

КАНАЛ ШИРОКОСМУГОВОГО РАДІОДОСТУПУ В ТЕРАГЕРЦОВОМУ ДІАПАЗОНІ ДЛЯ РАДІОСИСТЕМ ВИЯВЛЕННЯ ПРИХОВАНИХ ОБ'ЄКТІВ

В статті наводяться особливості розповсюдження радіохвиль в терагерцовому діапазоні та результати аналізу вітчизняних технічних рішень побудови каналу широкосмугового доступу терагерцового діапазону. Запропоновано технічне рішення каналу широкосмугового радіодоступу в терагерцовому діапазоні із підвищеною інформаційною ефективністю та узагальнений алгоритм прогнозування каналного та часового ресурсів такої мережі.

Ключові слова: терагерцовий діапазон, широкосмуговий радіодоступ, радіосистема, мобільний зв'язок, розповсюдження радіохвиль.

Вступ

Основними вимогами, що пред'являються до мобільних систем цифрового радіозв'язку нового покоління, є висока швидкість і надійність передавання даних великому числу користувачів в складних умовах поширення сигналів. Для практичної реалізації цих вимог розробники ретельно розглядають в основному один з найперспективніших шляхів, необхідних для побудови мереж мобільного зв'язку четвертого і п'ятого поколінь (4G і 5G), а саме-використання телекомунікаційних систем цифрового радіозв'язку терагерцового діапазону та перехід на малі соти (мікросоти, пікосоти і фемтосоти), які є базовими станціями з обмеженим діапазоном дії і які встановлюються для розширення зони покриття базових станцій макрорівня. На сьогоднішній день для таких мобільних систем дослідження сфокусовано на збільшенні пропускної здатності каналу зв'язку при використанні надширокосмугових 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.

Для підвищення інформаційної ефективності вузла зв'язку у статті запропоновано технічне рішення побудови каналу безпроводного широкосмугового абонентського доступу до інформаційних ресурсів із використанням каналу терагерцового діапазону, яке зумовлює кращу ефективність системи з точки зору дальності зв'язку та пропускної здатності каналу.

1. Аналіз технічних аспектів побудови каналу широкосмугового доступу терагерцового діапазону. 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] 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 малошумлячих 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 (140ГГц). Значні втрати енергії сигналу такого частотного діапазону на трасі розповсюдження потребують використання антен із коефіцієнтом підсилення до 50дБ, в діапазоні біля 140ГГц та кут розкриття діаграми спрямованості менше 1° .

У [8] 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 – 140ГГц. Приймальні та передавальні лінійні тракти забезпечують перенесення частотного діапазону біля 2,7ГГц в діапазон ≈ 140 ГГц при передачі сигналу і понижують частоту із ≈ 140 ГГц в $\approx 2,7$ ГГц при прийомі сигналу.

Центральна (ЦС) та абонентські станції (АС) з'єднуються каналами мережі backhaul в терагерцовому діапазоні (в даному випадку ≈ 140 ГГц). В якості АС використовується вузол доступу Wi-Fi, до якого підключені приймально-передавальні антени та лінійні тракти АС. Технічним рішенням [9] 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 широкопasmового 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 1,2Гбіт/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. При цьому до формувача інформаційного потоку центральної станції введено n передавальних та m 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.

2. Канал широкопasmового радіодоступу в терагерцовому діапазоні із підвищеною інформаційною ефективністю. При реалізації широкопasmового 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 (140ГГц) та малошумлячого вхідного підсилювача приймального тракту суттєво обмежує реалізацію потрібного розміру каналу мережі backhaul при передачі по одному каналу кількох інформаційних потоків.

2.1 Технічні аспекти побудови каналу терагерцового діапазону. Реалізація широкопasmового 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 (150Мбіт/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] 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.

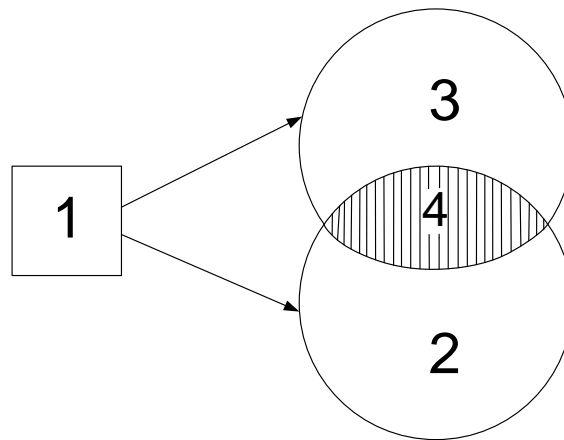


Рис.1. Структура принципу обслуговування абонентів розробленою системою

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 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 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 [15], динамічного програмування Беллмана [17], наближений «евристичний» метод Боксу [16]. 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 [18]. Для цього розглянемо математичну постановку задачі розподілу каналного ресурсу розробленого технічного рішення безпроводової системи. Нехай відома наступна інформація:

N_k^{ful} - кількість необхідних каналів для обслуговування k -го вузла попиту ($k = \overline{1, N}$), обумовлена як сума каналів за всіма видами заявок;

N_l^{vd} - максимальне число дозволених (допустимих) каналів для l -го вузла радіодоступу, при цьому число вузлів радіодоступу в системі дорівнює L . Величина N_l^{vd} , визначається типом використовуваного обладнання системи стільникового зв'язку;

Q_{kl} - умовна середня вартість (вага) передачі повідомлень, що припадає на один канал, з k -го вузла попиту в l -й вузол радіодоступу. Значення величини Q_{kl} визначається тим, що вузли попиту можуть бути «розкидані» по всій території, що обслуговується, мати різну «географічну» і «топографічну» прив'язку, яка впливає на якість поширення радіосигналів, їх стійкість, електромагнітну сумісність і т.д. При цьому показники ефективності Q_{kl} зазвичай розбивають на декілька груп: перша група характеризує якість зв'язку, в тому числі ймовірність відмови в обслуговуванні; друга - може визначати системні показники: стійкість, порогове відношення сигнал

/ завада, пропускну здатність каналів; третя - враховує економічні і експлуатаційні показники, пов'язані з передачею трафіку, а також витрати енергетичного, частотного і апаратного ресурсів; четверта - об'єднувати показники трьох попередніх груп.

Позначимо через x_{kl} плановане число каналів, яке буде використовуватися l -им вузлом радіодоступу для обслуговування k -го вузла попиту. Тоді в прийнятих позначеннях матимемо, що

$\sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^L Q_{kl} x_{kl}$ - загальна (сумарна) вартість каналного розподілу в системі мобільного зв'язку;

$\sum_{l=1}^L x_{kl}$ - загальна кількість каналів, необхідних для обслуговування k -го вузла попиту;

$\sum_{k=1}^N x_{kl}$ - загальна кількість дозволених каналів l -им вузлом радіодоступу.

Очевидним чином будемо вважати, що повинні бути виконані вимоги:

$$\sum_{l=1}^L x_{kl} = N_k^{ful}, \quad k = \overline{1, N} \quad (1)$$

$$\sum_{k=1}^N x_{kl} = N_l^{vd}, \quad l = \overline{1, L} \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^N x_{kl} = N_k^{ful} \quad \sum_{l=1}^L N_l^{vd} \quad (3)$$

Таким чином, оптимізаційну задачу ситуаційно-адаптивного розподілу каналів між вузлами радіодоступу можна сформулювати наступним чином: потрібно знайти аргумент x_{kl} , що забезпечує мінімум функціоналу Y виду

$$Y = \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^L Q_{kl} x_{kl}, \quad (4)$$

при умовах (1-3) і $x_{kl} \geq 0$.

Рішення поставленого завдання може базуватися на методі послідовного поліпшення плану - симплексного методу [18]. Слід зазначити, що сформульована задача аналогічна так званій відкритій транспортній моделі [18]. Необхідною додатковою умовою вирішення задачі є цілочисельність значень шуканих аргументів x_{kl} . Далі, перебираючи всі можливі варіанти конфігурацій розміщення вузлів радіодоступу, і повторюючи вищеописану методику

канального розподілу, можна отримати безліч значень критерію Y . Подальшим кроком буде вибір і призначення тієї конфігурації розробленого варіанту мережі, для якої значення критерію Y (серед наявної безлічі) мінімальне. Незавжди побачити, що знання величин x_{kl} допоможе також більш точно визначитися з кількістю задіяних (активних) каналів для кожного вузла радіодоступу. І якщо вийде так, що хоча для одного вузла радіодоступу $\sum_{k=1}^N x_{kl} < N_l^{vd}$, то це дозволить в подальшому мінімізувати складність алгоритмів прогнозування канално-часового ресурсу, спростити алгоритми передачі, поліпшити структуру мережі, підвищити швидкість обробки інформації і в цілому підвищити інформаційну ємність всієї розробленої бездротової системи терагерцового діапазону.

Висновки

Таким чином, нове технічне рішення каналу широкопasmового безпроводового доступу до інформаційних ресурсів в терагерцовому діапазоні з пропускну здатністю біля 150 Мбіт/с складається із приймально-передавальних станцій, що містять приймальні та передавальні антени, лінійні тракти та блоки обробки сигналів, а крім точки доступу до основного потоку додається точка доступу допоміжного потоку. Таке інноваційне рішення дозволяє підвищити ефективність використання інформаційного ресурсу мережі, збільшити відстань до віддаленої абонентської мережі в кілька разів в залежності від співвідношення інформаційних потоків на вході вузла доступу мережі, збільшити кількість точок радіодоступу.

Список використаної літератури

1. Han C., Akyildiz I.F. Terahertz band: Next frontier for wireless communications / in Proc. IEEE International Conference on Communications. Accepted to ICC. – 2014.
2. Быстров Р. П. Дальность действия миллиметровых радиолокационных станций в дождях / Р. П. Быстров, А. В. Соколов, Р. Н. Чеканов // М.: Радиотехника. – 2005. – № 1. – С. 19–23.
3. Быстров Р.П., Соколов А.В. Распространение короткой части миллиметровых и субмиллиметровых волн: возможные области их применения. // М.: Радиотехника, - № 5, - 2006. — с. 11-18.
4. Preissner F.J. // Symp. Millimeter and Submillimeter Wave Propagation and Circuits. AGARD Conf. Proc. 1972. № 245. P. 48/1.
5. Yujiri L., Shoucri M.M., Moffa P. // IEEE Microwave Magaz. 2003. V. 4. № 3. P. 39.
6. Малышенко Ю.И. Оценка воздействия дождей на параметры радиолокационных станций микроволнового диапазона с учетом метеостатистических сведений о продолжительности выпадения дождей / Ю. И. Малышенко, Ю. В. Левадный // ИРЭ НАН Украины. – Радиофизика и электроника. – 2012. – т. 3(17), № 1. – с. 36-40.
7. Link budget considerations for THz Fixed Wireless links/ M. Grigat // IEEE Trans. on Terahertz science and technology. – 2012. – vol. 2, NO. 2. – p.567-572.
8. Патент України на корисну модель №109005 Україна, Н 04 В 7/00. Мікрохвильова система широкопasmового бездротового доступу з підвищеною щільністю покриття зони обслуговування UMDS-TH / Наритник Т.М., Казіміренко В.Я., Сайко В.Г., Бреславський В.О., Єрмаков А.В. Заявник і патентовласник НТУУ «КПІ»; заявл.05.02.2016; опубл. 10.08.2016 // Бюл. № 15.
9. Патент України на корисну модель №110181 Україна, Н 04 В 7/165. Мікрохвильова система широкопasmового безпроводового доступу UMDS-Mesh / Наритник Т.М., Сайко В.Г., Казіміренко В.Я., Поршнев В.Л., Лисенко Д.О., Єрмаков А.В. Заявник і патентовласник НТУУ «КПІ»; заявл.08.04.2016; опубл. 26.09.2016 // Бюл. № 18.
10. Патент України на корисну модель №114590 Україна, Н 04 В 7/165. Мікрохвильова система широкопasmового доступу UMDS-PP / Наритник Т.М., Сайко В.Г., Казіміренко В.Я., Дакова Л.В., Єрмаков А.В. Заявник і патентовласник НТУУ «КПІ»; заявл.30.09.2016; опубл. 10.03.2017 // Бюл. № 5.
11. Патент на корисну модель 84923 Україна, Н 04 В 7/165. Приймально-передавальний формувач інформаційного потоку для каналу зв'язку з підвищеною спектральною ефективністю та пропускну здатністю / Ільченко М.Ю., Наритник Т.М., Казіміренко В.Я. Заявник і патентовласник НТУУ «КПІ»; заявл.11.05.2013; опубл. 25.11.2013 // Бюл. № 21.

12. Сайко В.Г. Використання розподілених транспортних радіомереж терагерцового діапазону в рамках побудови мереж мобільного зв'язку нового покоління / Сайко В.Г., Наритник Т.М., Казіміренко В.Я., Дакова Л.В., Грищенко Л.М., Кравченко В.І. // Зв'язок. -- № 6. – 2016. – с.16-21.

13. Патент на корисну модель 104299 Україна, Н 04 В 7/165. Канал безпроводного широкосмугового абонентського доступу до інформаційних ресурсів із використанням каналу терагерцового діапазону / Сайко В.Г., Наритник Т.М., Казіміренко В.Я., Лутчак О.В. Заявник і патентовласник НТУУ «КПІ»; заявл.25.06.2015; опубл. 25.01.2016 // Бюл. № 2.

14. Сайко В.Г. Радиорелейные системы терагерцового диапазона для радиометрических систем обнаружения скрытых объектов / Сайко В.Г., Казимиренко В.Я. // II Научно-практична конференція «Проблеми кібербезпеки інформаційно-телекомунікаційних систем». – Київ, КНУ імені Тараса Шевченка: 23-24 березня 2017 р. – С. 190-193.

15. Сосулин Ю.Г., Фишман М.М. Теория последовательных решений и ее приложения. – М.: Радио и связь, 1986. – 272 с.

16. Беллман Р. Прикладные задачи динамического проектирования. Под редакцией А. А. Первозванского. — М.: Наука. Главная редакция Физико-математической литературы, 1965. — 460 с.

17. Vox F. A heuristic Technique for Assigning Frequencies to Mobile radio Networks // IEEE Transaction on Vehicular Technology, VT-27(2). -- 1978. -- p. 57-64.

18. Вентцель Е.С. Исследование операций: задачи, принципы, методология. – М.: Дрофа, 2006. – 206 с.

Надійшла 07.07.2017 р.

Рецензент: д.т.н., с.н.с. Наконечний В.С.