

SECTION 10. TRANSPORT AND COMMUNICATIONS, SHIPBUILDING**10.1 High-reliability 5G / IOT mobile communication method when using the terahertz wavelength range**

Існуючі мережі мобільного зв'язку переважно розгортаються у спектральному діапазоні нижче 3 ГГц. Але одним з перспективних напрямків розвитку мереж 5G є використання вищих частотних діапазонів, таких як діапазони міліметрових і терагерцових хвиль (від 30 до 300 ГГц) [440]. Особливістю терагерцового діапазонів хвиль є те, що вони забезпечують значно ширші спектральні смуги, даючи змогу суттєво підвищити пропускну здатність у стільнику. Іншою перевагою терагерцових хвиль є значно компактніші розміри передавальних та приймальних антен, що дає змогу використовувати більш ефективні схеми просторового мультиплексування за рахунок збільшення кількості антен, як на стороні базової станції так і на стороні абонентського пристрою. Проте, використання вищих частотних діапазонів вимагає врахування при цьому ряд проблем, які необхідно вирішити.

Необхідно розробити нові підходи до організації радіоканалів у діапазоні високих частот, які б дали змогу ефективно використовувати переваги та, водночас, усувати недоліки хвиль терагерцового діапазону. Зокрема, значні загасання потужності сигналу в діапазоні високих частот можна компенсувати більшою кількістю передавально-приймальних антен та більш складними алгоритмами просторового мультиплексування, які б дозволили підвищити енергетичну ефективність каналів зв'язку. Існуючі методи діаграмоутворення у поєднанні із алгоритмами просторового мультиплексування та компенсації інтерференції можуть підвищити енергетичну та спектральну ефективність мереж мобільного зв'язку при їх впровадженні у вищому спектральному діапазоні. Крім того, значне затухання хвиль терагерцового діапазону робить їх перспективними для використання в піко та фемто стільниках, де необхідно забезпечувати значну пропускну здатність в обмежених зонах. Це дозволить

зменшити відстань між спільноканальними стільниками і відповідно підвищити ефективність використання радіочастотних ресурсів в гетерогенних мережах.

Для ефективного впровадження мереж мобільного зв'язку у спектральному діапазоні 30-300 ГГц також, необхідно вирішити ряд проблем пов'язаних із кінцевими абонентським пристроями. Існуючі термінали мобільного зв'язку підтримують багато радіоінтерфейсів у різних частотних діапазонах. Наразі сучасні мобільні пристрої здатні ефективно функціонувати у діапазоні від 800 МГц до 2,7 ГГц, проте впровадження вищих частотних діапазонів вимагає суттєвого вдосконалення апаратної частини терміналів мобільного зв'язку. Крім того, необхідно вдосконалити антенні системи для кінцевих абонентських пристроїв з метою забезпечення їх ефективного функціонування у будь-якому частотному діапазоні від 800 МГц до 300 ГГц.

Дослідження хвиль терагерцового діапазону показали [441], що через більш короткі довжини хвиль передача на вкрай високих частотах піддається блокуванню радіосигналу порівняно невеликими об'єктами. Цей ефект призводить до падіння рівня потужності на приймальній стороні і, тим самим, робить з'єднання терагерцового діапазону менш надійними. Тому представляє інтерес рішення, в якому ущільнення стільникової інфраструктури статично малими стільниками терагерцового діапазону доповнено рухомими вузлами мобільного зв'язку, що призводить до збільшення надійності встановлення з'єднання [442]. Для організації роботи мережі терагерцового діапазону з підвищеною надійністю можливе також використання одночасного підключення (multi-connectivity) абонентського терміналу (MT), коли він з'єднаний з двома і більше стільниками одночасно [443].

Важливо тільки замітити, що блокування з'єднання терагерцового діапазону є випадковою подією, яка вимагає негайної реакції з боку системи зв'язку [444], щоб уникнути розриву активної сесії. Отже, необхідно керувати одночасним підключенням абонентського терміналу до двох і більше з'єднань терагерцового діапазону для оперативного перенаправлення даної сесії на іншу точку радіодоступу при блокуванні поточного з'єднання. Таке управління є

новим функціоналом мережі доступу та відрізняється від відомих підходів, пов'язаних з вивантаженням абонентського трафіку на інші технології радіо доступу.

Тому одним з перспективних напрямків у бездротовій мережі з використанням терагерцового діапазону полягає в розробці інтелектуальних алгоритмів рішення естафетної передачі, щоб визначити час для виконання передачі обслуговування і забезпечення оптимального вибору технології мережі доступу серед всіх доступних мереж доступу для користувачів, забезпеченими багаторежимним мобільним терміналом. Для забезпечення рішення такої задачі по прогнозуванню максимальної дальності інтервалу прямої видимості терагерцового діапазону автори розробили модель на основі засобів штучного інтелекту [445].

Теоретичне дослідження стільникових мереж з можливістю встановлення з'єднань міліметрового діапазону частот часто проводиться методами стохастичної геометрії. Підхід у роботі [446] пропонує математичну модель для аналізу величини SINR та похідних від неї характеристик системи зв'язку при передачі як по лінії вниз, так і по лінії вгору. При цьому передбачається безліч рівномірно розподілених на площині БС і враховуються основні особливості з'єднань міліметрового діапазону частот, такі як можливість блокування передачі об'єктами невеликого розміру та використання антен з гострою діаграмою спрямованості. Для зниження ймовірності відсутності покриття у міліметровому діапазоні частот і підвищення можливої швидкості передачі даних також розроблена двокрокова повно дуплексна схема з ретрансляцією, яка придатна для застосування в мережах 5G [447].

Більшість наявних досліджень у галузі зв'язку міліметрового діапазону частот сходяться на висновок, що через більш короткі довжини хвиль передача на вкрай високих частотах піддається блокуванню радіосигналу порівняно невеликими об'єктами. Цей ефект призводить до падіння рівня потужності на стороні і, тим самим, робить з'єднання міліметрового діапазону частот менш надійними [448, с. 10].

В роботах в напрямку дослідження алгоритмів прийняття рішення щодо ініціації передавання обслуговування (хендоверу) можна виділити три публікації. Перша ґрунтується на алгоритмах багатокритеріального прийняття рішення щодо ініціації міжсистемного хендоверу, у яких різні параметри агрегуються у функції вартості [450]. Друга передбачає оброблення вхідних параметрів за математичними алгоритмами на основі марківських процесів прийняття рішень стосовно переключення між мережами, наприклад, як у [451]. Третя основана на використанні механізмів нечіткої логіки, приклади рішень на основі нечіткої логіки представлені у [452]. Проте у цих роботах критеріями вибору мережі доступу розглядали лише декілька параметрів, які не дають змогу враховувати в процесі оцінки значну множину критеріїв і адаптувати правила прийняття рішень в динамічному режимі роботи бездротових мереж в терагерцовому діапазоні.

Відоме рішення з можливістю одночасного підключення було досліджене у програмного додатку до хмарних систем радіодоступу для підвищення ефективності обслуговування терміналів, розташованих на краю стільника [453].

Недоліком відомого рішення є те, в існуючих моделях хмарних обчислень все ще залишаються нерозв'язаними питання безпеки мережі та персональних даних. Не зважаючи на те, що централізовані хмарні сервіси є доволі зручними для кінцевих абонентів, така парадигма викликає критичні занепокоєння щодо конфіденційності даних абонентів, враховуючи те, що великі обсяги різних даних, які передаються у мережах мобільного зв'язку та Інтернету речей, зберігається та використовується в динамічних хмарних середовищах. Таким чином, довіряючи захист свої даних третій стороні, користувачі ризикують втратити їх конфіденційність, а також несуть супутні ризики, пов'язані із можливим використанням цих даних зловмисниками.

Відоме рішення щодо керування системою обслуговування мобільних користувачів, яка складається з власної інфраструктури оператора мобільного зв'язку та орендованих підсистем обслуговування [454]. Автори запропонували

комплекс методів для управління якістю обслуговування потоків у гетерогенному мобільному середовищі.

Недоліком відомого рішення є те, не досліджено питання спільного управління існуючими мережами для забезпечення QoS з використанням технологій терагерцового діапазону хвиль та підвищення продуктивності гетерогенної мережі.

Ще відомий спосіб для організації роботи мережі міліметрового діапазону хвиль з підвищеною надійністю [455] шляхом використання одночасного підключення (multi-connectivity) абонентського терміналу, тобто коли він з'єднаний з двома і більше стільниками одноразово. Дане рішення направлене на зниження часу, коли абонентський термінал залишається під'єднаним до базової станції (БС) міліметрового діапазону хвиль, з'єднання з якою заблоковано. У разі переходу з'єднання міліметрового діапазону хвиль з поточної БС у заблокований стан, обслуговування терміналу перенаправляється на іншу (резервну) БС, що має досить низьку ймовірність блокування з'єднання в поточній зоні знаходження абонента. Тим самим даний спосіб організації роботи мережі міліметрового діапазону хвиль побічно знижує ймовірність розриву сесії через недостатню якість з'єднання, викликаного його блокуванням. Для роботи цього способу на абонентському терміналі потрібна інформація про те, яка з потенційних БС міліметрового діапазону хвиль буде найменшою мірою заблокована для нього в поточній зоні обслуговування.

Недоліком відомого рішення є те, що складність його технічної реалізації на існуючій централізованій 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.

Крім того, автори не навели як варіанти реалізації технічних рішень, так і не оцінили обчислювальні витрати та витрати часу на прийняття рішення згідно запропонованого способу та його модифікованих версій, що є важливим для забезпечення необхідного показника якості роботи даної мережі QoS.

Математична формалізація задачі.

Вихідні умови задачі:

Нехай:

- задано замкнутий простір θ ;
- простір θ складається з $\theta \rightarrow \theta_t \cup \theta_{nt}$, θ_t - де простір, покритий безпроводними технологіями, θ_{nt} - непокритий простір (мертві зони і зони нестійкого зв'язку).

- у просторі θ діє бездротова гетерогенна мережа (або гетерогенна мережа, що складається з Q мереж радіодоступу та набору з'єднань $n = 1, 2, \dots, N$, кожна з яких складається з окремих станцій ретрансляторів, тобто є сукупністю станцій бездротових зв'язків з відповідними характеристиками:

$$Q = \{Q_i\}, i = 1 \dots n, \quad (1)$$

де Q – базові станції або точки доступу в гетерогенному середовищі, i - кількість станцій.

В просторі θ існують безліч мобільних пристроїв (АТ), які функціонують у вільному режимі (без навантаження), або виконують технологічні операції (чи завдання) як роздільно – в поодиночку, так і разом. Нехай цими пристроями є:

$$F = F_1, F_2, \dots, F_u, \dots, F_c \quad (2)$$

де c - кількість мобільних пристроїв, u – позиція мобільного пристрою, який входить до складу мобільних пристроїв.

Кожен пристрій $F \in F_u$, може бути в трьох станах:

$$Q(F_u) = Q^1, Q^2, Q^3, \text{ де} \quad (3)$$

Q^1 – не функціонує (не включений, несправний), Q^2 – функціонує у вільному режимі, Q^3 – працює: окремо або спільно.

Для виконання АТ кожної технологічної операції накладаються певні вимоги:

1) вимагається виконання умов з боку пристрою або пристроїв, тобто на вибір пристроїв для виконання робочих операцій (на призначення технологічних операцій пристроїв) вимагається виконання низки умов, обмежень, критеріїв.

Всі ці вимоги позначимо через

$$P = \{P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_r\}, \quad (4)$$

де r – загальна кількість вимог, тобто критеріїв, значення якого визначає постановник завдань; P_i – вимога, яку визначає постановник. Вимога або критерій P_i має такі значення (зміст, характеристики) як: рівень сигналу або потужність бездротового зв'язку. Для безвідмовної роботи мобільного пристрою його значення не повинно бути меншим заданого значення, яке визначається на основі попередніх досліджень.

Також існують інші вимоги, такі як: безвідмовність/безперервність не менша E , енергетична потужність не менше O , які повинні бути відомі і задані виходячи з попередніх досліджень.

2) на якість виконання технологічної операції пред'являється ряд вимог:

$$G = \{G_1, G_2, G_3, G_w\}, \quad (5)$$

де w – кількість вимог і критеріїв на виконання (підтримки процесу виконання та результату виконання технологічних операцій), яку визначає постановник задач або завдань. G_i – вимоги на виконання технологічної операції: оперативність, мінімальність витрат енергоспоживання і т. д. на результати виконання технологічної операції, тобто на якість вихідної продукції; максимізація (пропускної здатності, QoS, швидкості передачі або певний комплексний критерій) і т. д.

Тепер, сформулюємо загальну задачу ефективного безвідмовного зв'язку при динамічному блокуванні з'єднання прямої видимості рухомими перешкодами під час передачі у терагерцовому діапазоні довжин хвиль:

Нехай в момент часу t_n стан середовища простору θ наступний, тобто ситуація – прийняття рішень при динамічному блокуванні з'єднання прямої видимості рухомими перешкодами під час передачі у терагерцовому діапазоні довжин хвиль:

$$Q(\theta) = (T_d, F, P, G), \quad (6)$$

T_d – базова станція або точка радіо доступу.

Тоді в момент часу t_n необхідно вибрати таку базову станцію або точку радіодоступу $T_d \in T$, яка задовільнятиме вимоги цільової функції

$$A = L(G) = L\{G_1, G_2, \dots G_j\} \rightarrow opt \quad (7)$$

$$de G = \{G_1, G_2, \dots G_j\}, j < w$$

Далі функцію A перетворимо в цільову функцію виду:

$$f(b_{ij}, c_{ij}, d_{ij}), \quad (8)$$

Цільова функція $f(b_{ij}, c_{ij}, d_{ij})$ це критерій, який необхідно максимізувати (певний комплексний критерій). Тоді загальний алгоритм рішення наведеної вище задачі, тобто завдання забезпечення ефективного безвідмовного зв'язку при динамічному блокуванні з'єднання прямої видимості рухомими перешкодами під час передачі у терагерцовому діапазоні довжин хвиль, буде мати наступний вигляд:

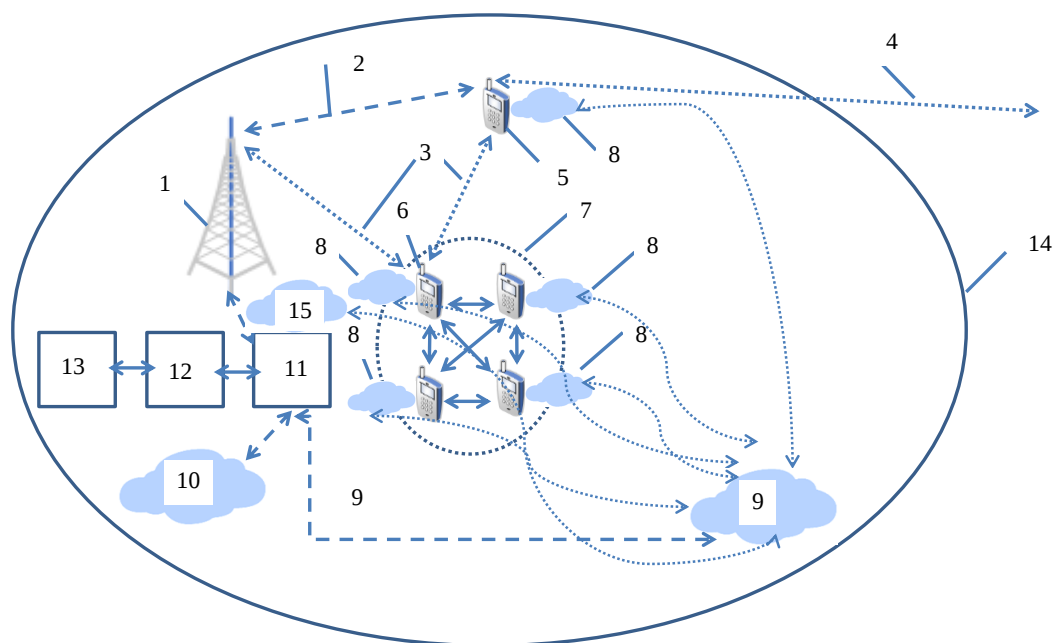
$$\max(f(b_{ij}, c_{ij}, d_{ij})). \quad (9)$$

Поставлена задача вирішується тим, що спосіб мобільного зв'язку 5G [455], що включає процес встановлення з'єднання МТ, оснащеного кількома мережевими інтерфейсами, до кількох точок доступу в бездротових мережах, управління розташуванням МТ, спеціальну процедуру передачі обслуговування (хендовер), яка має три послідовні операції – збір мережевої інформації, прийняття рішення і здійснення передачі обслуговування, додатково включає:

- попереднє формування комплексної бездротової мережі з залученням додаткових ресурсів сусідніх базових станцій та допоміжної кластерної мережі на базі МТ, які знаходяться в режимі очікування, в зоні поточної БС для обслуговування користувачів;
- після встановлення з'єднання МТ, оснащеного кількома мережевими інтерфейсами, до кількох точок доступу в комплексній бездротовій мережі проводиться моніторинг якості її роботи: збір даних та тренування нейронної мережі за допомогою програмного контролера БС мережі, вузла контролю та зберігання даних і інфраструктури нейронної мережі; тренування нейронної мережі; навчання та оптимізації нейронної мережі;
- при прийнятті рішення і здійснення передачі обслуговування застосовується процедура вибору мережі та перехід до нової мережної точки приєднання при блокуванні динамічними перешкодами з'єднання каналу прямої видимості на базі розробленого алгоритму ініціалізації інтелектуального хендоверу, з врахуванням потужності сигналу в зонах покриття основної та сусідніх мереж, мережного енергозбереження, розподілення користувачів у зоні обслуговування головної базової станції, термінали яких знаходяться в режимі очікування, якості обслуговування, розподілення пропускної здатності в межах стільника.

Сутність розробки пояснюється малюнками 1- 3:

На малюнку 1. зображена схема реалізації запропонованого способу мобільного зв'язку 5G з підвищеною надійністю при блокуванні з'єднання прямої видимості рухомими перешкодами при передачі в терагерцовому діапазоні хвиль.



Малюнок 1. Схема реалізації запропонованого способу мобільного зв'язку 5G з підвищеною надійністю при блокуванні з'єднання прямої видимості рухомими перешкодами при передачі в терагерцовому діапазоні хвиль.

На ньому:

1 – Головна базова станція мережі.

2 – Основний канал зв'язку з'єднання MT абонента з поточною базовою станцією.

3 – Резервний канал зв'язку з'єднання MT абонента з поточною MT допоміжної кластерної мережі.

4 – Резервний канал зв'язку з'єднання MT абонента з базовою станцією сусідньої зони обслуговування.

5 – MT абонента.

6 – Головний MT допоміжної кластерної мережі.

7 – Допоміжна кластерна мережа.

8 – Нейронні мережі MT.

9 - Хмара зберігання нейронних мереж.

10 - Хмара зберігання статистичних технічних параметрів FE.

11 – Програмний контролер поточної базової станції мережі.

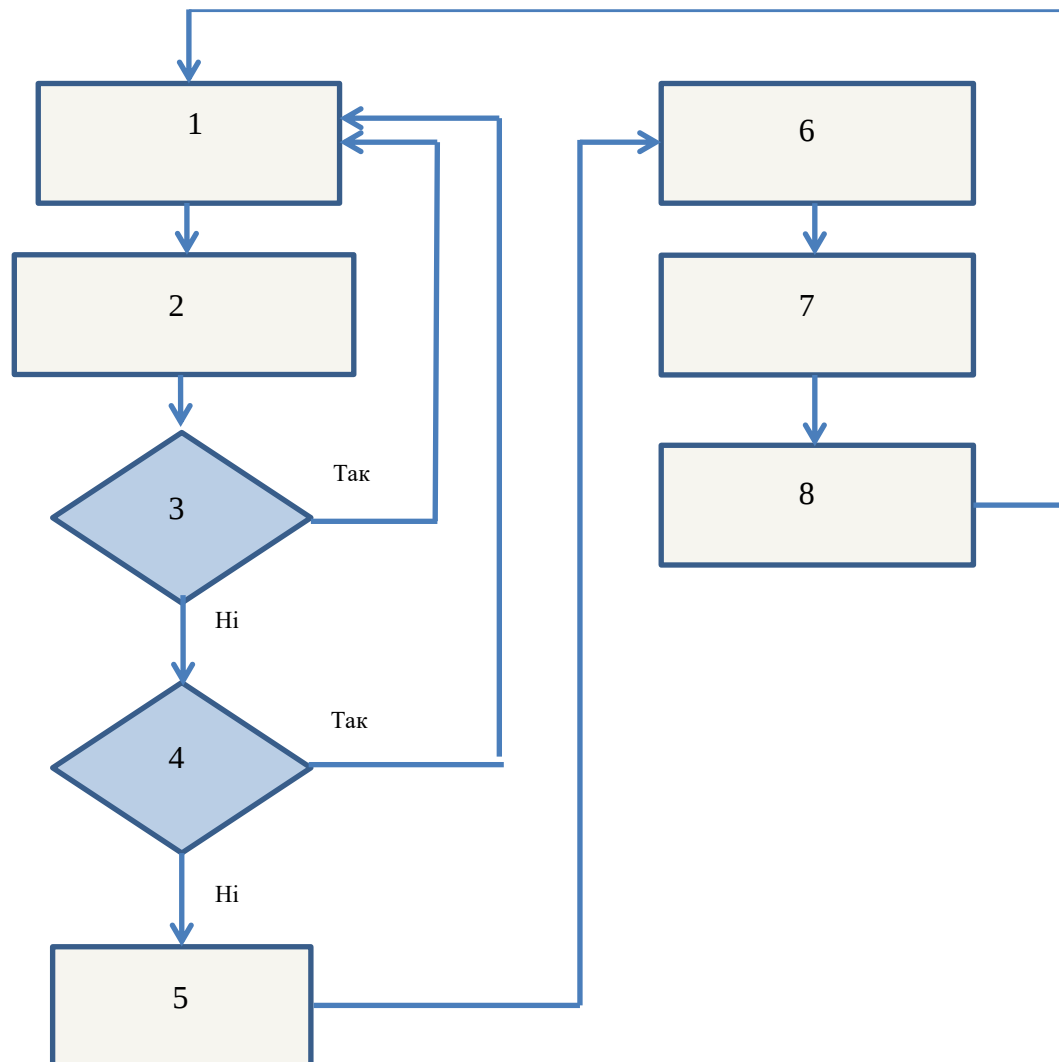
12 – Вузол контролю та зберігання даних.

13 - Блок формування кластерів.

14 - Зона обслуговування поточної базової станції мережі.

15 - Нейронна мережа програмного контролера поточної базової станції мережі.

На малюнку 2 зображена блок-схема алгоритму відстежування стану запропонованого способу мобільного зв'язку 5G з підвищеною надійністю в терагерцовому діапазоні хвиль на базі штучного інтелекту для збору і перетренування відповідних нейронних мереж.



Малюнок 2. Блок-схема алгоритму відстежування стану мережних пристроїв технічної реалізації запропонованого способу для збору і перетренування відповідних нейронних мереж

На ньому:

1 – Штатний режим роботи пристрою технічної реалізації запропонованого способу мобільного зв'язку 5G з підвищеною надійністю терагерцового діапазону хвиль.

2 - Моніторинг стану роботи МТ допоміжної кластерної мережі на базі алгоритмів кластеризації Forel та c-means.

3 – Операція «Нормальний стан роботи пристрою технічної реалізації запропонованого способу?».

4 – Операція «Відомий стан роботи пристрою технічної реалізації запропонованого способу?».

5 - Збір даних для тренування.

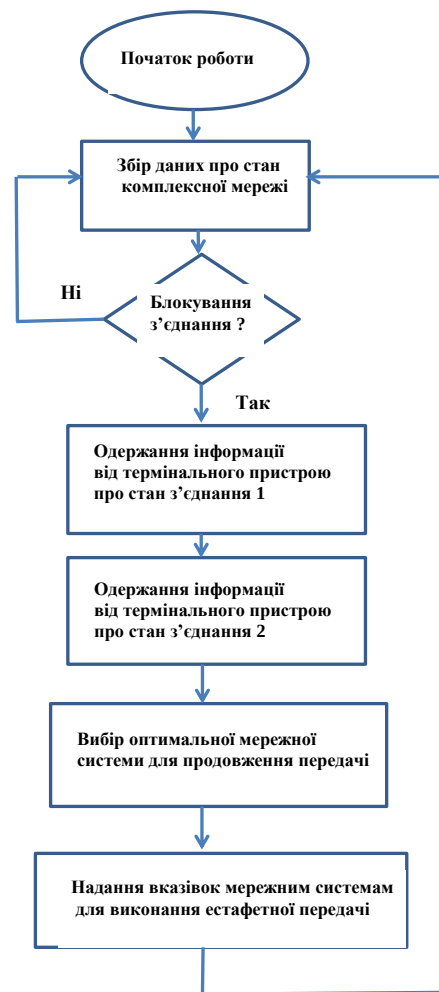
6 - Агрегування і надсилання даних до програмного контролера поточної базової станції.

7 - Перетренування нейронних мереж пристрою технічної реалізації запропонованого способу.

8- Оновлення нейронних мереж.

На малюнку 3 зображена блок-схема алгоритму ініціалізації інтелектуального хендоверу при блокуванні з'єднання прямої видимості рухомими перешкодами при передачі в терагерцовому діапазоні хвиль.

Загальний алгоритм функціонування запропонованого способу мобільного зв'язку 5G з підвищеною надійністю при блокуванні з'єднання прямої видимості рухомими перешкодами при передачі в терагерцовому діапазоні хвиль має чотири режими роботи: початковий запуск, формування комплексної бездротової мережі з залученням додаткових ресурсів сусідніх базових станцій та допоміжної кластерної мережі на базі МТ, режим функціонування, процедура вибору мережі та перехід до нової мережної точки приєднання при блокуванні прямої видимості.



Малюнок 3. Блок-схема алгоритму ініціалізації інтелектуального хендоверу при блокуванні з'єднання прямої видимості рухомими перешкодами при передачі в терагерцовому діапазоні хвиль

- В режимі початковий запуск, абонент спочатку встановлює з'єднання з поточною базовою станцією мережі терагерцового діапазону та надсилає власні вимоги.

- В режимі формування комплексної бездротової мережі з залученням додаткових ресурсів сусідніх базових станцій та допоміжної кластерної мережі на базі МТ, спочатку системою проводиться моніторинг сектору зони обслуговування місцезнаходження абонента; операцію кластеризації МТ, які знаходяться в режимі очікування, в даному секторі; формування робочої групи із 4-5 сусідніх просторово-рознесених МТ, які знаходяться в режимі очікування; пошук та знаходження вільного каналу робочою групою МТ, визначення

головного МТ групи; формування кластеру сусідніх БС та визначення їх пріоритетів для естафетної передачі зв'язку при блокуванні з'єднання прямої видимості між активним МТ і поточною БС мережі.

- В режимі функціонування, абонент встановлює з'єднання з поточною БС мережі і головним МТ допоміжної кластерної мережі одноразово. Проводиться моніторинг роботи комплексної бездротової мережі в терагерцовому діапазоні: збір даних та тренування нейронної мережі за допомогою контролера БС мережі, вузла контролю та зберігання даних і інфраструктури нейронної мережі; тренування нейронної мережі; навчання та оптимізації нейронної мережі.

- В режимі вибору мережі та перехід до нової мережної точки приєднання при блокуванні з'єднання рухомими перешкодами каналу прямої видимості застосовується розроблений алгоритм ініціалізації інтелектуальної естафетної передачі з врахуванням потужності сигналу в зонах покриття основної та сусідніх мереж, мережного енергозбереження, розподілення користувачів у зоні обслуговування поточної базової станції, термінали яких знаходяться в режимі очікування, якості обслуговування, розподілення пропускної здатності в межах стільника.

На рівні управління мережними пристроями запропоноване рішення для реалізації способу мобільного зв'язку 5G з підвищеною надійністю в терагерцовому діапазоні (див. мал. 1) має програмний контролер БС 11, який має з'єднання з вузлом контролю та зберігання даних 12, хмарою 9 зберігання нейронних мереж, хмарою 11 зберігання статистичних технічних параметрів FE (Features Engineering).

Для створення допоміжної кластерної мережі на базі МТ, які знаходяться в режимі очікування в зоні поточної БС для обслуговування користувачів, застосовується удосконалений спосіб конвергенції гетерогенної мережі терагерцового діапазону з використанням технології міжтермінальної взаємодії та кластерного аналізу.

Він передбачає, що тільки обмежене число мобільних терміналів буде зв'язуватися безпосередньо з базовою станцією. Ці термінали називаються

пристроями з прямим підключенням (ППП). Інші пристрої підключаються до ППП як точки доступу і носять назву пристрої з опосередкованим підключенням (ПОП).

Основна відмінність цього підходу від існуючих рішень когнітивного радіо полягає у принципах реалізації радіоінтерфейсу. Сучасні когнітивні мережі використовують неліцензований діапазон частот технологій Wi-Fi для зв'язку між терміналами. Проте, цього недостатньо для нових мобільних мереж з високою пропускнуою здатністю у зв'язку із обмеженою частотного діапазону хвиль. Тому, застосовуємо спільне використання частотного діапазону для міжтермінального обміну та зв'язку між ППП та БС на базі використання терагерцового діапазону. Це рішення передбачає конвертування несучих частот у ППП, для того щоб відокремити частотний спектр передавання сигналів терагерцового діапазону з базової станції до ППП, від частотного діапазону який використовується в міжтермінальній мережі. При цьому абонент ППП використовує тільки частину інформаційного потоку для свого сеансу зв'язку. Решта інформації ретранслюється через ППП до всіх ПОП, використовуючи інші спектральні ресурси. Це дає можливість уникнути інтерференції, покращити завадозахищеність та забезпечити належний рівень якості сприйняття послуг.

Дана особливість та можливості встановлення прямих з'єднань між термінальними пристроями, використовується в запропонованому рішенні для організації допоміжної кластерної мережі на базі МТ, які знаходяться в режимі очікування в зоні поточної БС для обслуговування користувачів. Для цього спочатку проводиться процес кластеризації МТ, які знаходяться в режимі очікування в зоні обслуговування користувачів поточної БС відносно місцезнаходження абонента, який плануються обслуговувати мережею. Проводиться формування просторово-рознесеної групи з 4-5 сусідніх МТ відносно місцезнаходження МТ абонента. Для того, щоб забезпечити якість комутації користувачів, незалежно від їх розташування, пропонується новий підхід до розподілення пропускнуої здатності рівномірно в межах даного стільника. В даному випадку для пошуку вільного каналу між множиною МТ

утворюється допоміжна кластерна мережа, в якій один з МТ виступає в ролі головного МТ. Цей МТ вибирається за критерієм якості каналу зв'язку та максимальної кількості сусідніх просторово-рознесених МТ. Дана модель відрізняється від класичної гетерогенної мережі тим, що малі стільники є динамічними і точки доступу в них є один, або декілька МТ. ПОП приєднані до ППП чи до інших ПОП за критерієм максимального відношення сигнал/шум.

Той МТ (ВОП) кластерної групи який перший знаходить вільний канал, він автоматично становиться головним і резервує його для інших МТ групи, які матимуть змогу при блокуванні з'єднання перешкодами каналу прямої видимості МТ абонента (МТ (ППП) абонента – поточна БС мережі) здійснювати передавання свої даних у наступних кадрах за допомогою утвореного нового канал зв'язку: МТ (ПОП) абонента – головний МТ(ППП) групи – поточна БС мережі.

Перевагою такого підходу є те, що більшість МТ даної групи в мережі не приймає безпосередньо участі у процесі пошуку за доступ до каналу, що дає змогу використовувати значно менше часове вікно і відповідно достатньо малу ймовірність появи колізій при естафетній передачі у випадку блокування перешкодами каналу прямої видимості МТ абонента. Зрозуміло, що вибір кількості груп та їх розмір залежить від балансування пропускної здатності та ймовірності колізій. Крім того, розмір груп також залежить від близькості просторово-рознесених МТ, які знаходяться в режимі очікування. Оскільки при зростанні відстані міжтермінальних з'єднань МТ можуть фізично знаходитися у різних зонах покриття, даний спосіб не дає гарантій ефективного функціонування при блокуванні перешкодами каналу прямої видимості МТ абонента. У даному випадку з урахуванням показника мережного енергозбереження утворюється новий канал з залученням додаткових ресурсів сусідніх базових станцій: МТ (ППП) абонента поточної БС мережі – БС сусідньої мережі.

Для визначення станів МТ запропонованого рішення для реалізації способу мобільного зв'язку 5G з підвищеною надійністю в терагерцовому

діапазону застосовується кластерний підхід із використанням ML (Machine Learning) алгоритмів Forel та c-means (с – середніх) [456]. Даний підхід дозволяє визначити на базі певного проміжку часу необхідні стани запропонованого пристрою або появу нових станів, врахувати динаміку переміщення абонентів, більшу кількість функціональних технічних параметрів із мінімальною зміною програмного забезпечення та дає можливість виділяти робочі групи МТ по зв'язності, по відстані від центру, по щільності МТ в зоні обслуговування поточної БС. Крім того, він дозволяє врахувати вимоги до якості обслуговування (пропускної спроможності) для МТ, що кластеризуються, і забезпечують підвищення ефективності використання мережних ресурсів.

Авторами даного рішення запропоновано використання інтелектуальних алгоритмів на базі тренуваних моделей штучного інтелекту для моніторингу якості комплексної бездротової мережі з залученням додаткових ресурсів сусідніх базових станцій та допоміжної кластерної мережі на базі МТ та забезпечення прийняття рішення на естафетну передачу обслуговування при блокуванні з'єднання прямої видимості рухомими перешкодами каналу прямої видимості. Робота цих алгоритмів зосереджена на управлінні використання просторово-рознесеними каналами встановленого з'єднання МТ до кількох точок доступу в бездротових мережах і як результат оптимізації використання частотно-часових ресурсів. Для цього такі алгоритми мають мати відповідну інфраструктуру для збору даних, тренування, тестування і оновлення відповідних тренуваних моделей. Її складовими є: модуль роботи алгоритмів ML на програмному контролері БС мережі; модуль моніторингу і тренування нейронної мережі; модуль навчання та оптимізації нейронної мережі; модуль роботи алгоритмів із використанням нейронної мережі, канали зв'язку для оновлення нейронних мереж.

Функціональні метрики розробленої системи оцінки роботи перетренованої нейронної мережі повинні бути звичні функціональні параметри даного рішення: потужності сигналу в зонах покриття основної та сусідніх мереж, параметр мережевого енергозбереження, дані розподілення пропускної

здатності в межах стільника та користувачів у зоні обслуговування поточної базової станції, термінали яких знаходяться в режимі очікування.

Якщо перетренована модель для певного алгоритму призвела до погіршення функціональних параметрів то дана модель повинна бути повернена на дотренування або має бути видалена із модуля зберігання даних. Для того щоб інтелектуальні алгоритми управління видавали правильний результат необхідно зібрати достатній набір даних. Під достатнім набором даних розуміється оптимальна кількість даних при якій тренування моделей вважається завершеним і не спостерігається так званий процес оверфітінгу.

Для збору функціональних даних використовується програмний контролер БС 11 мережі, який безпосередньо здійснює процес збору відповідних даних із мережних блоків запропонованого пристрою для реалізації способу мобільного зв'язку 5G з підвищеною надійністю в терагерцовому діапазоні. Кожен блок запропонованої системи (блоки 5, 6, 7, 11 див. мал. 1) є джерелом інформації для ML алгоритмів. Основна обробка даних перед тренуванням нейронних мереж 11 здійснюється на програмному контролері БС 11 мережі. Всі зібрані функціональні параметри, які необхідні для тренування нейронних мереж зберігаються у хмарі FE 9. Доступ до цих параметрів мають лише інтелектуальні алгоритми на програмному контролері БС 11 мережі. Якщо відбулася зміна стану мережних пристроїв запропонованого способу мобільного зв'язку 5G, яка вимагає перетренування відповідних моделей, то відповідні алгоритми здійснюють процедуру перетренування їх на базі нових параметрів FE. Після цього відбувається заміна відповідних натренованих моделей у хмарі. Коли з'явилась нова версія моделі для блоків 5, 6, 7, 11, то вони завантажують відповідну оновлену версію моделі.

Важливою складовою інтелектуальних алгоритмів управління є збір безпосередньо даних для навчання. Однією із особливостей використання даних алгоритмів у телекомунікаційних радіомережах терагерцового діапазону є змінність станів мережних пристроїв в комплексній бездротовій мережі, а також

появу нових і зникнення поточних станів, що вимагає додаткового збору даних і перетренування нейронних мереж.

Розроблений алгоритм збору даних (див. мал. 2) передбачає відстежування стану блоків запропонованого пристрою для раціонального збору даних із використанням зміни значень, як метрик евклідових відстаней, так і метрик функціональних технічних параметрів, по відношенню до кількості кластерів. Новизна даного підходу полягає у відмінності від класичної реалізації тим, що введені метрики співвідношення сигнал/шум потужності сигналу в зонах покриття основної та сусідніх мереж, параметр мережного енергозбереження, дані розподілення пропускної здатності в межах стільника та користувачів у зоні обслуговування головної базової станції термінали яких знаходяться в режимі очікування, замість метрики Евклідової відстані, що дає змогу враховувати просторові та часові характеристики поширення сигналу в терагерцовому діапазоні хвиль в процесі само оптимізації функціонування при блокуванні з'єднання прямої видимості рухомими перешкодами.

Безшовні передачі обслуговування, з низькою затримкою і мінімальними втратами пакетів, є вирішальними факторами для мобільних користувачів, які хочуть отримати безперервні і надійні послуги Виконання передачі обслуговування вимагає фактичної передачі пакетів даних на новому каналі безпроводному зв'язку для того, щоб перенаправити шлях з'єднання мобільного пристрою до нової точки приєднання.

У традиційних хендверах, які відбуваються в однорідних мережах, тільки інформація, отримана від радіоканалу, така як прийнятий сигнал (RSS) і доступність каналу використовуються в процесі прийняття рішення про передачу обслуговування. На відміну від цього рішення, крім RSS, такі параметри як потужності сигналу в зонах покриття поточної та сусідніх мереж, мережного енергозбереження, розподілення користувачів у зоні обслуговування головної базової станції, термінали яких знаходяться в режимі очікування, якості обслуговування, розподілення пропускної здатності в межах стільника, у запропонованому рішенні використані в процесі прийняття передачі

обслуговування при блокуванні з'єднання прямої видимості рухомими перешкодами. Це робить весь процес естафетної передачі більш складним і неоднозначним, так як різні чинники мають враховуватися, щоб зробити вдале рішення естафетної передачі.

Блок-схема алгоритму ініціалізації інтелектуальної естафетної передачі при блокуванні з'єднання каналу зв'язку прямої видимості рухомими перешкодами при передачі в терагерцовому діапазоні хвиль зображена на фіг. 3. Він може бути реалізований за допомогою протоколів, таких як Mobile IP та протоколу управління передачею потоків.

Для здійснення запропонованого рішення можуть бути використані стандартні та авторські розробки вузлів і компонентів приймально-передавальних систем (модулів) діапазону терагерцового діапазону частот [457], які побудовані з використанням технологій фотоніки та мікрохвильової електроніки, що дає також можливість запропонувати нові схемно-технологічні рішення створення в терагерцовому діапазоні. Крім того, для моніторингу просторово-енергетичних даних структури кластера мережі можна застосувати програмний додаток розроблений у програмному середовищі Matlab [458] з використанням пакету 5G Toolbox (програмний приклад «NR Positioning Using PRS»).

Подальша перспектива використання даного рішення вбачається в наступному. Запропонована авторська розробка дозволяє вирішити ряд науково-технічних задач для створення нових методів та алгоритмів комплексної гетерогенної мережі 5G з одночасним підключенням користувача до кількох вузлів мережної інфраструктури в умовах їх щільного розміщення, що враховує блокування з'єднання каналу зв'язку прямої видимості рухомими перешкодами при передачі в терагерцовому діапазоні хвиль, застосовний для поліпшення параметрів якості обслуговування.

Серед науково-практичних завдань, які необхідно ще вирішувати для цього, основними є наступні:

- дослідження роботи комплексної бездротової мережі з залученням додаткових ресурсів сусідніх базових станцій та допоміжної кластерної мережі на базі мобільних терміналів зони обслуговування поточної базової станції на основі імітаційної моделі руху абонентів для прогнозування вибору ефективних алгоритмів ініціалізації інтелектуальної естафетної передачі при блокуванні з'єднання каналу зв'язку прямої видимості рухомими перешкодами при передачі.

- розроблення та дослідження імітаційної моделі процесів динамічного розподілу ресурсів у комплексній бездротовій мережі з залученням додаткових ресурсів сусідніх базових станцій та допоміжної кластерної мережі на базі мобільних терміналів зони обслуговування поточної базової станції при блокуванні з'єднання каналу зв'язку прямої видимості рухомими перешкодами при передачі.