

УДК 621.396.4

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/08>**Сайко В.Г.**

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Наритник Т.М.Спільне підприємство «Інститут електроніки та зв'язку
Української академії наук національного прогресу»**Баховський П.Ф.**

Луцький національний технічний університет

МОДЕЛЬ ПІДВИЩЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ОБСЛУГОВУВАННЯ ГЕТЕРОГЕННОЇ МЕРЕЖНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДІАПАЗОНУ

У статті наводяться результати аналізу існуючих сучасних моделей та методів підвищення показників якості обслуговування у бездротових мережах зв'язку 5G NR при застосуванні терагерцового діапазону. Головний акцент зроблений на явищі блокування радіопромінів рухомими об'єктами, яке приводить до того, що ймовірність помилки на рівні каналу не перевищує наперед визначеного цільового значення. Приводиться модель бездротової терагерцової мережі з підтримкою реконфігурованих інтелектуальних поверхонь (РІП). Особливості її є те, що вона враховує динаміку змін основного параметру, який характеризує якість послуги, це затримку доставки даних з врахуванням затримки у розподіленому реєстрі. Такий підхід визначає можливість побудови мереж uRLLC. Запропоновані принципи реалізації нової інноваційної послуги мереж 5-го та наступних поколінь – використання ресурсу локального кластеру мережевої інфраструктури терагерцового діапазону з інтегрованими РІП для забезпечення надійності зв'язку. Наведено інноваційне рішення з використання розподіленого реєстру для реалізації механізму попереджувального хендоверу при динамічному блокуванні з'єднання прямої видимості рухомими перешкодами під час передачі у терагерцовому діапазоні довжин хвиль. Новим у запропонованому рішенні є те, що у сучасних бездротових мережах під час передачі обслуговування (хендовера) користувачького обладнання запускається механізм послідовної взаємодії та передачі сигналів між кількома об'єктами керування мобільністю та сеансом. Запропоноване рішення відрізняється від відомих тим, що усуває необхідність у послідовній обробці запитів безліччю об'єктів, що управляються, особливо коли мережева функція повинна бути обрана з безлічі кандидатів та відповідно забезпечує реалізацію різноманітні послуги з ультра-малими затримками.

Ключові слова: терагерцовий діапазон, терагерцові системи зв'язку, розподілений реєстр, блокування передачі прямої видимості, блокчейн-системи, гетерогенні мережі 5G.

Постановка проблеми. Сьогодні у світі 72 країни вже запустили сервіси мобільного зв'язку 5G, понад 460 операторів із 137 країн інвестують у пілотні розробки та проводять тестові запуски [1]. Технологія бездротового доступу 3GPP New Radio (NR) становиться основою систем 5G, що забезпечують високі швидкості передачі даних на інтерфейсі радіодоступу. Передача даних у таких системах вестиметься у терагерцовому діапазоні довжин хвиль, особливістю якого є необхідність прямої видимості між пристроями, що беруть участь у з'єднанні [2]. Одним із завдань у мережах, побудованих на основі терагерцових точок доступу, є завдання знаходження оптимального розташування точок доступу для забезпечення зони покриття мережі стійким зв'язком.

В реальних умовах найбільші труднощі системам 5G NR 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 таким чином, щоб ймовірність помилки на рівні каналу не перевищувала наперед визначеного цільового значення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Нещодавно консорціум 3GPP запропонував мож-

ливе вирішення проблеми виходу із зони покриття, яке полягає в механізмі «множинних з'єднань» (англ. multiconnectivity) [3]. При використанні цього принципу одночасно підтримується кілька активних каналів зв'язку пристрою з сусідніми NR BS, і у разі блокування радіосигналу з'єднання передається на одну з них. В умовах блокування для того, щоб підтримувати необхідну швидкість передачі через основну та через резервну базові станції, необхідна більша кількість фізичних ресурсів. Якщо для підтримки необхідної швидкості радіо ресурсів недостатньо, то поточна сесія скидається, або послуга продовжується надається з нижчою швидкістю з'єднання, якщо це передбачено угодою про рівень обслуговування (SLA).

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 вкрай високих частотах [4, 5]. 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 безперебійне надання сервісів IoT, у випадку коли у головних серверах виникають збої програмного забезпечення. Тому, зростаюча потреба в різноманітних додатках, що потребують високої пропускну здатності, таких як мобільне потокове відео та обробки великих даних, потребує зміни принципів управління радіо ресурсами в мережах мобільного зв'язку, щоб уникнути їх дефіциту ресурсів для забезпечення новітніх сервісів для абонентів.

З цієї точки зору представляють інтерес нові технічні 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 за рахунок збору даних про канали в системах міліметрових та терагерцових діапазонах хвиль. Інтелектуальні поверхні, що реконфігуруються, відносно недавно стали багатобічньою парадигмою проектування бездротових мереж і режимів бездротової передачі [6,7]. Вони також можуть створювати інтелектуальні радіосередовища (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. У відсутності керованого середовища архітектура бездротової 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 бездротових 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 [6] та в режимі відображення [7].

Постановка завдання. Розробка принципів технічної реалізації нової інноваційної послуги мереж 5-го та наступних поколінь – використання ресурсу локального кластеру мережевої інфраструктури терагерцового діапазону на базі РІП для забезпечення надійності зв'язку на основі розподіленого реєстру для механізму попереджувального хендверу при блокуванні каналу прямої видимості перешкодами при передачі на вкрай високих частотах.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Модель бездротової терагерцової мережі з підтримкою РІП. Вважатимемо, що основним параметром, що характеризує якість послуги, є затримка доставки даних τ . Саме такий підхід визначає можливість побудови мобільних мереж 5G uRLLC. Її величина залежить від багатьох чинників. По-перше, від розміру тієї одиниці кількості (обсягу) даних про передачу якої йдеться і швидкості передачі даних по лінії зв'язку для кожної з ділянок маршруту, якщо маршрут складається з кількох ділянок. По-друге, від ймовірних затримок у вузлах маршруту, пов'язаних із очікуванням у буфері через зайнятість лінії передачею чергового пакету даних. По-третє, від ймовірних затримок у вузлах розподіленого реєстру,

пов'язаних із очікуванням у буфері при обробці відповідного запиту. Четверте, від імовірності блокування прямої видимості лінії зв'язку між учасниками обміну даними у терагерцовому діапазоні довжин хвиль. П'яте, від часу поширення сигналу між учасниками обміну даними.

З огляду на сказане можна записати:

$$\tau = \bar{t}_1 + \bar{t}_2 + \bar{t}_3 + \bar{t}_4 + \bar{t}_5, \quad (1)$$

де $\bar{t}_1 = \bar{V}/\bar{W}$ – середній час передачі;
 \bar{V} – середній об'єм даних, що передаються;
 \bar{W} – середня швидкість передачі;
 \bar{t}_2 – середній час очікування;
 \bar{t}_3 – середній час обробки відповідного запиту у розподіленому реєстрі;
 \bar{t}_4 – середній час хендоверу при блокуванні прямої видимості лінії зв'язку між учасниками обміну даними;
 \bar{t}_5 – середній час розповсюдження сигналу.

Для маршруту при деяких припущеннях середню величину затримки можна оцінити, як суму затримок для кожної з ділянок:

$$T = \sum_{i=1}^N \tau_i, \quad (2)$$

де τ_i – затримка для i – ї ділянки, яка визначається відповідно формули (1).

Зробимо припущення про те, що мережа між користувачем та точкою надання послуги складається з двох ділянок: ділянки доступу та сполучної лінії з точкою надання послуги, яка складається теж з двох ділянок (перша, це ділянка доступу до відповідного РІП (R_{q1}) та друга, – від РІП до точки надання послуги (R_{q2})). Структура моделі мережі з підтримкою РІП наведена рис 1.

Модель складається з користувачів послуг K , точок доступу D , точок розміщення РІП $R_{1..4}$ та точки надання послуги Q . Прийняті припущення такі, що точки доступу з'єднані з точкою надання послуги лініями зв'язку, довжина яких дорівнює довжині прямого відрізка до відповідного РІП та від РІП до точки доступу.

Максимальна відстань від користувача до точки доступу дорівнює R_d , максимальна відстань від точки надання послуги до точки доступу $R_q = R_{q1} + R_{q2}$. Тоді максимальна відстань, що долається сигналом, становитиме

$$D_{max} = R_d + R_q, \quad (3)$$

При зроблених вище припущеннях $R_d \ll R_q$, (4)

При допущенні (4) відстань між користувачем та точкою надання послуги можна прийняти рівним R_d . Час поширення сигналу визначається швидкістю поширення світла при передачі. Вважаємо, що між точкою доступу та точкою надання

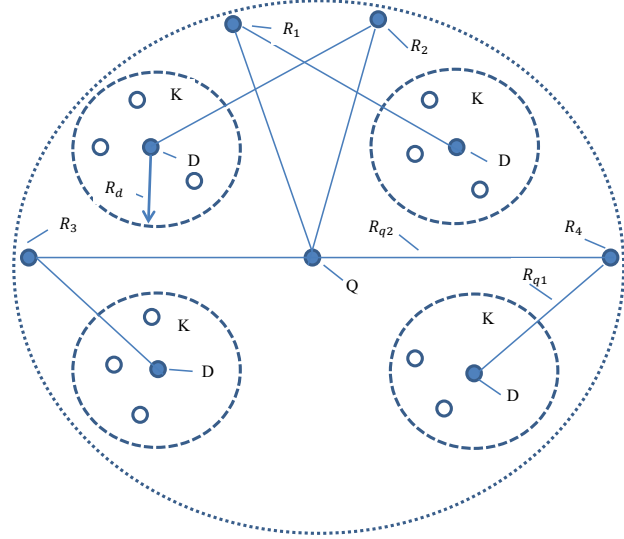


Рис. 1. Структура терагерцової мережі з підтримкою РІП

послуги використовується бездротова лінія зв'язку. Тоді з урахуванням рекомендації [8, 9]

$$t_5 = t_0 R_q, \quad (5)$$

де t_0 – затримка під час поширення на одиницю довжини.

Ми також робимо припущення про те, що користувачі розподілені на території випадково і їх розподіл може бути описано пуассонівським полем.

Імовірність знаходження n користувачів у зоні обслуговування точкою надання послуги визначається як:

$$P_n = \frac{(\pi R_q^2 \mu)^n}{n!} e^{-\pi R_q^2 \mu}, \quad (6)$$

де μ – густина користувачів на території ($1/m^2$).

Кількість користувачів у зоні обслуговування складе

$$\rho = \pi R_q^2 \mu, \quad (7)$$

Інтенсивність заявок (поток) у зоні обслуговування

$$\lambda = \lambda_0 \rho, \quad (8)$$

λ_0 – інтенсивність заявок, створювана одним користувачем.

Припустимо, що трафік можна описати моделлю потоку з коефіцієнтом варіації часового інтервалу між заявками Δa . Визначимо затримку на очікування (для однієї ділянки мережі) за допомогою моделі для системи G1/G/1 Крамера та Лангенбах-Бельца [10]:

$$\bar{t}_2 \approx \frac{\rho \bar{t}}{2(1-\rho)} (\Delta_a^2 + \Delta_t^2) G(\Delta_a^2, \Delta_t^2, \rho), \quad (9)$$

$$G(\Delta_a^2, \Delta_t^2, \rho) = \begin{cases} e^{\frac{2(1-\rho)(1-\Delta_a^2)^2}{3\rho(\Delta_a^2 + \Delta_t^2)}}, \Delta_a^2 \leq 1 \\ e^{-(1-\rho) \frac{(\Delta_a^2)^2}{\Delta_a^2 + 4\Delta_t^2}}, \Delta_a^2 > 1 \end{cases} \quad (10)$$

де $\rho = \lambda \bar{t}$ – параметр використання каналу (інтенсивність навантаження);
 Δ_a^2 – коефіцієнт варіації інтервалу між заявками (пакетами);
 Δ_t^2 – коефіцієнт варіації часу обслуговування.

Припустимо, що всі пакети мають рівну довжину, що може бути характерним для трафіку однієї послуги. Із формул (9,10) видно, що затримка на очікування істотно залежить від властивостей трафіку та його інтенсивності.

У [11] показано, що область надання обслуговування можна описати колом з радіусом, який визначається, переважно, часом поширення сигналу, тобто. відстанню. Це справді визначальна величина і наведені у цій роботі результати можна розглядати як граничні межі цифрового кластера.

Дійсно, збільшення радіусу цифрового кластера R_q згідно з (7) та (8) призводить до зростання інтенсивності заявок, що згідно з (9) та (10) призводить до зростання затримки через очікування. З урахуванням цієї залежності граничне значення R_q буде дещо меншим. Крім того, є необхідність врахувати різні вимоги щодо затримки доставки з боку різних послуг. Такий підхід визначає можливість побудови мереж uRLLC.

Інноваційне рішення з використання розподіленого реєстру для реалізації механізму попереджувального хендоверу при блокуванні передачі в терагерцовому діапазоні.

У сучасних бездротових мережах під час передачі обслуговування (хендовера) користувачького обладнання об'єкт управління мобільністю повинен використовувати контекстну інформацію обладнання і, можливо, стану RAN спільно з об'єктом управління сеансом. Ця подія запускає послідовну взаємодію та передачу сигналів між кількома об'єктами керування мобільністю та сеансом. У сильно розподіленому середовищі (гетерогенній мережі терагерцового діапазону) цей підхід мало ефективний, особливо при частих подіях передачі обслуговування при блокуванні в терагерцовому діапазоні.

Тому автори запропонували для вирішення такої задачі використати технологію розподіленого реєстру для реалізації механізму попереджувального хендоверу при блокуванні в терагерцовому діапазоні. Суть даного підходу наступна.

Розподілений реєстр використовується для реалізації механізму попереджувального хендоверу при блокуванні, згідно з яким створюється локальний кластер мережеских функцій для перемикання при блокуванні, так що контент обладнання РІП в цьому кластері може бути заздалегідь синхронізований. Це скоротить час передачі обслуговування, необхідний для надсилання та створення нового контенту обладнання РІП. Ефективна синхронізація в даному випадку цілком реалізована, оскільки такі кластери містять лише обмежену кількість локальних пристроїв РІП.

При цьому розподілений реєстр сприяє вирішенню задачі по управлінню сеансом при блокуванні шляхом ведення загального розподіленого реєстру, в якому різні управляючі об'єкти (РІП) можуть публікувати мережеву інформацію зі свого власного домену. Щоб гарантувати, що конфіденційну інформацію не буде розкрито, можна передбачити політики публікації. Сеанси можна створити в кількох доменах за допомогою смарт-контрактів, які публікуються різними об'єктами керування сеансом. Смарт-контракти визначають умови та вхідні дані, необхідні для створення маршруту переадресації у певному домені при блокуванні. Після виклику смарт-контракту розподілений реєстр гарантує його виконання, відповідно розгортається сегмент маршруту. Щоразу, коли викликається смарт-контракт, всі операції записуються до розподіленого реєстру для перевірки. Ці переваги роблять розподілений реєстр ідеальним вибором для забезпечення спільного використання даних у кількох доменах.

Запит на використання ресурсу локального кластеру мережевої інфраструктури на базі РІП може бути підготовлений заздалегідь у відповідності з постійним ідентифікатором РІП, які зберігаються у UDR. Служба управління мобільністю підготовлює перевіряючий смарт-контракт та публікує його в розподіленому реєстрі, доступ до якого здійснюється набором відповідних об'єктів управління мобільністю. Будь-який об'єкт управління мобільністю може вилучити підготовлений цей запит і відправити його до користувачького обладнання. Потім це обладнання, яке запросило ресурс локального кластера мережевої інфраструктури, вирішує задачу корисності та повертає своє рішення об'єкту управління мобільністю, який відправляє його рішення у смарт-контракт. Якщо смарт-контракт підтверджує правильність рішення, тобто запит на використання локального кластеру мережевої інфраструктури на базі РІП, пройшов успішно, підключається механізм

попереджувачого хендоверу, згідно якого створюється локальний кластер мережевих функцій для переключення при блокуванні в терагерцовому діапазоні. Це усуває необхідність у послідовній обробці запитів безліччю об'єктів, що управляються, особливо коли мережева функція повинна бути обрана з безлічі кандидатів.

Таким чином, управління даними на основі розподілений реєстр формує нову схему управління та обміну даними у мобільній мережі з використанням терагерцового діапазону. По-перше, дані не обов'язково повинні зберігатися приватно в одному домені. Натомість дані можуть бути зашифровані та розповсюджені по всій мережі, оскільки розподілений реєстр гарантує їх достовірність. По-друге, конкретний механізм управління доступом можна реалізувати за допомогою смарт-контрактів. Будь-який запит на доступ до опублікованих даних шляхом запуску смарт-контракту буде записано, що

полегшить майбутній аудит. Це особливо важливо стосовно даних, які використовуються для спільного керування, таких як стан мережі, контекст сеансу та вимоги QoS.

Висновки: запропоновані принципи технічної реалізації нової інноваційної послуги мереж 5-го та наступних поколінь – використання ресурсу локального кластеру мережевої інфраструктури терагерцового діапазону на базі РІП для забезпечення надійності зв'язку на основі розподіленого реєстру для механізму попереджувачого хендоверу при блокуванні передачі. Одним із подальших напрямків наукових досліджень – розробка моделей та методів застосування систем розподіленого реєстру, які необхідні для забезпечення заданих показників якості послуг зв'язку при використанні терагерцового діапазону, а також стабільності стану елементів такої гетерогенної мережі.

Список літератури:

1. 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: Київ: ТОВ «Про формат», 2021. 200 с.
2. V. Saiko, T. Narytnyk, M. Brailovskyi and V. Nakonechnyi. Radiating telecommunication system of the sub-THz-band to protect objects from unauthorized access. *2019 International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications: Science and Technology PIC S&T'2019*. p.p. 698–702.
3. 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).
4. D. Moltchanov, A. Samuylov, V. Petrov. Improving Session Continuity with Bandwidth Reservation in mmWave Communications. *IEEE Wireless Communications Letters*. 2018. no. 7. p. 1–4.
5. Сайко В.Г., Наритник Т.М. Беспроводові системи зв'язку терагерцового діапазону: монографія. Німеччина: Видавництво "LAP LAMBERT Academic Publishing". 2019. 68 с.
6. S. Hu, F. Rusek, and O. Edfors. Beyond Massive MIMO: The Potential of Positioning With Large Intelligent Surfaces. *IEEE Trans. Signal Process.* 2018. vol. 66. pp. 1761–1774.
7. J. He, H. Wymeersch, T. Sanguanpuak, O. Silvén, and M. Juntti. Adaptive beamforming design for mmwave RIS-aided joint localization and communication. *IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)*. 2020.
8. Олійник В.Ф., Кривуца В.Г., Сайко В.Г. Системи та мережі цифрового радіозв'язку: інженерно-технічний довідник. Ніжин: ТОВ "Видавництво "Аспект-Поліграф". 2011. 612 с.
9. Сайко В.Г. Системи бездротового цифрового радіозв'язку нового покоління: монографія. К.: ПП "Золоті ворота". 2011. 300 с.
10. Степанов С.Н. Теория телетрафика: концепции, модели, приложения. М.: Горячая линия – Телеком. 2015. 868 с.
11. Бородин А.С. Сети связи пятого поколения как основа цифровой экономики. *Электросвязь*. 2017. № 5. С. 45–47.

Saiko V.G., Narytnyk T.M., Bakhovskyi P.F. A MODEL FOR IMPROVING QUALITY OF SERVICE INDICATORS OF A HETEROGENEOUS NETWORK INFRASTRUCTURE IN THE TERAHERTZ RANGE

The article presents the results of the analysis of existing modern models and methods of improving service quality indicators in 5G NR wireless communication networks when using the terahertz range. The main emphasis is placed on the phenomenon of radio beam blocking by moving objects, which leads to the fact that the probability of an error at the channel level does not exceed a predetermined target value. A model of a wireless terahertz network with support for reconfigurable intelligent surfaces (RIS) is given. Its features are that it takes into account the dynamics of changes in the main parameter that characterizes the quality

of the service, which is the data delivery delay, taking into account the delay in the distributed registry. This approach determines the possibility of building uRLLC networks.

The proposed principles of implementation of a new innovative service of networks of the 5th and subsequent generations are the use of the resource of a local cluster of the network infrastructure of the terahertz range with integrated RIPv to ensure the reliability of communication. A solution is given for using a distributed register to implement a warning handover mechanism when the line-of-sight connection is dynamically blocked by moving obstacles during transmission in the terahertz wavelength range. What is new in the proposed solution is that in modern wireless networks, during the handover of user equipment, a mechanism of sequential interaction and signal transmission between several mobility and session management objects is launched. The proposed solution differs from the known ones in that it eliminates the need for sequential processing of requests by many managed objects, especially when the network function must be selected from many candidates, and accordingly ensures the implementation of various services with ultra-low delays.

Key words: *terahertz range, terahertz communication systems, distributed ledger, line-of-sight transmission blocking, blockchain systems, 5G heterogeneous networks.*