

---

## Модель побудови бездротової терагерцової мережі з підвищеною надійністю зв'язку

**Володимир Сайко**

кафедра прикладних інформаційних систем/факультету інформаційних технологій,  
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна  
ORCID 0000-0002-3059-6787

**Теодор Наритник**

Інститут електроніки та зв'язку Української академії наук, Київ, Україна  
ORCID 0000-0002-4118-0226

### Для цитування цієї статті:

Сайко Володимир, Наритник Теодор. Модель побудови бездротової терагерцової мережі з підвищеною надійністю зв'язку. International Science Journal of Engineering & Agriculture Vol. 2, No. 2, 2023, pp. 166-181. doi:10.46299/j.isjea.20230202.16.

**Надійшла до редакції:** 06 лютого 2023 р.; **Схвалено:** 11 лютого 2023 р.;

**Опубліковано:** 01 квітня 2023 р.

---

**Анотація:** Запропоновані принципи реалізації нової інноваційної послуги мереж 5-го та наступних поколінь – використання ресурсу локального кластеру мережевої інфраструктури терагерцового діапазону з інтегрованими реконфігурованими інтелектуальними поверхнями (РІП) для забезпечення надійності зв'язку. Наведено рішення з використання розподіленого реєстру для реалізації механізму попереджувального хендоверу при блокуванні в терагерцовому діапазоні. 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. Запропонована модель проектування покриття мережі терагерцового діапазону з підтримкою реконфігурованих інтелектуальних поверхонь на основі самоорганізованих карт Кохонена. Ключовою відмінністю підходу є використання метрики співвідношення сигнал/шум, замість евклідової відстані, а також при формуванні цифрового кластеру врахована густина користувачів послуг, що дало змогу вибрати розмір цифрового кластеру мережі з врахуванням вимог до якості обслуговування абонентського трафіку і розподілу користувачів по території, в тому числі для різноманітних послуг на основі концепції мереж зв'язку з малими затримками. Наведено методологічні основи вибору блокчейн-системи та алгоритму консенсусу на основі вимог і переваг. Її використання дозволило провести попередню оцінку використання технологій блокчейну для інтеграції у запропоноване перспективне рішення.

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

---

## 1. Вступ

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 [2,5]. 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. Системи NR функціонують у терагерцовому діапазоні частот, і у перспективі дозволять досягати високих швидкостей передачі до кількох гігабіт на секунду, й водночас значно менших затримок на рівні радіоканалу у порівнянні з сучасними системами четвертого покоління. В даний час оператори мереж та постачальники телекомунікаційних послуг вже проводять випробування цієї технології в умовах, наближених до реальних, і перед дослідницькою спільнотою постає ряд нових завдань, що вимагають методів аналізу продуктивності, доцільності та можливості впровадження тих чи інших послуг у системах 5G NR. Системи 5G NR не тільки дозволяють досягти нових унікальних можливостей, але й разом з цим ставлять перед проектувальниками телекомунікаційних мереж безліч складних задач, серед яких можна відзначити блокування радіопромінів рухомими об'єктами, необхідність в ефективних механізмах керування променем і т.д..

## 2. Об'єкт і предмет дослідження

**Об'єктом дослідження** є бездротові мережі доступу 5G NR терагерцового діапазону, а **предметом дослідження** - моделі обслуговування абонентів у бездротових мережах доступу 5G NR при використанні терагерцового діапазону.

Системи бездротового зв'язку як у міліметровому, так і в ТГц-діапазонах зазнають великих втрат у тракці передачі, хоча вони більш значні у терагерцовому спектрі. Наприклад, втрати на трасі довжиною 10 м на 28 ГГц становлять 81 дБ, але збільшуються до 101 дБ на 280 ГГц. Для компенсації високих втрат на трасі зазвичай використовуються високонправлені решітки антени. Щоб генерувати високоспрямований промінь, рівнофазна поверхня променів, що передаються, від усіх антенних елементів повинна бути перпендикулярна напрямку поширення хвилі. У більшості випадків для компенсації фазових затримок, викликаних рознесенням різних антенних елементів на певні відстані (зазвичай половину довжини хвилі), необхідні аналогові фазообертачі. Фактичний фазовий зсув переважно залежить від несучої частоти. Це стає проблемою у широкосмуговій системі, де використовуються кілька несучих, які охоплюють широкий частотний діапазон. Результуючий промінь може розсіюватися зі зміною частоти, що призводить до втрати посилення решітки – ефекту, відомого як перекис променя у міліметрових хвилях. У ТГц-системах цей ефект стає більш серйозним, тому що смуга пропускання ще ширша, а ширина променя надзвичайно мала (такі промені відомі як «голкові» або «олівцеві» промені). Згенеровані промені можуть при зміні частоти відхилитися у різних напрямках, що призводить до ще більш серйозних втрат посилення у ґратах. Щоб відрізнити ефект ТГц-системах від ефекту в системах міліметрового діапазону, цей ефект в ТГц-системах називається розщепленням променя. Нещодавно для пом'якшення небажаного ефекту запропонували використовувати метаповерхні або РПП [21].

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 пристроєм (МТ) 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.

### 3. Мета та задачі дослідження

**Мета роботи** полягає у розробці підходу до дослідження бездротових мереж доступу зв'язку 5G NR та моделі підвищення надійності обслуговування абонентів на окремо стоячих базових станціях з підтримкою RPI при використанні терагерцового діапазону.

Мета роботи досягається за рахунок вирішення наступних **задач**:

1. Аналіз існуючих сучасних моделей та методів підвищення показників якості обслуговування у бездротових мережах зв'язку 5G NR.
2. Розробка моделі бездротової терагерцової мережі з підтримкою RPI та синтезу локального цифрового кластеру.
3. Розробка моделі врахування блокування передачі прямої видимості у мережах зв'язку 5G NR з підтримкою RPI при використанні терагерцового діапазону.
4. Розробка рекомендаційних аспектів застосування блокчейн системи для перспективних послуг на мобільних мережах зв'язку терагерцового діапазону.

### 4. Аналіз літератури

Нещодавно консорціум 3GPP запропонував можливе 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]. Однак складність його технічної реалізації на існуючій інфраструктурі мобільного зв'язку 5G призводить до додаткових затримок перемикання каналів, оскільки рішення приймаються віддалено, та відповідно знижує загальну ефективність системи. Це пов'язано з тим, що існуюча централізована архітектура інфраструктури мереж мобільного зв'язку на сьогодні є вразливою з точки зору перевантаження обчислювальних ресурсів і тому вона не гарантує безперервне надання сервісів IoT, у випадку коли у головних серверах виникають збої програмного забезпечення. Тому, зростаюча потреба в різноманітних додатках, що потребують високої пропускної здатності, таких як мобільне потокове відео та 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 багатообіцяючою парадигмою проектування бездротових мереж і режимів бездротової передачі [6,7]. Вони також можуть створювати інтелектуальні радіосередовище (або інтелектуальні радіоканали), тобто поширенням

радіохвиль у навколишньому середовищі можна керувати для створення персоналізованого каналу зв'язку. В узагальненій моделі RIS-мережа формується між декількома БС для створення великомасштабних інтелектуальних радіоканалів, що обслуговують кількох користувачів. 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].

Відома на сьогодні розробка архітектури системи сигналізації для локалізації та картування за допомогою RIS по низхідному каналу [8]. Априорна інформація про розташування користувача використовується для визначення того, який RIS використовується для активації і як налаштувати його фази. Пілот-сигнал низхідної лінії зв'язку (DL), відбитий сигнал RIS, оптимізується з урахуванням поточного UE та умов навколишнього середовища, та використовується UE для оцінки параметрів каналу. Вони передаються алгоритму SLAM, який визначає місце розташування UE та локальну карту. Карти від різних UE можуть бути поєднані для забезпечення глобальної ситуаційної поінформованості.

Недоліком відомого рішення є те, що для нього не наведено як оцінку технічної реалізації його складності, так і варіанти апаратно-програмної реалізації. Тому, в цілому, не можливо оцінити відповідно технічні можливості системи для надання якісних послуг в інтегрованих мобільних мережах зв'язку 5G/6G та IoT.

Відоме рішення [9] зі збору інформації про канал для системи зв'язку міліметрового діапазону з підтримкою RIS. Ідея полягає у використанні розрідженості каналу міліметрового діапазону та топології самої RIS. Порівняно з сучасними методами, запропонований спосіб вимагає набагато менших частотно-часових ресурсів при збиранні інформації про канал.

Розріджений канал міліметрового діапазону складається з одного або кількох радіоліній [9]. Найпотужніша радіолінія в енергетичному плані зазвичай є лінією прямої видимості (LOS), якщо вона існує. Через велику кількість спільно розташованих блоків віддзеркалювання променів складовий канал між IRS та AP/UE (базова станція/термінал абонента) має унікальну структуру, яку можна використовувати під час формування радіоканалу. Автори використали розрідженість та структурну інформацію каналу міліметрового діапазону, щоб отримати характеристику тракту LOS між IRS та приймачами терміналів абонентів. Потім спроектували вектор фазового зсуву  $\theta$  відповідно до каналу LOS між IRS та AP/UE, щоб покращити покриття міліметрового діапазону за рахунок обходу блокувань між AP та UE.

Ключовою ідеєю способу отримання інформації про стан каналу (Channel State Information, CSI) є визначення UE за характеристикою каналу відбитої радіохвилі. В результаті автори запропонували обчислювати місцезнаходження UE шляхом оцінки відстаней між точкою доступу і пристроєм, що відбиває, і UE, а потім використовувати алгоритм триангуляції [10] для отримання тривимірного положення UE. Метою є підсилення відбитого сигналу, щоб UE могло виявити прийнятий сигнал.

Слід зауважити, що ефективність наведених рішень для стільникових систем 5G/6G з використанням терагерцових діапазонів хвиль у таких каналах багато в чому визначається здатністю алгоритмів часової синхронізації забезпечити необхідну точність оцінки числа та

часових положень компонентів багатопробеневого сигналу, а алгоритмів оцінки каналу – забезпечити високу точність оцінки комплексної амплітуди сигналів знайдених компонентів. Тому недоліком запропонованих підходів обробки сигналу у згаданих роботах [9,10] є те, що при проведенні процедури пошуку сигналів променів не враховується вплив компонент багатопробеневого сигналу друг на друга. Внаслідок цього зростає ймовірність помилкового виявлення сигналів променів. Крім того, не здійснюється оптимізація числа сигналів променів, які використовують для визначення місцезнаходження UE за відсутності прямої видимості, що призводить до підвищених вимог до апаратурної реалізації без збільшення якості інформації, що виділяється.

Для визначення оптимальних фазових зрушень у RIS та векторів формування променя у базових станціях (БС), рішення на основі аналітики зазвичай спирається на оцінку каналу, яка може бути громіздкою, враховуючи велику кількість елементів у RIS. Нещодавні дослідження показали багатообіцяючі результати у використанні методів машинного навчання для безпосереднього прогнозування оптимальних фазових зрушень RIS і вектора формування променя в БС або повністю минаючи проміжний етап оцінки каналу, або з обмеженим знанням інформації про канал.

У [11] автори запропонували заснований на глибинному навчанні (Deep Learning, DL) підхід для проведення порівняння між виміряною інформацією про координати в місцезнаходження користувача і конфігурацією кожного елемента RIS, яка максимізує рівень прийнятого користувачем сигналу в автономному режимі з використанням попередньо створеної бази даних відбитків пальців під час формування. Навчання рекурентної нейронної мережі (current neural network, DNN). На онлайн-фазі в навчену модель DNN передавалися виміряні координати цільового місця розташування, щоб вивести оптимальну фазову конфігурацію з акцентом на передбачуване місцезнаходження.

У [12] автори використовували метод DL «актор-критик» для вивчення спільної конструкції матриці формування променя передачі в БС і конфігурації фазового зсуву RIS для системи MISO. Сумарна ставка використовувалася як миттєва винагорода для навчання алгоритму на основі DL. Матриця формування променя передачі та фазові зрушення були отримані спільно шляхом поступового максимізації сумарної швидкості шляхом спостереження винагорода та ітеративного налаштування параметрів.

Загальні зауваження. Цілком природно, що, незважаючи на перспективи і безліч потенційних переваг, підхід машинного навчання до розробки рішень RIS стикається з багатьма проблемами. Ці проблеми також є можливостями майбутніх напрямів досліджень.

І одна із них, це змусити новий підхід, заснований на штучному інтелекті, працювати в реальних експериментах. Майже у всіх роботах, які ми розглянули, дослідження та експериментальні результати ґрунтуються на чисельному моделюванні, яке є податливим першим кроком. Однак загальноновизнано, що дані моделювання є точними, а поведінка, що моделюється, більш детермінованим. Моделювання також забезпечує зручність створення великих обсягів даних, необхідні машинного навчання. У реальному середовищі ці переваги були б недоступними. Надзвичайно важливо вийти за рамки експериментів, заснованих на моделюванні, для вивчення практичної здійсненності та ефективності рішень RIS на основі машинного навчання.

## 5. Методи досліджень

### Модель бездротової терагерцової мережі з підтримкою RPP

Вважатимемо, що основним параметром, що характеризує якість послуги, є затримка доставлення даних  $\tau$ . 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 з очікуванням у буфері через зайнятість лінії передачею чергового пакету даних. По-третє, від ймовірних затримок у вузлах розподіленого реєстру, пов'язаних з 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:

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

$\bar{V}$  – середній об'єм даних, що передаються;

$\bar{W}$  – середня швидкість передачі;

$\bar{\tau}_2$  – середній час очікування;

$\bar{\tau}_3$  – середній час обробки відповідного запиту у розподіленому реєстрі;

$\bar{\tau}_4$  – середній час хендверу при блокуванні прямої видимості лінії зв'язку між учасниками обміну даними;

$\bar{\tau}_5$  – середній час розповсюдження сигналу;

$\bar{\tau}_1 = \frac{\bar{V}}{\bar{W}}$  – середній час передачі.

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  $\tau_i$  – 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. 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.

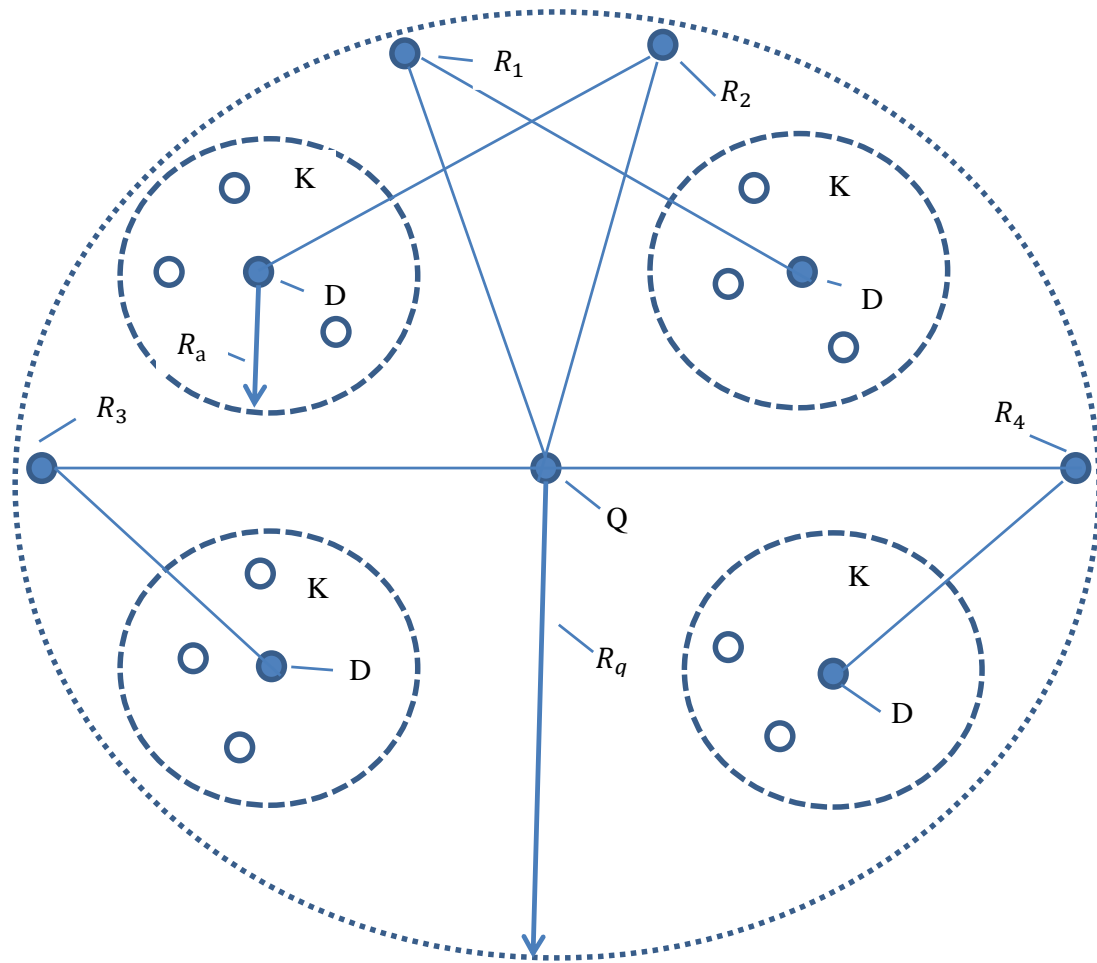


Рис.1. Структура терагерцової мережі з підтримкою РІП.

Максимальна відстань від користувача до точки доступу дорівнює  $R_d$ , максимальна відстань від точки надання послуги до точки доступу  $R_q$ . Тоді максимальна відстань, що долається сигналом, становитиме

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

При зроблених вище припущеннях

$$R_d \leq R_q, \quad (4)$$

При допущенні (4) відстань між користувачем та точкою надання послуги можна прийняти рівним  $R_d$ . Час поширення сигналу визначається швидкістю поширення світла серед передачі. Вважаємо, що між точкою доступу та точкою надання послуги використовується бездротова лінія зв'язку. Тоді з урахуванням рекомендації [13,14]

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

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 визначатиметься як:

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

де  $\mu$  – густина користувачів на території ( $1/\text{м}^2$ ).

Кількість користувачів у зоні обслуговування складе

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

Інтенсивність заявок (поток) у зоні обслуговування

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

$\lambda_0$  – інтенсивність заявок, створювана одним користувачем.

Припустимо, що трафік можна описати моделлю потоку з коефіцієнтом варіації часового інтервалу між заявками  $Q_a$ . Визначимо затримку на очікування (для однієї ділянки мережі) за допомогою моделі для системи GI/G/1 Крамера та Лангенбах-Бельца [15]:

$$\bar{\tau}_2 \approx \frac{\rho \tau}{2(1-\rho)} (Q_a^2 + Q_t^2) G(Q_a^2, Q_t^2, \rho), \quad (9)$$

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

де

$\rho = \lambda \bar{\tau}$  – параметр використання каналу (інтенсивність навантаження);

$Q_a^2$  – коефіцієнт варіації інтервалу між заявками (пакетами);

$Q_t^2$  – 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 [16] 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.

У цій роботі ми маємо намір уточнити цю величину, прийнявши до уваги трафік, що виробляється в цифровому кластері. 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.

### Алгоритм синтезу структури цифрового кластера з використанням РІП

Синтез та оптимізація структури цифрового кластера мереж мобільного зв'язку є одним із найважливіших аспектів, які впливають на подальшу ефективність функціонування мережі мобільного зв'язку.



При використанні методів детермінованої геометрії, такий підхід можна було б реалізувати шляхом примітивних обчислень відстані між базовими станціями [13]. Проте, в умовах хаотичної динаміки переміщення абонентів мережі мобільного зв'язку такий підхід не буде ефективним. У поєднанні із вищезазначеними викликами, відсутність адекватних математичних моделей, які описують динаміку переміщення абонентів у мережах мобільного зв'язку не дає змоги реалізувати детермінований алгоритм оптимізації структури цифрового кластеру мережі мобільного зв'язку. При використанні альтернативних методів планування на основі стохастичної геометрії, складність даного завдання експоненційно зростає пропорційно до збільшення кількості комірок, оскільки існує ймовірність накладання нових базових станцій з уже існуючими, що потребує додаткових етапів перевірки синтезованої структури.

Тому, в даній роботі пропонується використання машинного навчання для синтезу структури цифрового кластеру мережі для довільної території. Мета запропонованого способу полягає у тому, щоб забезпечити можливість адаптивного структурного синтезу цифрового кластеру мереж мобільного зв'язку в залежності від цільової зони покриття та характеру просторово-часових переміщень абонентів мобільного зв'язку. Для визначення позицій структури цифрового кластеру використовується алгоритм самоорганізованих карт Кохонена (SOM – Self-Organizing Maps) [17].

Нижче наведено покрокове формалізоване представлення запропонованого способу.

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 попереджувального 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.

## **6. Результати досліджень**

### **Модель використання розподіленого реєстру для реалізації механізму попереджувачого хендоверу при блокуванні в терагерцовому діапазоні**

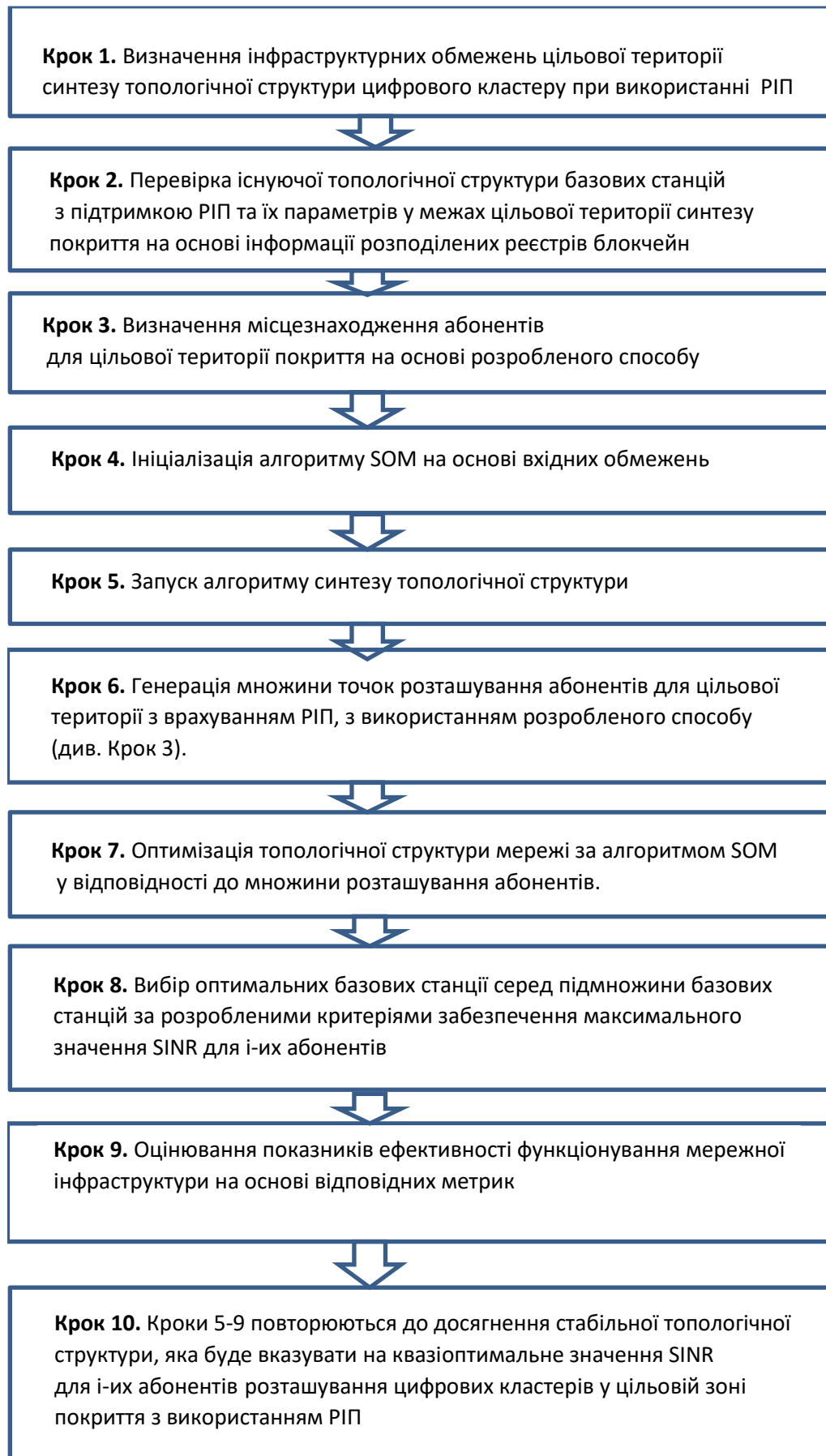
У сучасних бездротових мережах під час передачі обслуговування (хендовера) користувачького обладнання об'єкт управління мобільністю повинен використовувати контекстну інформацію обладнання і, можливо, стану RAN спільно з об'єктом управління сеансом. Ця подія запускає послідовну взаємодію та передачу сигналів між кількома об'єктами керування мобільністю та сеансом. У сильно розподіленому середовищі (гетерогенній мережі) 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 попереджувачого хендоверу при блокуванні в терагерцовому діапазоні. Суть даного підходу наступний.

Розподілений реєстр використовується для реалізації механізму попереджувачого хендоверу при блокуванні, згідно з яким створюється локальний кластер мережевих функцій для перемикавання 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.



**Рис.2.** Алгоритм синтезу структури цифрового кластеру з використанням РІП на основі самоорганізованих карт.

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 попереджувального хендверу, 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.

### **Рекомендаційні аспекти застосування блокчейн системи для перспективних послуг на мобільних мережах зв'язку терагерцового діапазону**

Основними причинами проблем, пов'язаних з інформаційною безпекою мобільних мереж терагерцового діапазону з підтримкою РІП, є:

- можливість прослуховування каналів та підміни повідомлень, яка обумовлена загальнодоступністю середовища передачі;
- необхідність використання складних алгоритмів маршрутизації, які враховують ймовірність отримання невірної інформації від скомпрометованих мобільних терміналів унаслідок змін топології мережі;
- неможливість реалізації традиційної безпекової політики обумовлена особливостями класичної архітектури терагерцової мережі, такими як відсутність фіксованої топології та центральних вузлів.

При спілкуванні РІП з об'єктами мобільної інфраструктури передається різна інформація, зокрема ідентифікаційні дані РІП, місцезнаходження, зміст запиту та інші. У разі порушення конфіденційності та цілісності таких даних можуть постраждати користувачі. Така інтелектуальна система включає величезну кількість динамічних критично важливих даних в реальному часі, тому її безпека є серйозною проблемою. Через гостру необхідність забезпечення незмінності та цілісності даних пропонується використовувати спеціальні механізми, які доступні у рішеннях блокчейн.

Критичними проблемами при впровадженні блокчейн технології в мобільні мережі з підтримкою РІП при використанні терагерцового діапазону хвиль є: низькі обчислювальні ресурси, обмежений обсяг пам'яті та енергії на мобільних засобах, часте зміна їх місцезнаходження у просторі та обмежені ресурси зв'язку.

Застосування блокчейна для надійної передачі інформації є важливим при передачі та уникненні втрат або спотворень, які можуть спричинити негативні наслідки. Завдяки конструкції системи довірчого керування в блокчейні її можна успішно застосовувати між вузлами (мобільними терміналами) з децентралізованими системами.

«Шкідливі» мобільні термінали можуть проникати в мережу та поширювати неправдиву інформацію, що призводить до збою в роботі мобільної мережі з підтримкою РІП при використанні терагерцового діапазону хвиль. Але застосування блокчейну для оцінки рейтингу учасника мобільної мережі при використанні терагерцового діапазону хвиль також

є ефективним рішенням для використання в такій інтелектуальній системі, оскільки рейтингова оцінка об'єкта дозволить застосовувати заходи до порушників та заохочувати порядних користувачів. Це дозволить забезпечити зниження кількості повідомлень неправильної поведінки, що створюють ризик або знижують ефективність роботи самої систем.

Використання алгоритмів з довірчого управління та поділу пріоритетів дозволяє учасникам мобільної мережі з підтримкою РІП при використанні терагерцового діапазону хвиль визначати з високою ймовірністю, чи отримане повідомлення є надійним. Так для об'єктів з високим рейтингом репутації інформація буде прийнята швидше, так як якість даних залежить від репутації об'єкта. Значення довіри до учасників мережі визначається на основі оцінок, отриманих в результаті минулої поведінки, які прикріплюються та зберігаються в системі за допомогою блокчейн технології. Даний метод дозволить об'єктивніше сприймати реальну обстановку, стимулювати користувачів на порядну поведінку та послідовно записувати події для подальшої обробки та використання.

Для організації цього процесу пропонується застосовувати блокчейн з удосконалений алгоритмом консенсусу Practical Byzantine Fault Tolerance [18-20], який відповідає за ефективну роботу в асинхронних мережах, дозволяє досягти консенсусу, навіть якщо деякі вузли мережі не відповідають або дають неправильну інформацію. Даний алгоритм передбачає вибір 2 видів вузлів - лідера та резервних вузлів. Кожен вузол у мережі підтримує свій власний внутрішній стан, і коли він отримує повідомлення, він виконує обчислення та готує рішення про нове отримане повідомлення. Індивідуальне рішення кожного вузла надсилається лідеру вузлів, який підтверджує довіру до нового повідомлення на основі рішень усіх вузлів. Лідером пропонується використовувати технології граничних обчислень, тоді як резервні вузли – учасників мобільної мережі з підтримкою РІП при використанні терагерцового діапазону хвиль, підключені до інтелектуальної системи управління.

При передачі інформації пристрій мережі формує повідомлення у вигляді транзакції, записуючи в нього значення рейтингу репутації і пріоритет ситуації. Транзакції записуються до блоку та передаються всім учасникам мережі. Чим вище репутація та пріоритет повідомлення, тим швидше приймається рішення про його прийняття. Блок фіксується, коли більше 2/3 валідаторів попередньо фіксують один і той же блок в тому самому раунді для транзакцій. Якщо повідомлення є компрометуючим або невірним, поведінка відправника повідомлення потім передається в блокчейн і повідомляється довірчому органу. Таким чином репутація відправника повідомлення погіршується.

Більшість сучасних блокчейн-систем є архітектурою єдиного ланцюжка. Таким чином, кожен вузол повинен виконувати безліч дубльованих обчислювальних завдань, що призводить до втрати енергії. Крім того, зниження його продуктивності стає очевиднішим, якщо виникають піки трафіку [18].

У випадку запропонованого рішення немає необхідності ділитися блоками за межі регіону окремого РІП. Для вирішення проблеми масштабованості пропонується архітектура використовує підхід сегментування. Сегментування - це поділ робочого навантаження блокчейн-мережі по одноранговій мережі, щоб кожен вузол не відповідав за транзакційне навантаження всієї мережі [19, 20]. Це дозволяє різним сегментам паралельно обробляти транзакції для збільшення пропускної спроможності, що прискорює процеси валідації, а також перевірки блоків у ситуаціях, що залежать від часу, зберігаючи при цьому сумісність. Відповідно до високої мобільності вузлів незалежних підмереж, різні підмережі можуть мати різну кількість вузлів та час генерації блоків. Як основу взаємозв'язку об'єктів при сегментуванні пропонується використовувати рішення Chameleon, Omniledger чи Elastico [18].

## 7. Перспективи подальшого розвитку досліджень

У статті запропоновані нові принципи реалізації перспективної 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 хендOVERу 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.

## 8. Висновки

1. Запропонована модель бездротової терагерцової мережі з підтримкою РІП та алгоритм синтезу локального цифрового кластеру.

2. Запропонована модель врахування блокування передачі прямої видимості у мережах зв'язку 5G NR з підтримкою РІП при використанні терагерцового діапазону.

3. Рекомендаційні аспекти застосування блокчейн системи для перспективних послуг на мобільних мережах зв'язку терагерцового діапазону.

---

### Список літератури:

- 1) Сайко, В.Г., Одарченко, Р.С. & Баховський, П.Ф. (2021). Мережі мобільного зв'язку нового покоління 4G/5G/6G: монографія. Київ: ТОВ «Про формат». ISBN 978-617-7894-40-6.
- 2) Saiko, V., Narytnyk, T., M. Brailovskyi, M. & Nakonechnyi, V. (2019). 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, 698–702.
- 3) 3GPP TS 37.340 V15.2.0: NR: Multi-connectivity; Overall description, Rel. 15. (2018). Available at. [https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/37\\_series/37.340/](https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/37_series/37.340/).
- 4) Moltchanov, D., Samuylov, A., Petrov, V. (2018). Improving Session Continuity with Bandwidth Reservation in mmWave Communications. IEEE Wireless Communications Letters, 7, 1–4.
- 5) Сайко, В.Г., Наритник Т.М. (2019). Безпроводові системи зв'язку терагерцового діапазону. Німеччина: Видавництво "LAP LAMBERT Academic Publishing RU".
- 6) Hu, S., Rusek, F., & Edfors, O. (2018). Beyond Massive MIMO: The Potential of Positioning With Large Intelligent Surfaces. IEEE Trans. Signal Process., 66 (Apr), 1761–1774.
- 7) He, J., Wymeersch, H., Sanguanpuak, T., Silvén, O., & Juntti, M. (2020) Adaptive beamforming design for mmwave RIS-aided joint localization and communication. IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW).
- 8) Wymeersch, H., He J. (2020). Radio localization and mapping with reconfigurable intelligent surfaces: Challenges, opportunities, and research directions. IEEE Veh. Technol. Mag., 15 (4), 52–61.
- 9) Heath, R., Gonzalez-Prelcic, N., Rangan, S., Roh, W. & Sayeed, A.M. (2016). An overview of signal processing techniques for millimeter wave MIMO systems. IEEE J. Sel. Topics Signal Process., 10 (3), 436–453.
- 10) Wang, Y., Yang, Xu., Zhao, Y., Liu, Y., & Cuthbert, L. (2013). Bluetooth positioning using RSSI and triangulation methods. 2013 IEEE 10th Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), 837–842.
- 11) Huang, C., Alexandropoulos, G.C., Yuen, C., M. Debbah, M. (2019). Indoor signal focusing with deep learning designed reconfigurable intelligent surfaces. Proc. IEEE Workshop on Sig. Proc. Advances in Wireless Commun. (SPAWC), 1-5.

12) Huang, C., Mo, R., Yuen, C. (2020). Reconfigurable intelligent surface assisted multiuser MISO systems exploiting deep reinforcement learning. *IEEE J. Sel. Area. Commun.*, 38 (8), 1839-1850.

13) Олійник, В.Ф., Кривуца, В.Г., Сайко, В.Г., Булгач, С.В. (2011). Системи та мережі цифрового радіозв'язку: інженерно-технічний довідник. Ніжин: ТОВ "Видавництво "Аспект-Поліграф".

14) Сайко, В.Г. (2011). Системи бездротового цифрового радіозв'язку нового покоління: монографія. Київ: ПП "Золоті ворота". ISBN 978-966-2246-23-0.

15) Степанов, С.Н. (2015). Теория телетрафика: концепции, модели, приложения. Москва: Горячая линия – Телеком.

16) Бородин, А.С. (2017). Сети связи пятого поколения как основа цифровой экономики. *Электросвязь*. (5), 45-47.

17) Тархов, Д.А. (2014). Нейросетевые модели и алгоритмы: справочник. Москва: Радио и связь.

18) Табернакулов, А. (2019). Блокчейн на практике. Москва: Альпина Паблишер.

19) Igor M. Coelho; Vitor N. Coelho; Rodolfo P. Araujo; Wang Yong Qiang; Brett D. Rhodes. (2020). Challenges of PBFT-Inspired Consensus for Blockchain and Enhancements over Neo dBFT. *Future Internet*, 12 (8).

20) Бардин, А.П. (2021). Обработка ошибочных ситуаций в больших блокчейн – сетях алгоритмом достижения консенсуса, основанном на решении задачи византийских генералов. *Вестник МГТУ имени М.Э.Баумана*, 4, 28-37.

21) C. Huang, C., Zappone, A. (2019). Reconfigurable intelligent surfaces for energy efficiency in wireless communication. *IEEE Trans. Wireless Commun.*, 18 (8), 4157–4170, Aug.

---

## **A model for building a wireless terahertz network with increased communication reliability**

### **Volodymyr Saiko**

Faculty of Information Technologies, Department of Applied Information Systems, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine  
ORCID 0000-0002-3059-6787

### **Theodore Narytnyk**

Institute of Electronics and Communication of the Ukrainian Academy of Sciences, Kyiv, Ukraine  
ORCID 0000-0002-4118-0226

---

**Abstract:** The proposed principles of implementation of new innovative service of networks of 5 and next generations – use of resource of local clusters of the network infrastructure of terahertz range with integrated reconfigured intellectual surfaces (RPE) for ensuring reliability of communication. The solutions for using the distributed registry for implementation of the mechanism of warning henchconfidence during blocking in the terahertz range are given. New in the proposed solution is that in modern wireless networks during the transfer of service (hinder) of the user's equipment the mechanism of consecutive interaction and transmission of signals between several objects of mobility and session management is launched. The proposed solution differs from the known fact that eliminates the need for consistent processing of requests for many managed objects, especially when the network function should be chosen from a number of candidates and accordingly ensures implementation of various services with ultra-low delays. A proposed terahertz network coverage design model with support for reconfigurable intelligent surfaces based on Kohonen self-organizing maps. The key differences in the approach are the use of the signal-to-noise ratio metric instead of the Euclidean distance, as well as the use of the service-user density to form a digital cluster, allowing to choose the size of the digital network cluster, taking into account the requirements

for the quality of subscriber traffic and the distribution of users across the territory, including for a variety of services based on the concept of low-delay communication networks. The methodological basis of choice of blockchain system and algorithm of consensus on the basis of requirements and advantages is given. Its use allowed to carry out a preliminary assessment of the use of blockchain technologies for integration into the proposed promising solution.

**Keywords:** Terahertz communication systems, distributed register, blocking of transmission of direct visibility, blockchain systems, heterogeneous network 5G.

---