особенностей распространения радиоволн и технических аспектов построения канала широкополосного доступа терагерцового диапазона. Предложено техническое решение канала радиодоступа терагерцового диапазона с повышенной информационной эффективностью. Приводится обобщенный алгоритм прогнозирования канального и временного ресурсов такой сети. Разработанное решение позволяет повысить эффективность использования информационного ресурса сети, увеличить расстояние до удаленной абонентской сети в несколько раз, в зависимости от соотношения информационных потоков на входе узла доступа сети, увеличить количество точек радиодоступа.

Ключевые слова: канал широкополосного доступа, терагерцовый диапазон, повышенная информационная эффективность, радиосистемы выявления скрытых объектов, алгоритм прогнозирования.

THZ BAND WIRELESS ACCESS CHANNEL FOR 5G WIRELESS SYSTEMS

This article provides the results of radio wave spreading feature analysis and technical aspects of the THz-band wireless broadband access channel design. Technical solution for high data efficiency THz-band wireless access channel is being provided here. Generalized channel and time resource prediction algorithm for such systems is being described here. The developed solution allows to increase the network's data use efficiency, increase the distance to remote subscriber network in some times depending on the network access node's input data stream ratio, and increase the amount of wireless access points.

Key words: broadband channel, THz, terahertz, T-ray, submillimeter, high data efficiency, prediction algorithm, hidden object detection radio system.