



УДК 621.361

Сайко Володимир Григорович

д-р техн. наук, професор, професор кафедри прикладних інформаційних систем
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна
OrcID: 0000-0002-3059-6787
vgsaiko@gmail.com

Наконечний Володимир Сергійович

д-р техн. наук, старший науковий співробітник, професор кафедри кібербезпеки та захисту інформації
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна
OrcID: 0000-0002-0247-5400
Nvc2006@i.ua

Толіупа Сергій Василійович

д-р техн. наук, професор кафедри кібербезпеки та захисту інформації
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна
OrcID: 0000-0002-1919-9174
tolupa@i.ua

Даков Сергій Юрійович

аспірант
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна
OrcID: 0000-0001-9413-3709
dacov@ukr.net

ТЕРАГЕРЦОВИЙ КАНАЛ РАДІОДОСТУПУ ДЛЯ КОМПЛЕКСІВ БЕЗПЕКИ СИСТЕМ ВИЯВЛЕННЯ ПРИХОВАНИХ ОБ'ЄКТІВ

Анотація. Однією з перспективних сфер застосування терагерцових технологій є системи бездротового зв'язку. Зокрема передбачається створення принципово нових за габаритами, завдозахищеності та енергоефективності пристроїв субміліметрового та терагерцового діапазону для високошвидкісної передачі відеосигналу, для радіорелейних систем прямої видимості, для транспортних мереж мобільного зв'язку п'ятого покоління 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 дозволять 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. На сьогоднішній день для таких бездротових систем дослідження сфокусовано на збільшенні пропускну здатності каналу зв'язку при використанні надширококутних сигналів, які займають весь терагерцовий діапазон. Однак, варто зазначити, що в багатьох перспективних додатках для мереж нового покоління дальність зв'язку відіграє більш значиму роль, ніж швидкість передавання даних. Метою статті є підвищення інформаційної ефективності вузла зв'язку шляхом розробки інноваційного рішення для побудови каналу безпроводного ширококутового абонентського доступу до інформаційних ресурсів із використанням каналу терагерцового діапазону, яке зумовлює кращу ефективність системи з точки зору дальності зв'язку та пропускну здатності каналу. В статті наводяться результати аналізу технічних аспектів побудови каналу ширококутового доступу терагерцового діапазону для комплексів безпеки в системах виявлення прихованих об'єктів. Запропоновано технічне рішення каналу радіодоступу в терагерцовому діапазоні із підвищеною інформаційною ефективністю та узагальнений алгоритм прогнозування каналного та часового ресурсів такої мережі.



Ключові слова: терагерцові технології; мобільний зв'язок; транспортні мережі зв'язку; системи виявлення прихованих об'єктів; радари; канал ширококутового доступу; терагерцовий діапазон; підвищена інформаційна ефективність; радіосистеми виявлення прихованих об'єктів.

1. ВСТУП

Постановка проблеми. Однією з перспективних сфер застосування терагерцових технологій є системи бездротового зв'язку [1]. Зокрема передбачається створення принципово нових за габаритами, завадозахищеності та енергоефективності 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 дозволять отримувати більш точну і детальну оперативну інформацію про стан контролюваного 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 обставини роблять цей діапазон унікальним для побудови телекомунікаційних систем і мереж, в тому числі для радіометричних систем виявлення прихованих об'єктів. В останні роки тенденція використання діапазону терагерцового радіохвиль придбала на відміну від минулих років стійкий характер. Це пояснюється успіхами в розробці технічно досконалих пристроїв і систем [1]. Найважливішою їх перевагою є широкий робочий діапазон частот. Вузькі діаграми спрямованості антен в цьому діапазоні сприяють підвищенню скритності зв'язку і придушення. На сьогоднішній день для таких бездротових систем дослідження сфокусовано на збільшенні пропускну здатності каналу зв'язку при використанні надширококутових сигналів, які займають весь терагерцовий діапазон [1]. Однак, варто зазначити, що в багатьох перспективних додатках для мереж 5-го 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.

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 терагерцовому частотному діапазоні. В даний час в безлічі робіт [2-7,14] отримано значні результати з досліджень поширення міліметрових, частково субміліметрових і терагерцових хвиль. Основні особливості терагерцового випромінювання, які відрізняють його від мікрохвильового і оптичного, проявляються, головним чином, під час його взаємодії з речовиною. Зокрема, в 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 і при цьому 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 досягати. Але покриття послугами значної території мережею каналів терагерцового діапазону ускладнюється відсутністю на сьогодні передавальних трактів прийнятної вартості та потрібної потужності і малOSHумлячих приймальних трактів. В районних центрах є значна кількість абонентів, територіально дислокованих звичайно в центральній частині міста. Якщо в містах обласних центрів існує досить розвинута оптоволоконна мережа по якій зазвичай реалізується доступ до інформаційних ресурсів, то в невеликих містах, в районних центрах, та в 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. В дійсному випадку – терагерцовий діапазон (140 ГГц). Значні втрати енергії сигналу такого частотного діапазону на трасі розповсюдження потребують використання антен із коефіцієнтом підсилення до 50 дБ, в діапазоні біля 140 ГГц та кут розкриття діаграми спрямованості менше 10.

В [8,14] пропонується реалізація доступу в форматі згідно стандарту IEEE 802.11n і з подальшим перенесенням робочого діапазону, в якому використовується програмно-апаратні засоби Wi-Fi, в терагерцовий діапазон – 140 ГГц. Технічним рішенням [9,14] розширення зони обслуговування (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 ширококутового доступу [10]. В [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 при використанні модуляції 64-QAM реалізує швидкість потоку даних 1,2 Гбіт/с в 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 із швидкістю інформаційного потоку 1,2 Гбіт/с. Такий канал був розроблений для терагерцового діапазону (в діапазоні 140 ГГц) [11,12,14]. Він складається із приймально-передавальних антен, лінійних трактів та блоків обробки сигналів на базі формувача центральної станції. При цьому 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 по окремому порту підключається до приймально-передавальної антени, яка направлена на відповідну зону покриття. Інформаційні потоки в форматі IEEE 802.11n в кількості до 8-ми передаються на трасі розповсюдження до приймального вузла відповідної станції. Для більш ефективного використання інформаційного ресурсу при наданні послуг абонентського доступу в якості абонентської станції використовувався вузол доступу на базі чіпа Mikrotik R52nM.



Мета статті. Підвищення інформаційної ефективності вузла зв'язку шляхом побудови каналу безпроводного ширококутового абонентського доступу до інформаційних ресурсів із використанням інноваційних рішень каналу терагерцового діапазону, яке зумовлює кращу ефективність системи з точки зору дальності зв'язку та пропускної здатності каналу.

2. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Канал ширококутового радіодоступу в терагерцовому діапазоні із підвищеною інформаційною ефективністю. При реалізації ширококутового доступу абонентів до інформаційних ресурсів інформаційна швидкість в середньому на одного абонента складе біля 3–4 Мбіт/с. Тобто кількість одночасно працюючих в мережі складе ≈ 40 абонентів. Збільшення кількості абонентів вимагає або підвищення наданого інформаційного ресурсу, або зниження інформаційної швидкості потоку, що надається абоненту. Зменшення інформаційної швидкості потоку, що надається абоненту це зниження якості передачі. Збільшення загального інформаційного ресурсу в дійсному випадку 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 при передачі по одному каналу кількох інформаційних потоків.

2.1 ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНІЧНІ АСПЕКТИ ПОБУДОВИ КАНАЛУ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДІАПАЗОНУ

Реалізація ширококутового доступу вимагає надання значного інформаційного ресурсу на кожного абонента, що при недостатньому наданому ресурсу породжує зниження ефективності системи в плані надання послуг. Відсутність на сьогодні апаратних засобів приймальних та передавальних трактів прийнятної вартості при використанні 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 в першу чергу через недостатній інформаційний ресурс каналу при використанні модему на базі чіпа Mikrotik R52nM в 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 головним чином для розширення розмірів зони обслуговування, що не є предметом даної статті.

В 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 по результатам дослідження обслуговуваної території.

Як вказано вище, в технічному рішенні [9,14] пропонується до різних точок доступу підключати від одного і більше інформаційних потоків. Недоліки такого технічного рішення – це недостатній інформаційний ресурс при підключенні одного потоку та зменшення довжини каналу передачі при подачі кількох потоків. Ці недоліки, зв'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 по принципу 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.

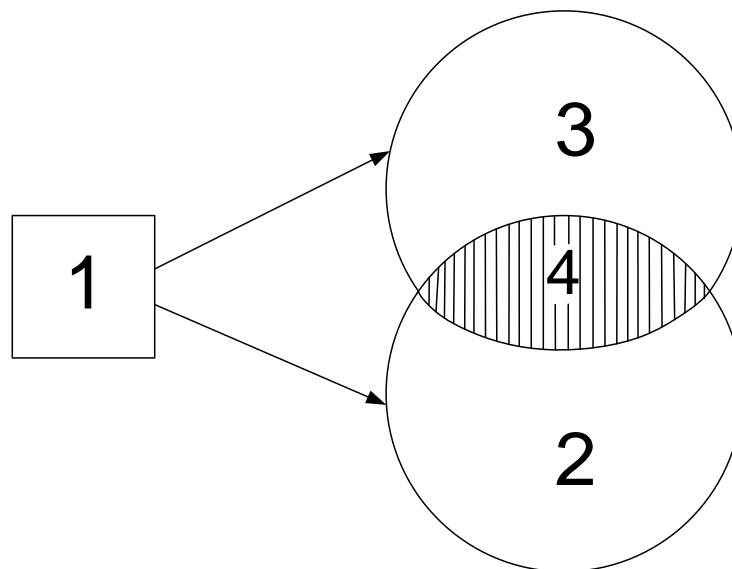


Рис.1. Структура принципу обслуговування абонентів розробленою системою

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).



2.2 УЗАГАЛЬНЕНИЙ АЛГОРИТМ ПРОГНОЗУВАННЯ КАНАЛЬНОГО 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 наступних 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 складність вирішення такого завдання, яка обумовлена відсутністю досить 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 мало вивченості 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 [13,14].

3. ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Таким чином, запропоноване інноваційне рішення дозволяє підвищити ефективність використання інформаційного ресурсу мережі для радіометричних систем виявлення прихованих об'єктів, збільшити відстань до віддаленої абонентської мережі в кілька разів в залежності від співвідношення інформаційних потоків на вході вузла доступу мережі, збільшити кількість точок радіодоступу. Подальші дослідження пов'язані з розробкою методики енергетичного розрахунку радіоканалу ТГц діапазону для бездротових систем 4-го та 5-го поколінь. На даний час велика кількість матеріалів, стосовно методики розрахунку роботи цифрових радіорелейних ліній на терагерцових хвилях розглядається в різних рекомендаціях МСЕ, але до єдиного виду так і не зведені. Для розробки методики енергетичного розрахунку радіоканалу ТГц діапазону необхідно вирішити цілий ряд завдань, виконуючи їх в певній послідовності.



СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] С. О. Кравчук і Т. М. Наритник, *Телекомунікаційні системи терагерцового діапазону: монографія*, Житомир, ФОП «Євенок О. О.», 2015.
- [2] Р. Быстров і А. Соколов, «Дальность действия миллиметровых радиолокационных станций в дождях», *Радиотехника*, №1, сс. 19–23, 2005.
- [3] Р. Быстров і А. Соколов, «Распространение короткой части миллиметровых и субмиллиметровых волн: возможные области применения», *Радиотехника*, №5, сс. 11–18, 2006.
- [4] F. Preissner, “Terahertz band. Symp. Millimeter and Submillimeter Wave Propagation and Circuit,” *AGARD Conf. Proc.*, no. 245, pp. 48/1, 1972.
- [5] В. Сайко і Т. Наритник, «Радіоканал доступу терагерцового діапазону», *I Міжн. наук.-практ. конф. Розбудова екон. освіти та формування основ фінансової грамотності учнівської молоді — основа розвитку громадянського суспільства та становлення економіки знань*, Київ, сс. 149–151, 2017.
- [6] Ю. Малышенко і Ю. Левадный, «Оценка воздействия дождей на параметры радиолокационных станций микроволнового диапазона с учетом метеостатистических сведений о продолжительности выпадения дождей. ИРЭ НАН Украины», *Радиофизика и электроника*, №1, сс. 36–40, 2012.
- [7] M. Grigat, “Link budget considerations for THz Fixed Wireless links,” *IEEE Trans. on Terahertz science and technology*, vol. 2, no. 2, pp. 567–572, 2012.
- [8] В. Г. Сайко, Т. М. Наритник, В. Я. Казіміренко, В. О. Бреславський і А. В. Єрмаков, «Мікрохвильова система широкопугового бездротового доступу з підвищеною щільністю покриття зони обслуговування UMDS-TH», МПК H04B 7/00, пат. №109005, серп. 2016.
- [9] В. Г. Сайко, Т. М. Наритник, В. Я. Казіміренко, В. Л. Поршнев, Д. О. Лисенко і А. В. Єрмаков, «Мікрохвильова система широкопугового безпроводового доступу UMDS-Mesh», МПК H04B 7/165, пат. №110181, вер. 2016.
- [10] В. Сайко, Т. Наритник, В. Казіміренко, Л. Дакова, Л. Грищенко і В. Кравченко, «Використання розподілених транспортних радіомереж терагерцового діапазону в рамках побудови мереж мобільного зв'язку нового покоління», *Зв'язок*, №6, сс. 16–21, 2016.
- [11] В. Г. Сайко, Т. М. Наритник, В. Я. Казіміренко і О. В. Лутчак, «Канал безпроводного широкопугового абонентського доступу до інформаційних ресурсів із використанням каналу терагерцового діапазону», МПК H04B 7/165, пат. №104299, січ. 2016.
- [12] В. Сайко і Т. Наритник, “Радиорелейные системы терагерцового диапазона для радиометрических систем обнаружения скрытых объектов”, *II наук.-практ. конф. Проблеми кібербезпеки інформаційно-телекомунікаційних систем*, Київ, сс. 190–193, 2017.
- [13] Е. С. Вентцель, *Исследование операций: задачи, принципы, методология*, Москва, Дрофа, 2006.
- [14] В. Г. Сайко, В. Я. Казіміренко, Л. М. Грищенко, В. І. Кравченко, «Канал широкопугового радіодоступу в терагерцовому діапазоні для радіосистем виявлення прихованих об'єктів», *Сучасний захист інформації*, №2(30), сс. 72–78, 2017.



UDC 621.361

Volodymyr Saiko

doctor of technical science, professor
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine
OrcID: 0000-0002-3059-6787
vgsaiko@gmail.com

Volodymyr Nakonechnyi

doctor of technical science, professor
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine
OrcID: 0000-0002-0247-5400
Nvc2006@i.ua

Serhii Tolyupa

doctor of technical science, professor
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine
OrcID: 0000-0002-1919-9174
tolupa@i.ua

Serhii Dakov

post-graduate student
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine
OrcID: 0000-0001-9413-3709
dacov@ukr.net

**TERACHERTSOVYI CHANNEL RADIODOSTUPU FOR COMPLEX SYSTEM
WITHOUT SYSTEMS THE BELL OF THE OBJECTS**

Abstract. One of the perspective use of THz (submillimeter) technologies is the wireless communication systems. In particular, it will lead to development of the submillimeter/THz band devices with brand new size, interference immunity and energy efficiency, for high speed video signal broadcasting, line of sight relay, for 5G cell phone transport networks, high precision radars for small size, high velocity target detection and tracking, and hidden object detection radiometric systems. Nowadays, the research of such wireless systems is focused on increase of communication channel bandwidth using superbroadband signals, which occupy all the THz band. However, it's worth to mention, that in many perspective applications of 5th generation networks, the range has more important role, than the data transmission speed. The goal of the article is the increase of communication center's information efficiency by the development of innovative solution for construction of the wireless broadband subscriber channel for information resource access using THz band, which provides greater efficiency in the channel's range and bit rate. The results of THz-band wireless broadband access technical solution analysis are being provided here. The implementation of broadband access requires designating significant informational resource amount per subscriber, which, if the designated resource amount is not enough, leads to decrease in efficiency in service providing. Today's lack of transmitter/receiver hardware of decent cost, when using unlicensed THz frequencies in backhaul network channels, leads to significant decrease of backhaul network channel length, which means decrease of the network zone size. Therefore, to avoid these flaws, the new technical solution for every subscriber's bit rate increase, the subscriber amount increase on the territory covered by the access point, and the service coverage territory expansion possibility, is being provided here. During the THz-band channel broadcast system deployment process, one of the main issue is the channel and time resource distribution between the wireless communication system's different sectors (directions), which is due to the change of traffic quality and amount. A generalized channel and time resource amount prediction algorithm is being provided for high efficiency wireless access channel. The control of such system can be done similarly to the server network. Territorial access point location allows: the increase of data amount being provided to the covered territory subscribers; the possibility to hold energy resource (energy per bit), which means the backhaul channel length is being preserved; the possibility of covered territory size expansion. Generally, the developed solution allows to increase the new generation wireless system data use efficiency, to increase the distance



to remote subscriber network in some times, depending on the network access node's input data stream ratio, and to increase the amount of wireless access points.

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

REFERENCES

- [1] S. O. Kravchuk and T. M. Narytnyk, *Telekomunikatsiyni systemy terahertsovoho diapazonu: monohrafiya [Telecommunication Systems of the Terahertz Range: Monograph]*, Zhytomyr, FOP "Yevenok O. O.", 2015. (In Ukrainian).
- [2] R. Bystrov and A. Sokolov, "Dal'nost' deistviya millimetrovykh radiolokatsionnykh stantsii v dozhdyakh [Range of Millimeter Radar Stations in Rains]," *Radiotekhnika*, no. 1, pp. 19–23, 2005. (In Russian).
- [3] R. Bystrov and A. Sokolov, "Rasprostranenie korotkoi chasti millimetrovykh i submillimetrovykh voln: vozmozhnye oblasti ikh primeneniya [Distribution of a short part of millimeter and submillimeter waves: possible areas of their application]," *Radiotekhnika*, no. 5, pp. 11–18, 2006. (In Russian).
- [4] F. Preissner, "Terahertz band. Symp. Millimeter and Submillimeter Wave Propagation and Circuit," *AGARD Conf. Proc.*, no. 245, pp. 48/1, 1972.
- [5] V. Sayko and T. Narytnyk, "Radiokanal dostupu terahertsovoho diapazonu [Therapeutic range access radio channel]," *I Mizhn. nauk.-prakt. konf. Rozbudova ekon. osvity ta formuvannya osnov finansovoyi hramotnosti uchniv'skoyi molodi — osnova rozvytku hromadyans'koho suspil'stva ta stanovlennya ekonomiky znan'*, Kyiv, pp. 149–151, 2017. (In Ukrainian).
- [6] Yu. Malysenko and Yu. Levadnyi, "Otsenka vozdeistviya dozhdei na parametry radiolokatsionnykh stantsii mikrovolnovogo diapazona s uchetom meteostaticheskikh svedenii o prodolzhitel'nosti vypadeniya dozhdei. IRE NAN Ukrainy [Estimation of the influence of rains on parameters of radar stations of the microwave range, taking into account meteorological data on the duration of rainfall. IRE National Academy of Sciences of Ukraine]," *Radiofizika i elektronika*, no. 1, pp. 36–40, 2012. (In Russian).
- [7] M. Grigat, "Link budget considerations for THz Fixed Wireless links," *IEEE Trans. on Terahertz science and technology*, vol. 2, no. 2, pp. 567–572, 2012.
- [8] V. H. Sayko, T. M. Narytnyk, V. Ya. Kazimirenko, V. O. Breslavs'kyy and A. V. Yermakov, «*Mikrokhvyl'ova systema shyrokosmuhovoho bezdrotovoho dostupu z pidvyshchenoyu shchil'nistyu pokryttya zony obsluhovuvannya UMDS-TN [Microwave broadband wireless access system with high density coverage UMDS-TN service area]*," MPK N04V 7/00, pat. no. 109005, Aug. 2016. (In Ukrainian).
- [9] V. H. Sayko, T. M. Narytnyk, V. Ya. Kazimirenko, V. L. Porshnyev, D. O. Lysenko and A. V. Yermakov, «*Mikrokhvyl'ova systema shyrokosmuhovoho bezprovodovoho dostupu UMDS-Mesh [UMDS-Mesh broadband wireless access microwave]*," MPK N04V 7/165, pat. no. 110181, Sep. 2016. (In Ukrainian).
- [10] V. Sayko, T. Narytnyk, V. Kazimirenko, L. Dakova, L. Hryshchenko and V. Kravchenko, "Vykorystannya rozpodilennykh transportnykh radiomerezh terahertsovoho diapazonu v ramkakh pobudovy merezh mobil'noho zv'yazku novoho pokolinnya [The use of distributed terrestrial radio networks in the framework of building a new generation of mobile communications networks]," *Zv'yazok*, no. 6, pp. 16–21, 2016. (In Ukrainian).
- [11] V. H. Sayko, T. M. Narytnyk, V. Ya. Kazimirenko and O. V. Lutchak, «*Kanal bezprovodnoho shyrokosmuhovoho abonent-s'koho dostupu do informatsiynykh resursiv iz vykorystanniam kanalu terahertsovoho diapazonu [Channel of wireless broadband subscriber access to information resources using the terahertz channel]*," MPK N04V 7/165, pat. no. 104299, Jan. 2016. (In Ukrainian).
- [12] V. Sayko and T. Narytnyk, "Radioreleinye systemy terahertsovoho diapazona dlya radiometricheskikh sistem obnaruzheniya skrytykh ob'ektov [Radiation systems of the terahertz range for radiometric detection systems of hidden objects]," *II nauk.-prakt. konf. Problemy kiberbezpeky informatsiyno-telekomunikatsiynykh system*, Kyiv, pp. 190–193, 2017. (In Russian).
- [13] E. S. Venttsel', *Issledovanie operatsii: zadachi, printsipy, metodologiya [Operations research: tasks, principles, methodology]*, Moskva, Drofa, 2006. (In Russian).
- [14] V. Sayko, V. Kazimirenko, L. Hryshchenko and V. Kravchenko, «*Kanal shyrokosmuhovoho radiodostupu v terahertsovomu diapazoni dlya radiosystem vyyavlennya prykhovanykh ob'yektiv [Broadband Terrestrial Radio Access Channel for Hidden Objects Radio Systems]?*," *Suchasnyy zakhyst informatsiyi*, no. №2(30), pp. 72–78, 2017. (In Ukrainian).

