

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА БІОМЕДИЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

УДК 621.37

«Допущено до захисту»

Завідувач кафедри біомедичної
інженерії та телекомунікацій
к.т.н., доц. Мікітчук Т.М.

« 14 » грудня 2021 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему «Дослідження та оптимізація алгоритму управління ресурсами в
гетерогенних мережах стандарту LTE»

за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка»
освітній ступінь «магістр»

Виконавець роботи
студент 2 курсу, гр.ЗТРмд-20-1

13.12.2021 
(дата, підпис)

Василевський А.П.

Керівник роботи
к.т.н., доц.

15.12.2021 
(дата, підпис)

Ципоренко В.В.

Житомир
2021

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА БІОМЕДИЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної магістерської роботи

на тему «Дослідження та оптимізація алгоритму управління ресурсами в гетерогенних мережах стандарту LTE»

Виконав: студент 2 курсу,
групи ЗТРмд-20-1 спеціальності
172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Василевський А.П.

Керівник Ципоренко В.В.

Рецензент Нікітчук Т.М.

Житомир
2021

«Затверджено»

Завідувач кафедри біомедичної
інженерії та телекомунікацій

Т.М. Нікітчук

«10» січня

2021 р.

Завдання на кваліфікаційну магістерську роботу

Василевський Артем Петрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи. Дослідження та оптимізація алгоритму управління ресурсами в гетерогенних мережах стандарту LTE

затверджено наказом по університету від «08» листопада 2021 р. № 547/с

2. Мета дослідження. Підвищення питомої швидкості передачі інформації підвищення в частотних каналах абонентів фемтостільників

3. Вихідні дані (характеристики об'єкта, умов дослідження та ін. Стільник мережі LTE з піковою пропускнуою спроможністю $C = 50$ Мбіт/с, Висота підвісу антени 50м.

4. Основні задачі дослідження. Розробка алгоритму розподілу ресурсів стільника. Розробка математичної моделі, що описує розподіл ресурсів стільника. Моделювання роботи стільника системи мобільного зв'язку з метою дослідження розподілу ресурсів.

5. Термін подання роботи до захисту грудень 2021р

6. Дата видачі завдання «10» січня 2021 р.

Науковий керівник

Ципоренко В.В.

(підпис)

(прізвище, ініціали)

Завдання прийняв

Василевський А.П.

до виконання

(підпис)

(прізвище, ініціали)

АНОТАЦІЯ

Магістерська робота присвячена дослідженню системи мобільного зв'язку, побудованої на основі використання технологій четвертого покоління. Розроблена математична модель розподілу ресурсів. Також розроблено алгоритм розподілу радіо ресурсів мережі мобільного зв'язку.

Проведено моделювання роботи мережі мобільного зв'язку четвертого покоління на основі використанням неоднорідної структури мережі.

ANNOTATION

The master's thesis is devoted to the study of the mobile communication system, built on the use of fourth generation technologies. A mathematical model of resource allocation has been developed. An algorithm for allocating radio resources of the mobile network has also been developed. The fourth-generation mobile network was modeled on the basis of a heterogeneous network structure.

РЕФЕРАТ

Дана магістерська робота присвячена дослідженню та оптимізації алгоритму управління ресурсами в гетерогенних мережах стандарту LTE.

Кваліфікаційна магістерська робота містить 74 сторінки, 25 рисунків, 4 таблиці, 35 джерел посилання.

У вступі обґрунтовано актуальність розробки та сформульовано мету, об'єкт та предмет розробки і поставлені задачі.

У першому розділі проведено аналіз відомих публікацій, які містять дослідження проблем розподілу ресурсів мережі стандарту LTE.

У другому розділі проведено розробку математичного апарату ймовірнісної моделі обслуговування на рівні розподілу ресурсів у взаємодії пар людина-людина та машина-машина. Також проведено розробку алгоритму розподілу радіоресурсу між мікро та макростільниками.

У третьому розділі проведено результати моделювання роботи системи мобільного зв'язку стосовно розподілу каналних ресурсів між користувачами типу H2H та M2M. Також проведено моделювання розподілу частотного ресурсу між фемтостільником та макростільником.

У висновках коротко наведено виконання всіх поставлених задач.

У додатку наведено програму моделі.

Теоретичне та практичне значення одержаних результатів:

1. Розроблено математичний апарат моделювання розподілу ресурсів системи мобільного зв'язку.
2. Розроблено алгоритми розподілу ресурсів системи мобільного зв'язку.
3. Розроблено модель виділення ресурсів в системі мобільного зв'язку.
4. Проведено дослідження алгоритмів виділення та розподілу ресурсів в системі мобільного зв'язку.

Ключові слова: мобільний зв'язок, 4G, LTE, MIMO, базові станції, широкосмугова передача даних.

ЗМІСТ

Вступ	7
1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ПРИНЦИПІВ ПОБУДОВИ МЕРЕЖ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ СТАНДАРТУ LTE	8
1.1 Огляд публікацій, в яких започатковано вирішення проблеми управління ресурсами в гетерогенних мережах стандарту LTE	8
1.2 Огляд алгоритмів зниження внутрішньо системних перешкод в гомогенних і гетерогенних мережах стандарту LTE	10
2 РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ РОЗПОДІЛУ РЕСУРСІВ МЕРЕЖІ СТАНДАРТУ LTE	18
2.1 Розробка моделі послідовного виділення радіоресурсів в мережі LTE	18
2.2 Аналіз моделі та розробка алгоритму розрахунку ймовірнісних характеристик	23
2.3 Розробка алгоритму управління ресурсами в гетерогенних мережах стандарту LTE	25
2.4 Розробка алгоритму знаходження оптимальних значень параметрів	29
2.5 Вибір моделі розповсюдження сигналу і розрахунок втрат на трасі поширення	30
2.6 Розробка імітаційних моделі методу eICIC	32
3 МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ МЕРЕЖІ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ СТАНДАРТУ LTE	44
3.1 Дослідження алгоритму управління ресурсами в гетерогенних мережах стандарту LTE	47
Висновки	57
Перелік використаних джерел	60
Додаток А	64

ВСТУП

Розвиток безпроводних телекомунікаційних технологій дозволяє розширювати спектр послуг, що надається. Розширення пропускної здатності каналів мобільного зв'язку дозволяє використовувати ці системи як для організації взаємодії людина-людина(H2H), так і машина-машина(M2M). в цьому випадку виникає проблема розподілу каналних ресурсів між цими взаємодіями.

Крім того, внаслідок багатьох причин не можливо або нераціонально організовувати однорідну систему мобільного зв'язку. Ця неможливість може бути обумовлена географічними або соціальними факторами, такими, як проведення масових заходів, що обумовлюють велике скупчення абонентів на невеликій площі.

Для обслуговування подібних аномалій використовується окремі стільники невеликих розмірів, які повинні мати можливість взаємодії із системами мобільного зв'язку із стільниками нормальних розмірів.

Проблема розподілу абонентів, частотного та інформаційного ресурсів між великими та малими стільниками, які територіально суміщено між собою являється досить складною та нетривіальною науковою задачею.

Об'єктом дослідження є управління ресурсами системи мобільного зв'язку четвертого покоління, що побудована на основі стандарту LTE.

Мета роботи – розробка оптимального алгоритму розподілу ресурсів системи мобільного зв'язку 4G та вибір оптимальних їх значень.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні **задачі**:

1. Дослідити літературні джерела з метою вивчення принципів організації роботи стільників систем мобільного зв'язку.
2. Розробити алгоритм розподілу ресурсів стільника.
3. Розробити математичну модель, що описує розподіл ресурсів стільника.
4. Провести моделювання роботи стільника системи мобільного зв'язку з метою дослідження розподілу ресурсів.

1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ПРИНЦИПІВ ПОБУДОВИ МЕРЕЖ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ СТАНДАРТУ LTE

1.1 Огляд публікацій, в яких започатковано вирішення проблеми управління ресурсами в гетерогенних мережах стандарту LTE

Стандарт та технологія мобільного зв'язку 4-го покоління з'явилися досить недавно, тому має багато невирішених питань та потребує великої кількості досліджень. Це обумовлює велику кількість публікацій та тему використання технології LTE.

В [1] розглянуто алгоритм розподілу радіо ресурсів між користувачами однієї базової станції мережі LTE. Була запропонована математична модель у вигляді мультисервісної системи масового обслуговування з обмеженим ресурсом декількох типів і випадковими вимогами до виділення ресурсу. На прикладі пуассоновського потоку даних і експоненціального часу обслуговування було отримано розподіл стаціонарних ймовірностей в мультиплікативній формі.

В [2] авторами побудована модель схеми доступу до ресурсів спільного використання у вигляді системи масового обслуговування з одночасними відмовами ненадійних приладів, надійними приладами і кінцевою чергою, отримані формули для розрахунку основних імовірнісних характеристик переривання обслуговування і проведено їх чисельний аналіз.

В результаті проведенного в [3] моделювання, були отримані залежності часу встановлення uplink з'єднання від кількості абонентських пристроїв і інтенсивності запитів на uplink передачу. Крім того, було чисельно оцінено вплив числа доступних преамбул в процедурі випадкового доступу на час встановлення з'єднання.

В [4] розроблено метод управління інформаційними і сигнальними потоками на бездротовому сегменті мережі LTE, який оснований на використанні різних порогів.

В [5] приведено порівняльний аналіз технологій мобільного зв'язку 4-го покоління. Показано, що характеристики радіопокриття і ємності мережі LTE значно вище характеристик WiMax.

В [6] авторами побудована модель стільника мережі LTE з тимчасовою додатковою смугою частот для обслуговування користувачів у вигляді багатолінійної системи масового обслуговування з ненадійними приладами. Отримана формула для розрахунку середнього числа користувачів, які очікують початку обслуговування та проведено аналіз основних характеристик системи.

В [7] в якості ефективного методу розрахунку стаціонарних ймовірностей і імовірнісних характеристик спрощеної системи масового обслуговування запропоновано рекурентний алгоритм обчислення нормуючої константи і отримані рекурентні формули для ймовірності блокування і середнього обсягу і дисперсії зайнятих ресурсів.

У [8] запропонована схема динамічного розподілу радіоресурсів між H2H-користувачами і M2M-пристроями з виділенням ресурсів послідовно діапазонами фіксованого розміру. У термінах теорії телетрафіка побудована математична модель стільника мережі LTE з однаковою вимогою до мінімальної швидкості передачі для всіх типів блоків даних M2M-пристроїв. Показано, що безліч блокувань запитів за часом для різних типів блоків даних збігаються.

Побудована в [9] математична модель дозволяє досліджувати розподіл радіоресурсів в стільнику мережі LTE, який обслуговує трафік телефонії і міжмашинної взаємодії, в припущенні, що ресурси для пропуску трафіку міжмашинної взаємодії виділяються діапазонами фіксованого розміру, а надходження запитів на його передачу описується за допомогою марковського вхідного потоку.

У статті [10] отримано стаціонарний розподіл для системи масового обслуговування з обмеженим ресурсом, декількома вхідними пуассоновськими потоками і експоненціальним обслуговуванням. Показано, що стаціонарний розподіл має мультиплікативний вигляд. Подальші дослідження припускають перевірку гіпотези про інваріантності виду стаціонарного розподілу щодо закону

розподілу тривалості обслуговування, а також розробку чисельних методів для аналізу ймовірнісно-часових характеристик системи.

У [11] побудована модель схеми доступу до ресурсів мультисервісної мережі з поточним одноадресним і багатоадресним трафіком. Пріоритетне обслуговування реалізовано за допомогою механізму переривання користувачів менш пріоритетної послуги - послуги відео за запитом, що генерує одно адресний трафік, - в разі недостатності ресурсів для надання більш пріоритетних послуг мультимовлення - послуги відеоконференцій і гри в режимі реального часу, для яких розглянуті дві дисципліни обслуговування.

Запропоновано рекурентний алгоритм розрахунку стаціонарного розподілу ймовірностей станів моделі, а також формули для розрахунку ймовірнісних характеристик моделі - ймовірностей переривання і блокування, чисельний аналіз яких дозволить операторам бездротових мереж наступних поколінь провести оцінку рівня якості послуг, що надаються.

1.2 Огляд алгоритмів зниження внутрішньо системних перешкод в гомогенних і гетерогенних мережах стандарту LTE

Умовно всі схеми по зниженню міжканальних завад в LTE можна поділити на дві групи (рисунок 1.1): статичні і динамічні. До статичних відносяться FFR (Fractional Frequency Reuse, Жорстке дробове повторне використання частотного ресурсу), SFR (Soft Frequency Reuse, М'яке повторне використання частотного ресурсу), PFR (Partial Frequency Reuse, Часткове повторне використання частотного ресурсу). До динамічних відносяться схеми e-ICIC.

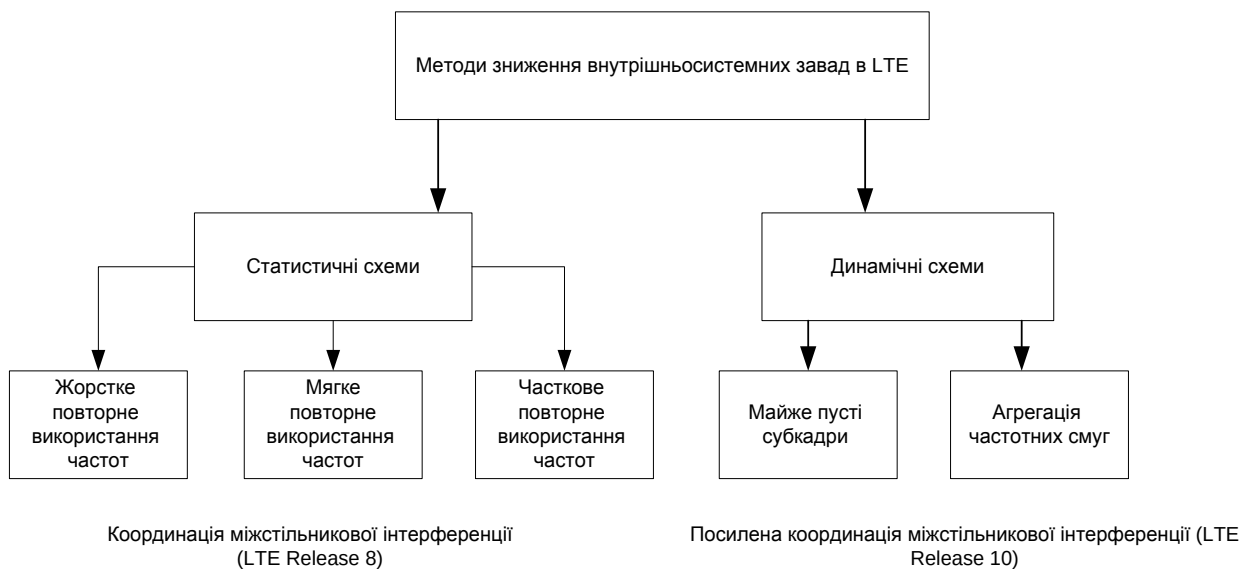


Рисунок 1.1 – Методи зниження міжканальних завад

Класичний спосіб зниження внутрішньо системних завад описаний в [6] і використовує частотні кластери (для стандарту GSM) - група прилеглих друг до друга стільників, в межах якої повторне використання одних і тих же частот неприпустимо через перевищення порогового рівня взаємних завад. Для LTE коефіцієнт повторного використання частот в стільниках кластера дорівнює одиниці у випадках повного і м'якого повторного використання і менше одиниці при жорсткому і дробовому повторному використанні смуг частот.

Повторюючи цей частотний кластер, можна побудувати мережу LTE, так як піднесучі в системі ортогональні, а, отже, внутрішньо стільникову інтерференцію немає необхідності враховувати, а міжстільникова - знижується за рахунок розподілу потужності між смугами частот, виділених для користувачів в центральному і граничному діапазоні відповідно.

У статті [7] проводиться порівняння методів SFR і PFR з різними коефіцієнтами повторного використання частот з двома новими методами. Метою дослідження є вибір методу, що підвищує пропускну здатність на кордоні стільників і не погіршує при цьому середню пропускну здатність в секторі. Запропоновані алгоритми працюють на основі розподілу ресурсних блоків для абонентів. Для кожного сектора резервуються «заборонені» ресурсні блоки, які

в першому випадку не можуть бути використані в інших секторах, а в другому використовуються лише з 10% рівнем потужності. Складаються цільові матриці відповідності ресурсних блоків і користувачів, розподіл в яких відбувається на основі Угорського алгоритму. Результати моделювання наведені на рисунках 1.2 – 1.4.

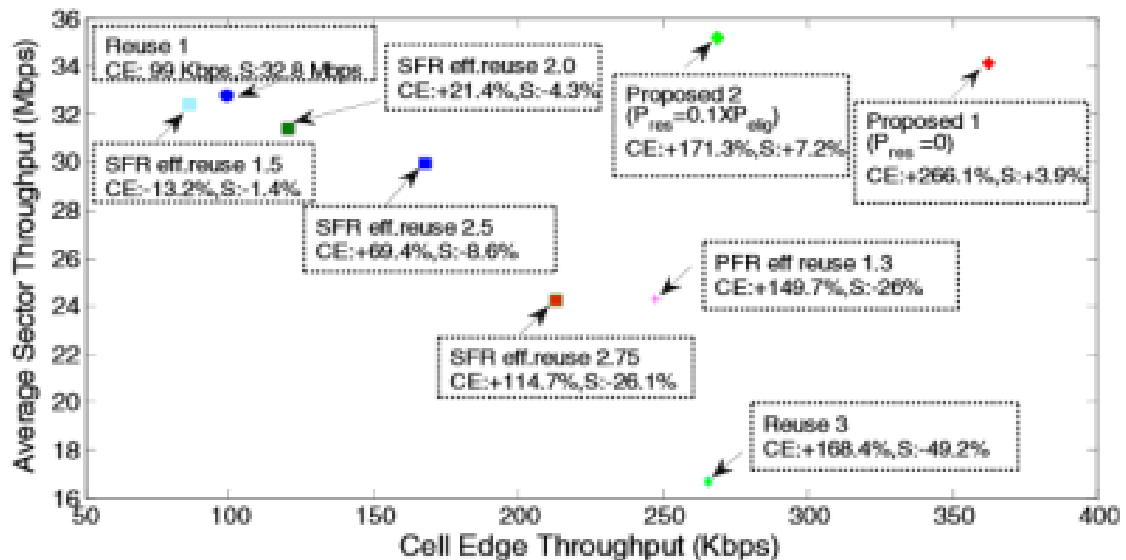


Рисунок 1.2 – Карта забезпечення середньої та граничної пропускної здатності в залежності від використаного алгоритму

Аналіз даних, наведених на рисунку 1.2 показує, що метод з коефіцієнтом повторного використання дає приріст пропускної здатності на кордоні сектора на 168,4%, але погіршує середню пропускну здатність сектора на 49,2% в порівнянні зі схемою повторного використання частот 1. Аналогічно, метод PFR покращує пропускну здатність на кордоні сектора на 149, 7% і зменшує середню на 26%. Метод SFR з коефіцієнтами повторного використання частот 2, 2.5, 2.75 збільшують пропускну спроможність на кордоні сектора на 21,4%, 69,4% і 114,7% з відповідним зменшенням середньої пропускної здатності на 4,3%, 8, 6% і 26,1%.

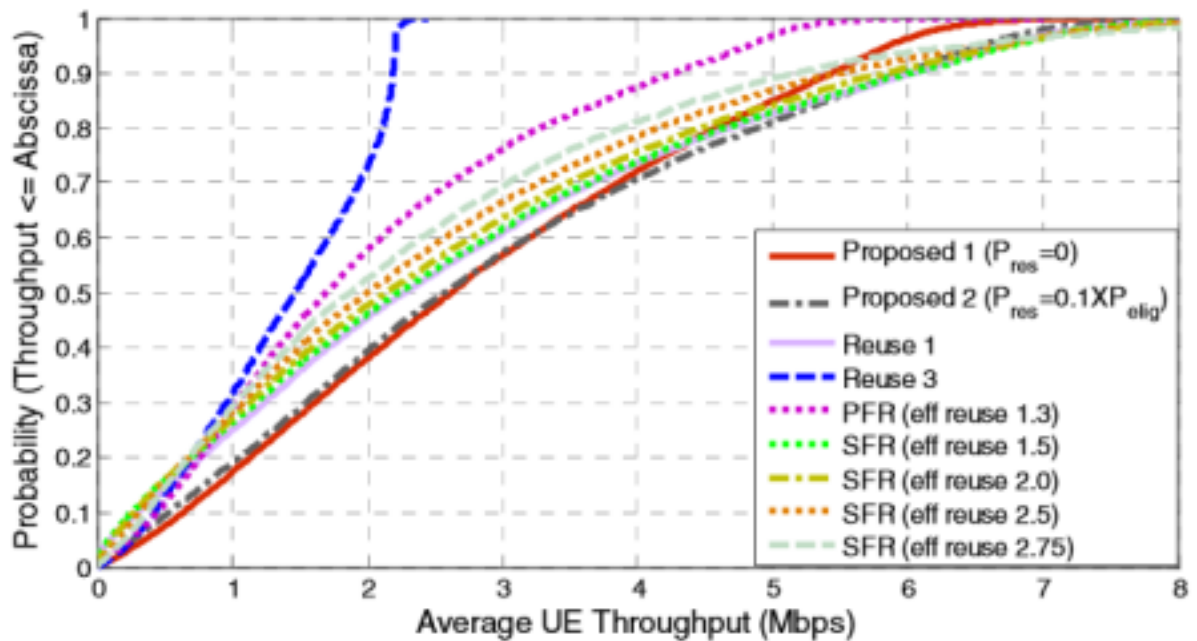


Рисунок 1.3 – Інтегральна функція розподілу пропускної здатності в секторі для запропонованих алгоритмів

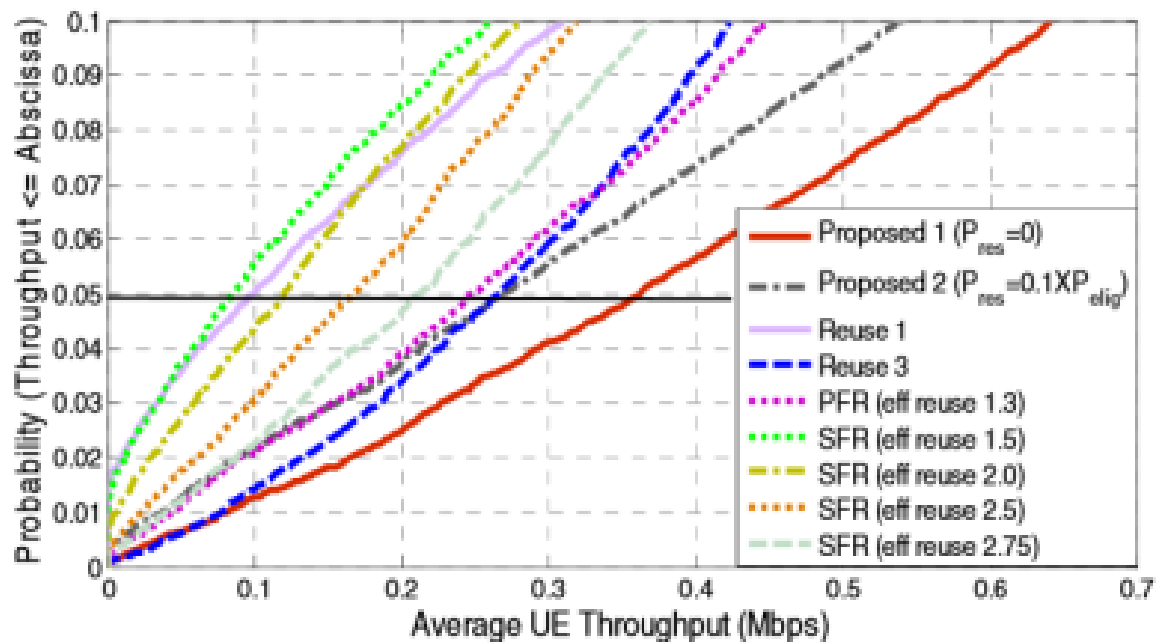


Рисунок 1.4 – Інтегральна функція розподілу пропускної здатності на кордоні сектора для запропонованих алгоритмів

Запропоновані алгоритми з розподілом ресурсних блоків дають вигравш по двома пропускними здібностями. Схема з нульовою потужністю ресурсних

блоків (266, 1%, 3,9%), схема з 10% - потужністю ресурсних блоків (171,3%, 7, 2%).

Технологія ICIC, що включає в себе статичні схеми зниження міжканальних завад в сусідніх стільниках, була впроваджена в LTE Release 8. Алгоритми ICIC призначені для функціонування на БС. У стандартах 2G / 3G інтерференцією управляли контролери БС. В 4G обмін інформацією між сусідніми БС про ступінь зайнятості ресурсу відбувається по інтерфейсу X2. У низхідному каналі БС відправляє RNTPI - повідомлення (Relative narrowband transmission-power indicator), отримавши які сусідні БС коректують потужність випромінювання на певних частотах. За висхідному каналі сусіднім стільників відправляється два типи повідомлень: НІІ (High interference indicator) і ОІ (Overload indicator). Перший показник сигналізує про частоти, які БС - відправник визначає для своїх користувачів на кордоні стільника і які не повинні бути використані абонентами інших стільників. Другий показник вказує на рівень міжканальних завад в певній смузі частот, і БС, які отримали це повідомлення вживають заходів щодо зниження завад на цих частотах.

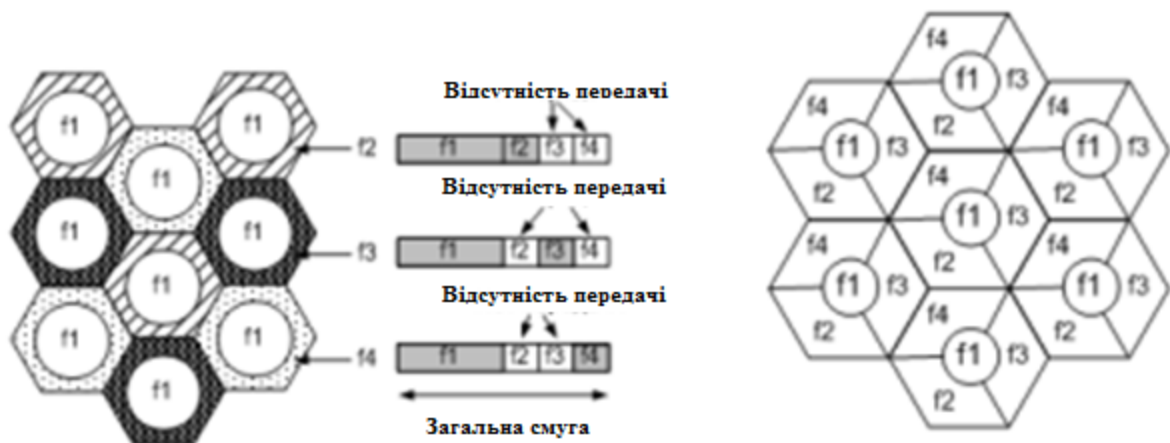


Рисунок 1.5 – Метод дробного повторного використання частот

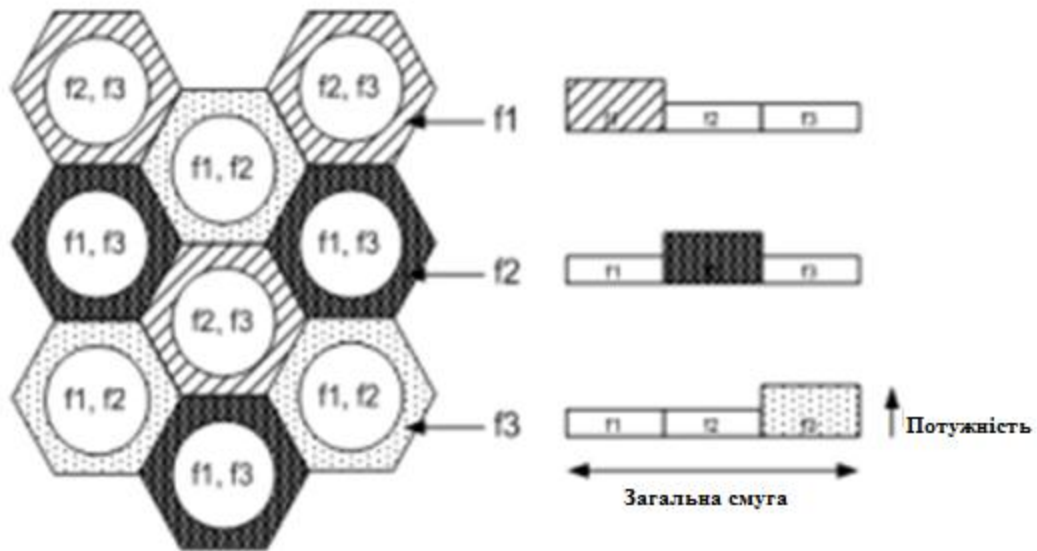


Рисунок 1.6 – Метод м'якого повторного використання частот

При м'якому і дробовому повторному використанні частотного ресурсу (рисунки 1.5, 1.6) кожен стільник розділений на дві зони - центральна частина і кордон стільника - і призначення піднесучих відбувається в залежності від знаходження користувача в певній зоні.

Коефіцієнт повторного використання частот в центральній зоні дорівнює 1, отже, всі користувачі цієї зони у всіх сусідніх стільниках отримують частоти з одного діапазону, а користувачі на кордоні стільники обслуговуються з коефіцієнтом повторного використання частот рівним 3. Також здійснюється контроль рівня потужності передачі (в центральній зоні використовується знижена потужність випромінювання БС). Недоліком є те, що робоча смуга системи недовикористовується.

Однак технологія ICIC в частотній області орієнтована на гомогенні мережі і ефективна при захисті від внутрішньо системних завад тільки фізичних каналів даних, а не каналів управління (PDCCH, PCFICH і PHICH).

Для усунення недоліку ICIC в 3GPP Release 10 була використана технологія eICIC (enhanced Inter-Cell Interference Coordination), в якій для зниження внутрішньосистемних завад застосовуються динамічні схеми: в частотній області використовується агрегація частотних смуг (Carrier

aggregation, CA), а в часовій - передача даних в кадрах з наявністю тільки опорних символів ABS (Almost Blank Subframes). Ці субкадри відведені для обслуговування користувачів, схильних до інтерференції (обслуговуються пікостільника і підключитися до неї в результаті CRE - «постраждалих користувачів»).

У Release 10 введений стандарт LTE - Advanced, який є розвитком стандарту LTE. В рамках LTE - Advanced можливо кілька сценаріїв агрегації спектра (рисунок 1.7):

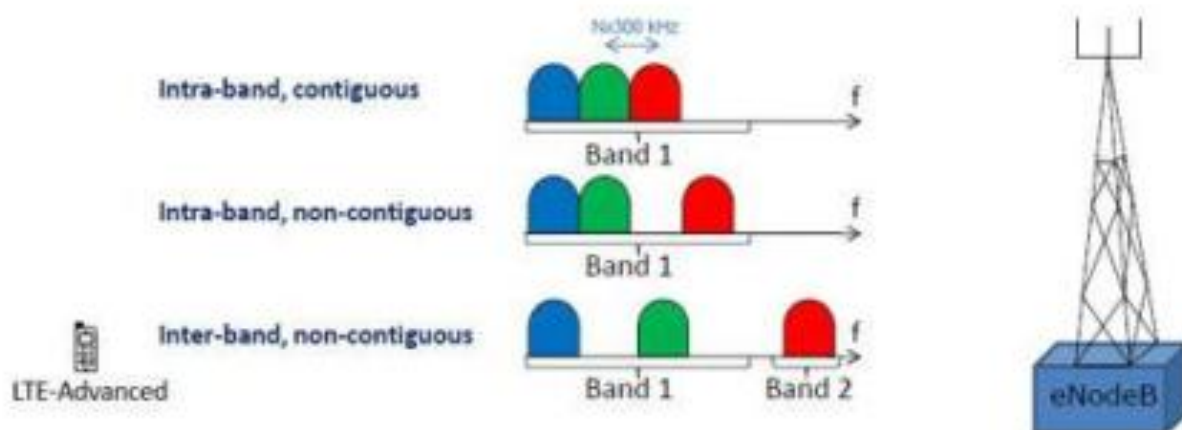


Рисунок 1.7 – Варіанти агрегації спектра

- 1) Intra-band, contiguous або агрегація спектрів суміжних смуг в межах одного діапазону.
- 2) Intra-band, non-contiguous або агрегація спектрів несуміжних смуг в межах одного діапазону.
- 3) Inter-band, non-contiguous або агрегація спектра з різних діапазонів.

Максимальне число частотних каналів, які агрегуються, які називаються компонентними несучими, при ширині спектра одного каналу 20 МГц рівне п'яти. При цьому керуючу інформацію можна передавати на спеціально виділеній компонентній несучій PCC (Primary component carrier, первинна компонентна несуча), а дані - на SCC (Secondary component carrier, вторинна компонентна несуча).

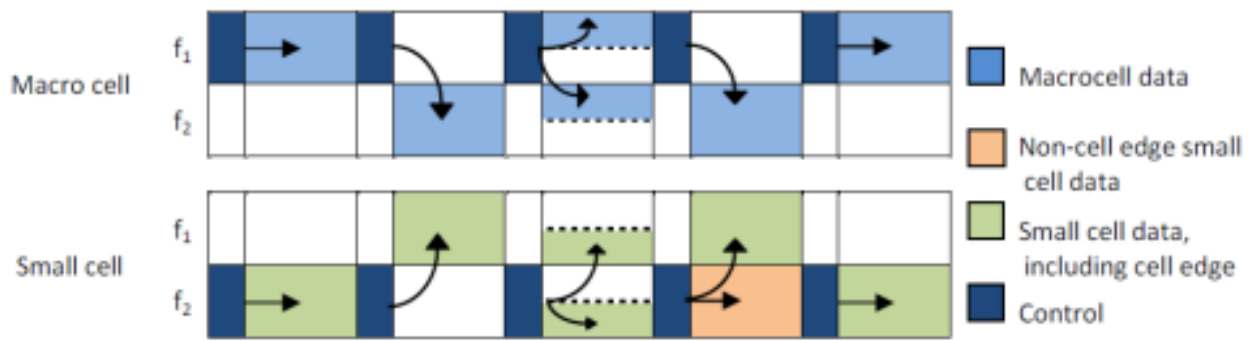


Рисунок 1.8 – Розподіл ресурсів по компонентним несучим

Розподіл ресурсів, показаний на рисунку 1.8, дозволяє уникнути внутрішньо системних завад завдяки розподілу даних і керуючої інформації макро- фемтостільників в одні і ті ж моменти часу на різні несучі f_1 і f_2 . Проте, рівень інтерференції в гетерогенній мережі критичний тільки для користувачів на кордоні стільника (в зоні CRE), тому дані користувачів фемтостільників, локалізованих в центральній області стільника (помаранчевий колір на рисунку 1.8), і дані користувачів макростільниками можуть передаватися на одній несучій

Висновки. В розділі було проведено аналіз відомих публікацій, які містять дослідження проблем розподілу ресурсів мережі стандарту LTE. Основна тенденція цих досліджень полягає в тому, що мережа LTE розглядається як система масового обслуговування із різного роду допущеннями та спрощеннями. Також в розділі приведено аналіз алгоритмів розподілу ресурсів в існуючих мережах.

2 РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ РОЗПОДІЛУ РЕСУРСІВ МЕРЕЖІ СТАНДАРТУ LTE

2.1 Розробка моделі послідовного виділення радіоресурсів в мережі LTE

Розглянемо стільник мережі LTE, в якій H2H-користувачі та M2M-пристрої мають однакове значення відношення сигнал-шум SNR (Signal-to-Noise Ratio) і не змінюють свого положення щодо базової станції. Це означає, що всі радіоканали між базовою станицею та абонентськими пристроями мають однакові характеристики.

Будемо вважати як пропускну здатність стільника мережі LTE пікову швидкість передачі даних, яку позначимо C одиниць каналного ресурсу (ОКР), причому за одиницю каналного ресурсу приймемо мінімальну допустиму швидкість передачі для M2M-трафіку.

Користувачам надається одна H2H-послуга, наприклад, голосова телефонія або потокове відео, а також мережа підтримує передачу K типів блоків даних від множини M2M-пристроїв. Для надання послуги H2H-користувачам зарезервовано R_{H2H} ОКР.

В цьому випадку

$$C_{M2M} := C - R_{H2H}$$

ОКР яке доступне для M2M-пристроїв,

$$C_{H2H} := C - C_{M2M}$$

ОКР – для користувачів H2H-послуги.

Схема стільника, що обслуговує M2M-і H2H-трафік, зображена на рисунку 2.1.

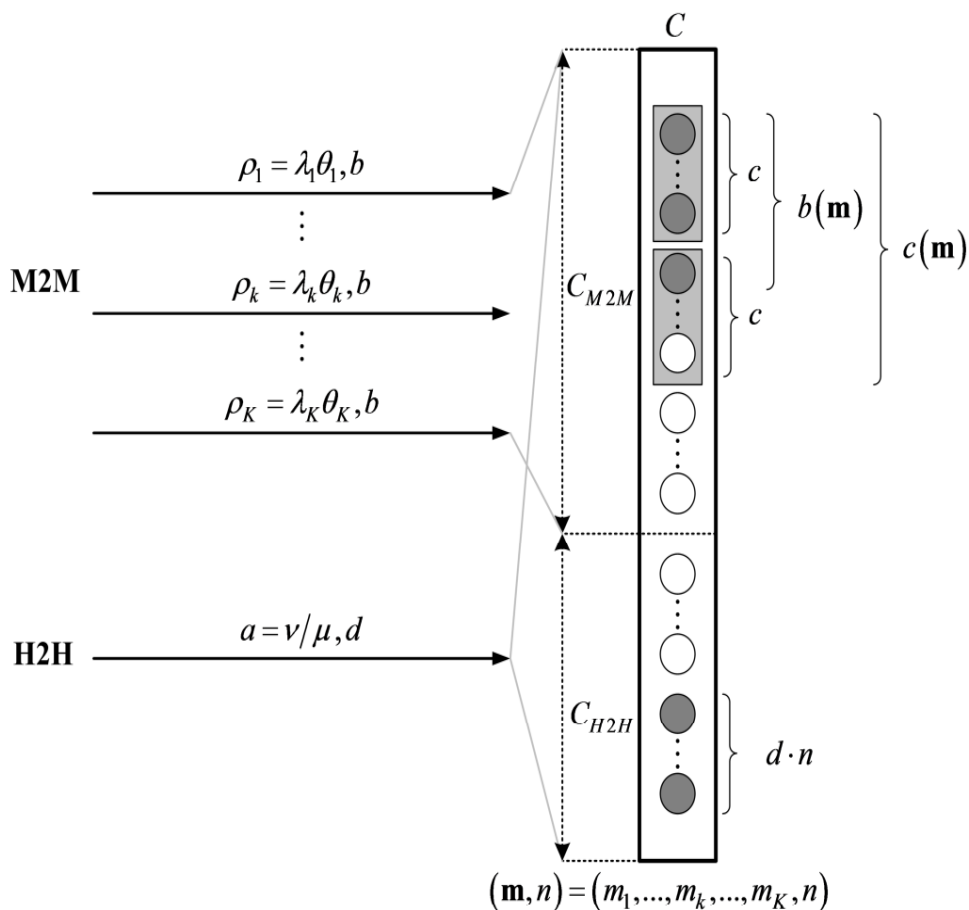


Рисунок 2.1 – Модель розподілу ресурсів стільника LTE із діапазоном фіксованого розміру

Нехай для передачі блоку даних будь-якого типу від пристроїв M2M потрібно мінімум b ОКР. При цьому передачі поточного числа блоків даних ресурси виділяються діапазонами фіксованого розміру з ОКР. Тоді величина

$$M := \lfloor c/b \rfloor = \max \{y \in \mathbb{N} : y \leq c/b\}$$

визначає максимальну кількість блоків даних, які можуть бути одночасно передані на одному діапазоні ресурсів.

Позначимо $S := \lfloor C_{M2M}/c \rfloor$ максимальну кількість діапазонів ресурсів фіксованого розміру, які можуть бути виділені в стільнику для обслуговування M2M пристроїв.

Вважаємо, що вхідний потік запитів M2M-пристроїв на передачу блоків даних k -типу є пуассонівським з інтенсивністю λ_k [с⁻¹], а довжина блоку розподілено за експоненційним законом із середнім θ_k [біт].

Позначимо $\rho_k := \lambda_k \theta_k$ відповідну інтенсивність запропонованого навантаження на передачу блоків даних k -типу, $k = 1, K$. Для надання послуги Н2Н потрібно d ОКР.

Передбачається, що вхідний потік запитів Н2Н-користувачів є пуассонівським з інтенсивністю ν [с⁻¹], а час надання Н2Н-послуги розподілено за експоненційним законом із середнім $1/\mu$ [с].

Позначимо $a := \nu/\mu$ інтенсивність запропонованого навантаження створюваного користувачами Н2Н-послуги.

У моделі при надходженні запиту на передачу блоку даних k -типу, $k = 1, K$, від М2М-пристроїв можливі три ситуації.

1. Запит буде прийнято на обслуговування, і додаткові ресурси не будуть виділено. Ситуація можлива, коли на момент надходження запиту число блоків, що передаються, таке, що зменшення швидкості їх передачі (яка не може бути менше, ніж b) дозволить прийняти на обслуговування ще один блок даних.
2. Запит буде прийнято на обслуговування, та діапазон ресурсів фіксованого розміру буде виділено. Ситуація можлива, коли на момент надходження запиту число блоків, що передаються таке, що зменшення швидкості їх передачі (яка не може бути менше, ніж b) не дозволяє прийняти на обслуговування ще один блок, і вільні ОКР з доступної для М2М пристроїв пропускної спроможності C_{M2M} для виділення додаткового діапазону.
3. Інше. Запит заблоковано через відсутність вільних ресурсів.

Аналогічно для випадку, коли надходить запит Н2Н-користувача, можливі дві ситуації.

1. Запит Н2Н-користувача буде прийнято на обслуговування, якщо на момент його надходження вільні хоча б із ОКР.
2. В іншому випадку запит буде заблоковано через відсутність вільних ресурсів.

Позначимо $m_k(t)$ кількість блоків даних k -го типу в момент $t \geq 0$ від М2М-пристроїв, а $n(t)$ кількість користувачів, яким в момент $t \geq 0$ надається Н2Н послуга. В цьому випадку функціонування моделі стільника LTE з трафіком міжмашинної взаємодії описує випадковий процес

$$\{m(t), n(t), t > 0\} := \{m_1(t), \dots, m_K(t), n(t), t > 0\}$$

над простором станів

$$\chi := \{m \geq 0, n \geq 0 : n \cdot d \leq C - c(m), c(m) \leq C_{M2M}\} \quad (2.1)$$

де $c(m) := c \cdot \left\lceil \frac{b(m)}{M} \right\rceil := c \cdot \min \left\{ y \in \mathbb{N}, y \geq \frac{b(m)}{M} \right\}$ - кількість ОКР, що виділено для

передачі $m_\bullet := \sum_{k=1}^K m_k$ блоків даних M2M-пристроїв,

а $b(m) := b \cdot m_\bullet$ — мінімальна кількість ОКР, яка необхідна для передачі такої кількості блоків даних.

У зроблених припущеннях про пуасонівський вхідний потік та експоненційне обслуговування випадковий процес $(m(t), n(t))$ є марківським процесом (МП). Багато блокувань для M2M-пристроїв, що передають блоки даних k - типу і безліч блокувань для H2H-користувачів можуть бути представлені наступним чином:

$$B_k := \{(m, n) \in \chi : n \cdot d > C - c(m + e_k) \vee c(m + e_k) > C_{M2M}\}, k = \overline{1, K} \quad (2.2)$$

$$B_{H2H} := \{(m, n) \in \chi : (n + 1) \cdot d > C - c(m)\} \quad (2.3)$$

З урахуванням припущення, що для передачі блоку даних M2M- пристроїв будь-якого типу потрібно b ОКР, безліч B_k блокувань набуде наступного вигляду:

$$B_k := \left\{ (m, n) \in \chi : n \cdot d > C - \frac{c(m_\bullet + 1)}{d} \vee \frac{c(m_\bullet + 1)}{d} > C_{M2M} \right\}, k = \overline{1, K} \quad (2.4)$$

Отриманий вираз (2.4), що визначає множину блокувань запитів на передачу блоків даних k -типу залежить тільки від сумарної кількості переданих блоків даних $m_\bullet$. З урахуванням викладеного множина блокувань запитів на передачу блоків даних будь-якого типу від M2M-пристроїв у наступному вигляді:

$$B_{M2M} := \{(m, n) \in \chi : n \cdot d > C - c(m_\bullet + 1) \vee c(m_\bullet + 1) > C_{M2M}\}. \quad (2.5)$$

У припущенні про стаціонарність МП $(m(t), n(t))$ існує стаціонарний розподіл ймовірностей $p(m, n)$, $(m, n) \in \mathcal{X}$, $(m(t), n(t))$, який задовольняє наступній системі рівнянь рівноваги:

(2.6)

$$\begin{aligned}
& p(m, n) \left[\sum_{k=1}^K \left(\lambda_k \cdot 1\{(m, n) \notin B_{M2M}\} + \frac{c(m_{\bullet})}{\theta_k} \cdot 1\{m_k > 0\} \right) + \right. \\
& \left. + \nu \cdot 1\{(m, n) \notin B_{H2H}\} + \mu n \right] = \sum_{k=1}^K p(m - e_k, n) \cdot \lambda_k \cdot 1\{m_k > 0\} + \\
& + \sum_{k=1}^K p(m + e_k, n) \cdot \frac{c(m_{\bullet})}{\theta_k} \cdot 1\{(m, n) \notin B_{M2M}\} + \\
& + p(m, n+1) \mu(n+1) \cdot 1\{n > 0\} + p(m, n-1) \cdot \nu \cdot 1\{n > 0\}, k = \overline{1, K}, (m, n) \in \mathcal{X}.
\end{aligned}$$

Аналіз діаграми, наведеної на рисунку 2.2, показує, що виконується критерій Колмогорова та, МП $(m(t), n(t))$ є зворотнім випадковим процесом. Тоді стаціонарні ймовірності МП $p(m, n)$, $(m, n) \in \mathcal{X}$ задовольняють системі рівнянь часткового балансу:

$$\begin{cases} p(m, n) \cdot \frac{c(m_{\bullet})}{\theta_k} = p(m - e_k, n) \cdot \lambda_k, m_k > 0, k = \overline{1, K}, (m, n) \in \mathcal{X} \end{cases} \quad (2.7)$$

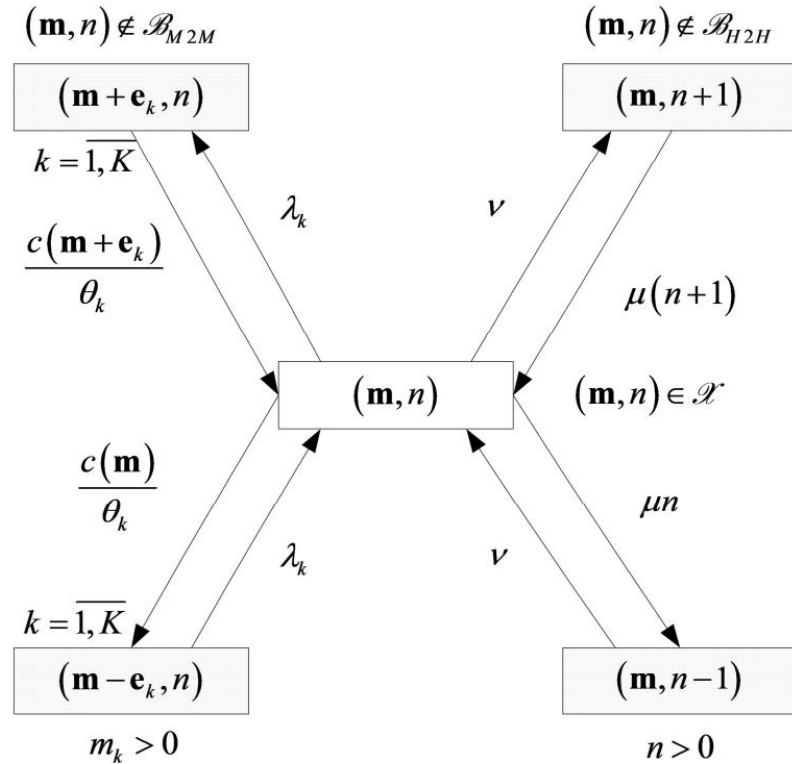


Рисунок 2.2 – Діаграма інтенсивностей переходів між (m, n) та сусідніми станами при частковому балансі, $(m, n) \in \mathcal{X}$

2.2 Аналіз моделі та розробка алгоритму розрахунку ймовірнісних характеристик

Із системи рівнянь (2.7) стаціонарний розподіл даного МП може бути знайдено у явному вигляді, яке отримано у наступному виразі.

Стаціонарний розподіл ймовірностей станів оборотного марківського процесу $(m(t), n(t))$ представимо у вигляді

$$p(m, n) = G^{-1}(\chi) c^{m_{\bullet}} \left(\prod_{i=1}^{m_{\bullet}} \left[\frac{b \cdot i}{M} \right] \right)^{-1} \cdot \left(\prod_{k=1}^K \rho_k^{m_k} \right) \cdot \frac{a^n}{n!}, (m, n) \in \chi, \quad (2.8)$$

де $G(\chi) = p^{-1}(0,0)$ - нормуюча константа.

Систему рівнянь (2.7) можливо записано у вигляді рекурентного алгоритму розрахунку стаціонарного розподілу $p(m, n)$, $(m, n) \in \chi$.

Алгоритм розрахунку розподілу ймовірностей

Початкові данні: $C, C_{H2H}, K, c, b, \nu, \mu, d; \lambda_k, \theta_k, k = \overline{1, K}$.

1. Розрахунок початкових параметрів:

Розрахунок запропонованого навантаження:

$$\rho_k = \lambda_k \cdot \theta_k,$$

$$\alpha := \frac{\nu}{\mu}.$$

$$C_{M2M} = C - R_{H2H},$$

$$S = \left\lfloor \frac{C_{M2M}}{c} \right\rfloor,$$

$$M = \left\lfloor \frac{c}{b} \right\rfloor.$$

2. Розрахунок ненормованих ймовірностей $g(m, n)$ і нормуючої константи $G(X)$.

2.1 $g(0,0) = 1, G(X) = 1$.

2.2 $c(m_{\bullet}) = c \cdot \left\lfloor \frac{b(m_{\bullet})}{c} \right\rfloor,$

$$b(m_{\bullet}) = b \cdot m_{\bullet},$$

$$m_{\bullet} = 0, \dots, \left\lfloor S \cdot \frac{c}{b} \right\rfloor.$$

2.3 Розрахувати

$$2.3.1 \quad g(m_1, \dots, 0, \dots, 0, 0) = g(m_1 - 1, \dots, 0, \dots, 0, 0) \left(\frac{\rho_1}{c(m_1)} \right),$$

$$G(X) = G(X) + g(m_1, \dots, 0, \dots, 0, 0), \quad m_1 = 1, \dots, \left\lfloor S \cdot \frac{c}{b} \right\rfloor.$$

$$2.3.2. \quad g(m_1, m_2, \dots, 0, \dots, 0, 0) = g(m_1, m_2 - 1, \dots, 0, \dots, 0, 0) \left(\frac{\rho_2}{c(m_{\bullet})} \right),$$

$$G(X) = G(X) + g(m_1, m_2, \dots, 0, \dots, 0, 0),$$

$$m_2 = 1, \dots, \left\lfloor S \cdot c - m_{\bullet} b \right\rfloor$$

$$m_{\bullet} = 0, \dots, \left\lfloor S \cdot \frac{c}{b} \right\rfloor$$

$$g(m_1, m_2, \dots, m_k, \dots, m_K, 0) = g(m_1, m_2, \dots, m_k, \dots, m_K - 1, 0) \left(\frac{\rho_K}{c(m_{\bullet})} \right),$$

$$G(X) = G(X) + g(m_1, m_2, \dots, m_k, \dots, m_K, 0),$$

$$m_K = 1, \dots, \left\lfloor \frac{S \cdot c - m_{\bullet} b}{b} \right\rfloor$$

$$m_{\bullet} = 0, \dots, \left\lfloor S \cdot \frac{c}{b} \right\rfloor$$

2.4 Розрахувати:

$$g(m_1, m_2, \dots, m_k, \dots, m_K, n) = g(m_1, m_2, \dots, m_k, \dots, m_K, n - 1) \left(\frac{a}{n} \right),$$

$$n = 1, \dots, \left\lfloor \frac{C - c(m_{\bullet})}{b} \right\rfloor$$

$$m_{\bullet} = 0, \dots, \left\lfloor S \cdot \frac{c}{b} \right\rfloor$$

3. Розрахунок нормованих ймовірностей $p(m, n)$

$$p(m_1, m_2, \dots, m_k, \dots, m_K, n) = \frac{g(m_1, m_2, \dots, m_k, \dots, m_K, n)}{G(X)}$$

$$n = 0, \dots, \left\lfloor \frac{C - c(m_*)}{d} \right\rfloor$$

$$m_* = 0, \dots, \left\lfloor S \cdot \frac{c}{b} \right\rfloor$$

Знаючи розподіл ймовірностей $p(m, n)$, можливо розрахувати значення ймовірностей блокувань запитів M2M-пристроїв:

$$B_{M2M} = \sum_{(m,n) \in B_{M2M}} p(m, n).$$

та H2H користувачів:

$$B_{H2H} = \sum_{(m,n) \in B_{H2H}} p(m, n).$$

Важливою характеристикою є величина середнього часу передачі блоків даних k -типу T_k , яка може бути обчислена за формулою:

$$T_k = \sum_{(m,n) \in B_{M2M}} \frac{p(m, n)}{\lambda_k} (1 - B_{M2M}). \quad (2.9)$$

2.3 Розробка алгоритму управління ресурсами в гетерогенних мережах стандарту LTE

Формалізація методу eICIC, модифікованого в часовій області

Основна концепція методу на першому етапі передбачає максимізацію цільової функції «нормальних» і «постраждалих» користувачів для всіх можливих значень α на кожному фемтостільнику. Одночасно кожен фемтостільник проводить розрахунок числа своїх «Постраждалих» користувачів із застосуванням динамічного програмування.

На другому етапі макростільники виробляють максимізації власних цільових функцій, які залежать від кількості підключених до них користувачів і певних для всіх можливих значень α .

На заключному етапі в результаті підсумовування максимізувати цільових функцій, отриманих для певного α для фемтосот і макростільниками, формується загальна цільова функція, яка також відповідає заданому α .

Формується масив, що складається з загальних цільові функції, отриманих

для різних допустимих значень α . коефіцієнт α_{opt} відповідає загальній цільовій функції, обраної з даного масиву максимізацій.

Обробка даних за методом eICIC, модифікованому в часовій області, може проводитися в реальному часі. Обчислення загальної цільової функції вимагає обмін даними між усіма базовими станціями мережі. При цьому по інтерфейсу X2 передається мінімальна кількість інформації - значення максимізувати цільової функції для роботи з базовою станцією для заданого α .

Застосування динамічного програмування знижує складність обчислення алгоритму пошуку «постраждалих» користувачів з $O(2^K)$ до $O(K^2)$, де 2 відповідає двом наборам користувачів («нормальним» і «потерпілим»), а K - загальна кількість користувачів фемтосоти, що беруть участь у відборі.

Стільник, що обслуговує, вибирається на основі максимального значення RSRP, використовується CRE віртуальне розширення зони покриття фемтостільника за рахунок збільшення отриманого від неї рівня RSRP на довільну величину (6 і 15 дБ для кожного фемтостільника).

Користувачі (UE) фемтостільника діляться на дві групи: «нормальні» і «постраждалі». Макростільникам передають субкадри, частина з яких є ABS субкадрах. В спрощеному випадку ABS субкадри використовуються тільки для обслуговування «постраждалих», а користувачі макростільників обслуговуються тільки не - ABS субкадрами.

Вторинний відбір проводиться за допомогою DP - алгоритму (Dynamic Programming).

В даному алгоритмі цільова функція є функцією, що рекурсивно обчислюється.

Розглянемо мережу з M макростільниками і P фемтостільниками.

Введемо наступні позначення:

N_m^i – кількість UE, що закріплено за макростільником;

N_p^j - кількість UE, що закріплено за фемтостільником;

N_{p0}^j – кількість «постраждалих» користувачів після первинного відбору(якщо

$N_{p_0}^j=0$, то первинний відбір не проводився);

$N_p^j - N_{p_0}^j$ – кількість нормальних користувачів після первинного відбору;

α – відсотковий вміст ABS субкадрів в загальній кількості субкадрів;

$N_{p+}^j(\alpha)$ – кількість «нормальних» користувачів після вторинного відбору;

$N_{p-}^j(\alpha)$ – кількість «постраждалих» користувачів після вторинного відбору;

При цьому

$$N_{p+}^j(\alpha) + N_{p-}^j(\alpha) = N_p^j - N_{p_0}^j. \quad (2.10)$$

Питома швидкість даних «нормальний» та «постраждалих» користувачів фемтостільника j відповідно:

$$R_m^j = G \left(\frac{N_{p+}^j(\alpha) \cdot r_m^j}{N_{p+}^j(\alpha)} \right), \quad (2.11)$$

$$R_n^j = G \left(\frac{N_{p-}^j(\alpha) \cdot r_n^j}{N_{p-}^j(\alpha)} \right), \quad (2.12)$$

де

$$G \left(N_{p+}^j(\alpha) \right) = \sum_{m=1}^{N_{p+}^j(\alpha)} \frac{1}{m}. \quad (2.13)$$

$$G \left(N_{p-}^j(\alpha) \right) = \sum_{n=1}^{N_{p-}^j(\alpha)} \frac{1}{n}. \quad (2.14)$$

r_m^j, r_n^j - середня швидкість передачі даних «нормальних» і «постраждалих» користувачів фемтостільника j .

Вторинний вибір «постраждалих» користувачів для заданого значення α в фемтостільнику j наведено на рисунку 2.3.

Для будь-якого заданого α фемтостільників може максимізувати цільову функцію і отримати відповідну кількість «постраждалих» користувачів. Аналогічно, кожна макростільниками може розрахувати свою цільову функцію $U_m^i(\alpha)$ для заданого α . Оптимальне значення α отримуємо після підсумовування цільових функцій для всіх значень α .

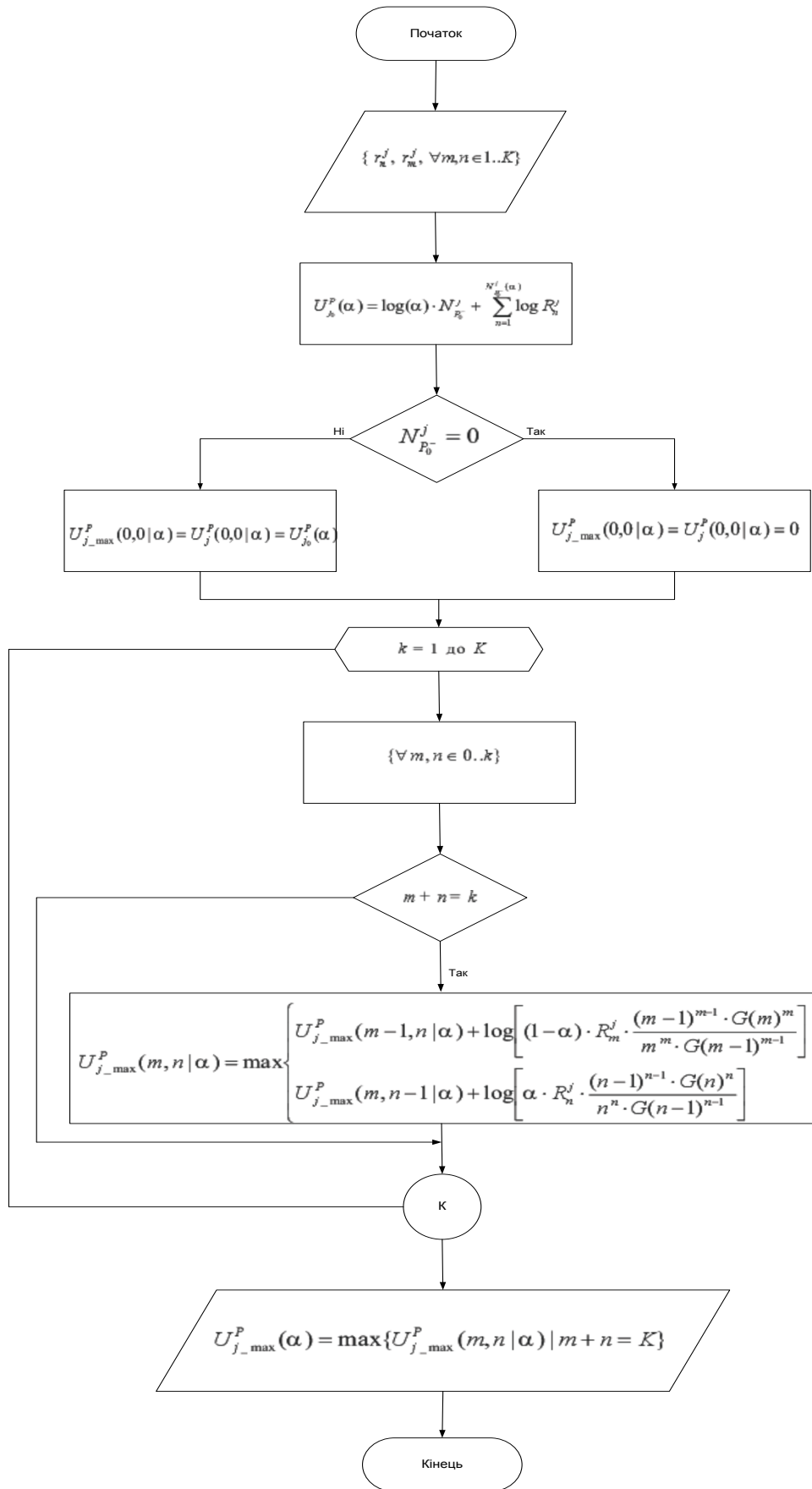


Рисунок 2.3 – DP - алгоритм. Вторинний вибір «постраждалих» користувачів для заданого значення α в Фемтостільників j

2.4 Розробка алгоритму знаходження оптимальних значень параметрів

1 Кожен макростільник R_l^i згідно виразу:

$$R_l^i = G(N_M^i) \cdot r_l^i \cdot \frac{1}{N_M^i} . \quad (2.15)$$

для всіх закріплених за ним користувачів і розраховує $U_i^M(\alpha)$ для всіх можливих значень α :

$$U_i^M(\alpha) = \log(1 - \alpha) \cdot N_M^i + \sum_{i=1}^{N_M^i} \log R_l^i . \quad (2.16)$$

2) Кожен із фемтостільників виробляє первинний відбір і оголошує «постраждалими» користувачів зі значенням RSRP <заданого порогового рівня (-8 дБ, наприклад) Після отримання від абонентських станцій значень RSRP, виявляються абоненти з низьким рівнем RSRP.

Міжнародні ідентифікаційні номери цих абонентів - International Mobile Subscriber Identity (IMSI) буферизується (тимчасово записуються в пам'ять) у вигляді масиву даних. Також оцінюється їх досяжна швидкість R_n^j :

$$R_n^j = G(N_{p-}^j(\alpha)) \cdot r_n^j \cdot \frac{1}{N_{p-}^j(\alpha)} . \quad (2.17)$$

і вхідне значення DP - алгоритму:

$$U_{j0}^p(\alpha) = \log(\alpha) \cdot N_{p-}^j(\alpha) + \sum_{n=1}^{N_{p-}^j(\alpha)} \log R_n^j . \quad (2.18)$$

Після цього, аналогічно відбувається повторний збір даних від UE і буферизація номерів IMSI через часовий інтервал, чисельно рівний 4-5 секунд, необхідний для однозначного визначення абонентів, у яких показники RSRP є систематично низькими.

Значення цього тимчасового інтервалу визначається таким чином, щоб воно було більше, ніж час, за яке може статися хоча б одна процедура хендвера (2-3 секунди).

Таким чином, ті абоненти, у яких низьке значення RSRP було наслідком

перетину кордонів стільників, і яким стояла процедура хендовера, встигнуть його пройти. При другому зборі даних від UE ці абоненти не потраплять в статистику абонентських пристроїв з низькими показниками RSRP.

3) Кожен із фемтостільників оцінює (на основі прийнятого SINR) два параметра (вхідні значення для DP - алгоритму) для «постраждалих» користувачів, які були визначені на 2 кроці, тобто r_m^j в не - ABS кадрах. І r_n^j в ABS кадрах.

4) Для всіх можливих значень α кожен із фемтостільників незалежно проводить вторинний відбір «постраждалих» користувачів за допомогою DP - алгоритму, отримуючи значення:

$$U_{j_max}^P(\alpha) = \max\{U_{j_max}^P(m, n, \alpha), m + n\} = K, \quad (2.19)$$

і зберігаючи результати вторинного відбору.

5) Кожен із фемтостільників інформує всі інші БС (і макро -, і фемто) про своєму розрахованому значенні $U_{j_max}^P(\alpha)$, і кожен із макрос тільників інформує всі інші БС про своє розраховане значення $U_i^M(\alpha)$ (через інтерфейс X2).

6) Кожна БС підсумовує передані їй значення цільових функцій зі своїм значенням і розраховує функцію:

$$U(\alpha) = U^M(\alpha) + U^P(\alpha) = \sum_{i=1}^M U_i^M(\alpha) + \sum_{j=1}^P U_{j_max}^P(\alpha). \quad (2.20)$$

Число отриманих $U(\alpha)$ дорівнює числу можливих значень, які може приймати α . Далі з масиву $U(\alpha)$ вибирається максимальне значення, і визначається, що відповідне йому α - оптимальне.

2.5 Вибір моделі розповсюдження сигналу і розрахунок втрат на трасі поширення

Так як в моделі мережі LTE частота несучої в напрямку вниз дорівнює 1220 МГц, обрана модель втрат для даної частоти, розроблена сектором радіокомунікацій Міжнародного союзу електрозв'язку - ITU-R P.1411-6 [14].

Використовується частина моделі, спеціально розроблена для розрахунку втрат в міських умовах. Нижче наведено розрахунок втрат на трасі поширення для макро базових станцій:

$$L_{losl} = L_{BP} \begin{cases} 20 \log_{10} \left(\frac{d}{R_{BP}} \right) & \text{при } d \leq R_{BP} \\ 40 \log_{10} \left(\frac{d}{R_{BP}} \right) & \text{при } d > R_{BP} \end{cases}, \quad (2.21)$$

де L_{losl} - найменше значення втрат на трасі поширення;

R_{BP} – порогова відстань між eNB та UE

$$R_{BP} \approx \frac{4h_b h_m}{\lambda} \quad (2.22)$$

$$L_{losu} = L_{BP} + 20 + \begin{cases} 25 \log_{10} \left(\frac{d}{R_{BP}} \right) & \text{при } d \leq R_{BP} \\ 40 \log_{10} \left(\frac{d}{R_{BP}} \right) & \text{при } d > R_{BP} \end{cases}, \quad (2.23)$$

де L_{losu} - найменше значення втрат на трасі поширення;

$$L_{BP} = \left| 20 \log_{10} \left(\frac{\lambda^2}{8\pi h_b h_m} \right) \right|, \quad (2.24)$$

де L_{BP} – базові втрати при передачі

h_b - висота антени eNB;

h_m - висота антени UE;

λ – довжина хвилі.

Втрати на трасі поширення розраховуються згідно виразу:

$$L = \frac{L_{losu} + L_{losl}}{2}. \quad (2.25)$$

Допустимі втрати на трасі поширення розраховуються:

$$L_{доп} = -S + G + P_{bs}, \quad (2.26)$$

де $P_{bs} = 46$ дБм - потужність передавача базової станції;

$S = -85$ дБм – чутливість приймача UE;

$G = 14,5$ дБм – коефіцієнт підсилення антени передавача.

Підставляючи значення, отримуємо:

$$L_{доп} = -85 + 14,5 + 46 \approx 146 \text{ дБ}.$$

Із врахуванням того, що висота антени передавача $h_b = 50$ м, висота антени мобільної станції $h_m = 1,5$ м. Підставивши значення в (2.22), отримуємо: $R_{BP} = 1273$ м.

Прийнявши відстань між базовими станціями рівним 1000 метрів, розрахуємо втрати на трасі. Так як відстань між базовими станціями становить 1000 метрів, то d - відстань від UE до eNB не може перевищувати 1000 метрів і, отже, воно менше порогової відстані між eNB і UE: $d \leq R_{BP}$.

Таким чином, за формулою (2.21) $L_{losl} = 92,9$ дБ, за формулою (3.14) $L_{losu} = 112,4$ дБ.

Підставивши отримані значення в формулу (3.16) отримаємо, що L - втрати на трасі, рівні 102,7 дБ.

Отримане значення втрат $L = 102,7$ дБ на трасі не перевищує значення допустимих втрат $L_{доп} = 146$ дБ. Отже, у разі відповідності характеристик мережі значенням з таблиці 1.3, істотних перешкод прийому сигналів при нормальній роботі мережі виникати не буде. Отже, дана модель мережі з характеристиками, відповідними таблиці 1.3 може бути використана для проведення віртуального експерименту і перевірки роботи методу eICIC, модифікованого в часовій області. Модель втрат на трасі ITU-R P.1411 вбудована в мережевий симулятор ns-3.

2.6 Розробка імітаційних моделі методу eICIC

Однією з основних проблем в дослідженнях телекомунікаційних систем є висока вартість обладнання (маршрутизаторів, бездротових точок доступу), що значно ускладнює тестування, оптимізацію старих і впровадження нових топологій і мережевих рішень. Економічним рішенням даних завдань є розробка та використання ПЗ, що дозволяє проводити імітаційне моделювання, отримуючи результати з тією ж достовірністю, що і на реальному обладнанні.

Значно скорочується трудомісткість при організації експериментів, тому що немає необхідності будувати реальну мережу. Згідно дослідженням, проведеним Асоціацією обчислювальної техніки (Association for Computing

Machinery, ACM) [15], мережеве моделювання використовується в 76% наукових робіт, присвячених бездротовим мережам.

Перевагою симуляції є доказовість коректності зібраної статистики. Знаючи апроксимації, закладені в модель, і ступінь їх застосовності можна довести коректність результатів проведених експериментів без необхідності доводити коректність самої моделі.

Імітаційна модель мережі LTE розроблена в симуляторі NS-3

NS-3 є вільним програмним забезпеченням, поширюваним під ліцензією GNU GPLv2, і орієнтований на дослідницьке застосування, а також в освітніх цілях. Тексти програм ns-3 відкриті для дослідження, модифікації і використання і доступні на сайті проекту [16]. Симулятор ns-3 дозволяє створювати моделі мереж LTE, реалізовувати різні сценарії і тестувати на отриманих моделях будь-які алгоритми.

В симулятор вбудовані сучасні моделі поширення радіохвиль і втрат на трасі, що дозволяє отримувати результати моделювання з урахуванням затухання для різних типів місцевості. У даній роботі розглянуто випадок розташування ділянки мережі LTE в міських умовах на основі стандартної моделі, топологія мережі якої відповідає технічній рекомендації 3GPP R4-092042. Структурная схема програми імітаційної моделі приведена на рисунку 1.13.

NS-3 є симулятором з дискретним часом - це означає, що рівняння, що описують систему, вирішуються чисельними методами, тобто для отримання вихідної статистики потрібна велика кількість ітерацій.

Ns-3 має ряд переваг [17]:

- 1) Вся документація написана для Doxygen. Всі класи мають короткий опис призначення, методів і діаграми успадкування та комунікації.
- 2) Мова C ++ в якості основної дає переваги в продуктивності і використанні пам'яті в порівнянні з іншими мовами.
- 3) Більшість реалізованих в NS-3 моделей протоколів мережевого рівня і вище

мають структуру, схожу з реалізацією цих протоколів в ОС Linux, що полегшує верифікацію коду. Коректність моделей канальних і фізичних рівнів була доведена експериментально [18].

4) Передача даних між різними рівнями реалізована з використанням пакетів. Пакети в NS-3 є сховищем серійних даних (в основному заголовків). На кожному етапі є можливість порівняти вміст пакета-моделі з реальним пакетом, також пакети можна записувати в trace-файли для перегляду в спеціалізованих програмах захоплення пакетів (Packet Capture), що додатково полегшує верифікацію моделі.

5) Є можливість з'єднувати модель і реальну мережу (пристрій), що полегшує перехід від комп'ютерної моделі до тестбеду. У розробці обчислювальних мереж тестбеди являють собою масиви мережевих пристроїв, що знаходяться в умовах, наближених до ідеальних. Експериментатору дається доступ до виділеної частини масиву. Зв'язка симулятор - реальний пристрій дозволяє, наприклад, перевірити роботу протоколу мережевого рівня в лабораторних умовах без необхідності трудомісткого системного програмування. Кожна технологія, реалізована в ns - 3, містить модуль, що містить файли на мові C ++ з іменами класів, що зберігаються в цих файлах. Для моделювання часу відводиться спеціальний клас `class Time` і використовується функція `Simulator :: Schedule ()`.

Програмний код, що міститься у файлі .cc, використовується для установки параметрів моделі і проведення симуляції.

Клас `class Node` використовується для завдання вузлів в мережі, в які через клас `class Object` інтегруються властивості і мережеві зв'язки.

Однак складність і тривалий час симуляції (кілька годин) алгоритмів, складності в обробці масивів даних, а також відсутність вбудованого графічного інтерфейсу в ns-3 змушують реалізовувати модифікований метод eICIC в спеціально призначеному для цих цілей середовищі Matlab, а в ns-3 збирати статистичні дані до і після роботи алгоритму. Приклад проведення даної процедури показаний на рисунку 2.5.

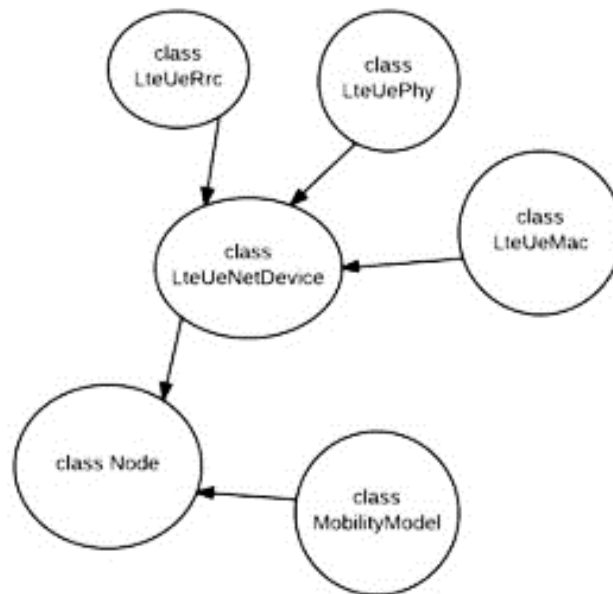


Рисунок 2.5 – Додавання властивостей об'єкта класу class Node

Для створення нового об'єкта використовується команда:

```
Ptr <Node> node = CreateObject <Node> ();
```

Для присвоєння властивостей об'єкта вузла слід записати наступне:

```
Ptr <NetDevice> dev = CreateObject <NetDevice> ();
node->AggregateObject (dev);
```

Для оптимізації структури коду використовується клас class LteHelper, за допомогою якого проводиться ініціація вузлів LTE, абонентських терміналів і базових станцій eNBs.

Це здійснюється за допомогою організації зв'язку між різними верствами системи з збереженням покажчиків на об'єкт для отримання доступу до функцій і змінним.

Параметри і змінні можуть бути ініційовані з використанням класу TypeIdSetAttribute (). Наприклад, для максимізації доступної частотної смуги слід виділити 100 ресурсних блоків (це відповідає виділеній смузі 20 МГц) і записати наступну команду:

```
Config::SetDefault ("ns3::LteEnbNetDevice::DlBandwidth", UIntegerValue (100));
```

Найбільші обчислювальні витрати для симулятора подібного типу потрібні при реалізації фізичного рівня, тому для прискорення обчислень виключається деталізація до символічного базису, а зберігається лише деталізація до базису ресурсних блоків. При цьому модель має всі властивості реальної системи в максимально повному обсязі, незважаючи на наявність різних API (Application Programming Interface) у різних вендорів.

Інтерфейс вбудованого в ns-3 додатка LENA Project дозволяє планувальником взаємодіяти з MAC - рівнем, залишаючись незалежним від PHY - рівня. Для забезпечення доступу між рівнями планувальник використовує SAP (Service Access Points), дозволяє також проводити обмін параметрами в певні моменти часу.

Для правильної роботи механізму майже порожніх субкадрів потрібно визначити число користувачів, схильних до інтерференції. Дана процедура проводиться за допомогою запуску функції `RrFfMacScheduler :: DoSchedDlCqiInfoReq ()`, в результаті якого виявляються користувачі з рівнем показника якості CQI нижче порогового значення.

Масив `std :: list <uint_16t> victimList` виділяється для зберігання індивідуальних номерів RNTI схильних до інтерференції абонентів, а функція `VictimListEdit ()` регулярно відстежує статус абонентів, оновлюючи список схильних до інтерференції абонентів. Для визначеності вважаємо, що граничне значення параметра CQI становить 3.

У режимі ABS потрібно визначення двох значень CQI, тому що в майже порожніх субкадрах макро eNB передають дані зі зниженою потужністю, тому для цих кадрів вибираються більш низькі модуляційно кодуючі схеми, ніж могли б бути використані.

У низхідному каналі передаються додаткові контрольні повідомлення, в яких закладена інформація про те, чи використовується майже порожній або звичайний кадр (рисунок 4.2). Новий тип повідомлень позначається `class AbsCtrlMessage` і входить в клас `class LteControlMessage` [19].

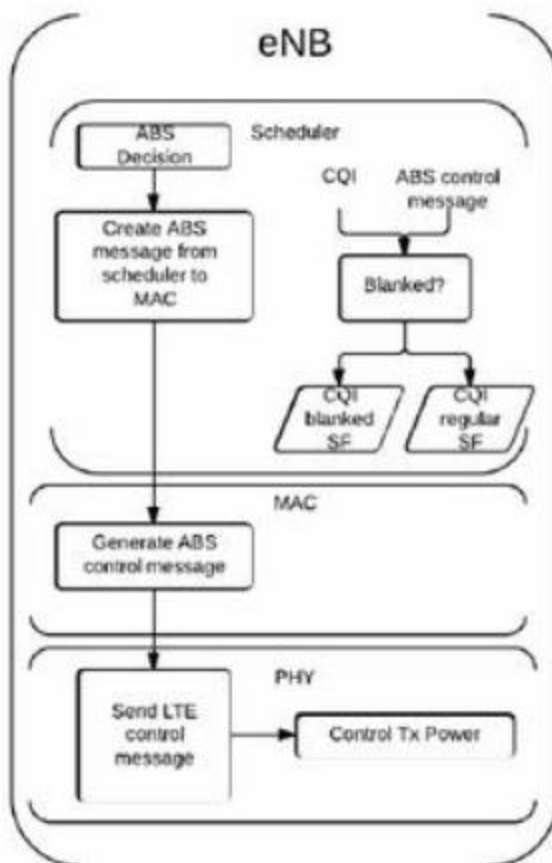


Рисунок 2.6 – Алгоритм генерації і передачі спеціальних повідомлень

Структурна схема програми імітаційної моделі наведена на рисунку 2.7. Основні характеристики мережі задаються в файлі, що виконується, моделі мережі з допомогою атрибутів симулятора ns-3 (таблиця 3). У ns-3 задані стандартні характеристики, що задовольняють специфікаціям консорціуму 3GPP.

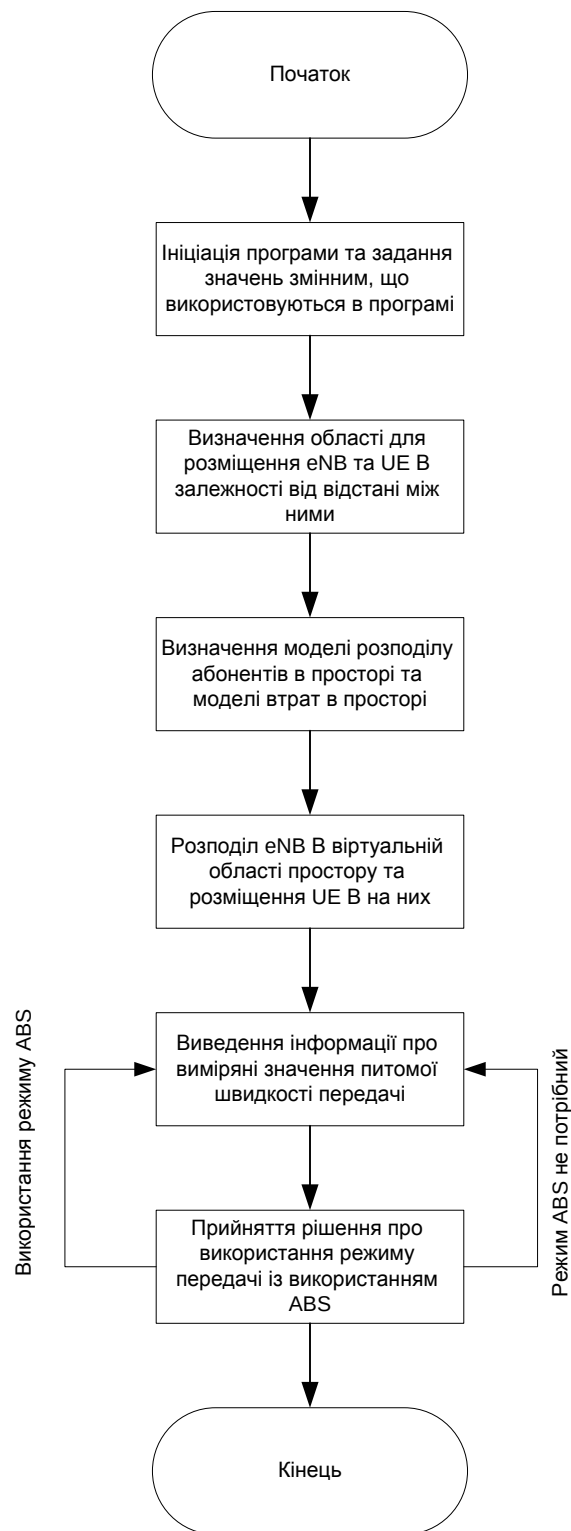


Рисунок 2.7 – Структурна схема імітаційної моделі мережі LTE

Метою моделювання в даній роботі є оцінка впливу запропонованого алгоритму на питому швидкість передачі інформації в залежності від сценарію абонентського навантаження: обидва стільники перевантажені, перевантажений тільки фемтостільник.

Таблиця 2.1 – Основні характеристики моделі мережі LTE

Параметр	Значення
Відстань між макро и фемто <i>eNodeBs</i>	1000 м
Кількість макро <i>eNodeB</i> стільників	1
Кількість фемто <i>eNodeB</i> стільників	1
Номер частотного каналу	100 (Частота несучої 1220 МГц)
Потужність передачі макро <i>eNB</i>	46 дБм
Потужність передачі фемто <i>eNB</i>	2 дБм
Кількість ресурсних блоків	50 (смуга 10 МГц)
Кількість абонентів	Залежить від сценарію
Висота підвісу антени	50 м
Час симуляції	20 с
Чутливість приймача <i>UE</i>	-85 дБм
Підсилення антени передавача	14,5 дБ

Для досягнення даної мети необхідно:

- 1) розробити модель модифікованого в часовій області методу eICIC;
- 2) провести вимірювання значень питомої швидкості передачі, отриманих при роботі макро БС з використанням ABS, в гетерогенній мережі з 1 макро і 1 фемто БС для двох варіантів розподілу абонентського навантаження;
- 3) з генеральної сукупності модельованих значень отримати вибірку об'ємом, рівним числу абонентів. Побудувати криві накопиченої частоти для середнього значення питомої швидкості передачі до і після застосування алгоритму [20]. Визначити по ним значення середньої і граничної питомої швидкості передачі для трьох категорій користувачів (Абоненти фемтостільників, абоненти макростільників, всі користувачі);
- 4) зробити висновки про ефективність алгоритму, що використовується, на підставі результатів симуляції.

Питома швидкість передачі системи мобільного зв'язку є показник, що обчислюється як відношення швидкості передачі даних на 1 Гц смуги частот, що використовується. Ця величина також характеризує швидкість передачі інформації в заданій смузі частот і є показником ефективності використання частотного ресурсу. Збільшення питомої швидкості передачі дозволяє підвищити ємність стільнику, що в свою чергу, підвищує пропускну здатність системи в цілому.

В [21] вводиться наступне визначення питомої швидкості передачі (біт / с / Гц):

$$\gamma_i = \frac{\chi_i}{T_i \omega} , \quad (2.27)$$

де χ_i – кількість коректно доставлених біт в SDU (Service Data Unit, одиниця (пакет) передачі даних конкретної послуги) для i -ого користувача;

T_i – тривалість активного з'єднання;

ω – доступна смуга системи;

Для заданої кількості користувачів визначається крива накопиченої частоти розподілу середнього значення питомої швидкості передачі. Швидкість передачі для мобільної станції, що знаходиться на кордоні сектора, визначається як значення інтегральної функції розподілу ймовірності нормованої пропускну здатності в точці 5% [22,23].

Система повинна забезпечувати максимально можливе значення спектральної ефективності для користувачів, що знаходяться на кордоні сектора, при дотриманні розумної складності самої системи. У таблиці 4.2 наведені значення СЕ на кордоні стільники для випадку, коли в одному секторі знаходиться 10 користувачів [24, 25].

У ns - 3 виконані наступні частини моделі: блок завдання параметрів моделі, первинного відбору постраждалих користувачів, вторинного відбору постраждалих користувачів, розрахунок оптимального значення α .

Таблиця 2.2 – Питома швидкість передачі інформації падаючого каналу на кордоні стільника

	<i>LTE</i>	<i>Advanced LTE</i>	<i>IMT Advanced</i>
2×2 MIMO	0,05	0,07	
4×2 MIMO	0,06	0,09	0,075
4×4 MIMO	0,08	0,12	

У блоці завдання параметрів моделі конфігурується ділянка гетерогенної мережі, задає параметри БС і моделі поширення.

Вхідні дані: Основні характеристики моделі мережі LTE.

Вихідні дані: 1 Етап: - r_m^j , r_n^j - середня швидкість передачі даних «нормальних» і «Постраждалих» користувачів фемтостільника j (зберігається в вигляді txt-файлу); питома швидкість передачі даних в частотних каналах абонентів (Зберігається в вигляді txt-файл, рисунок 4.4).

```
% time CellID IMSI RNTI RSRP(dbm) SINR CQI SpecEff
0.0222143 1 34 1 -83.7720 1.8852 3 0.6000
0.0222143 1 34 1 -83.7720 1.8852 3 0.6000
0.0222143 1 453 2 -85.9582 0.3963 0 0.1500
0.0222143 1 453 2 -85.9582 0.3963 0 0.1500
0.0222143 2 279 13 -81.8919 2.8449 3 0.6000
0.0222143 2 279 13 -81.8919 2.8449 3 0.6000
```

Рисунок 2.8 – Фрагмент вмісту txt-файлу, отриманого з ns - 3

У блоці первинного відбору постраждалих користувачів визначається число «Постраждалих» користувачів за рівнем заданого порогу RSRP. наявність користувачів фемтостільників, що мають значення RSRP менше порогового значення (-8 дБ), автоматично запускає алгоритм обчислення коефіцієнта α .

Як тільки система починає працювати з новим розрахованим значенням α , кожні 2-3 секунди проводиться сканування користувачів з метою отримання їх

RSRP (також можливо оцінювання SINR або розраховане на його основі CQI). Значення цього тимчасового інтервалу визначається таким чином, щоб воно було більше, ніж час, за яке може статися хоча б одна процедура хендовера. Таким чином, ті абоненти, у яких низьке значення RSRP було наслідком перетину кордонів стільників, і яким стояла процедура хендовера, встигнуть його пройти.

Коли значення RSRP від користувачів фемтостільника стає більше порога, система автоматично виходить з режиму передачі в ABS - субкадрах.

Вхідні дані: Основні характеристики моделі мережі LTE.

Вихідні дані: N_{p0}^j - кількість «постраждалих» користувачів після первинного відбору;

$N_p^j - N_{p0}^j$ - кількість «нормальних» користувачів після первинного відбору;

Фрагменти лістингу програмного коду на мові C ++ з коментарями наведено в додатку А.

Наступна частина програми виконується в Matlab.

Вторинний відбір постраждалих користувачів виконується на фемтостільниках. В даному блоці проводиться максимізація рекурсивно обчислювальної цільової функції з аргументами в вигляді уточненого числа «постраждалих» користувачів для заданого α . Для всіх можливих значень α кожен фемтостільник незалежно виробляє вторинний відбір «постраждалих» користувачів за допомогою DP - алгоритму.

Вхідні дані: r_m^j, r_n^j - середня швидкість передачі даних «нормальних» і «Постраждалих» користувачів фемтостільника j ;

Вихідні дані: масив «нормальних» і «постраждалих» користувачів $\{m, n\}$ після вторинного відбору, максимізувати значення цільової функції за формулою (2.20).

Розрахунок оптимального значення α виконується на макростільниках. В даному блоці проводиться розрахунок цільової функції макростільниками за формулою (2.17). Далі кожен макростільник обчислює максимальне значення

цільової функції за формулою (2.21) на основі своїх розрахунків і розрахунків, проведених на фемтостільниках, що знаходяться в її секторах.

Вихідні дані: Питома швидкість передачі даних R_l^i , розрахована за формулою (2.16).

Вихідні дані: $U(\alpha)$ - максимізувати значення цільової функції для всіх можливих значень α , оптимальне значення α (індивідуальне для кожного макростільника) по критерію максимуму середньої спектральної ефективності і спектральної ефективності на кордоні стільника.

Це другий етап роботи моделі. Отримане значення α пересилається в Блок завдання параметрів моделі, і кожен макростільник починає працювати з використанням свого значення α .

Висновки. В розділі проведено розробку математичного апарату ймовірнісної моделі обслуговування на рівні розподілу ресурсів у взаємодії пар людина-людина та машина-машина. Також проведено розробка алгоритму розподілу радіоресурсу між мікро та макростільниками.

З МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ МЕРЕЖІ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ СТАНДАРТУ LTE

Розглянемо стільник мережі LTE з піковою пропускнуою спроможністю $C = 50$ Мбіт/с, з якої для обслуговування Н2Н-користувачів зарезервовано $C_{H2H} = 10$ Мбіт/с.

Від М2М пристроїв надходять запити на передачу блоків даних двох типів, тобто. $K = 2$. Вважаємо, що $\theta_1 = 100$ кбайт і $\lambda_1 \in [2, \dots, 98]$, а $\theta_2 = 200$ кбайт та $\lambda_2 \in [1, \dots, 50]$.

В цьому випадку інтенсивність запропонованого навантаження для двох типів блоків даних збігаються: $\rho_1 = \rho_2$. В результаті аналізу джерел [11–13] за одиницю каналного ресурсу виберемо значення 880 кбіт/с.

Вважаємо, що для обслуговування М2М-трафіку може бути виділено до двох діапазонів ($S = 2$) фіксованого розміру $c = 20$ Мбіт/с кожен. В якості прикладу послуги, що запитується Н2Н-користувачами, розглядаємо потокове відео з мінімальною допустимою швидкістю передачі $= 3$ Мбіт/с. При цьому інтенсивність запропонованого навантаження Н2Н-користувачів не змінюється і становить $\alpha = 5$.

На рисунку 3.1 представлені графіки залежності ймовірностей блокувань запитів Н2Н-користувачів та М2М-пристроїв, а також середнього часу передачі блоків даних k -типу, від запропонованого сумарного навантаження М2М-пристроїв.

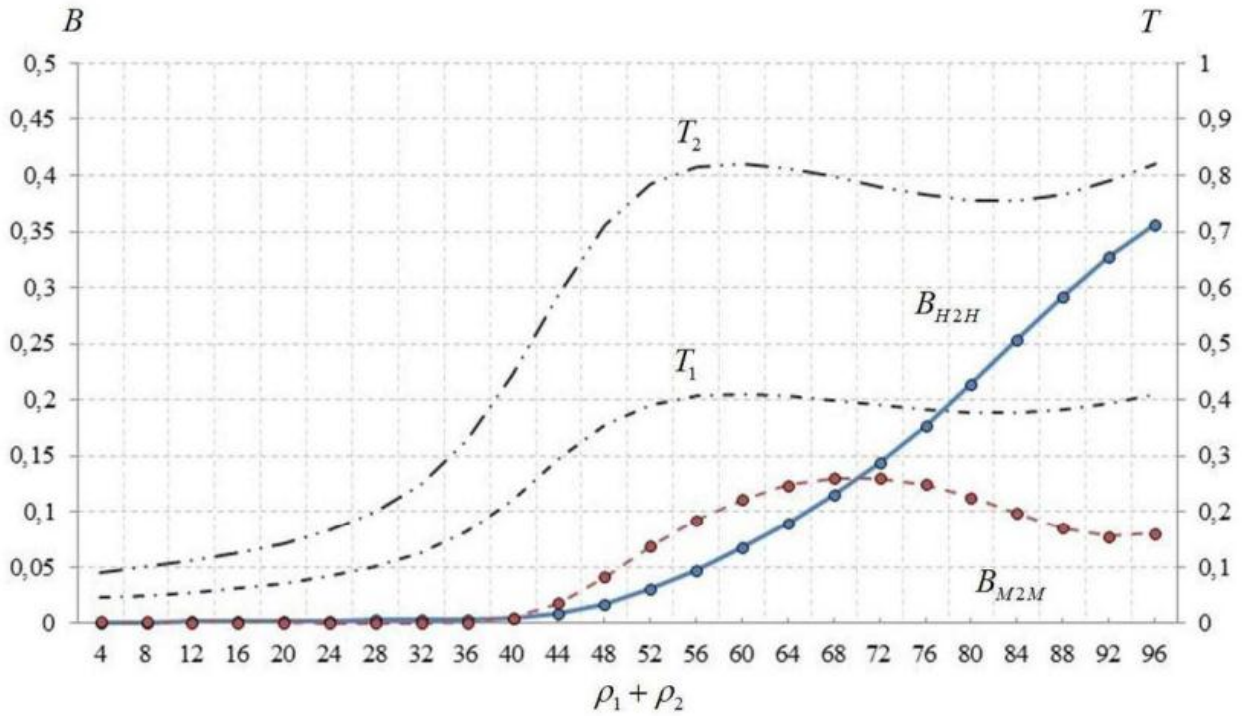


Рисунок 3.1 – Ймовірності блокувань та середній час передачі блоку даних

Аналіз графіків, наведених на рисунку 3.1 показує, що середній час T_2 передачі блоків даних другого типу більше часу T_1 , що відповідають принципам обслуговування еластичного трафіку [18, 19]. При цьому криві $T_k, k = 1, 2$, мають немонотонний характер, пов'язаний із запропонованою схемою обслуговування M2M-пристроїв з виділенням ресурсів послідовно діапазонами фіксованого розміру. Для пояснення ефекту, що спостерігається, розглянемо наступні ймовірно-часові характеристики моделі. 1. Середня кількість виділених діапазонів ресурсів фіксованого розміру:

$$\bar{S} = \sum_{(m,n) \in X} \left\lceil \frac{m_{\bullet}}{M} \right\rceil \cdot p(m,n) \quad (3.1)$$

2. Середня кількість ресурсів, виділена для передачі одного блоку даних M2M-пристроїв:

$$\bar{b}_1 = \sum_{(m,n) \in X, m \neq 0} \left\lceil \frac{c(m)}{m_{\bullet}} \right\rceil \cdot p(m,n) \quad (3.2)$$

Графіки залежностей зазначених вище імовірно-часових характеристик від зростання запропонованого сумарного навантаження M2M-пристроїв представлені на рисунку 3.2.

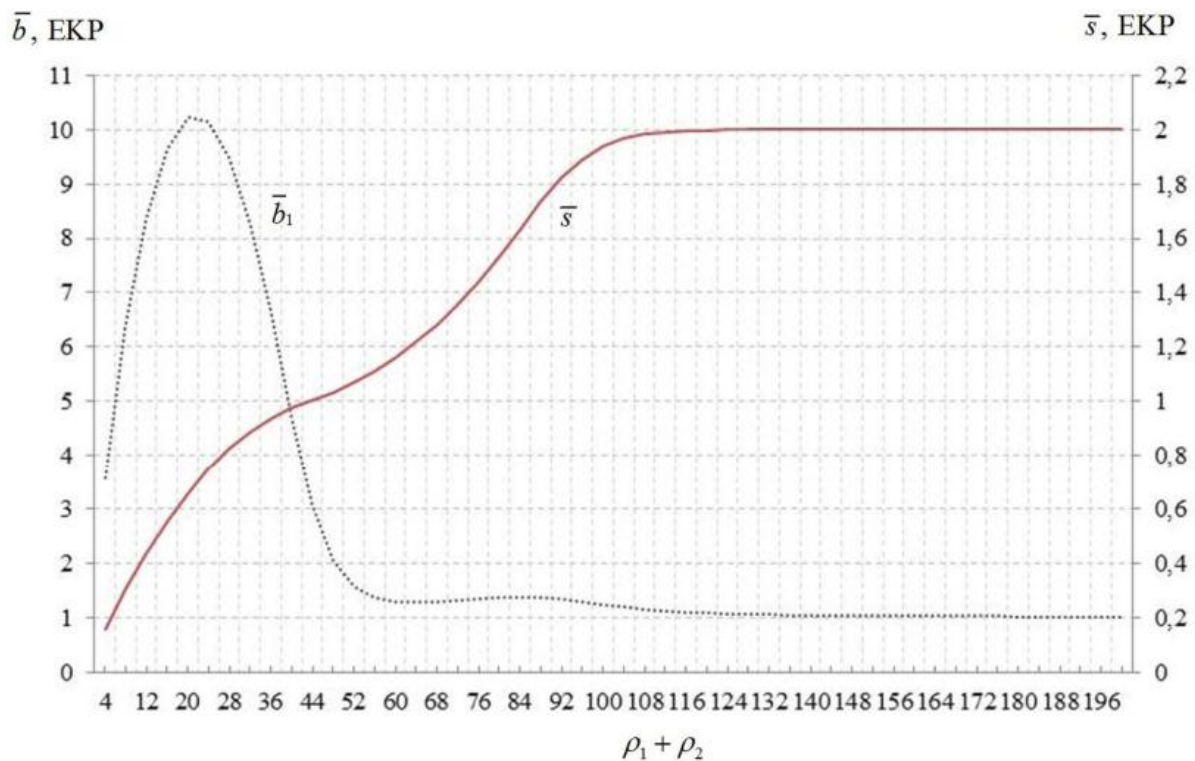


Рисунок 3.2 – Імовірно-тимчасові характеристики s^- і b_1

Аналіз графіків показує, що параметр $\bar{b}$ досягає найбільшого значення при одному виділеному діапазоні ($s^- \leq 1$) і невеликих значеннях запропонованого навантаження $\rho_1 + \rho_2 \in [24, \dots, 36]$ приймає при одному виділеному діапазоні ресурсів фіксованого розміру.

Таким чином, для даного інтервалу інтенсивності запропонованого навантаження характерні мінімальні значення часу передачі блоку даних $Tk, k = 1, 2$. З урахуванням подальшого зростання запропонованого навантаження зменшується кількість ресурсів, доступних для M2M-пристроїв, та виділення чергового діапазону істотно не скорочує час передачі блоків даних.

3.1 Дослідження алгоритму управління ресурсами в гетерогенних мережах стандарту LTE

Розглянемо систему, яка складається і з одного макростільника і одного фемтостільника, і промодельюємо два сценарії абонентського навантаження:

- обидва стільники перевантажені,
- перевантажений тільки фемтостільник.

Для оцінки кількості абонентів, які можуть бути обслуженими макростільниками і фемтостільниками можна використовувати параметри моделі Клейнрока [26]. При аналізі трафіку в режимі скачування файлів, необхідно врахувати частоту появи і обсяг файлів.

Будемо вважати, що довжини пакетів і час їх прибуття розподілені в даній моделі за експоненціальним законом. У моделі використовуються наступні параметри:

Q - розмір пакета переданих даних, що призначені для користувача;

T_{обсл} - час передачі інформації (час обслуговування);

λ - вхідний потік заявок;

ρ - завантаженість каналу в годину;

Пропускную здатність макростільників вважаємо рівній 12.8 Мбіт / с, пропускную здатність фемтостільника - 6.7 Мбіт / с.

З огляду на те, що в середньому абонент викачує на годину 2 файли об'ємом 15 Мбайт і резервуючи пропускную здатність для телефонних ліній (1 Мбіт / с), IP - TV (2 Мбіт / с) і відеодзвінків (1 Мбіт / с), розрахуємо максимальну кількість абонентів макростільника і фемтостільника, що викачують файли:

$$N_M = \frac{\lambda}{n} = \frac{\rho}{Tn} = \frac{\rho}{n \frac{Q}{0,8V}} = \frac{0.5 \cdot 3600}{2 \cdot \frac{120}{7}} = 52 \text{ абонента}$$

$$N_F = \frac{\lambda}{n} = \frac{\rho}{Tn} = \frac{\rho}{n \frac{Q}{0,8V}} = \frac{0,5 \cdot 3600}{2 \cdot \frac{120}{2,16}} = 20 \text{ абонентів}$$

Так як при телефонному навантаженні для більшості сучасних фемтостільників домашнього класу кількість одночасних підключень обмежена 8, а для макростільників в смузі $F = 10$ МГц при вхідному навантаженні $A = 40$ Ерл і ймовірності відмови в обслуговуванні $p = 1\%$ можна обслужити $N = 1333$ абонента, будемо вважати фемтостільник перевантаженим, якщо кількість абонентів в ній досягає 50, а макростільники - якщо кількість абонентів в ній сягає 1800.

На рисунку 3.3 наведені результати первинного і вторинного відбору для першого сценарію і виведені абоненти, які мають значення RSRP менше порогового значення -80 дБм до застосування алгоритму. На рисунку 3.4 наведені аналогічні дані після застосування алгоритму.

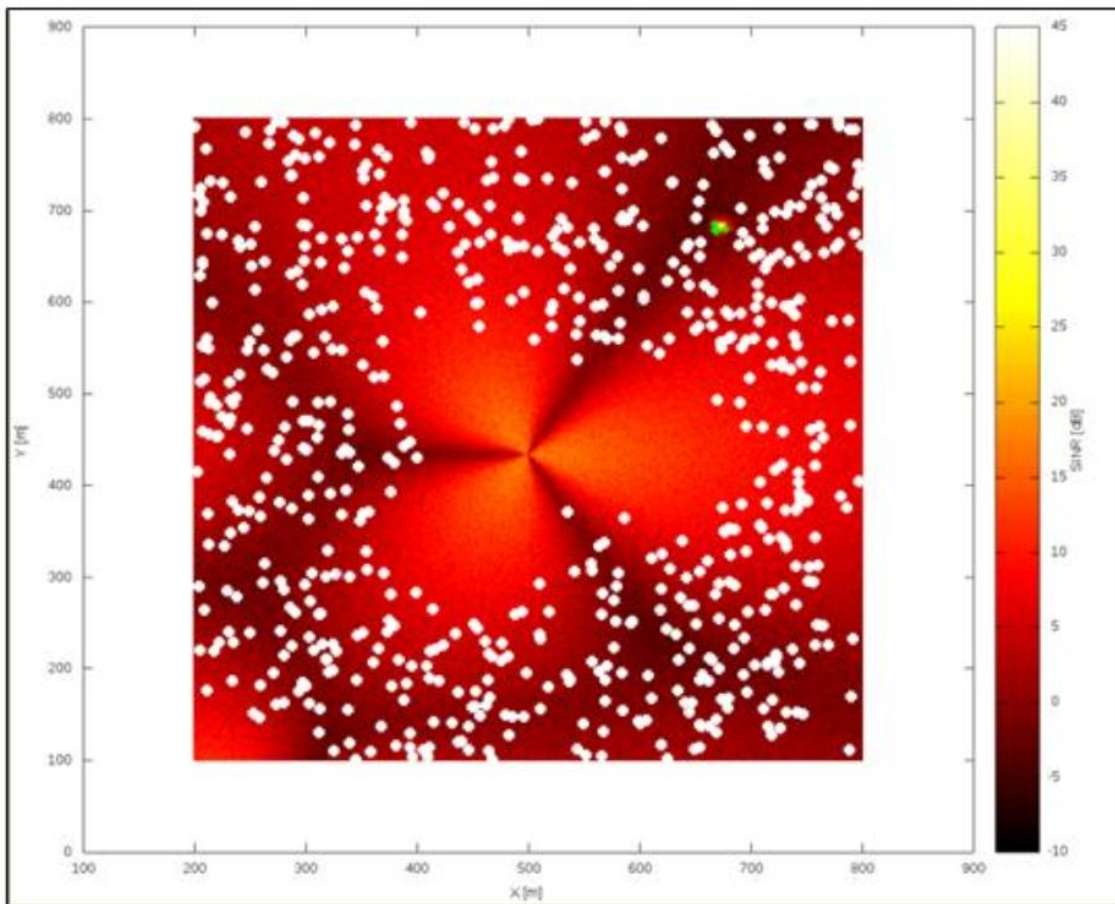


Рисунок 3.3 – Абоненти з низьким рівнем RSRP до застосування алгоритму (1-й сценарій)

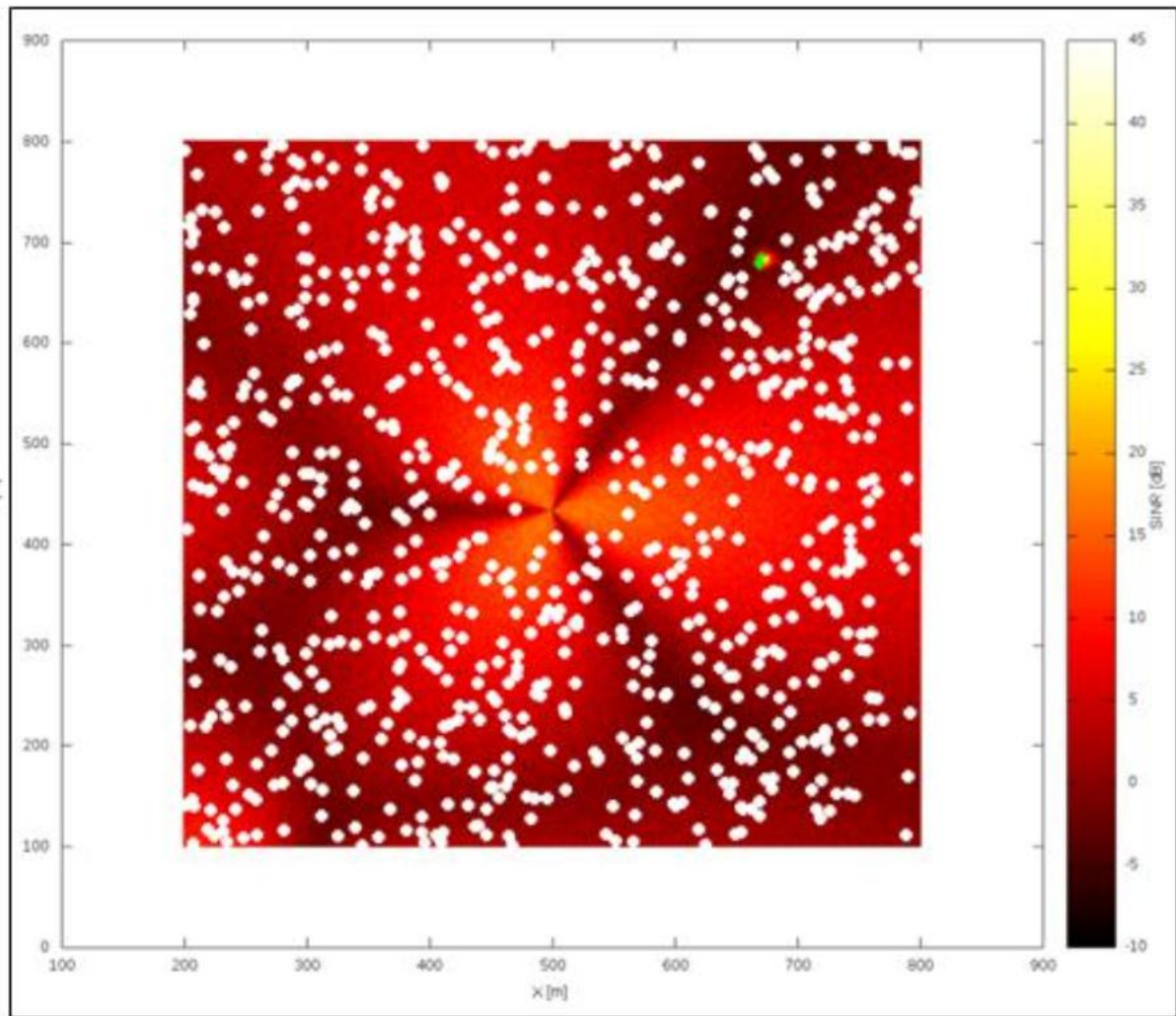


Рисунок 3.4 – Абоненти з низьким рівнем RSRP після застосування алгоритму
(1 сценарій)

По осях абсцис і ординат відкладається відстань в метрах, по осі Z - відношення сигнал / шум на вході абонентського пристрою. Білими кружками позначені абоненти макростільника, зеленими - абоненти фемтостільника. Кількість абонентів макростільника з низьким рівнем RSRP після застосування алгоритму збільшилася з тисяча двісті вісімдесят один до 1706, число абонентів фемтостільника зменшилася з 28 до 10. Кількість потерпілих користувачів, що визначається алгоритмом, дорівнює 20, кількість майже порожніх субкадрах - 40% від загальної бігової послідовності ($\alpha_{\text{opt}} = 0.4$).

На рисунку 3.5 наведені результати первинного і вторинного відбору для другого сценарію і виведені абоненти, які мають значення RSRP менше порогового значення -80 дБм до застосування алгоритму.

На рисунку 3.6 наведені аналогічні дані після застосування алгоритму.

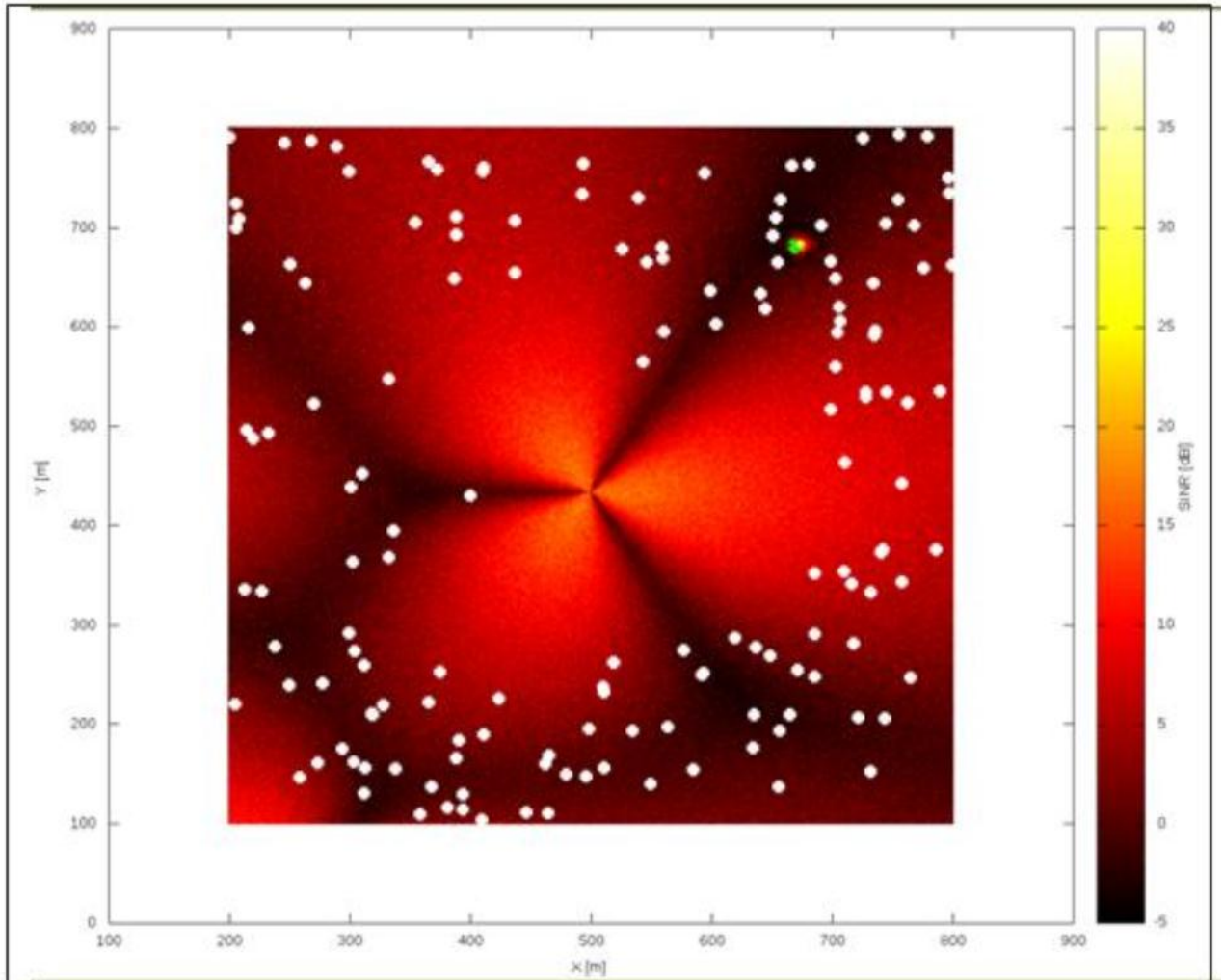


Рисунок 3.5 – Абоненти з низьким рівнем RSRP до застосування алгоритму (2-й сценарій)

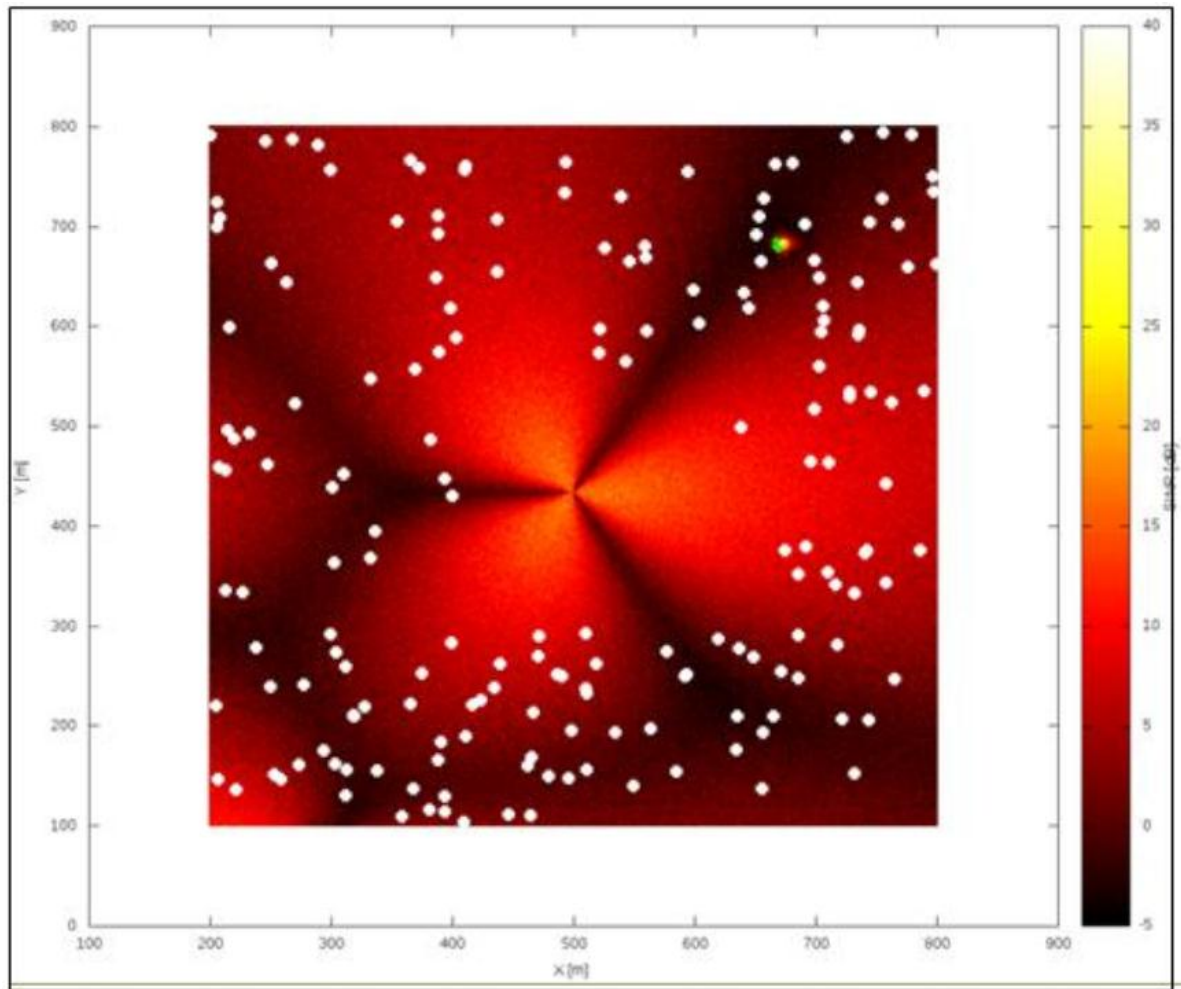


Рисунок 3.6 – Абоненти з низьким рівнем RSRP після застосування алгоритму
(2 сценарій)

Число абонентів макростільника з низьким рівнем RSRP після застосування алгоритму збільшилася з 122 до 164, число абонентів фемтостільника зменшилася з 36 до 6. Кількість постраждалих користувачів, що визначається алгоритмом, так само 31, кількість майже порожніх субкадрів - 60% від загальної бігової послідовності ($\alpha_{opt} = 0.6$).

Для оцінки питомої швидкості передачі, з генеральної сукупності модельованих значень береться вибірка обсягом, рівним числу абонентів. За формулою (3.4) обчислюється статистична функція розподілу вибірки. Будується гістограма відносних частот і крива накопиченої частоти розподілу (рис. 3.7, 3.8).

(3.4)

$$F(x) = \sum_{x_i < x} \frac{f_i}{n},$$

де f_i - відносна частота попадання в інтервали;
 n – об'єм вибірки.

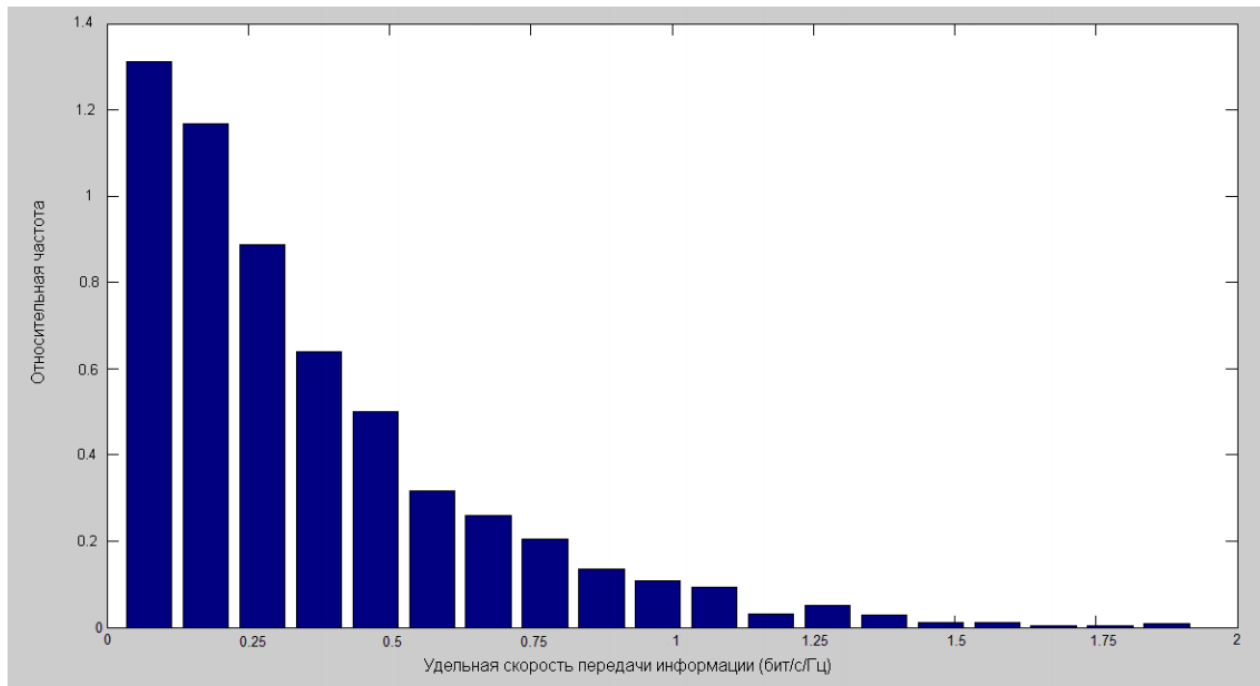


Рисунок 3.7 – Гістограма відносних частот

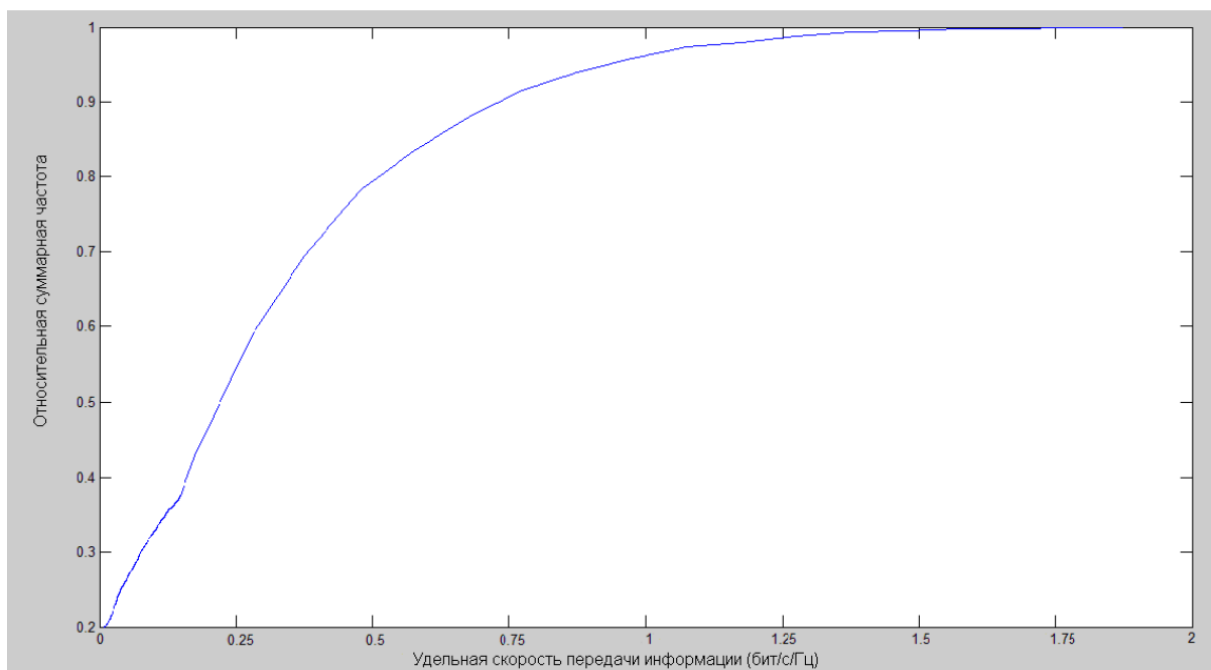


Рисунок 3.8 – Крива накопленої частоти експоненціального розподілу

Розподіл середнього значення питомої швидкості передачі в вибірці має експоненціальний характер. Середнє значення і стандартне відхилення для вибірки великого обсягу розраховуються за формулами (3.5), (3.6).

$$\bar{x} = d + \frac{b}{n} \cdot \sum f \cdot z, \quad (3.5)$$

де d – середнє значення першого наближення;

n – обсяг вибірки;

b – ширина інтервалу;

z – відхилення.

$$\sigma = b \cdot \sqrt{\frac{\sum f \cdot z^2 - \frac{(\sum f \cdot z)^2}{n}}{n - 1}}. \quad (3.6)$$

Довірчий інтервал узятий в межах $\pm 3\sigma$ для довірчої ймовірності $P = 98\%$. Питома швидкість передачі для мобільних станцій на кордоні сектора і середня питома швидкість передачі визначається як крива накопиченої частоти розподілу в точці 5% і 50% відповідно. На рисунках 3.9, 3.10 представлені криві накопиченої частоти до і після застосування алгоритму для користувачів макростільниками, користувачів фемтосстільників і всіх користувачів для першого і другого сценарію.

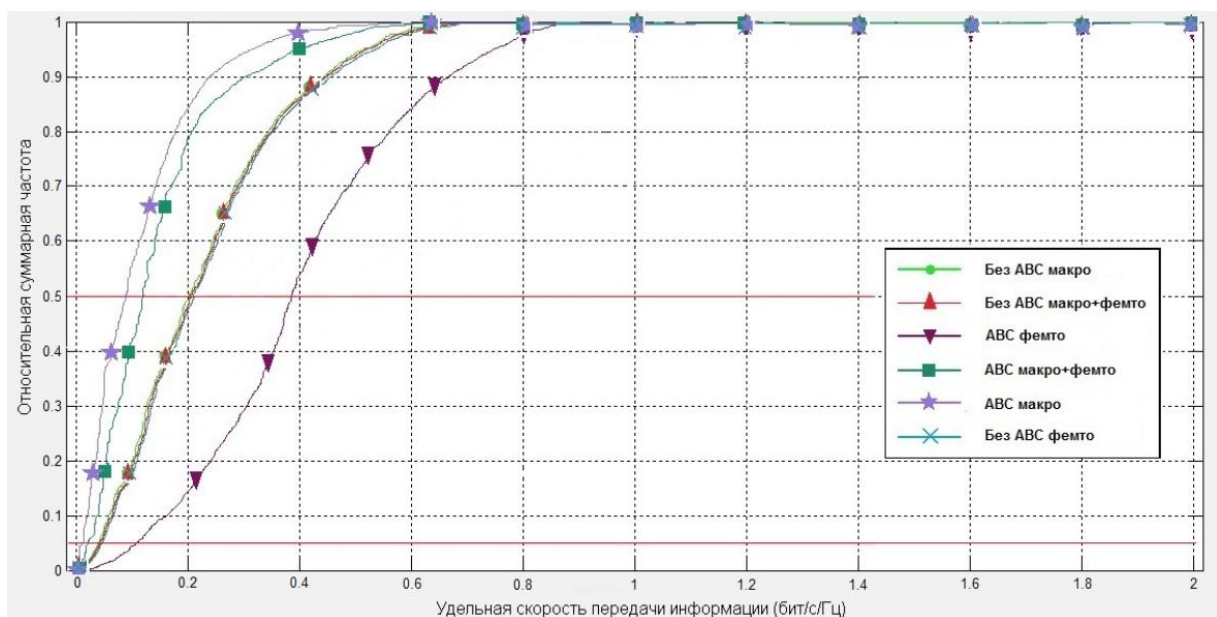


Рисунок 3.9 – Криві накопиченої частоти розподілу середнього значення питомої швидкості передачі до і після застосування алгоритму (1 сценарій)

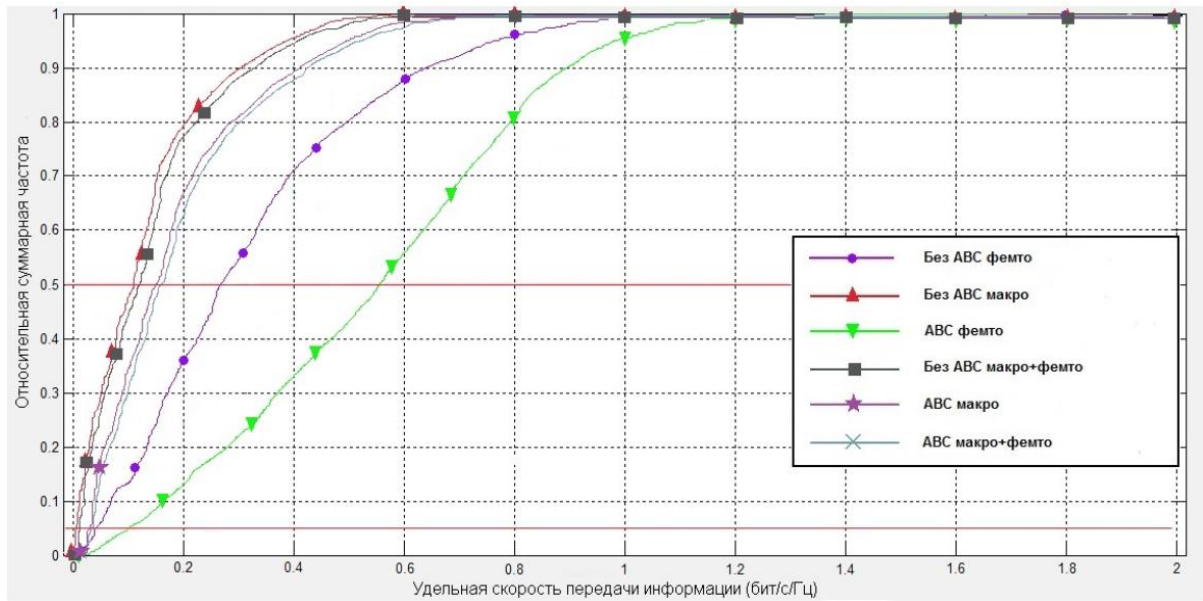


Рисунок 3.10 – Криві накопиченої частоти розподілу середнього значення питомої швидкості передачі до і після застосування алгоритму (2 сценарій)

Чисельні значення середньої і граничної швидкості передачі, відповідні точках кривих накопиченої частоти, а також кордони довірчих інтервалів представлені в таблицях 3.1 і 3.2.

Таблиця 3.1 – Результати симуляції (1 сценарій)

До використання алгоритму	Середня питома швидкість передачі, біт/с/Гц	Гранична питома швидкість передачі, біт/с/Гц	Границі довірчого інтервалу	Характер змін на границі стільника
Всі користувачі	0.211	0.063	0.0132	
Користувачі макростільника	0.205	0.061	0.0178	
Користувачі фемтостільника	0.213	0.066	0.0109	

Після використання алгоритму				
Всі користувачі	0.134	0.044	0.0143	зменшилось в 1.43 рази
Користувачі макростільника	0.085	0.016	0.0167	зменшилось в 3.81 рази
Користувачі фемтостільника	0.378	0.112	0.0155	збільшилось в 1.69 рази

Таблиця 3.2 – Результати симуляції (2 сценарію)

До використання алгоритму	Середня питома швидкість передачі, біт/с/Гц	Гранична питома швидкість передачі, біт/с/Гц	Границі довірчого інтервалу	Характер змін на границі стільника
Всі користувачі	0.421	0.045	0.0052	
Користувачі макростільника	0.434	0.052	0.0061	
Користувачі фемтостільника	0.125	0.022	0.0087	
Після використання алгоритму				
Всі користувачі	0.412	0.052	0.0049	збільшилось в 1.15 рази
Користувачі макростільника	0.362	0.046	0.0062	зменшилось в 1,13 рази

Користувачі фемтостільника	0.852	0.153	0.0065	збільшилось в 6.95 рази
-------------------------------	-------	-------	--------	----------------------------

На основі таблиць 3.1 і 3.2 зроблені наступні висновки: коли обидва стільники перевантажені, після застосування алгоритму гранична питома швидкість передачі в частотних каналах абонентів фемтостільників збільшилася в 1.69 рази, абонентів макростільника - зменшилася 3.81 рази. Середня питома швидкість передачі в частотних каналах абонентів фемтостільника збільшилася в 1.77 раз, абонентів макростільника - зменшилася в 2.41 рази. Коефіцієнт $\alpha = 0.4$. Оскільки надмірна кількість ABS - субкадрах в загальному переданому потоці зменшує час обслуговування абонентів макростільника, їх питома швидкість передачі зменшується.

У випадку перевантаженого фемтостільника, після застосування алгоритму гранична питома швидкість передачі в частотних каналах абонентів фемтостільника збільшилася в 6,95 рази, абонентів макростільника - зменшилася 1.13 рази. Середня питома швидкість передачі в частотних каналах абонентів фемтостільників збільшилася в 6.816 раз, абонентів макростільників - зменшилася в 1.19 раз. Коефіцієнт $\alpha = 0.6$. Зменшення питомої швидкості передачі для абонентів макростільників в даному випадку не так помітно через низьку щільності макро абонентів в стільнику.

Порівнюючи граничної швидкості передачі в частотних каналах абонентів в таблицях 3.1 і 3.2 зі значеннями в таблиці 3.2, можна зробити висновок, що моделюються значення задовольняють розкиду середніх стандартизованих значень 0.08 - 0.12 біт / с / Гц (специфікація 3GPP).

Мета роботи - підвищення питомої швидкості передачі інформації в частотних каналах абонентів фемтостільників - досягнута.

Висновки. В розділі проведено результати моделювання роботи системи мобільного зв'язку стосовно розподілу каналних ресурсів між користувачами типу H2H та M2M. Також проведено моделювання розподілу частотного ресурсу між фемтостільником та макростільником.

Висновки

При виконанні роботи було виконано наступне:

1. Проведено дослідження літературних джерел з метою вивчення принципів організації роботи стільників систем мобільного зв'язку.
2. Провідено розробку алгоритму розподілу ресурсів стільника.
3. Розроблено математичну модель, що описує розподіл ресурсів стільника.
4. Проведено моделювання роботи стільника системи мобільного зв'язку з метою дослідження розподілу ресурсів.

Підвищення питомої швидкості передачі інформації на межі стільника є важливою науково-технічною задачею, яка може бути вирішена зниженням міжстільникової інтерференції в мережі. В результаті аналізу публікацій з даної проблематики було встановлено, що традиційні способи зниження внутрішньо системних перешкод в гомогенних мережах (технологія координації між стільникової інтерференції ICIC Release 8), такі як метод PFR і SFR можуть поліпшити СЕ на кордоні сектора на величину до 150%; при цьому спостерігається зменшення середньої СЕ до 30%. Ефективно показали себе модифіковані методи, основані на розподілі абонентам ресурсних блоків із застосуванням Угорського алгоритму.

Однак технологія ICIC в частотній області орієнтована на гомогенні мережі і ефективна при захисті від внутрішньо системних перешкод тільки фізичних каналів даних, а не каналів управління, що не дозволяє використовувати їх в гетерогенних мережах. Цей недолік усувають методи посиленої координації між стільникової інтерференції eICIC 3GPP Release 10: Carrier aggregation в частотній області і Almost Blank Subframes в часовій.

Carrier aggregation дозволяє уникнути внутрішньо системних перешкод завдяки розподілу даних і керуючої інформації які створюють інтерференцію стільників в одні і ті ж моменти часу на різні несучі. Але ряд недоліків, таких як відсутність підтримки цієї технології абонентськими пристроями ранніх релізів, підвищені вимоги до побічних випромінювань, максимальної потужності і іншим чинникам, що з суміщенням різних радіочастот в одному пристрої, а

також неможливість агрегувати все частотні діапазони не дають використовувати цей спосіб максимально ефективно.

У зв'язку з цим пропонується удосконалення методів зниження внутрішньо системних перешкод в часовій області за допомогою ABS - алгоритму. Ключовим моментом при цьому є визначення процентного вмісту ABS - субкадрах, оптимального з точки зору підвищення середньої та граничної питомої швидкості передачі. Вибір може бути здійснений одним з трьох способів: емпіричним, на основі аналітичного розрахунку і з застосуванням алгоритмів. В якості такого алгоритму розглядається модифікований в часовій області метод посиленої координації міжстільниковій інтерференції (eICIC). Для балансування навантаження в гетерогенних мережах застосовується метод CRE, ідея якого полягає в тому, що значення RSRP, отримане від фемтостільників, штучно збільшується на деяке значення. Це дозволяє абонентам підключатися до фемтостільників, незважаючи на те, що від неї отримано не максимальне значення RSRP.

Розглядалася система з одним макростільником і одним фемтостільником. За допомогою моделювання порівнювалися середня і гранична питома швидкість передачі інформації для двох сценаріїв навантаження: обидва стільники перевантажені, перевантажені тільки фемтостільники. Коли обидва стільники перевантажені, після застосування алгоритму гранична питома швидкість передачі в частотних каналах абонентів фемтостільників збільшилася в 1.69 рази, абонентів макростільниками - зменшилася 3.81 рази. Середня питома швидкість передачі в частотних каналах абонентів фемтостільників збільшилася в 1.77 раз, абонентів макростільниками - зменшилася в 2.41 рази. коефіцієнт $\alpha = 0.4$.

Оскільки надмірна кількість ABS - субкадрах в загальному переданому потоці зменшує час обслуговування абонентів макростільниками, їх питома швидкість передачі зменшується.

Коли перевантажені фемтостільники, а макростільники недовантажені після застосування алгоритму гранична питома швидкість передачі в частотних

каналах абонентів фемтостільників збільшилася в 6.95 рази, абонентів макростільниками - зменшилася 1.13 рази. Середня питома швидкість передачі в частотних каналах абонентів фемтостільників збільшилася в 6.816 раз, абонентів макростільниками - зменшилася в 1.19 раз. Коефіцієнт $\alpha = 0.6$. Зменшення питомої швидкості передачі для абонентів макростільників в даному випадку слабо виражене через низьку щільності макро абонентів в стільнику.

Порівнюючи граничної швидкості передачі в частотних каналах абонентів можна зробити висновок, що значення, які моделюються, задовольняють розкиду середніх стандартизованих значень 0.08 - 0.12 біт / с / Гц (Специфікація 3GPP).

Перелік використаних джерел

1. Васильєвський, В.В. "Оптимізація алгоритмів управління ресурсами в гетерогенних мережах LTE". – Київ: Видавництво "Наука", 2020. – 320с.
2. Григоренко, І.І. "Дослідження методів управління ресурсами в гетерогенних мережах LTE". – Харків: Видавництво "Ранок", 2019. – 280с.
3. Демченко, О.О. "Алгоритми оптимізації ресурсів в гетерогенних мережах LTE". – Львів: Видавництво "Світ", 2018. – 350с.
4. Жуковський, С.С. "Ресурси та їх управління в гетерогенних мережах LTE". – Дніпро: Видавництво ДНУ, 2017. – 300с.
5. Коваль, В.В. "Оптимізація алгоритмів управління ресурсами в гетерогенних мережах LTE". – Одеса: Видавництво ОНУ, 2016. – 330с.
6. Литвиненко, Д.М. "Дослідження алгоритмів управління ресурсами в гетерогенних мережах LTE". – Полтава: Видавництво ПНТУ, 2018. – 310с.
7. Мороз, І.Л. "Алгоритми управління ресурсами в гетерогенних мережах LTE". – Вінниця: Видавництво ВНТУ, 2019. – 340с.
8. Петренко, І.І. "Оптимізація ресурсів в гетерогенних мережах LTE". – Запоріжжя: Видавництво ЗНУ, 2017. – 315с.
9. Сидоренко, В.К. "Дослідження алгоритмів управління ресурсами в гетерогенних мережах LTE". – Чернівці: Видавництво ЧНУ, 2018. – 325с.
10. Шевченко, О.П. "Оптимізація алгоритмів управління ресурсами в гетерогенних мережах LTE". – Суми: Видавництво СНАУ, 2019. – 305с.
11. Dahlman, E., Parkvall, S., Sköld, J. "4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband". – Academic Press, 2013. – 544p.
12. Tripathi, P., Sharma, A. "Evolution of Mobile Broadband: HSPA+ and Beyond". – Mobile Communications Journal, 2012. – Vol.18, No. 7. – pp. 15-22.
13. Lee, C. "High-Speed Packet Access: Implementation and Challenges". – Mobile Systems Journal, 2018. – Vol. 27, No. 3. – pp. 52-59.

14. Rodríguez Martínez Elena Inter cell interference coordination techniques in HETNETS, June, 2013.
15. Ching-HaoHuang Wireless Commun. Lab., Chunghwa Telecom Labs., Taoyuan, Taiwan Chen-Yin Liao An interference management scheme for heterogeneous network with cell range extension in Network Symposium (APNOMS) 2011 13th Asia-Pacific.
16. Rahman, M., Yanikomeroglu, H., Wong W. Interference avoidance with dynamic Inter-Cell Coordination for Downlink LTE system, Wireless Communications and Networking Conference, WCNC 2009. IEEE, 2009.
17. Moray Rumney Введение в LTE Advanced , Agilent Technologies, 10.06.2015
18. Wang Y., Pederson K.I., Time and Power Domain Interference Management for LTE Networks Conf.
19. Ho, Q.-D., Tweed, D., & Le-Ngoc, T. "LTE-Advanced: An Overview". – SpringerLink, 2016. – pp. 21-30.
20. Eriksson, G., Lindoff, B., Sundblad, M. "High-Speed Packet Access: The Technology and Applications". – IEEE Communications Magazine, 2009. – Vol. 47, No. 2. – pp. 60-68.
21. 3GPP R1– 112331 Performance evaluation in heterogeneous networks, Aug. 2011.
22. 3GPP R1– 112411 Scenarios for further enhanced non ca-based ICIC for LTE, Aug., 2011.
23. Hisham el Shaer, Interference Management in LTE-Advanced Heterogeneous Networks Using Almost Blank Subframes, Master's Degree Project Stockholm, Sweden, XR_EE_SB 2012:006.
24. Recommendation ITU-R P.1411-6, Propagation data and prediction methods for the planning of short-range outdoor radiocommunication systems and radio local areanetworks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz, 2012.

25. S. Kurkowski, T. Camp, and M. Colagrosso «Manet simulation studies: the incredible», ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, vol. 9, no. 4, pp. 50–61, 2005.
26. Відкрите програмне забезпечення [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.nsnam.org/>
27. Validation of ns-3 802.11b PHY model May 2009 Guangyu Pei and TomHenderson Boeing Research and Technology The Boeing Company P.O.Box 3707,MC 7L-49 Seattle, WA 98124-7707.
28. Thomas F. Christiansen Self-Organizing Networks (SON) TD-ICICImplementation In a Network Simulator, Norwegian and Technology, Department of Electronics and Telecommunications.
29. REPORT ITU-R M.2134 Requirements related to technical performance forIMTAdvanced radio interface(s), 2008.
30. 3GPP [TR 36.913version 9.0.0](#) Release 9, 2010 23. Narcis Cardona, Jose F.Monserrat, Jorge Cabrejas LTE-Advanced and Next Generation Wireless Networks:Channel Modelling and Propagation, Published Online: 2 OCT 2012.
31. Negronomicón, C. "A Comparison and SWOT Analysis of Towards 4G Technologies: 802.16e and 3GPP-LTE". – Academia.edu, 2012.
32. Одарченко Р.С. "Методи тестування ефективності радіозв'язку в мережах LTE". – Київ: Видавництво "Наука", 2021. – 280с.
33. Nakamura Takahiro Proposal for Candidate Radio Interface Technologies for IMTAdvanced Based on LTE Release 10 and Beyond (LTE-Advanced), December,2009.

34. 3GPP TR 39.913 Requirements for further advancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) (LTE-Advanced), 2011.
35. Іванова Л.М. "Оптимізація алгоритмів управління ресурсами в гетерогенних мережах LTE". – Харків: Видавництво "Ранок", 2019. – 300с.

Додаток А

```
// установка необхідних заголовних файлів
#include <ns3 / core-module.h>
#include <ns3 / network-module.h>
#include <ns3 / mobility-module.h>
#include <ns3 / internet-module.h>
#include <ns3 / lte-module.h>
#include <ns3 / config-store-module.h>
#include <ns3 / buildings-module.h>
#include <ns3 / applications-module.h>
#include <ns3 / rem-spectrum-phy.h>
#include <ns3 / spectrum-channel.h>
#include <ns3 / log.h>
#include <ns3 / lte-amc.h>
#include <iomanip>
#include <string>
#include <vector>
#include <stdlib.h>

using namespace ns3; // директива, яка вказує на те, що використовується середу ns-3
NS_LOG_COMPONENT_DEFINE ("lte-zayts");
// функція, автоматично розміщує список знайдених аномальних абонентів в файл
void
PrintAnomalyGnuplottableUeListToFile (std :: string filename, uint32_t UEMassiv [], int length)
{
    std :: ofstream outFile;
    outFile.open (filename.c_str (), std :: ios_base :: out | std :: ios_base :: trunc);
    if (! outFile.is_open ())
    {
        NS_LOG_ERROR ("Can not open file" << filename);
        return;
    }
    if (filename == "lte-zayts-cell-detection-result.txt")
    {
        int cell = 42;
        int xcell = 2300;
        int ycell = 1610;
        int xwrote = 90;
        int ywrote = 20;
        int c = 0;
        for (int k = 0; k <length; k++)
            if (UEMassiv [k] == 42)
```

```

c = 1;
if (c == 0)
outFile << "\n # Sleeping cell is cell number" << cell << "\n \n"
<< "set object circle" // << uedev-> GetImsi ()
<< "at" << xcell << "," << ycell << "\t size 370 linewidth 7 fc rgb \" green \" front \n \n"
<< "\" at \"<< xwrote <<\", \"<< ywrote <<\" \t left font \"Helvetica, 20 \" textcolor rgb \"blue \" \"
<< std :: endl;
else
<< "\" at \"<< xwrote <<\", \"<< ywrote <<\" \t left font \"Helvetica, 20 \" textcolor rgb \"blue \" \"
<< std :: endl;
}
else
{
for (NodeList :: Iterator it = NodeList :: Begin (); it != NodeList :: End (); ++ it)
{
Ptr <Node> node = * it;
int nDevs = node-> GetNDevices ();
for (int j = 0; j <nDevs; j ++)
{
for (int i = 0; i <length; i ++)
{
Ptr <LteUeNetDevice> uedev = node-> GetDevice (j) -> GetObject <LteUeNetDevice> ();
if (uedev)
if (uedev-> GetImsi () == UEMassiv [i])
{
Vector pos = node-> GetObject <MobilityModel> () -> GetPosition ();
outFile << "# Anomaly UE, IMSI =" << uedev-> GetImsi () << "\n"
<< "set label \" \"//<< uedev-> GetImsi ()
<< "\" at \"<< pos.x <<\", \"<< pos.y <<\" \t left front point linewidth 7 lc rgb \"green \" offset 0,0 \"
<< std :: endl << std :: endl;
}}}}
std :: cout << "\nAnomaly UEs are written to file" << filename << std :: endl;
}
// функція дозволяє виявити аномальних абонентів - програма роботи з масивами
void
AnomalyDetection (std :: string filename)
{
std :: ifstream file;
file.open (filename.c_str (), std :: ios :: in);
if (! file.is_open ())
{
NS_LOG_ERROR ("Can not open file" << filename);

```

```

return;
}
std::string line;
getline (file, line); // пропуск першого рядка з текстовим позначенням величин
float time, cellid, rnti, rsrpWt, rsrpDbm, sinr, a, b, c;
uint32_t imsi;
int cqi;
int n = 0;
std::vector<float> RSRPdbm;
std::vector<uint32_t> allUEs;
std::vector<uint32_t> rsrpUEanomaly;
std::vector<uint32_t> cqiUEanomaly;
std::vector<uint32_t> goodCellIDs;
file >> time;
file >> cellid;
file >> imsi;
file >> rnti;
file >> a;
file >> b;
file >> c;
allUEs.push_back (imsi);
if (c > 0 && c < 1) // автоматичне розпізнавання файлу з CQI або з RSRP
{
    sinr = a;
    cqi = b;
    while (! file.eof ())
    {
        if (cqi != 0)
            cqiUEanomaly.push_back (imsi); // запис абонентів з CQI > 0 в контейнер даних
        file >> time;
        file >> cellid;
        goodCellIDs.push_back (cellid); // запис номерів працюють сот в контейнер даних
        file >> imsi;
        file >> rnti;
        file >> sinr;
        file >> cqi;
        allUEs.push_back (imsi); // запис номерів всіх абонентів в контейнер даних
    }
    std::set<uint32_t> s (cqiUEanomaly.begin (), cqiUEanomaly.end ());
    std::vector<uint32_t> cqiUEanomalyNoRepeat (s.begin (), s.end ());
    uint32_t cqiUEanomalyMassiv [cqiUEanomalyNoRepeat.size ()];
    n = 0;

```

```

// створення масиву з номерами абонентів з CQI> 0
for (std :: vector<uint32_t> :: iterator it = cqiUEanomalyNoRepeat.begin (); it! =
cqiUEanomalyNoRepeat.end (); ++ it)
{
cqiUEanomalyMassiv [n] = * it;
// std :: cout << "cqi" << * it << "\n";
n ++;
}
// запис номерів абонентів з CQI> 0 в файл для відображення на карті радіопокриття
PrintAnomalyGnuplottableUeListToFile ( "lte-zayts-UEs-A-CQI.txt", cqiUEanomalyMassiv,
cqiUEanomalyNoRepeat.size ();
}
else
{
while (! file.eof ())
{
if (rsrpWt <= -100)
{
rsrpUEanomaly.push_back (imsi); // запис в контейнер даних номерів абонентів з
RSRPdbm.push_back (rsrpDbm); // низькими показниками RSRP
}
file >> time;
file >> cellid;
file >> imsi;
file >> rnti;
file >> rsrpWt;
file >> sinr;
file >> cqi;
allUEs.push_back (imsi);
}
std :: set<uint32_t> s1 (rsrpUEanomaly.begin (), rsrpUEanomaly.end ());
std :: vector<uint32_t> rsrpUEanomalyNoRepeat (s1.begin (), s1.end ());
uint32_t rsrpUEanomalyMassiv [rsrpUEanomalyNoRepeat.size ()];
n = 0;
// створення масиву з номерами абонентів з низьким значенням RSRP
for (std :: vector<uint32_t> :: iterator it = rsrpUEanomalyNoRepeat.begin (); it! =
rsrpUEanomalyNoRepeat.end (); ++ it)
{
rsrpUEanomalyMassiv [n] = * it;
n ++;
}
PrintAnomalyGnuplottableUeListToFile ( "lte-zayts-UEs-A-RSRP.txt", rsrpUEanomalyMassiv,

```

```

rsrpUEanomalyNoRepeat.size ());
}
std::set<uint32_t> s2(allUEs.begin (), allUEs.end ());
std::vector<uint32_t> allUEsNoRepeat (s2.begin (), s2.end ());
std::set<uint32_t> s3(goodCellIDs.begin (), goodCellIDs.end ());
std::vector<uint32_t> goodCellIDsNoRepeat (s3.begin (), s3.end ());
// створення масиву з номерами працюють сот
uint32_t goodCellIDsMassiv [goodCellIDsNoRepeat.size ()];
n = 0;
for (std::vector<uint32_t>::iterator it1 = goodCellIDsNoRepeat.begin (); it1 !=
goodCellIDsNoRepeat.end (); ++ it1)
{
goodCellIDsMassiv [n] = * it1;
std::cout << "good cell is" << * it1 << std::endl;
n ++;
}
// функція, що створює файл з номерами всіх абонентів для відображення на карті
// радіопокриття
void
PrintGnuplottableUeListToFile (std::string filename)
{
std::ofstream outFile;
outFile.open (filename.c_str (), std::ios_base::out | std::ios_base::trunc);
if (! outFile.is_open ())
{
NS_LOG_ERROR ("Can not open file" << filename);
return;
}
for (NodeList::Iterator it = NodeList::Begin (); it != NodeList::End (); ++ it)
{
Ptr<Node> node = * it;
int nDevs = node->GetNDevices ();
for (int j = 0; j < nDevs; j++)
{
Ptr<LteUeNetDevice> uedev = node->GetDevice (j) ->GetObject<LteUeNetDevice> ();
if (uedev)
{
Ptr<LteUeRrc> ueRrc = uedev->GetRrc ();
Ptr<LteUePhy> uePhy = uedev->GetPhy ();
Vector pos = node->GetObject<MobilityModel> () ->GetPosition ();
outFile << "#IMSI =" << uedev->GetImsi () << "\t CellId =" << ueRrc->GetCellId () << "\n"
<< "set label \" " << uedev->GetImsi ()

```

```

<< "\" at "<< pos.x <<" , "<< pos.y <<" \ t left font \ "Helvetica, 8 \" textcolor rgb \ "grey \"
front point pt 1 ps 0.3 lc rgb \ "grey \" offset 0,0 "
<< std :: endl << std :: endl;
}}}}
// основна функція моделі
int main (int argc, char * argv [])
{
// активація компонентів для виведення інформації про вимірювання і процесі моделювання
LogComponentEnable ( "lte-zays", LOG_LEVEL_ALL);
LogComponentEnable ( "PhyStatsCalculator", LOG_LEVEL_ALL);
// завдання характеристик моделі, які використовуються за замовчуванням
Config :: SetDefault ( "ns3 :: UdpClient :: Interval", TimeValue (Milliseconds (1)));
Config :: SetDefault ( "ns3 :: UdpClient :: MaxPackets", UIntegerValue (1000000));
Config :: SetDefault ( "ns3 :: LteAmc :: AmcModel", EnumValue (LteAmc :: MiErrorModel));
Config :: SetDefault ( "ns3 :: PhyStatsCalculator :: DLRsrpSinrFilename", StringValue
( "DLRsrpSINRstats.txt"));
Config :: SetDefault ( "ns3 :: PhyStatsCalculator :: ULSinrFilename", StringValue ( "UESinrStats.txt"));
Config :: SetDefault ( "ns3 :: LteEnbRrc :: SrsPeriodicity", UIntegerValue (320));
Config :: SetDefault ( "ns3 :: PffFMacScheduler :: HarqEnabled", BooleanValue (false));
// параметри для створення сценарію моделювання
bool noncroppedUeBox = false; // установка методу завдання розмірів модельованого ділянки мережі
uint32_t nMacroEnbSites = 27; // установка кількості базових станцій
uint32_t nMacroEnbSitesX = 5; // установка мінімальної кількості БС по осі X
double interSiteDistance = 1000; // установка відстані між БС (м)
uint16_t XRes = 200; // установка дозволу карт радіопокриття по осі X
uint16_t YRes = 200; // установка дозволу карт радіопокриття по осі Y
double MaxPointsREM = 50000; // Завдання максимальної кількості розраховуються точок
double areaMarginFactor = 0.5; // установка коефіцієнта виносу абонентів від країв мережі
double macroUeDensity = 0.0001; // установка кількості абонентів на один квадратний метр
double macroEnbTxPowerDbm = 46.0; // Завдання потужності БС (дБм)
uint16_t macroEnbDIEarfcn = 100; // установка номера радіоканалу вниз
uint16_t macroEnbBandwidth = 100; // установка смуги частот використовується БС (РБ)
double simTime = 20; // повне час моделювання (с)
bool generateREM = true; // включення генерації карт радіопокриття
bool GenerateREMandStopAfterAnomalyDetection = false; // відключення зупинки моделювання
// після створення карти радіопокриття і виявлення аномальних абонентів
bool AnomalyDetect = true; // активація алгоритму виявлення «сплячих» сот
bool StopWhenREMDone = false; // відключення зупинки моделювання після створення карти
// радіопокриття
// установка необхідних компонентів роботи симулятора
CommandLine cmd;
cmd.Parse (argc, argv);

```

```

ConfigStore inputConfig;
inputConfig.ConfigureDefaults ();
cmd.Parse (argc, argv);
// створення області для розміщення абонентів
Box macroUeBox;
if (noncroppedUeBox)
{
uint32_t currentSite = nMacroEnbSites -1;
uint32_t biRowIndex = (currentSite / (nMacroEnbSitesX + nMacroEnbSitesX + 1));
uint32_t biRowRemainder = currentSite% (nMacroEnbSitesX + nMacroEnbSitesX + 1);
uint32_t rowIndex = biRowIndex * 2 + 1;
if (biRowRemainder> = nMacroEnbSitesX)
{
++ rowIndex;
}
uint32_t nMacroEnbSitesY = rowIndex;
NS_LOG_LOGIC ( "nMacroEnbSitesY =" << nMacroEnbSitesY);
macroUeBox = Box (-areaMarginFactor * interSiteDistance,
(NMacroEnbSitesX + areaMarginFactor) * interSiteDistance,
-areaMarginFactor * interSiteDistance,
(NMacroEnbSitesY -1) * interSiteDistance * sqrt (0.75) +
areaMarginFactor * interSiteDistance,
1.0, 2.0);
}
else
{
if (interSiteDistance == 1000)
macroUeBox = Box (100 3900, 100 3900, 1.0, 2.0);
else
macroUeBox = Box (50, 1950, 50, 1950, 1.0, 2.0);
}
double macroUeAreaSize = (macroUeBox.xMax - macroUeBox.xMin) * (macroUeBox.yMax -
macroUeBox.yMin);
uint32_t nMacroUes = round (macroUeAreaSize * macroUeDensity);
NS_LOG_LOGIC ( "nMacroUes =" << nMacroUes << "(density =" << macroUeDensity << ")");
// створення груп вузлів базових станцій
NodeContainer macroEnbs1;
macroEnbs1.Create (11 * 3);
NodeContainer macroEnbs2;
macroEnbs2.Create (6);
NodeContainer macroEnbs3;
macroEnbs3.Create (2);

```

```

NodeContainer macroEnbs4;
macroEnbs4.Create (1);
NodeContainer macroEnbs5;
macroEnbs5.Create (6);
NodeContainer macroEnbs6;
macroEnbs6.Create (11 * 3);
// створення абонентських пристроїв
NodeContainer macroUes;
macroUes.Create (nMacroUes);
// установка моделі поширення
MobilityHelper mobility;
mobility.SetMobilityModel ( "ns3:: BuildingsMobilityModel");
// установка типу планувальника мережі
Ptr <LteHelper> lteHelper = CreateObject <LteHelper> ();
lteHelper-> SetSchedulerType ( "ns3:: PFFfMacScheduler");
lteHelper-> SetAttribute ( "UseIdealRrc", BooleanValue (false));
// установка моделі втрат на трасі поширення
lteHelper-> SetAttribute ( "PathlossModel", StringValue
( "Ns3:: HybridBuildingsPropagationLossModel"));
lteHelper-> SetPathlossModelAttribute ( "ShadowSigmaOutdoor", DoubleValue (1.5));
Config :: SetDefault ( "ns3:: HybridBuildingsPropagationLossModel :: Frequency",
DoubleValue (2.12e + 09)); // установка частоти несучої
lteHelper-> SetPathlossModelAttribute ( "Los2NlosThr", DoubleValue (1e6));
lteHelper-> SetSpectrumChannelType ( "ns3:: MultiModelSpectrumChannel");
// установка моделі загасання і її значень
lteHelper-> SetFadingModel ( "ns3:: TraceFadingLossModel");
lteHelper-> SetFadingModelAttribute ( "TraceFilename", StringValue ( "src / lte / model / fadingtraces /
fading_trace_EPA_3kmph.fad"));
lteHelper-> SetFadingModelAttribute ( "TraceLength", TimeValue (Seconds (10.0)));
lteHelper-> SetFadingModelAttribute ( "SamplesNum", UIntegerValue (10000));
lteHelper-> SetFadingModelAttribute ( "WindowSize", TimeValue (Seconds (0.5)));
lteHelper-> SetFadingModelAttribute ( "RbNum", UIntegerValue (100));
// установка потужності базових станцій
Config :: SetDefault ( "ns3:: LteEnbPhy :: TxPower", DoubleValue (macroEnbTxPowerDbm));
// розподіл макробазових станцій на місцевості і установка на них вузлів базових
// станцій (по три вузла на БС)
mobility.Install (macroEnbs1);
Ptr <LteHexGridEnbTopologyHelper> lteHexGridEnbTopologyHelper =
CreateObject <LteHexGridEnbTopologyHelper> ();
lteHexGridEnbTopologyHelper-> SetLteHelper (lteHelper);
lteHexGridEnbTopologyHelper-> SetAttribute ( "InterSiteDistance", DoubleValue (interSiteDistance));
lteHexGridEnbTopologyHelper-> SetAttribute ( "MinX", DoubleValue (interSiteDistance / 2));

```

```

lteHexGridEnbTopologyHelper-> SetAttribute ( "GridWidth", UIntegerValue (nMacroEnbSitesX));
lteHelper->SetEnbAntennaModelType ("ns3::ParabolicAntennaModel");
lteHelper->SetEnbAntennaModelAttribute ("Beamwidth", DoubleValue (70));
lteHelper->SetEnbAntennaModelAttribute ("MaxAttenuation", DoubleValue (20.0));
lteHelper->SetEnbDeviceAttribute ("DLEarfcn", UIntegerValue (macroEnbDLEarfcn));
lteHelper->SetEnbDeviceAttribute ("ULEarfcn", UIntegerValue (macroEnbDLEarfcn + 18000));
lteHelper->SetEnbDeviceAttribute ("DLBandwidth", UIntegerValue (macroEnbBandwidth));
lteHelper->SetEnbDeviceAttribute ("ULBandwidth", UIntegerValue (macroEnbBandwidth));
NetDeviceContainer macroEnbDevs1 = lteHexGridEnbTopologyHelper -
>SetPositionAndInstallEnbDevice (macroEnbs1);
mobility.Install (macroEnbs2);
lteHexGridEnbTopologyHelper->SetAttribute ("MinX", DoubleValue (interSiteDistance/2));
lteHexGridEnbTopologyHelper->SetAttribute ("MinY", DoubleValue (2*interSiteDistance));
NetDeviceContainer macroEnbDevs2 = lteHexGridEnbTopologyHelper -
>SetPositionAndInstallEnbDevice (macroEnbs2);
mobility.Install (macroEnbs3);
lteHexGridEnbTopologyHelper->SetAttribute ("MinX", DoubleValue
(2*interSiteDistance+(interSiteDistance/2)));
lteHexGridEnbTopologyHelper->SetAttribute ("MinY", DoubleValue (2*interSiteDistance));
NetDeviceContainer macroEnbDevs3 = lteHexGridEnbTopologyHelper -
>SetPositionAndInstallEnbDevice (macroEnbs3);
mobility.Install (macroEnbs4);
lteHexGridEnbTopologyHelper->SetAttribute ("MinX", DoubleValue
(2*interSiteDistance+(interSiteDistance/2)));
lteHexGridEnbTopologyHelper->SetAttribute ("MinY", DoubleValue (2*interSiteDistance));
lteHelper->SetEnbAntennaModelAttribute ("Beamwidth", DoubleValue (0));
NetDeviceContainer macroEnbDevs4 = lteHexGridEnbTopologyHelper -
>SetPositionAndInstallEnbDevice (macroEnbs4);
mobility.Install (macroEnbs5);lteHexGridEnbTopologyHelper->SetAttribute ("MinX", DoubleValue
(3*interSiteDistance+(interSiteDistance/2)));
lteHexGridEnbTopologyHelper->SetAttribute ("MinY", DoubleValue (2*interSiteDistance));
lteHelper->SetEnbAntennaModelAttribute ("Beamwidth", DoubleValue (70));
NetDeviceContainer macroEnbDevs5 = lteHexGridEnbTopologyHelper -
>SetPositionAndInstallEnbDevice (macroEnbs5);
mobility.Install (macroEnbs6);
lteHexGridEnbTopologyHelper->SetAttribute ("MinX", DoubleValue (0));
lteHexGridEnbTopologyHelper->SetAttribute ("MinY", DoubleValue (3*interSiteDistance));
NetDeviceContainer macroEnbDevs6 = lteHexGridEnbTopologyHelper -
>SetPositionAndInstallEnbDevice (macroEnbs6);
//случайное размещение абонентских устройств в сети
NS_LOG_LOGIC ("randomly allocating macro UEs in " << macroUeBox);
Ptr<PositionAllocator> positionAlloc = CreateObject<RandomBoxPositionAllocator> ();

```

```

Ptr<UniformRandomVariable> xVal = CreateObject<UniformRandomVariable> ();
xVal->SetAttribute ("Min", DoubleValue (macroUeBox.xMin));
xVal->SetAttribute ("Max", DoubleValue (macroUeBox.xMax));
positionAlloc->SetAttribute ("X", PointerValue (xVal));
Ptr<UniformRandomVariable> yVal = CreateObject<UniformRandomVariable> ();
yVal->SetAttribute ("Min", DoubleValue (macroUeBox.yMin));
yVal->SetAttribute ("Max", DoubleValue (macroUeBox.yMax));
positionAlloc->SetAttribute ("Y", PointerValue (yVal));
Ptr<UniformRandomVariable> zVal = CreateObject<UniformRandomVariable> ();
zVal-> SetAttribute ( "Min", DoubleValue (macroUeBox.zMin));
zVal-> SetAttribute ( "Max", DoubleValue (macroUeBox.zMax));
positionAlloc-> SetAttribute ( "Z", PointerValue (zVal));
mobility.SetPositionAllocator (positionAlloc);
mobility.Install (macroUes);
NetDeviceContainer macroUeDevs = lteHelper-> InstallUeDevice (macroUes);
// підключення абонентів до базових станцій
NetDeviceContainer macroEnbDevsAll;
macroEnbDevsAll.Add (macroEnbDevs1);
macroEnbDevsAll.Add (macroEnbDevs2);
macroEnbDevsAll.Add (macroEnbDevs3);
macroEnbDevsAll.Add (macroEnbDevs4);
macroEnbDevsAll.Add (macroEnbDevs5);
macroEnbDevsAll.Add (macroEnbDevs6);
lteHelper-> AttachToClosestEnb (macroUeDevs, macroEnbDevsAll);
// активація наскрізного каналу передачі даних для абонентських пристроїв
enum EpsBearer :: Qci q = EpsBearer :: GBR_CONV_VOICE;
EpsBearer bearer (q);
lteHelper-> ActivateDataRadioBearer (macroUeDevs, bearer);
BuildingsHelper :: MakeMobilityModelConsistent ();
// запис координат абонентів в файл для подальшої візуалізації на карті радіопокриття
PrintGnuplottableUeListToFile ( "lte-zayts-UEs.txt");
// створення карти радіопокриття мережі і пошук «сплячою» стільники, якщо ця функція включена
Ptr <RadioEnvironmentMapHelper> remHelper;
if (generateREM || GenerateREMAfterAnomalyDetection)
{
PrintGnuplottableUeListToFile ( "lte-zayts-UEs.txt");
if (AnomalyDetect || GenerateREMAfterAnomalyDetection)
{
AnomalyDetection ( "DLrsrpSINRstats.txt");
AnomalyDetection ( "UESinrStats.txt");
if (GenerateREMAfterAnomalyDetection)
Simulator :: Stop ();
}
}

```

```

}
remHelper = CreateObject <RadioEnvironmentMapHelper> ();
remHelper-> SetAttribute ( "ChannelPath", StringValue ( "/ ChannelList / 0"));
remHelper-> SetAttribute ( "OutputFile", StringValue ( "lte-zayts.rem"));
remHelper-> SetAttribute ( "XMin", DoubleValue (macroUeBox.xMin));
remHelper-> SetAttribute ( "XMax", DoubleValue (macroUeBox.xMax));
remHelper-> SetAttribute ( "XRes", UIntegerValue (XRes));
remHelper-> SetAttribute ( "YMin", DoubleValue (macroUeBox.yMin));
remHelper-> SetAttribute ( "YMax", DoubleValue (macroUeBox.yMax));
remHelper-> SetAttribute ( "YRes", UIntegerValue (YRes));
remHelper-> SetAttribute ( "Z", DoubleValue (1.5));
remHelper-> SetAttribute ( "MaxPointsPerIteration", UIntegerValue (MaxPointsREM));
remHelper-> Install ();
// відключення зупинки симулятора після генерації карти, якщо ця функція включена
if (! StopWhenREMDone)
{
remHelper-> SetAttribute ("StopWhenDone", BooleanValue (false));
Simulator :: Stop (Seconds (simTime));
}
}
else
{
// установка часу моделювання
Simulator :: Stop (Seconds (simTime));
}
// включення відстеження фізичного рівня мережі і рівня управління каналом
lteHelper-> EnablePhyTraces ();
lteHelper-> EnableRlcTraces ();
// запуск і зупинка роботи симулятора
Simulator :: Run ();
Simulator :: Destroy ();
// кінець роботи програми
return 0;
}

```