

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»  
ФАКУЛЬТЕТ ПРИКЛАДНОЇ МАТЕМАТИКИ**

**КАФЕДРА СИСТЕМНОГО ПРОГРАМУВАННЯ І  
СПЕЦІАЛІЗОВАНИХ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ**

«На правах рукопису»  
УДК 004.773

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри СПСКС

\_\_\_\_\_ Віталій РОМАНКЕВИЧ

“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2020р.

**Магістерська дисертація  
на здобуття ступеня магістра**

зі спеціальності 123 Комп'ютерна інженерія

на тему: СПОСІБ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ У ВИСОКОНАВАНТАЖЕНИХ МОБІЛЬНИХ  
МЕРЕЖАХ

Юрович Іван Васильович \_\_\_\_\_ (підпис)

Науковий керівник доцент, с.н.с.,к.т.н. Юлія БОЯРІНОВА (підпис)

Рецензент \_\_\_\_\_ (підпис)

Консультант з нормоконтролю доцент, с.н.с.,к.т.н. Юлія БОЯРІНОВА \_\_\_\_\_ (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації  
немає запозичень з праць інших авторів без  
відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_ (підпис)

Київ – 2020 року

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет прикладної математики

Кафедра системного програмування і спеціалізованих комп'ютерних систем

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

за освітньо-професійною програмою

Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри СПСКС

\_\_\_\_\_ Віталій РОМАНКЕВИЧ

1 грудня 2019р.

**ЗАВДАННЯ**

**на магістерську дисертацію студенту**

**Юровичу Івану Васильовичу**

1. Тема дисертації «Спосіб передачі даних у високонавантажених мобільних мережах» \_\_\_\_\_

науковий керівник дисертації доцент, с.н.с.,к.т.н. Ю.Є. Боярінова \_\_\_\_\_ ,  
затвержені наказом по університету від «12 » листопада 2020 р. №3298-С

2. Термін подання студентом дисертації \_\_\_\_\_ грудня 2020 р. \_\_\_\_\_

3. Об'єкт дослідження – мережі стільникового зв'язку. \_\_\_\_\_

4. Предмет дослідження – характеристика навантаження стільникової мережі, та спосіб зменшення навантаження. \_\_\_\_\_

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: \_\_\_\_\_

- аналіз існуючих способів розвантаження мобільних мереж

- розробка нового способу передачі даних у високонавантажених мобільних мережах \_\_\_\_\_

- розробка програмної моделі для стандартного та запропонованого способу передачі даних

- порівняння результатів роботи моделі \_\_\_\_\_

6. Перелік ілюстративного матеріалу - презентація \_\_\_\_\_

7. Перелік публікацій (мінімальна кількість) \_\_\_\_\_  
2 тез \_\_\_\_\_

8. Дата видачі завдання 1 жовтня 2019 р. \_\_\_\_\_

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Затвердження теми	1.12.2019	
2	Збір та дослідження літератури	19.09.2020	
3	Аналіз існуючих рішень	23.09.2020	
4	Зміст та вступ	25.09.2020	
5	Розробка програмної моделі	05.10.2020	
6	Реферат	09.10.2020	
7	Перший розділ	09.10.2020	
8	Другий розділ	23.10.2020	
9	Третій розділ	04.11.2020	
10	Четвертий розділ	16.11.2020	
11	Редагування та перевірка роботи	20.11.2020	
12	Попередній розгляд магістерської дисертації на кафедрі	27.11.2020	

Студент \_\_\_\_\_

Іван ЮРОВИЧ

Науковий керівник дисертації \_\_\_\_\_

Юлія БОЯРІНОВА

## РЕФЕРАТ

### **Актуальність теми.**

Мобільний зв'язок є невід'ємною частиною нашого теперішнього життя. Чимало речей у нашому житті так чи інакше пов'язані з використанням мобільного пристрою.

Але телефон майже не несе користі якщо використовувати його без мобільного зв'язку. Тому надзвичайно важливою характеристикою мобільного зв'язку є його якість. Одним з показників якості є стабільність, що характеризує можливість у будь який момент часу отримати доступ до мережі. Зазвичай якість мобільного зв'язку є прийнятною та задовольняє більшість потреб користувачів. Проте існують ситуації, коли базові станції мобільного зв'язку не витримують великої кількості користувачів і через це якість з'єднання суттєво погіршується. В таких випадках навіть коротке текстове повідомлення може передаватися протягом декількох хвилин. Така проблема є характерною під час масових скупчень людей, наприклад, на концертах, фестивалях або ярмарках.

**Метою роботи** є покращення способу передачі даних у мобільній мережі з використанням алгоритму, який зможе зменшити надлишкове навантаження мережі без потреби модифікації існуючого обладнання.

**Об'єктом дослідження** є мережі стільникового зв'язку та методи обміну даними між мобільними пристроями.

**Предметом дослідження** є характеристика навантаження стільникової мережі, проблеми що пов'язані з перевантаженням та методи вирішення надлишкового навантаження мережі.

**Методи дослідження.** Моделювання роботи мережі з можливістю зміни основних параметрів мережі, що стосуються досліджуваного, та відстеження показників мережі у кожен момент часу.

**Наукова новизна** полягає у створенні способу передачі даних у мережі, що дозволяє зменшити надлишкове навантаження мережі без значної втрати у швидкості передачі даних, і при цьому, без потреби змін у апаратному забезпеченні.

**Практична цінність** полягає у пришвидшені передачі даних у високонавантажених мережах при незначних ресурсних затратах як з боку користувача так і з боку поставника послуг передачі даних.

**Апробація роботи.** Основні положення і результати роботи представлені та обговорені на:

Міжнародній науковій інтернет-конференції на тему "Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення" (випуск 49) (Київ, 10 червня 2020 року).

XIII науково-практичній конференції магістрантів та аспірантів ПМК-2020 присвяченій 30-річчю факультету прикладної математики (Київ, 18 – 20 листопада 2020 року).

#### **Публікації.**

За результатами магістерської дисертації було опубліковано 2 наукові праці, з них 2 тези доповідей.

**Структура та обсяг роботи.** Магістерська дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, висновків та додатків.

У вступі представлена загальна характеристика проблеми, обґрунтована необхідність розробки нового алгоритму, сформульована задача роботи.

У першому розділі дається визначення стільникової мережі та описані основні характеристики роботи стільникової мережі.

У другому розділі описані можливі проблеми, дається визначення високонавантажених мереж, та проведена оцінка існуючих рішень та їх недоліків.

У третьому розділі наведено покращений спосіб передачі даних у високонавантажених мережах, описані переваги на недоліки.

У четвертому розділі, наведено приклад роботи алгоритму на різних наборах даних, та проведений аналіз результатів.

У висновках описано результати дослідження.

**Ключові слова** стільникова мережа, мобільний зв'язок, базова станція, розвантаження мережі.

## ABSTRACT

### **Actuality of theme.**

Mobile communications are an integral part of our lives today. Many things in our lives are related to the use of a mobile device in one way or another.

But the phone is almost useless if you use it without a mobile connection. Therefore, the quality of mobile communication is an extremely important characteristic. One of the indicators of quality is stability, which characterizes the ability to access the network at any time. Mobile quality is generally acceptable and meets most user needs. However, there are situations where mobile base stations do not withstand a large number of users and as a result, the quality of the connection deteriorates significantly. In such cases, even a short text message can be transmitted within minutes. This problem is typical during mass gatherings, such as concerts, festivals or fairs.

**The aim of the work** is to improve the method of data transmission in the mobile network using an algorithm that can reduce the overload of the network without the need to modify existing equipment.

**The object of research** is cellular networks and methods of data exchange between mobile devices.

**The subject of the study** is the characteristics of the load on the cellular network, the problems associated with congestion and methods of solving the overload of the network.

**Research methods.** Simulation of network operation with the ability to change the basic parameters of the network related to the experiment, and tracking network performance at any time.

**The scientific novelty** is to create a method of data transmission in the network, which reduces the overload of the network without a significant loss in data rate, and without the need for changes in hardware.

**The practical value** lies in the accelerated data transfer in high-load networks at low resource costs both by the user and by the data service provider.

**Approbation of work.** The main provisions and results of the work are presented and discussed at:

International Scientific Internet Conference on "Information Society: Technological, Economic and Technical Aspects of Formation" (Issue 49) (Kyiv, June 10, 2020).

XIII scientific-practical conference of undergraduates and graduate students of PMK-2020 dedicated to the 30th anniversary of the Faculty of Applied Mathematics (Kyiv, November 18-20, 2020).

### **Publications.**

According to the results of the master's dissertation, 2 scientific works were published, including 2 abstracts.

**Structure and scope of work.** The master's dissertation consists of an introduction, four chapters, conclusions and appendices.

The introduction presents the general characteristics of the problem, substantiates the need to develop a new algorithm, formulates the task.

The first section defines the cellular network and describes the main characteristics of the cellular network.

The second section describes possible problems, identifies high-load networks, and assesses existing solutions and their shortcomings.

The third section presents an improved method of data transmission in high-load networks, describes the advantages and disadvantages.

In the fourth section, an example of the algorithm on different data sets is given, and the results are analyzed.

The conclusions describe the results of the study.

**Keywords** cellular network, mobile communication, base station, network unloading.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ .....	10
ВСТУП.....	12
1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО МОБІЛЬНУ МЕРЕЖУ .....	14
1.1. Розмір стільника .....	15
1.2. Radio Resource Controller .....	16
1.2.1. Вимоги споживання енергії до 3G, 4G та Wi-Fi .....	18
1.2.2. Радіоресурси .....	20
1.2.3. Машина станів LTE RRC .....	20
1.2.4. Машина станів HSPA та HSPA+ (UMTS) RRC.....	23
1.2.5. Машина станів EV-DO (CDMA) RRC.....	25
1.3. Неefективність періодичних передач .....	26
1.4. Мультиплексування .....	28
1.4.1. TDM .....	29
1.4.2. FDM .....	31
1.4.3. OFDM .....	32
Висновки до розділу .....	33
2. СПОСОБИ РОЗВАНТАЖЕННЯ МОБІЛЬНОЇ МЕРЕЖІ .....	35
2.1. Класифікація методів розвантаження .....	37
2.1.1. Залежно від участі терміналів користувачів .....	37
2.1.2. Залежно від часу доставки .....	39
2.2. Розвантаження без затримок .....	41
2.2.1. На основі точок доступу.....	42
2.2.2. T2T .....	45
2.3. Розвантаження з затримками.....	47
2.3.1. На основі точок доступу.....	48
2.3.2. T2T .....	55
Висновки до розділу .....	61
3. СПОСІБ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ У ВИСОКОНАВАНТАЖЕНИХ МЕРЕЖАХ	62
3.1. Детальний опис .....	63
3.2. Переваги .....	65
3.2.1. Зменшення навантаження на базову станцію .....	65
3.2.2. Ефективніше використання активних з'єднань .....	66
3.2.3. Збільшення загальної пропускної здатності мережі.....	68
3.2.4. Адаптація до навантаження мережі .....	68
3.2.5. Відсутність потреби у модифікації існуючого обладнання операторів .	71
3.3. Недоліки способу та методи їх вирішення .....	71
3.3.1. Збільшене споживання енергії головним пристроєм .....	71

3.3.2. Затримки передачі через головний пристрій .....	72
3.3.3. Інтерференція .....	73
3.3.4. Одночасна підтримка всього 2х другорядних пристроїв.....	74
3.3.5. Мобільність користувачів .....	74
3.3.6. Необхідність встановлення ПЗ для користувача .....	75
Висновки до розділу .....	76
<b>4. ТЕСТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАПРОПОНОВАНОГО СПОСОБУ</b>	<b>77</b>
4.1. Отримані результати .....	78
4.1.1. Середньостатистичні значення.....	79
4.1.2. Кількість головних пристроїв.....	81
4.1.3. Швидкість передачі стільникових даних.....	84
4.1.4. Швидкість передачі даних по WiFi.....	85
4.1.5. Ймовірність виникнення трафіку .....	87
4.1.6. Ймовірність перепідключення до головного пристрою .....	89
Висновки до розділу .....	92
<b>ВИСНОВКИ</b> .....	<b>93</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b> .....	<b>95</b>
Додатки	

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ

MЗ – мобільний зв'язок.

Фемтосоти – малопотужні і мініатюрні станції стільникового зв'язку, що призначені для обслуговування невеликої території.

RRC (Radio Resource Controller) – контролер радіоресурсів.

DTIM (Delivery Traffic Indication Message) – повідомлення про індикацію трафіку доставки.

API (Application Programming Interface) – прикладний програмний інтерфейс.

MIMO (Multiple Input Multiple Output) – системи зв'язку з окремими передавальними і приймальними антенами.

LTE (Long Term Evolution) – стандарт бездротового зв'язку для мобільних пристроїв.

Discontinuous Reception

DRX (Discontinuous Reception) – прийом з перериваннями.

HSPA (High Speed Packet Access) – стандарт високошвидкісного пакетного доступу мобільного зв'язку 3-го покоління.

GSM (Global System for Mobile Communications) – стандарт для опису протоколів цифрових стільникових мереж другого покоління (2G), що використовуються мобільними пристроями, такими як мобільні телефони та планшети.

UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) – мобільна стільникова система третього покоління для мереж на базі стандарту GSM

3GPP (3rd Generation Partnership Project) – термін для ряду стандартних організацій, які розробляють протоколи для мобільного зв'язку.

3GPP2 (3rd Generation Partnership Project 2) – термін для співпраці між телекомунікаційними асоціаціями для вироблення специфікації системи мобільного зв'язку третього покоління (3G).

MUX (Multiplexer) – пристрій, який вибирає між кількома аналоговими або цифровими вхідними сигналами і перенаправляє вибраний вхід на одну вихідну лінію.

FHSS (Frequency Hopping Spectrum Spreading) – технологія передачі сигналу зі швидким псевдовипадковим перелаштуванням робочої частоти.

DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) – технологія модуляції, що забезпечує більшу продуктивність локальних бездротових мереж шляхом розширення спектра випромінюваного сигналу.

FDM (Frequency-Division Multiplexing) – техніка, за допомогою якої загальна пропускна здатність, доступна в комунікаційному середовищі, ділиться на ряд смуг частот, що не перекриваються, кожна з яких використовується для передачі окремого сигналу.

OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) – метод мультиплексування (поєднання кількох потоків даних в один спільний простір), який підрозподіляє даний радіоспектр на набір ортогональних піднесучих, через які передається інформація.

RAN (Radio Access Network) – частина системи мобільного зв'язку, яка реалізує технологію радіодоступу.

QoS (Quality of Service) – опис або вимірювання загальної продуктивності послуги, наприклад, телефонії або комп'ютерної мережі.

## ВСТУП

Із розвитком інформаційних технологій наше життя все більше стає залежним від багатьох речей, які дозволяють спростити та пришвидшити вирішення повсякденних задач. Наприклад, мобільні телефони, планшети, ноутбуки, годинники та багато інших речей. Усі ці пристрої зараз обладнані модулем мобільного зв'язку для доступу до всесвітньої мережі інтернет. Отож, мобільний зв'язок є невід'ємною частиною нашого теперішнього життя.

Але мобільний телефон майже не несе користі, якщо використовувати його без мобільного зв'язку (МЗ). Тому надзвичайно важливою характеристикою МЗ є його якість. Одним з показників якості є стабільність, що характеризує можливість у будь який момент часу отримати доступ до мережі. Зазвичай якість МЗ є прийнятною та задовольняє більшість потреб користувачів. Проте, існують ситуації, коли базові станції мобільного зв'язку не витримують великої кількості користувачів і через це якість з'єднання суттєво погіршується. В таких випадках навіть коротке текстове повідомлення може передаватися протягом декількох хвилин. Така проблема є характерною під час масових скупчень людей, наприклад, на концертах, фестивалях, ярмарках тощо.

Оператори мобільного зв'язку намагаються вирішити погіршення стабільності мережі за допомогою встановлення додаткових мобільних базових станцій, найчастіше автомобілів, обладнаних базовою станцією, поблизу місця потенційного скупчення людей. Але це, переважно, не вирішує проблему повністю, адже мережа все ще може залишатися занадто навантаженою і не спроможною ефективно обробляти запити усіх під'єднаних пристроїв.

Метою магістерської дисертації є покращення мобільного зв'язку завдяки модифікації існуючого способу передачі даних у мобільній мережі, для випадків, коли вона не здатна забезпечити обробку запитів усіх користувачів у прийнятний проміжок часу, через надмірне навантаження. Запропонований спосіб допомагає суттєво зменшити кількість активних з'єднань з базовою станцією мобільного зв'язку, а також дозволяє більш повно використовувати активні з'єднання, що

сумарно дозволить ефективніше використовувати мобільний зв'язок у мережах з високим навантаженням.

Особливістю даного методу є те, що для його впровадження у роботу не потрібно створювати, змінювати, чи маніпулювати існуючим апаратним забезпеченням. Тобто, запропонований спосіб передачі даних можна використовувати без затрат на додаткове апаратне обладнання чи модифікацію існуючого обладнання.

А також запропонований спосіб може працювати разом або паралельно з іншими способами передачі даних у стільниковій мережі не впливаючи на їх роботу, отже, для роботи даного способу не обов'язкове 100% покриття усіх користувачів.

## 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО МОБІЛЬНУ МЕРЕЖУ

Мобільна мережа вважається одним із найважливіших винаходів людства і лише за кілька десятиліть ця технологія пережила цілий ряд еволюцій.

Стільникова мережа або мобільна мережа працює за наступним принципом: територія, на якій забезпечується з'єднання клієнтів, розбивається на окремі ділянки, що називаються «стільниками», кожен з яких обслуговує базова станція. При цьому, в кожному стільнику абонент отримує ідентичні послуги, тому сам абонент не помічає перетин цих віртуальних кордонів стільників.

Зазвичай, базова станція являє собою декілька залізних шаф з обладнанням і антен які розміщуються на спеціально побудованій вищці. Варто помітити, що у містах антени часто розміщують на дахах висотних будівель. У середньому, кожна станція ловить сигнал від мобільних пристроїв на відстані до 35 кілометрів.

Для покращення якості обслуговування оператори також встановлюють фемтосоти – малопотужні і мініатюрні станції стільникового зв'язку, що призначені для обслуговування невеликої території. Вони дозволяють стрімко покращити покриття в тих місцях, де це необхідно.

Мобільний пристрій, що знаходиться у мережі, прослуховує ефір і знаходиться сигнал базової станції. У сучасну SIM-карту, окрім процесора і оперативної пам'яті, також влаштований унікальний ключ, що дозволяє авторизуватися у стільниковій мережі. Зв'язок телефону зі станцією може ґрунтуватися на різних протоколах – наприклад, цифровими DAMPS, CDMA, GSM, UMTS.

В Україні для мобільної мережі виділені три діапазони частот – 900 МГц, 1800 МГц та 2600 МГц. При цьому, 900 МГц покриває найбільшу територію з представлених діапазонів, але меншу ємність; 2600 МГц має найменшу дальність дії, але має велику ємність та пропускну здатність; 1800 вважається золотою серединою і є найбільш популярним. Враховуючи вищевказані характеристики частотних діапазонів, їх використання обґрунтоване типом задачі яку оператори намагаються вирішити в даному стільнику. Наприклад, 900 МГц використовують

у малонаселених пунктах чи зонах (села, ліси, степи), тому що абонентів там не багато і даного діапазону достатньо для задоволення клієнтських потреб. Разом з тим, 900 МГц дозволяє створювати стільники великих розмірів, тому оператору потрібно встановити меншу кількість базових станцій у порівнянні з іншими частотними діапазонами, що дозволяє оператору економніше витратити ресурси. Натомість, діапазон 2600 МГц обслуговує дуже обмежену територію, проте дозволяє підтримувати великі потужності мережі, такі як ємність та пропускна здатність, тому його ставлять у місцях великого скупчення людей. У всіх інших випадках, коли не потрібно підтримувати надвелику кількість пристроїв, але і надвелику територію підтримувати немає можливості, оператори використовують 1800 МГц діапазон.

### 1.1. Розмір стільника

Розмір стільника залежить від багатьох факторів, таких як тип базової станції, ландшафт (рівнина, гори, полонини тощо), місцезнаходження встановлення (сільська, або міська місцевість), та кількість населення. Розмір стільника також обмежений радіусом дії мобільних пристроїв, що повинні отримувати доступ до мережі.

Базові станції мають обмежену пропускну здатність і можуть обробляти лише певну кількість одночасних дзвінків. Це є причиною того, що в міських районах, де щільність населення висока і існує значна кількість комунікацій, стільники, як правило, численні та маленькі - сотні чи навіть лише десятки метрів один від одного (рисунок 1.1). У сільській місцевості, де щільність населення значно нижча, розмір стільників значно більший, іноді досягає кількох кілометрів, але рідко перевищує більше десяти кілометрів.

Важливо підкреслити, що зменшення потужності сигналу, випромінюваного базовими станціями, у свою чергу зменшує покриття стільників. Поліпшення здатності мережі здійснювати голосові дзвінки або трафік даних, в такому випадку, обов'язково передбачає збільшення кількості базових станцій.



Рисунок 1.1 – Приклад застосування базових станцій різних діапазонів частот

## 1.2. Radio Resource Controller

Мережі 3G і 4G мають унікальну функцію, якої немає у кабельних, та, навіть, мережах WiFi. Контролер радіоресурсів (RRC) здійснює посередницьке управління з'єднаннями між мобільним пристроєм та базовою радіостанцією (рисунок 1.2) [1]. Розуміння того, чому воно існує, і як воно впливає на продуктивність кожного пристрою в мобільній мережі, є критичним для створення високопродуктивних мобільних додатків. RRC має прямий вплив на затримку, пропускну здатність та час автономної роботи мобільного пристрою.

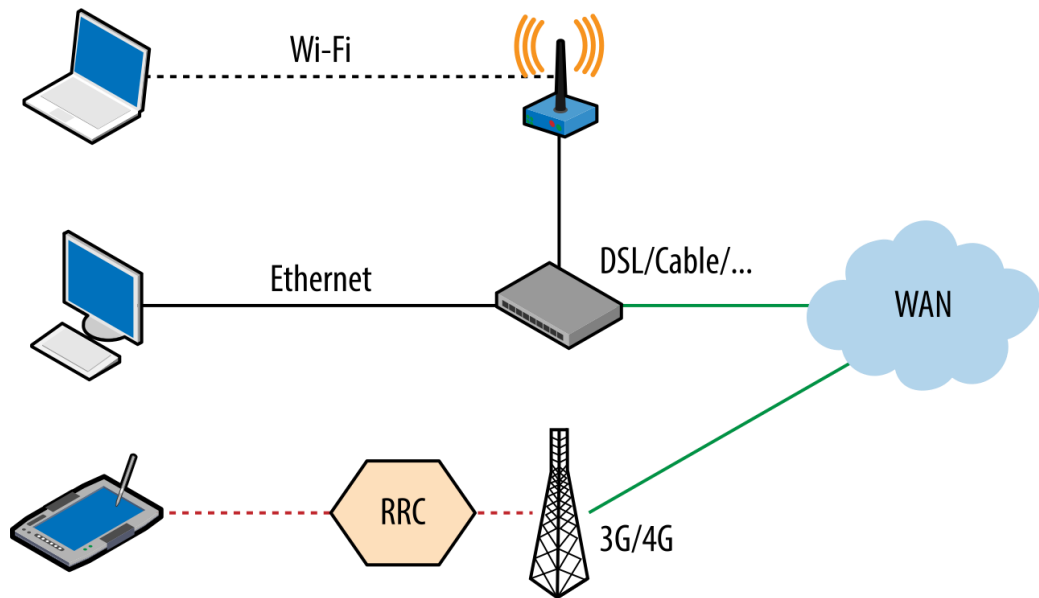


Рисунок 1.2 – Контролер радіоресурсів (RRC)

При використанні фізичного з'єднання, наприклад, кабелю Ethernet, комп'ютер має пряме, та постійно ввімкнене мережеве з'єднання, що дозволяє будь-якій стороні цього з'єднання надсилати пакети даних у будь-який час. Це найкращий можливий спосіб мінімізації затримки. Стандарт WiFi наслідує подібну модель, де кожен пристрій може передавати дані в будь-який момент часу [2]. Це також забезпечує мінімальну затримку в найкращому випадку, але завдяки використанню спільного радіо-середовища може також призвести до високих коефіцієнтів зіткнень та непередбачуваної продуктивності, якщо активних користувачів багато. Крім того, оскільки будь-який пристрій WiFi може почати передачу в будь-який час, усі інші також повинні бути готові до прийому. Таким чином, радіоприймачі завжди залишаються увімкнені, що споживає багато енергії.

На практиці, постійно підтримувати активність WiFi-радіо занадто дорого, оскільки ємність акумулятора є обмеженим ресурсом для більшості пристроїв. Тому, WiFi пропонує невелику оптимізацію енергії, де точка доступу періодично транслює повідомлення про індикацію трафіку доставки (DTIM), щоб вказати, що вона буде передавати дані для певних клієнтів відразу після цього. У свою чергу, клієнти можуть слухати ці кадри DTIM як підказки про те, коли радіоприймач

повинен бути готовим до прийому, інакше радіоприймач може спати, до наступної передачі DTIM. Це зменшує використання батареї, але додає додаткову затримку.

У цьому полягає проблема мереж 3G та 4G: ефективність та потужність мережі. Вірніше, нестача живлення через те, що мобільні пристрої обмежені ємністю акумулятора та вимогою до високої ефективності мережі серед значно більшої кількості активних користувачів у стільникові. Для вирішення даної проблеми і потрібен RRC.

Як впливає з назви, контролер радіоресурсів бере на себе повну відповідальність за планування того, хто передає дані, коли виділяється пропускна смуга, яка потужність сигналу використовується, стан живлення кожного пристрою та десяток інших змінних. Простіше кажучи, RRC - це мозок мережі радіодоступу. Наприклад, якщо потрібно відправити дані по бездротовому каналу, спочатку потрібно попросити RRC виділити деякі радіоресурси. Якщо потрібно отримати дані з Інтернету, RRC повідомить про час коли потрібно прослуховувати прийом вхідних пакетів.

Все управління RRC здійснюється мережею, тому не можливо контролювати RRC за допомогою API, наприклад, для оптимізації програми для мереж 3G та 4G. Залишається лише знати і працювати в рамках обмежень, встановлених RRC.

### 1.2.1. Вимоги споживання енергії до 3G, 4G та Wi-Fi

Радіопередавач є одним з найбільш енергоємних компонентів будь-якого мобільного пристрою. Насправді, лише екран є єдиним компонентом, який споживає більшу кількість енергії, якщо він увімкнений. На практиці ж, екран залишається вимкненим протягом значних періодів часу, тоді як радіопередавач повинен підтримувати ілюзію "постійного" з'єднання, щоб користувач був доступний у будь-який момент часу.

Одним із способів досягнення цієї мети є підтримка радіозв'язку весь час, але навіть з останніми досягненнями в ємності акумулятора, це розрядило б акумулятор за лічені години. Більше того, останні випуски стандартів 3G та 4G вимагають паралельних передач (MIMO), що еквівалентно живленню декількох

радіопередавачів одночасно. На практиці потрібно дотримуватися рівноваги між підтримкою радіозв'язку для обслуговування інтерактивного трафіку з низькою затримкою та переходом у стан низької потужності, щоб забезпечити економне споживання заряду акумулятора.

Однозначної відповіді, як краще порівнювати різні технології, та що краще для більшого часу автономної роботи, немає. За допомогою WiFi кожен пристрій встановлює власну потужність передачі, яка зазвичай знаходиться в діапазоні 30–200 мВт. Для порівняння, потужність передачі радіомодуля 3G / 4G управляється мережею і може споживати до 15 мВт в режимі очікування. Однак, щоб врахувати більший діапазон та перешкоди, одному і тому ж радіомодулю може знадобитися 1000–3500 мВт при передачі у режимі підвищеної потужності [1].

На практиці, при передачі великих обсягів даних, WiFi, часто, набагато ефективніший, якщо потужність сигналу хороша. Але, якщо пристрій більшу частину часу не працює, то радіомодуль 3G / 4G є більш ефективним. Для кращої роботи було б добре використовувати динамічне перемикання між різними типами з'єднань. Однак, принаймні на даний момент, такого механізму не існує. Це активна область досліджень як у галузі, так і в наукових колах.

Потужність сигналу є одним з основних важелів досягнення більшої пропускної здатності. Однак, висока потужність передачі споживає значну кількість енергії і, отже, може регулюватися для досягнення кращого часу автономної роботи. Подібним чином, вимкнення радіомодуля може також повністю розірвати радіолінію з базовою станцією, а це означає, що у разі нової передачі спочатку необхідно обмінятися низкою контрольних повідомлень для відновлення радіоконтексту, що може додати десятки і навіть сотні мілісекунд затримки.

На пропускну здатність та ефективність затримки безпосередньо впливає профіль управління живленням використовуваного пристрою. Насправді, це і є ключовим, у мережах 3G та 4G, де управління радіоенергією контролюється RRC: воно не тільки повідомляє, коли потрібно передавати дані, але й повідомляє потужність передачі та час переходу в різні стани живлення.

### 1.2.2. Радіоресурси

У LTE, як і в більшості інших сучасних бездротових стандартів, існують спільні радіоканали висхідної та низхідної ліній зв'язку, доступ до яких контролюється за допомогою RRC [31]. Перебуваючи у підключеному стані, RRC повідомляє кожному пристрою, який часовий інтервалам призначено конкретному пристрою, яка потужність передачі, модуляція, та ще десяток інших змінних.

Якщо мобільний пристрій не має призначених ресурсів за допомогою RRC, то він не може передавати або приймати будь-які користувацькі дані. Отже, коли пристрій у стані DRX, то він синхронізується з RRC, але йому не виділяються ресурси висхідної та низхідної ліній, тому пристрій вважається "напівпробудженим".

### 1.2.3. Машина станів LTE RRC

Радіомодулем кожного LTE-пристрою керує базова станція, яка обслуговує користувача у певний проміжок часу. Насправді стандарт 3GPP визначає чітко визначений автомат, який описує можливі стани живлення кожного пристрою, підключеного до мережі (рисунок 1.4) [1]. Мережевий оператор може вносити зміни до параметрів, що викликають переходи стану, але сам автомат стану однаковий у всіх розгортаннях LTE.

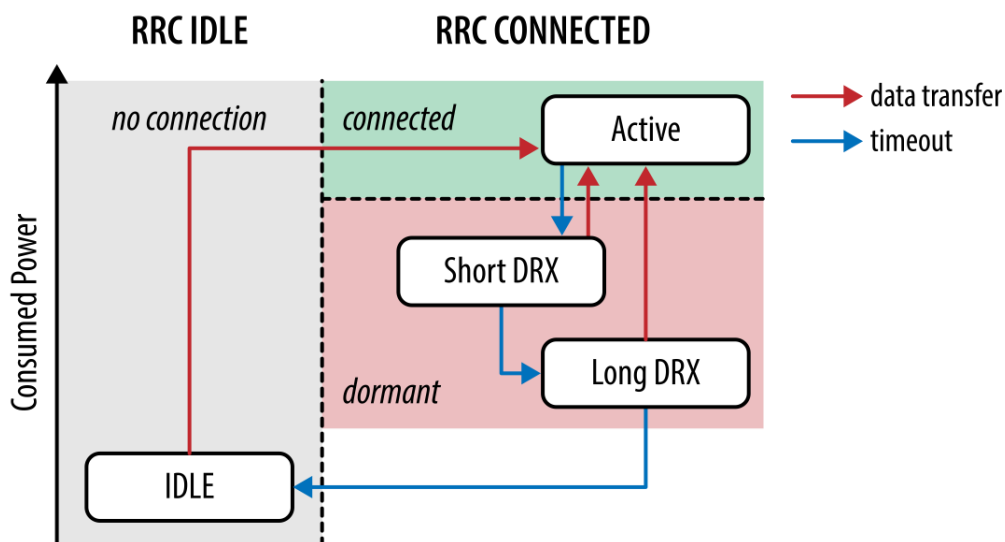


Рисунок 1.3 – Машина станів LTE RRC

RRC Idle - RRC в режимі очікування. Радіомодуль знаходиться в режимі низького енергоспоживання (<15 мВт) і слухає мережу лише для керування трафіком. Клієнту, в мережі оператора, не призначено жодних радіоресурсів.

RRC Connected - RRC підключено. Радіопередавач знаходиться в режимі підвищеного споживання енергії (1000–3500 мВт), в той час як відбувається передача даних, або очікування даних, а радіомережею були виділені відповідні необхідні радіоресурси.

Коли пристрій перебуває в режимі очікування, він лише прослуховує трансляції каналів управління, таких як сповіщення про вхідний трафік. А коли підключений, то мережа має встановлений контекст і призначені ресурси для клієнта.

У режимі очікування пристрій не може надсилати або приймати будь-які дані. Для цього він повинен спочатку синхронізуватися з мережею, прослуховуючи мережеві трансляції, а потім подати запит до RRC про переведення у стан "підключення". Це узгодження може зайняти кілька кругових обмінів системними повідомленнями. Специфікація 3GPP LTE виділяє на перехід мобільного пристрою у активний режим до 100 мілісекунд. А у специфікації LTE-Advanced даний час був зменшений до 50 мілісекунд.

Опинившись у підключеному стані, між радіомережею та пристроєм LTE встановлюється мережевий контекст, і дані можуть передаватися. Однак, RRC не знає що треба переводити мобільний пристрій у режим енергозбереження, як тільки будь-яка сторона завершить передбачувану передачу даних.

IP-трафік невинний, оптимізовані TCP-з'єднання довговічні, а UDP-трафік не передбачає індикатора "закінчення передачі". Як результат, автомат стану RRC залежить від набору таймерів, що запускають переходи станів RRC.

Оскільки підключений стан вимагає великої потужності, доступні декілька підстанів (рисунок 1.3), що дозволяють ефективніше працювати:

- Постійний прийом (Active). Стан найвищої потужності, встановлений контекст мережі, виділені мережеві ресурси.

- Короткий інтервал прийому (Short DRX). Встановлений мережевий контекст, мережеві ресурси не виділені.
- Довгий інтервал прийому (Long DRX). Встановлений мережевий контекст, мережеві ресурси не виділені.

У стані високої потужності RRC створює резервування ресурсів для прийому та передачі даних пристроєм через бездротовий інтерфейс і повідомляє пристрою про те, які часові слоти використовувати, потужність передачі, схему модуляції та десяток інших змінних. Потім, якщо пристрій не працював протягом встановленого періоду часу, він переходить у короткий стан живлення DRX, де мережевий контекст все ще зберігається, але конкретні радіоресурси не призначені. У короткому стані DRX пристрій слухає лише періодичні трансляції з мережі, що дозволяє зберегти заряд акумулятора - не на відміну від інтервалу DTIM у WiFi.

Якщо радіомодуль залишається в режимі очікування досить тривалий час, то він переходить у стан Long DRX, який є ідентичним стану Short DRX, за винятком того, що пристрій більше перебуває у режимі сну між пробудженнями для прослуховування трансляцій (рисунок 1.4).

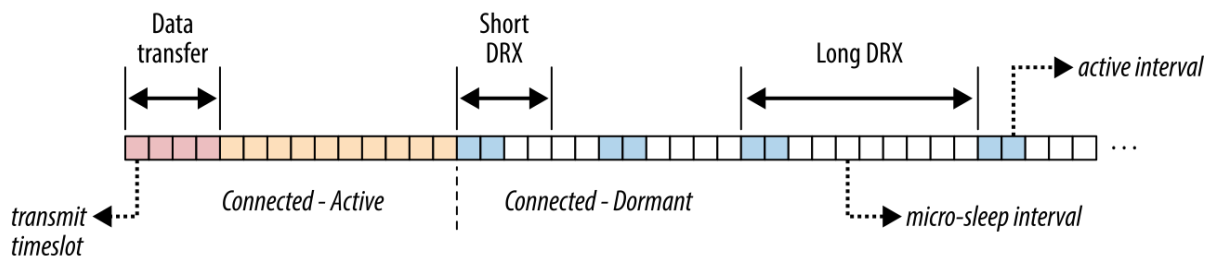


Рисунок 1.4 – Прийом з перериваннями для RRC станів

Якщо мережа або мобільний пристрій повинні передавати дані, коли радіомодуль знаходиться в одному з коротких або довгих DRX (неактивних) станів, мобільний пристрій і RRC повинні спочатку обмінятися контрольними повідомленнями, щоб узгодити, коли передавати, а коли слухати радіопередачі. Для LTE цей час узгодження ("від сплячого до підключеного") складає менше 50 мілісекунд і додатково зменшується до менш до менш ніж 10 мілісекунд для LTE-Advanced.

Залежно від того, в якому стані живлення знаходиться радіопередавач, мобільному пристрою з LTE спочатку може знадобитися від 10 до 100 мілісекунд затримки для узгодження необхідних ресурсів з RRC. Після цього дані користувача можна передавати по бездротовому каналу через мережу оператора, а потім виводити у загальнодоступний Інтернет. Планування цих затримок, особливо при розробці програм, чутливих до затримок, може грати ключову роль.

#### 1.2.4. Машина станів HSPA та HSPA+ (UMTS) RRC

Мережі 3GPP попереднього покоління до LTE та LTE-Advanced мають дуже схожий автомат RRC, який також досі підтримується радіомережею. Однак, машина станів для попередніх поколінь дещо складніша (рисунок 1.6), а затримки значно вищі. Насправді одна з причин, чому LTE пропонує кращу продуктивність - саме завдяки спрощеній архітектурі та покращеній роботі переходів стану RRC.

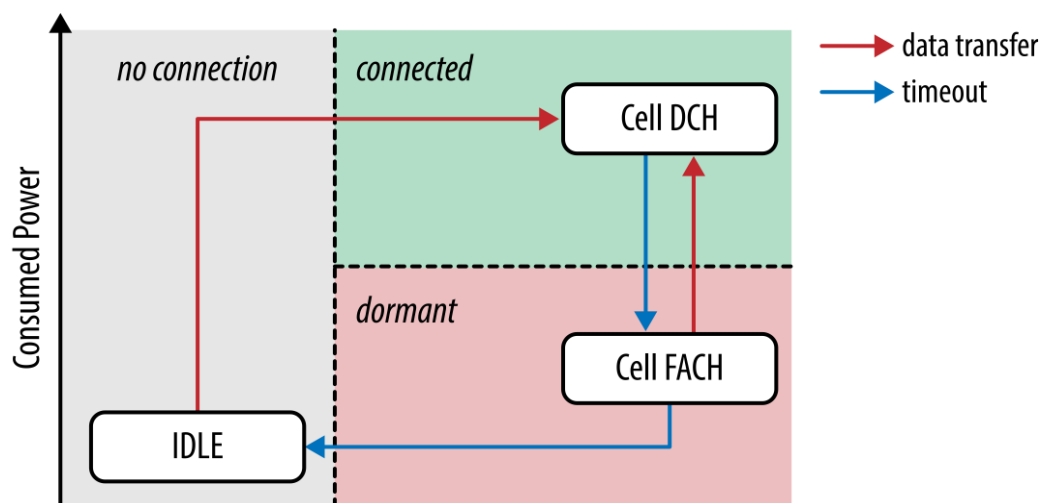


Рисунок 1.5 – Машина станів UMTS RRC для HSPA та HSPA+

Idle – подібно до стану очікування у LTE. Радіопристрій знаходиться в низькому енергоспоживанні і прослуховує лише управління трафіком з мережі. Клієнту в мережі оператора не призначено жодних радіоресурсів.

Cell DCH – подібно до підключеного режиму LTE, при постійному прийомі. Пристрій знаходиться у високопотужному стані, а мережеві ресурси призначаються як для передачі даних на вхід так і на вихід.

Cell FACH – проміжний стан потужності, який споживає значно менше енергії, ніж DCH. Пристрій не має виділених мережевих ресурсів, але, тим не менше, він може передавати невеликі обсяги даних користувача через загальний низькошвидкісний канал (зі швидкістю, як правило, менше 20 Кбіт/с).

Стани очікування та DCH майже ідентичні станам простою та з'єднання в LTE. Однак, проміжний стан FACH унікальний для мереж UMTS (HSPA, HSPA+) і дозволяє використовувати загальний канал для невеликих передач даних, який характеризується як: повільний, стабільний і споживаючий приблизно половину потужності стану DCH. На практиці цей стан був розроблений для обробки неінтерактивного трафіку, такого як періодичне опитування та перевірка статусу, що проводиться багатьма фоновими програмами.

Перехід від DCH до FACH ініціюється таймером. Однак, якщо пристрій знаходиться у стані FACH, то щоб здійснити перехід назад до DCH, кожен пристрій має буфер даних, що надсилаються, і доки буфер не перевищує налаштований мережею поріг, як правило, від 100 до 1000 байт, пристрій може залишатися в проміжному стані. Нарешті, якщо жодні дані не переносяться, перебуваючи у FACH протягом певного періоду часу, інший таймер переводить пристрій у стан очікування.

На відміну від LTE, який пропонує два проміжні стани (короткий DRX і довгий DRX), пристрої UMTS мають лише один проміжний стан: FACH. Однак, незважаючи на те, що LTE пропонує теоретично вищий ступінь управління потужністю, самі радіомодулі, як правило, споживають більше енергії в пристроях LTE, адже більша пропускна здатність пов'язана зі збільшенням споживання батареї. Отже, пристрої LTE все ще мають значно вищий профіль потужності, ніж їх попередники 3G.

Найбільшою різницею між мережами 3G попереднього покоління та LTE є затримка переходів стану. Там, де LTE налаштований на сотні мілісекунд затримки на перехід з режиму очікування до стану підключення, той самий перехід з режиму очікування в режим DCH може зайняти до двох секунд і вимагатиме десятків

контрольних повідомлень між пристроєм 3G та RRC. Перехід від FACH до DCN теж не набагато швидший, адже перехід займає близько півтори секунди.

Останні мережі HSPA+ зробили значні вдосконалення в цьому плані і зараз є конкурентоспроможними до LTE. Проте, не можна розраховувати на постійний доступ до мереж 4G або HSPA+. Мережі 3G старшого покоління продовжуватимуть існувати ще принаймні десять років. Тому, всі мобільні додатки також повинні враховувати багатосекундні затримки RRC при доступі до мережі через інтерфейс 3G.

### 1.2.5. Машина станів EV-DO (CDMA) RRC

Хоча стандарти 3GPP, такі як HSPA, HSPA+ та LTE, є домінуючими мережевими стандартами у всьому світі, важливо не забувати про мережі, що побудовані на базі 3GPP2 CDMA.

Не дивно, що незалежно від відмінностей у стандартах, основні обмеження однакові в мережах на базі UMTS та CDMA: заряд акумулятора є обмежуючим ресурсом а радіостанції дорогі в експлуатації, тому ефективність мережі є важливим показником. Отже, мережі CDMA також мають автомат станів RRC (рисунок 1.7), який контролює стан радіозв'язку кожного пристрою.

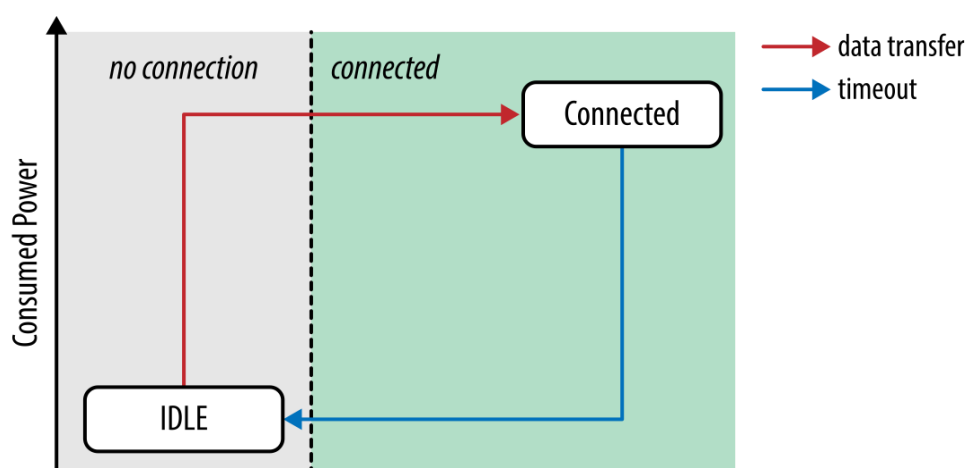


Рисунок 1.6 – CDMA RRC автомат: EV-DO (Rev. 0 — DO Advanced)

IDLE – подібно до простою в стандартах 3GPP. Радіопристрій знаходиться в режимі низького енергоспоживання і прослуховує лише управління трафіком з мережі. Клієнту в мережі оператора не призначено жодних радіоресурсів.

Connected – подібно до підключеного режиму LTE та DCH в HSPA. Пристрій знаходиться у високопотужному стані, а мережеві ресурси призначені для передачі даних як на завантаження, так і на вивантаження.

Це, безумовно, один з найпростіших автоматів RRC: пристрій знаходиться або у високопотужному стані, із виділеними мережевими ресурсами, або в режимі очікування. Крім того, всі мережеві передачі вимагають переходу у підключений стан, затримка якого схожа на затримку мереж HSPA: від сотень до тисяч мілісекунд залежно від випуску розгорнутої інфраструктури. Інших проміжних станів не існує, а переходи назад у режим очікування також контролюються за допомогою тайм-аутів, налаштованих оператором.

### 1.3. Неefективність періодичних передач

Важливим наслідком переходів станів радіозв'язку, керованих часом очікування, незалежно від генерації або базового стандарту, є те, що дуже легко побудувати схеми доступу до мережі, які можуть забезпечити як поганий досвід роботи для інтерактивного трафіку, так і низьку продуктивність акумулятора. Насправді, все, що потрібно зробити, це зачекати досить довго, щоб радіомодуль перейшов у стан низької потужності, а потім запустити доступ до мережі, щоб запустити перехід станів RRC.

Щоб проілюструвати проблему, припустимо, що пристрій перебуває у мережі HSPA+, яка налаштована на перехід із стану DCH у стан FACH через 10 секунд неактивності радіомодуля. Далі на пристрій завантажується програма, яка планує переривчасту передачу, таку як відображення аналітики в режимі реального часу, з інтервалом 11 секунд. У підсумку, пристрій може витратити сотні мілісекунд на передачу даних а інший час просто бездіятиме, перебуваючи в режимі високої потужності. Найгірший сценарій можливий, якщо пристрій переходитиме в режим низької витрати енергії, щоб прокинутися знову всього

через кілька сотень мілісекунд, що призведе до постійних затримок передачі даних та значної втрати продуктивності акумулятора.

Кожна радіопередача, якою б малою вона не була, змушує переходити у стан високої потужності. Потім, після передачі, радіостанція залишатиметься у такому потужному стані, поки не закінчиться термін дії бездіяльності (рисунок 1.8). Фактичний розмір даних, що передаються, не впливає на таймер. Далі, пристрою, можливо, доведеться також пройти ще кілька проміжних станів, перш ніж він зможе повернутися в режим очікування.

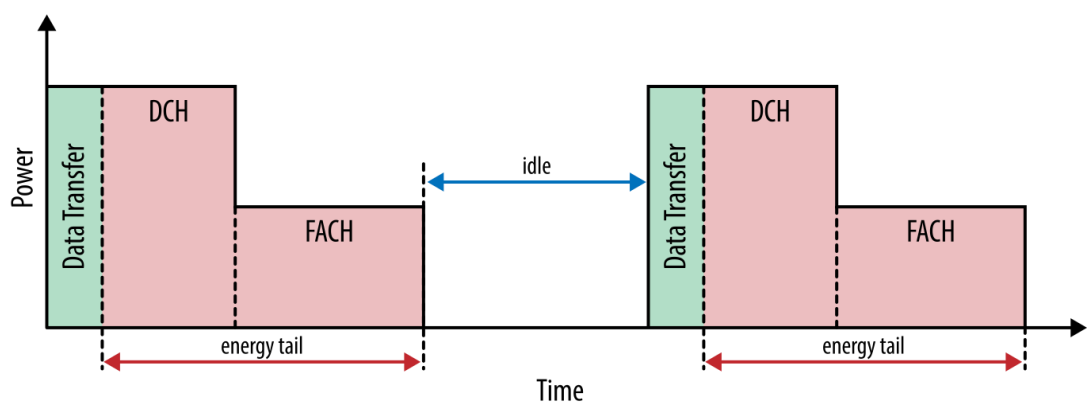


Рисунок 1.7 – HSPA+ енергетичний хвіст завдяки переходам DCH> FACH> IDLE

"Енергетичні хвости" створюються переходами стану, що керуються таймером, та роблять періодичні передачі дуже неефективним шаблоном доступу до мережі в мобільних мережах. Як наслідок, спочатку отримуємо затримку переходу стану, щоб перейти в активний стан, потім відбувається передача даних, а далі радіоприймач працює в режимі простоювання, витрачаючи потужність, поки всі таймери не спрацюють, і пристрій не зможе повернутися в стан низької потужності.

Організація AT&T Labs Research опублікувала велику дослідницьку роботу "Profiling Resource Usage for Mobile Applications" [3], в якому проаналізувала низку популярних мобільних додатків щодо ефективності роботи мережі та акумулятора. Додаток Pandora є чудовим прикладом неефективності періодичних мережевих передач у мобільних мережах.

Щоразу, коли користувач Pandora відтворює пісню, весь музичний файл завантажується програмою з мережі за один раз, що є правильною поведінкою: завантажити якомога більше даних, а потім вимкнути радіоприймач на якомога довший період. Однак, після передачі музики, додаток проводить періодичні опитування для вимірювання аудиторії, надсилаючи аналітичні пінг-сигнали кожні 60 секунд. У результаті, на аналітичні повідомлення припадало 0,2% від загальної кількості переданих байтів, проте 46% від загального енергоспоживання програми.

Передачі пінг-повідомлень невеликі, але енергетичні хвости, викликані переходами стану RRC, утримували радіозв'язок значно довше, без потреби витрачаючи 46% батареї. Об'єднуючи аналітичні дані в меншу кількість запитів або надсилаючи дані аудиторії, коли радіо вже активне, допомогло б усунути непотрібні енергетичні хвости і збільшити енергоефективність програми.

#### 1.4. Мультиплексування

У телекомунікаційних та комп'ютерних мережах мультиплексування - це метод, за допомогою якого кілька аналогових або цифрових сигналів об'єднуються в один сигнал на спільному носії. Мета - розподілити дефіцитний ресурс. Наприклад, у телекомунікаціях кілька телефонних дзвінків можуть здійснюватися за допомогою одного дроту. Мультиплексування зародилося в телеграфії в 1870-х роках, і зараз широко застосовується у мобільному зв'язку.

Мультиплексований сигнал передається через канал зв'язку, такий як кабель або радіомережа. Мультиплексування ділить ємність каналу зв'язку на кілька логічних каналів, по одному для кожного переданого сигналу повідомлення або потоку даних. Зворотний процес, відомий як демультимплексування, розпаковує вихідні канали на кінці приймача.

Пристрій, який виконує мультиплексування, називається мультиплексором (MUX), а пристрій, який виконує зворотний процес, називається демультимплексором (DEMUX або DMX).

Зворотне мультиплексування (DEMUX) має протилежну, від мультиплексування, мету, а саме, розбити один потік даних на кілька потоків,

передати їх одночасно через кілька каналів зв'язку та відтворити вихідний потік даних.

Кілька цифрових бітових потоків із змінною швидкістю передачі даних можуть ефективно передаватися по одному каналу з фіксованою смугою пропускання за допомогою статистичного мультиплексування. Це асинхронний режим мультиплексування часової області, який є формою мультиплексування з поділом часу.

Цифрові бітові потоки можуть передаватися по аналоговому каналу за допомогою методів мультиплексування з кодовим поділом, таких як розширений спектр перескоку частоти (FHSS) і розширений спектр прямої послідовності (DSSS).

У бездротовому зв'язку мультиплексування також може бути здійснено за допомогою змінної поляризації (горизонтальної / вертикальної або за годинниковою стрілкою / проти годинникової стрілки) на кожному сусідньому каналі та супутнику, або за допомогою фазованої багатоантенної решітки в поєднанні зі схемою з кількома входами з декількома входами (MIMO).

#### 1.4.1. TDM

Мультиплексування з розподілом часу (TDM) - це цифрова (або в рідкісних випадках аналогова) технологія, яка використовує час, а не простір або частоту, для розділення різних потоків даних [32]. TDM включає послідовність груп з декількох бітів або байтів з кожного окремого вхідного потоку, один за одним, і таким чином, що вони можуть бути пов'язані з відповідним приймачем (рисунок 1.9). Якщо це зробити досить швидко, приймальні пристрої не виявлять, що частина часу ланцюга була використана для обслуговування іншого логічного шляху зв'язку.

Даний метод корисний, коли швидкість передачі даних носія більше, ніж у джерела, і кожному сигналу відводиться певна кількість часу. Ці слоти настільки малі, що всі передачі здаються паралельними. При мультиплексуванні з розподілом по частоті всі сигнали працюють одночасно з різними частотами, а при

мультиплексуванні з розподілом по часу всі сигнали працюють з однаковою частотою в різний час.

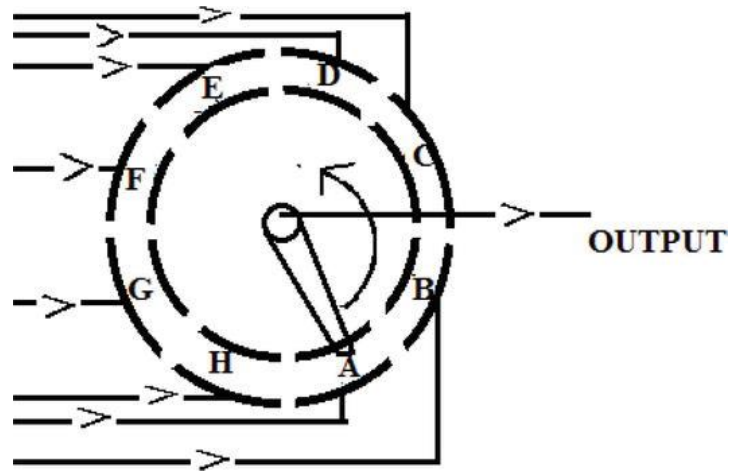


Рисунок 1.8 – Схематична діаграма TDM мультиплексування

Мультиплексування з розподілом часу має наступні характеристики:

- Загальний потік ділиться на  $N$  слотів, кожен з яких відповідає за окреме джерело даних
- Кожне джерело може використовувати лише один часовий інтервал кожні  $N$  слотів
- структуру кадру складається з  $N$  послідовних часових інтервалів
- якщо присвоїти число кожному часовому інтервалу, то кожне джерело асоціюється з номером часового інтервалу, і може передавати дані лише всередині свого слоту (рисунок 1.10)

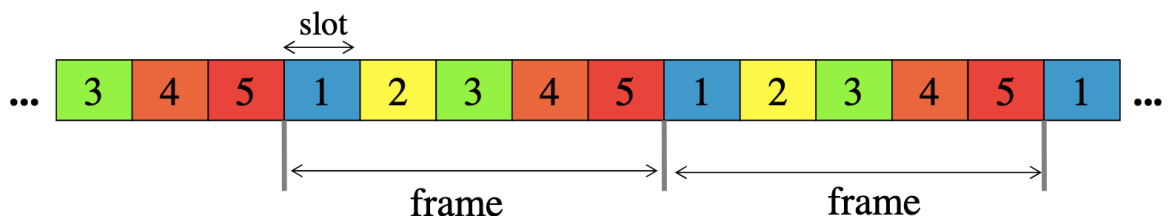


Рисунок 1.9 – Схематична діаграма розподілу потоку даних TDM

## 1.4.2. FDM

Мультиплексування з частотним поділом (FDM) - це техніка мультиплексування, яка дозволяє поєднувати сигнали різних частот для одночасної передачі даних.

У FDM загальна смуга пропускання ділиться на набір смуг частот, які не перекриваються. Кожна з цих смуг є носієм окремого сигналу, який генерується та модулюється одним із передавальних пристроїв [33]. Діапазони частот відокремлені один від одного смужками невикористаних частот, які називаються захисними смугами, щоб запобігти перекриванню сигналів.

Сигнали поєднуються разом за допомогою мультиплексора на початку передачі. Комбінований сигнал передається по каналу зв'язку, що дозволяє одночасно передавати кілька незалежних потоків даних. На приймальному кінці окремі сигнали розпаковуюються із комбінованого сигналу в процесі демультимплексування.

Рисунок 1.10 представляє концепт мультиплексування за допомогою FDM. Показано 4 смуги частот, кожна з яких може передавати сигнал від 1 відправника до 1 приймача. Кожному з 4 відправників виділяється окрема смуга частот. Чотири діапазони частот мультиплексуються і передаються через спільний канал зв'язку. На приймальному кінці демультимплексор відтворює чотири сигнали у стан, якими вони були перед мультиплексуванням.

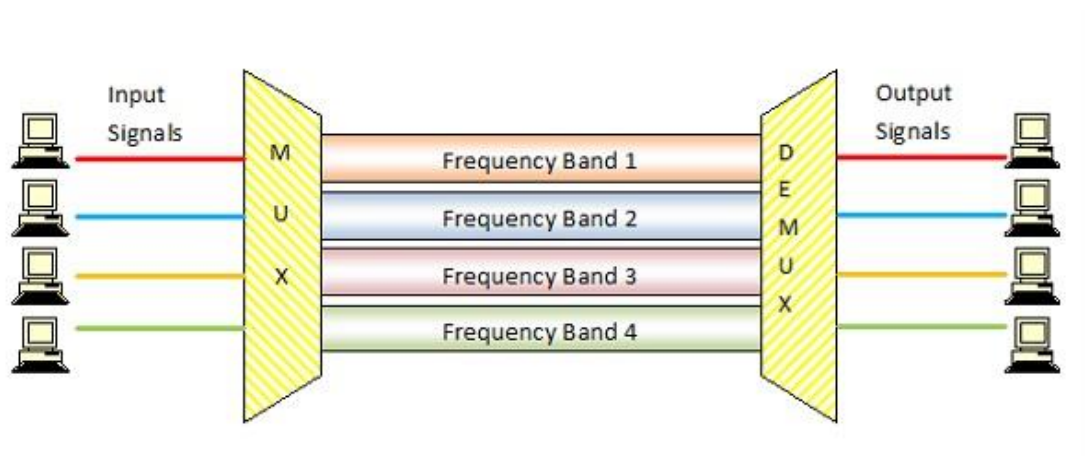


Рисунок 1.10 – Представлення концепту мультиплексування з частотним поділом.

Тут, якщо смуги частот складають смугу пропускання 150 кГц, розділену захисними смугами по 10 кГц, тоді ємність каналу зв'язку повинна бути не менше 630 кГц (канали:  $150 \times 4 +$  смуги захисту:  $10 \times 3$ ).

Даний спосіб дозволяє спільне використання одного середовища передачі, такого як мідний кабель, волоконно-оптичний кабель, або радіо, між безліччю незалежних сигналів, що генеруються багатьма користувачами.

FDM широко використовується для мультиплексування дзвінків у телефонних мережах. Він також використовується в стільникових мережах, бездротових мережах і для супутникового зв'язку.

### 1.4.3. OFDM

У телекомунікаціях ортогональне мультиплексування з частотним поділом (OFDM) є видом цифрової передачі та методом кодування цифрових даних на декількох несучих частотах. OFDM розробив популярну схему широкосмугового цифрового зв'язку, що використовується в таких сферах, як цифрове телебачення та аудіомовлення, доступ до Інтернету DSL, бездротові мережі, мережі електропередач та мобільний зв'язок 4G / 5G [4].

OFDM - це схема мультиплексування з частотним поділом (FDM), запроваджена Робертом В. Чангом з Bell Labs у 1966 р. [5] При передачі даних з використанням OFDM, багато ортогональних піднесучих сигналів розташовані з перекриваючимися спектрами, для паралельної передачі даних. Демодуляція базується на алгоритмах швидкого перетворення Фур'є. OFDM був вдосконалений Вайнштейном та Ебертом у 1971 р. за допомогою введенням охоронного інтервалу, який забезпечує кращу ортогональність каналів передачі, що постраждали від багатопроменевого поширення. Кожна піднесуча (сигнал) модулюється за допомогою звичайної схеми модуляції (наприклад, квадратурної амплітудної модуляції, або фазової маніпуляції) з низькою швидкістю передачі символів. Це підтримує загальну швидкість передачі даних, подібну до звичайних схем модуляції з однією несучою в одній смузі пропускання.

Головною перевагою OFDM перед схемами з однією несучою є його здатність справлятися з важкими канальними умовами без складних фільтрів вирівнювання. Зрівняння каналів спрощується, оскільки OFDM можна розглядати як використання багатьох повільно модульованих вузькосмугових сигналів, а не одного швидко модульованого широкосмугового сигналу. Низька швидкість передачі символів робить доступним захисний інтервал між символами, що дозволяє усунути міжсимвольні перешкоди (ISI) та використовувати відлуння та розподіл часу (в аналоговому телебаченні, видимі як ореоли та розмиття відповідно), щоб досягти посилення різноманітності, тобто покращення співвідношення сигнал / шум. Цей механізм також полегшує проектування одночастотних мереж (SFN), де кілька суміжних передавачів посиляють один і той же сигнал одночасно на одній і тій же частоті, оскільки сигнали від декількох віддалених передавачів можуть бути конструктивно повторно об'єднані, економлячи перешкоди традиційної системи з однією несучою.

#### Висновки до розділу

Мобільні мережі еволюціонували протягом серії поколінь, кожна з яких пропонувала значні технологічні вдосконалення порівняно з попередніми поколіннями. Перші два покоління мобільних мереж спочатку впровадили аналогову передачу голосу (1G), а потім цифрову передачу голосу (2G). Наступні покоління підтримали розповсюдження смартфонів, запровадивши з'єднання для передачі даних (3G) і надавши доступ до Інтернету. Мережі служб 4G покращили передачу даних, зробивши їх швидшими та спроможними забезпечити більшу пропускну здатність для таких потреб, як потокове передавання.

Стандарти бездротового зв'язку швидко розвиваються, але фізичне впровадження цих мереж - це і дорога, і трудомістка робота. Крім того, після розгортання мережі необхідно підтримувати значний проміжок часу, щоб компенсувати витрати та утримати існуючих клієнтів в мережі. Іншими словами, хоча навколо 5G існує багато галасу та маркетингу, мережі старшого покоління продовжуватимуть працювати, як мінімум, ще десять років.



## 2. СПОСОБИ РОЗВАНТАЖЕННЯ МОБІЛЬНОЇ МЕРЕЖІ

Світовий мобільний трафік буде рости в найближчі роки завдяки зростаючій популярності мобільних пристроїв та запровадженню доступних тарифних планів передачі даних стільниковими операторами. Мобільні додатки, що потребують даних, такі як аудіо та відеопрогравачі, соціальний мережі або хмарні сервіси, стають все популярнішими серед користувачів. Оскільки сьогодні найпоширеніший спосіб доступу до даних у русі, стільникові мережі перебувають під великим тиском, намагаючись впоратися з цим безпрецедентним перевантаженням даних.

Враховуючи це зростання, операторам потрібно вкласти значні інвестиції, як у мережу радіодоступу (RAN), так і в базові інфраструктури. З чисто економічної точки зору модернізація RAN є дуже дорогою, оскільки такий підхід вимагає більшої кількості інфраструктурного обладнання і, отже, більших інвестицій.

Дефіцит ліцензованих радіочастотних спектрів перешкоджає вдосконаленню RAN. Правила дозволяють операторам мобільного зв'язку використовувати лише незначну частину загального радіочастотного спектру, що також надзвичайно дорого. Користувачі повинні користуватися спільними обмеженими бездротовими ресурсами. Додавання трафіку, що перевищує певну межу, зменшує продуктивність та якість обслуговування (QoS) користувачів. У пікові періоди в переповненому столичному середовищі користувачі вже відчувають тривалі затримки, низьку пропускну здатність та перебої в роботі мережі через затори та перевантаження на рівні RAN. На жаль, ця тенденція може лише посилитися в майбутньому, через прогнозоване збільшення об'єму мобільних даних. Проблема стосується, насамперед, операторів мережі, оскільки їм доводиться компенсувати задоволення споживачів прибутковістю бізнесу, враховуючи тенденцію до майже фіксованих бізнес-моделей. Іншими словами, експоненціальне збільшення трафіку, що протікає в їхній RAN, не приносить достатньо додаткових доходів для розподілу на подальші оновлення RAN. Це створює, так званий, розрив у доходах [6].

Вищезазначені обставини породили інтерес до альтернативних методів для зменшення навантаження на стільникову мережу. Першою спробою мобільних операторів вирішити цю ситуацію була регуляція швидкості з'єднання та обмеження використання даних. Однак, ці практики негативно впливають на користувацький досвід та їх задоволення. З цієї причини, виникли альтернативні підходи. У даній роботі, звертається увага на одне з таких рішень, яке стало привертати все більший інтерес дослідницької спільноти: розвантаження мобільних даних. Даний спосіб полягає у використанні невикористаної пропускної здатності в різних бездротових технологіях. У даній роботі, розвантаження мобільних даних розглядається як використання додаткової бездротової технології для передачі даних, які спочатку передаються через стільникову мережу, з метою покращення деяких ключових показників ефективності.

Хоча розвантаження може стосуватися будь-якої мережі, поточне дослідження стосується лише зменшення навантаження на стільникову мережу. Це та мережа, яка найбільше виграє від цієї техніки, та яка, за даних умов, найбільше цього потребує. Варто зазначити, що для аналізу рішень були розглянуті лише способи, в яких мобільні термінали явно використовуються як частина схеми розвантаження, або за допомогою безлічі бездротових інтерфейсів, або за допомогою нетрадиційних стільникових технік (наприклад, LTE-D2D). Крім очевидної вигоди від зменшення навантаження на мережу інфраструктури, переведення даних на додаткову бездротову технологію призводить до ряду інших удосконалень, серед яких: збільшення загальної пропускної здатності, скорочення часу доставки вмісту, розширення покриття мережі, збільшення доступності мережі, та краща енергоефективність. Ці вдосконалення корисні як для операторів стільникового зв'язку, так і для користувачів, тому розвантаження часто описується в літературі як безпрограшна стратегія [7]. На жаль, розвантаження мережі не є безкоштовною процедурою, адже потрібно вирішити низку проблем, головним чином пов'язаних з координацією інфраструктури, мобільністю користувачів, безперервністю обслуговування, ціноутворенням, бізнес-моделями та відсутністю стандартів.

## 2.1. Класифікація методів розвантаження

На рисунку 2.1 зображено традиційний спосіб передачі даних у мобільних мережах, де кожен пристрій має з'єднання з базовою станцією, тому передача даних відбувається напряму, через базову станцію на пристрій, і навпаки. Для передачі даних базова станція повинна виділити відповідні ресурси кожному абоненту, а також, тримати активне з'єднання з пристроєм.

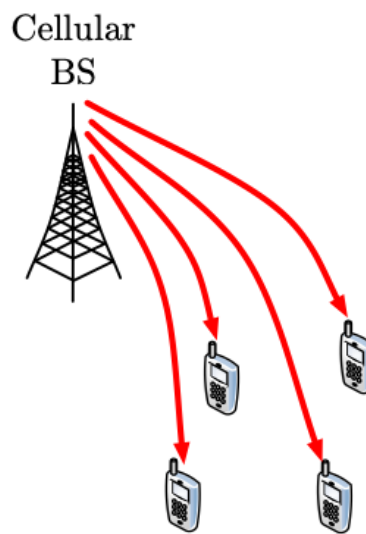


Рисунок 2.1 – Традиційний режим передачі даних

### 2.1.1. Залежно від участі терміналів користувачів

Методи розвантаження мобільних даних можна класифікувати залежно від участі терміналів користувачів у процесі розвантаження. Таким чином, розрізняються способи передачі даних через стаціонарну точку доступу WiFi, або за допомогою з'єднань термінал-термінал (T2T).

#### Стаціонарна точка доступу WiFi

Перенаправлення трафіку через стаціонарну точку доступу WiFi, як зображено на рисунку 2.2, є звичайним рішенням для зменшення трафіку в стільникових мережах. Кінцеві користувачі, які розташовані всередині зони покриття точки доступу WiFi (як правило, набагато меншої, ніж у мобільного

стільника), можуть використовувати її як гідну альтернативу стільниковій мережі, коли потрібно обмінюватися даними. Точки доступу WiFi, як правило, забезпечують кращу швидкість та пропускну здатність з'єднання, ніж стільникові мережі. Однак, зона покриття досить невелика, а можливість переміщення без втрати зв'язку можлива лише всередині зони покриття. Оскільки грошові витрати на розгортання масиву фіксованих точок доступу набагато нижчі, ніж розгортання однієї стільникової базової станції, основні світові оператори стільникового зв'язку, такі як AT&T, Verizon, T-Mobile, Vodafone та Orange, почали інтегрувати все більшу кількість бездротових точок доступу WiFi у своїх стільникових мережах, щоб забезпечити розвантаження даних [7]. Тим часом, для популярних мобільних пристроїв (в основному iPhone і Android) пропонується зростаюча кількість програм, що автоматизують процес розвантаження, таких як iPass, чи BabelTen.

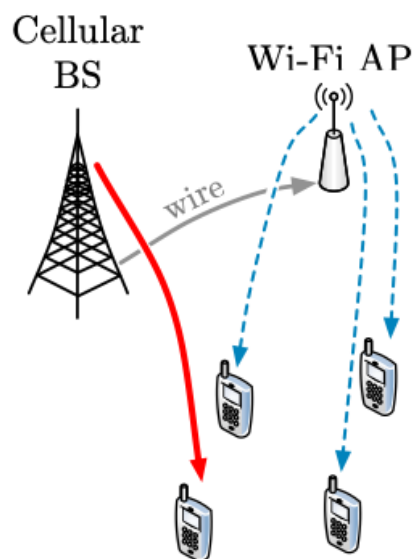


Рисунок 2.2 – Перенаправлення трафіку через фіксовані точки доступу WiFi

#### Термінал-термінал

Зростаюча популярність інтелектуальних мобільних пристроїв, що пропонують кілька альтернативних варіантів зв'язку, дає можливість розгорнути мережу термінал-термінал (T2T), яка покладається на прямий зв'язок між користувачами мобільних пристроїв, без потреби в інфраструктурній магістралі

(рисунок 2.3). Цей інноваційний підхід має властивості, які можуть бути використані для розвантаження трафіку мобільної мережі. Користуючись спільними інтересами між користувачами, які розташовані поруч, провайдер стільникового зв'язку може вирішити надсилати популярний вміст лише невеликій частині користувачів через стільникову мережу, і дозволити цим користувачам поширювати інформацію за допомогою комунікацій T2T та опортуністичних сусідів. Варто зазначити, що форми розвантаження на основі WiFi точок доступу та T2T можуть застосовуватися одночасно, дозволяючи користувачам отримувати дані в гібридному режимі.

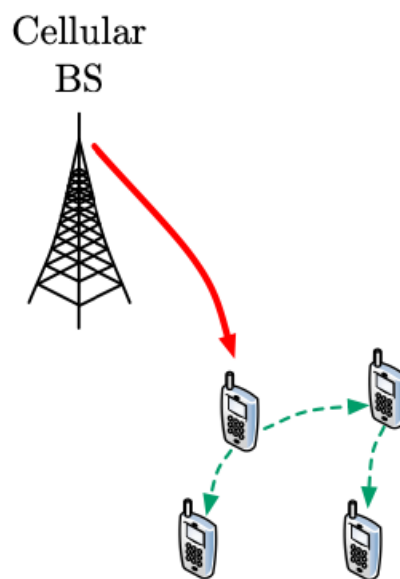


Рисунок 2.3 – T2T режим передачі даних

### 2.1.2. Залежно від часу доставки

Окрім розмежування способів розвантаження на основі точок доступу WiFi та T2T, є ще один аспект, який відіграє важливу роль у категоризації. Зокрема, враховуються вимоги програм, що генерують трафік, з точки зору гарантій доставки. Із цієї причини, потрібно враховувати часовий проміжок доставки даних у класифікації. Це розкладається на дві додаткові категорії: розвантаження без затримок даних та розвантаження зі затримкою даних.

## Розвантаження без затримок

При розвантаженні без затримки кожен пакет має жорстке обмеження по затримці доставки, визначене додатком, яке, як правило, не залежить від мережі. До отримання даних не додається ніяка додаткова затримка, для збереження вимог QoS (крім затримки внаслідок обробки пакетів, фізичної передачі та радіодоступу). Наприклад, інтерактивні аудіо та відеопотоки не повинні містити жодної додаткової затримки, щоб зберегти свої властивості в режимі реального часу. Слід врахувати, що допустима затримка для голосових з'єднань становить близько 50 мс (до однієї секунди для потокової передачі відео). Ця вимога навантажує мережу, яка повинна дотримуватися вищевказаних обмежень по затримці, щоб забезпечити належне функціонування програми. Розвантаження без затримки є по суті нездійсненним в опортуністичних мережах, оскільки накопичена наскрізна затримка на шляху передачі може бути занадто високою щодо жорстких вимог часу доставки. Однак, якщо взяти до уваги сценарії з низькою мобільністю користувачів, то стає можливо передавати дані із суворими гарантіями затримки, використовуючи передачі T2T або за допомогою фіксованої інфраструктури.

Розвантаження без затримки в більшості випадків може бути важко здійснити, якщо врахувати, що користувачі мобільні, та здатні переключатися між різними технологіями доступу. Якщо оператори хочуть дозволити користувачам бути справді мобільними, а не лише переміщуватися всередині зони покриття одного стільника, слід зосередитися на таких питаннях, як прозора передача, взаємодія між альтернативними технологіями доступу та існуючою стільниковою інфраструктурою. Для прикладу, цей аспект не реалізовується, коли розглядається базова реалізація розвантаження через точки доступу IEEE 802.11. З іншого боку, цей спосіб дозволяє розвантажувати такі дані, як передача голосу через IP (VoIP) або інтерактивні програми, отримуючи майже прозорий процес розвантаження.

## Розвантаження із затримками

При розвантаженні із затримками прийом вмісту може бути навмисно відкладений до певного моменту часу, з метою досягнення більш вигідних умов

доставки. У цю категорію включаються такі типи передачі: трафік із втраченими гарантіями якості обслуговування на основі вмісту (це означає, що окремі пакети можуть затримуватися, але весь вміст повинен надходити до користувача протягом заданого терміну) та дійсно стійкий до затримок трафік (без будь-яких гарантій затримки). Послаблення гарантій доставки дозволяє також переміщати трафік опортуністично, що, за визначенням, може гарантувати лише ймовірнісний час доставки. Якщо передача даних не закінчується до очікуваного терміну, стільниковий канал використовується як резервний засіб для завершення передачі, гарантуючи мінімальну QoS. Незважаючи на втрату підтримки режиму реального часу, через додану затримку передачі, слід зауважити, що багато мобільних додатків генерують вміст, що є стійким до затримок – наприклад, програми для смартфонів, які синхронізують електронні листи чи подкасти у фоновому режимі. Додавання альтернативного методу розповсюдження цього вмісту під час пікових періодів (коли стільникова мережа перевантажена або навіть має перебої в роботі) стає корисним розширенням і представляє фундаментальну задачу для способів розвантаження мережі.

Стратегії розвантаження із затримками у значній мірі покладаються на мобільність. Завдяки мобільності користувачі можуть досягти точки доступу IEEE 802.11, або сусіда, який може передати бажані дані, збільшуючи пропускну здатність. З іншого боку, у стратегіях розвантаження із затримками мобільність часто є основною перешкодою і вимагає значних зусиль, щоб змусити систему працювати разом.

## 2.2. Розвантаження без затримок

Розвантаження без затримок - це найбільш простий та досліджений клас розвантаження. Дані можуть передаватися в режимі реального часу та бути інтерактивними, тим самим забезпечуючи можливість використання таких послуг, як потокове передавання відео та VoIP. На сьогоднішній день точки доступу WiFi представляють собою найбільш логічне рішення завдяки широкій поширеності, прийнятній продуктивності та низькій вартості. Оператори можуть стимулювати

абонентів до розвантаження, пропонуючи необмежену кількість даних через точки доступу Wi-Fi (і використовуючи замість цього обмежені стільникові дані). Тим не менше, в літературі можна знайти багато підходів, які використовують спільний доступ до вмісту T2T між сусідніми вузлами.

З технічної точки зору, стільникові базові станції призначені для покриття великих макрозон (діаметр 1-2 км у міських районах та 4-12 км у сільських районах), тоді як стандарт IEEE 802.11 охоплює обмежені території, в діапазон 30-100 метрів. Проте, швидкість передачі даних у локальних бездротових мережах зазвичай вища ніж у стільникових мережах. Рекламована пропускна здатність становить близько 100 Мбіт/с для LTE та 300 Мбіт/с для IEEE 802.11n. Проте, у реальному житті ситуація дещо відрізняється. Наприклад, LTE може досягти піку в 70 Мбіт/с у сприятливих умовах, з середнім показником 20 Мбіт/с. З іншого боку, стандарт IEEE 802.11n може досягти реалістичної пропускної здатності у 40 Мбіт/с. Отже, можна скористатися взаємодоповнюваністю цих технологій, належним чином поєднуючи сильні сторони різних технологій для досягнення кращої передачі даних.

### 2.2.1. На основі точок доступу

На сьогодні переважаюча модель розвантаження на основі точки доступу керується користувачем. Це означає, що користувач повинен явно вмикати альтернативну мережу доступу, щоб отримати покращення передачі даних. Такий підхід спочатку здається привабливим, оскільки не вимагає змін у мережевій інфраструктурі, однак загальні обмеження, такі як обмежена мобільність та відсутність безперервності сесій, заважають його масовому прийняттю. Сучасна тенденція полягає в тому, щоб дозволити операторам глибше контролювати процес розвантаження, щоб мати можливість краще використовувати спільні ресурси та покращувати користувацький досвід споживачів. Врешті-решт, виникає питання про те, як стільниковий оператор може вести прибутковий бізнес, виводячи великі частини свого трафіку поза мережу.

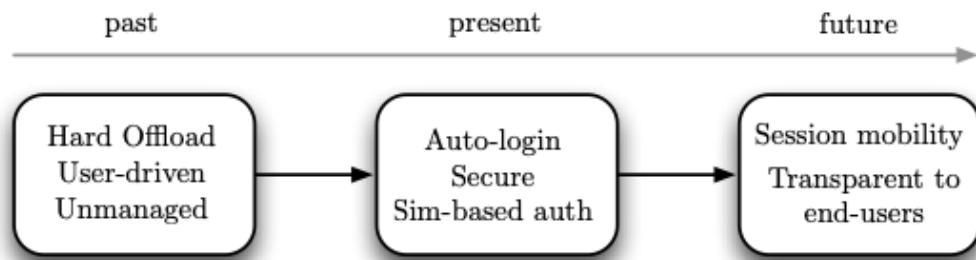


Рисунок 2.4 – Кроки до інтеграції альтернативних мереж доступу та стільникової інфраструктури

Оператори все більше і більше прагнуть до більш тісної інтеграції альтернативних мереж доступу та їх стільникової інфраструктури, як показано на рисунку 2.4. Процес інтеграції стосується партнерства між стільниковими та бездротовими провайдерами, загальної політики виставлення рахунків та обліку, спільних баз даних абонентів для автентифікації, авторизації, спостереження за споживанням ресурсів (AAA), та забезпечення безпеки. На сьогоднішній день передбачається дві можливі архітектури мережі для інтеграції стільникового та Wi-Fi доступу: вільне з'єднання та щільне з'єднання. У вільному зв'язку дві мережі є незалежними і взаємопов'язані непрямо через зовнішню IP-мережу. Безперервність обслуговування забезпечується роумінгом між двома мережами. Натомість, у тісному взаємозв'язку, дві мережі мають спільне ядро та багато функцій, таких як вертикальну та горизонтальну передачу, інтегроване управління ресурсами та спільне AAA [8].

#### Розгортання та моделювання точок доступу WiFi

Наявні дослідження демонструють, що розгортання фіксованих точок доступу є працюючим методом зменшення перевантаження у стільникових мережах. Ці дослідження мотивують зростаючий інтерес до розвантаження даних, надаючи експериментальну верхню межу щодо кількості даних, яку можна розвантажити за допомогою наявної інфраструктури точок доступу. Цікавою стратегією для підвищення продуктивності розвантаження є оптимальне

розміщення точок доступу, щоб максимізувати трафік, що протікає через альтернативний канал. Оскільки вирішити проблему оптимального позиціонування досить складно (NP складна задача) із збільшенням кількості AP, було розроблено ряд алгоритмів, які частково вирішують дану проблему.

Kyunghan Lee, Joohyun Lee, та інші співавтори представили одне з перших кількісних досліджень щодо переваг, які розвантаження даних через точки доступу може принести постачальникам мереж та кінцевим користувачам [9]. Наявність Wi-Fi аналізувалося протягом двох з половиною тижнів у Сеулі, Корея. Зібрані дані показують, що розвантаження без затримок може послабити значну частину стільникового трафіку. Ці результати додатково підкріплюються Paul Fuxjager та співавторами, які надають дані про міський район Відня [10]. Ці дослідження показують, що доступність точок доступу до Wi-Fi в мегаполісах вже досить висока. Результати досліджень підтверджують потенціал розвантаження даних, як життєздатного рішення проблеми перевантаження стільникового зв'язку.

Liang Hu, Claudio Coletti та інші співавтори зосередили увагу на покращенні якості обслуговування, яке приносить розвантаження без затримок в залежності від кількості точок доступу WiFi [11]. Моделювання, виконане за допомогою точної моделі поширення радіозв'язку в міському сценарії, виявило лінійне збільшення середньої пропускної здатності на одного користувача, якщо щільність точок доступу збільшується. Однак, основна увага приділяється руху в приміщенні, таким чином, мобільність користувачів не враховується при оцінці. Розгортаючи по 10 точок доступу на квадратний кілометр, середня пропускна здатність користувачів може збільшитися на 300%, тоді як кількість користувачів, що не підключені, зменшується на 15%, порівняно з базовим випадком, коли присутні лише стільникові мережі.

Nikodin Ristanovic та співавтори [12], придумали алгоритми розгортання точок доступу, які спрямовані на максимізацію частки розвантаженого трафіку. Всі ці підходи подібні, та пропонують евристичне вирішення проблеми оптимального розгортання точок доступу, яка має NP складність. Ідея полягає в тому, щоб розташувати точки доступу близько до місць із найбільшою щільністю запитів

мобільних даних (або кількості користувачів). Результати моделювання показують, що можна зменшити стільниковий трафік на 20 - 70%, залежно від щільності точок доступу.

Окрім результатів моделювання, аналітичні моделі допомагають отримати теоретичні межі продуктивності. Fidan Mehmeti та Thrasyvoulos Spyropoulos пропонують модель, засновану на теорії масового обслуговування, щоб зрозуміти ефективність розвантаження на основі точок доступу WiFi з даними, що передаються в реальному часі, з точки зору користувача [13]. Вони отримали вираз для очікуваної затримки доставки даних, представленого як функцію з наступними змінними: досяжність точки доступу, інтенсивність трафіку та швидкість двох мереж (стільникової та WiFi).

Оптимальне розгортання точок доступу може бути короткостроковим рішенням для підвищення продуктивності розвантаження даних у реальному часі. У найоптимістичнішому сценарії, ретельно спланувавши розгортання, можна розвантажити до 70% трафіку. Хоча, якщо шаблон запитів змінюється, обране розгортання може бути вже не оптимальним, через це характеристики розвантаження можуть значно погіршитися. Крім того, усі вищевказані роботи припускають, що механізми вертикальної передачі є досконалими, що є дуже грубим спрощенням. Додавання занадто великої кількості точок доступу також може погіршити ситуацію через взаємне перекриття. З іншого боку, аналітичні моделі допомагають зрозуміти оптимальну частку даних для переходу на альтернативний канал, щоб максимізувати загальну швидкість передачі даних та обсяг економії стільникового зв'язку.

### 2.2.2. T2T

Розвантаження T2T у режимі реального часу часто асоціюється з кооперативними стратегіями для одночасної експлуатації декількох наявних інтерфейсів. Таким чином, мережа повинна мати можливість координувати передачу даних розподіленим способом. Спочатку розглядалися лише позасмугові передачі. Однак, розробки стандарту 3GPP LTE (Rel-12) пропонують інтегрувати

можливості прямого внутрішньосмугового зв'язку в майбутню стільникову архітектуру [13]. Це забезпечує додаткову гнучкість мережі, але порушує такі проблеми, як взаємні перешкоди та розподіл ресурсів, оскільки передача T2T відбувається у тому ж діапазоні, що і передача стільникового зв'язку.

#### Кооперативний розподіл даних

Seung-Seok Kang та Matt W. Mutka запропонували CHUM - покрокову стратегію завантаження, коли призначений проксі завантажує мультимедійний вміст через стільникову мережу, а потім багатоадресно передає його через інтерфейс WiFi іншим зацікавленим вузлам [14]. Цей метод спрямований на зменшення витрат на підключення до 90% при збереженні ресурсних затрат. Також, було розроблено розширення для зменшення витрати заряду акумулятора у випадку послуги обміну миттєвими повідомленнями. Результати моделювання та випробувальних стендів показують, що економія енергії зростає із збільшенням кількості взаємодіючих вузлів. Подібним чином, архітектура COSMOS використовує наявність альтернативного каналу для трансляції потоку в реальному часі на сусідні вузли [15]. Як і однорангова мережа, COSMOS стійкий до відмов вузлів. Кількість послідовних мовників налаштовується відповідно до щільності вузлів, що беруть участь у розподілі даних, для компенсації зіткнень на бездротовому носії та надмірності даних.

#### Інтеграція можливостей Device-to-Device

Розробки стандарту 3GPP LTE (Rel-12) пропонують інтегрувати можливості прямого внутрішньосмугового зв'язку в майбутні стільникові архітектури, які також називають підкладкою стільникової мережі [16] або пристрій до пристрою (D2D), а не за допомогою традиційних технологій, що працюють на неліцензійних діапазонах (переважно IEEE 802.11 та Bluetooth). Це відкриває шлях для спільного використання стільникових та короткодіапазонних передач, пропонуючи користувачам різну ступінь свободи передачі та середовище, що підтримується

мережею. Кінцеві користувачі можуть виявляти одне одного в безпосередній близькості за допомогою явного зондування.

Після виявлення вузли можуть спілкуватися за допомогою виділених ресурсів або спільного стільникового каналу висхідної лінії зв'язку. Потім зв'язок D2D запускається стільниковою мережею і підпадає під постійне управління та контроль мережі. З цих причин їх також можна застосовувати для балансування навантаження. Отже, D2D може стати корисною платформою для розвитку розвантаження даних у майбутньому, тому що вона може досягти кращого управління ресурсами шляхом повторного використання спектру фізично сусідніх пристроїв, тоді як надійність може значно зрости завдяки меншій відстані зв'язку. Крім того, можливості D2D дозволяють LTE стати дуже цікавою технологією для мереж громадської безпеки [17]. У будь-якому випадку, такі критичні проблеми, як виявлення сусідів, планування передачі, розподіл ресурсів та управління перешкодами, зокрема у випадку розгортання кількох стільникових мереж, все ще потребують вирішення, щоб перейти до ефективної інтеграції в майбутні стільникові архітектури.

### 2.3. Розвантаження з затримками

Розвантаження з затримками додає затримку до прийому вмісту. Загалом, хоча для кінцевих користувачів надзвичайно важливо отримувати вміст у встановлені терміни, не принципово отримувати весь потік із фіксованою швидкістю. Деякі дані можуть мати явні обмеження на час доставки, інші ж, можуть бути стійкими до затримок. Електронна пошта, інформація, пов'язана з новинами, або подкасти, це лише невеликий список ресурсів, які можуть підтримувати певний ступінь затримки, не порушуючи задоволеності користувачів. Отже, це відмінні кандидати, яких можна розвантажити за допомогою розвантаження з затримками.

Здебільшого, стратегія розвантаження покладається на стільникову мережу для прискорення процесу розпоширення даних (для передачі даних до користувачів, що потім далі будуть їх поширювати, при розвантаженні на основі

T2T) або для забезпечення мінімальних QoE (резервні передачі, коли наближається кінцевий термін). До встановленого кінцевого терміну вміст бажано передавати за альтернативною технологією. На відміну від підходів, викладених у розділі «Розвантаження без затримок», розвантаження з затримкою безпосередньо використовує мобільність вузлів для створення комунікаційних можливостей. Як побічний ефект, продуктивність сильно залежить від моделі мобільності користувачів.

Оскільки повідомлення пересилаються лише під час контактів з іншими користувачами або точками доступу, статистичний аналіз таких зустрічей стає особливо значущим. По-перше, час до нової зустрічі (час між взаємодіями) вказує на ємність доставки всередині опортуністичної мережі. Крім того, коли користувачі зустрічаються, знання того, як довго триває зустріч (час їх контакту), допоможе передбачити, скільки повідомлень, що очікують на пересилання, можуть бути надіслані. Розподіл часу контактів також впливає на загальну пропускну здатність доставки, коли кілька користувачів конкурують за один і той же бездротовий канал, оскільки з'єднання можуть бути втрачені внаслідок суперечок та планування.

### 2.3.1. На основі точок доступу

Стратегії, засновані на точках доступу, використовують переваги додаткової мережевої магістралі, часто утвореної фіксованими точками доступу WiFi, для обробки даних в обхід стільникової мережі. Додаткова мережа доступу може бути частиною мережі стільникового оператора або може бути повністю окремою. В останньому випадку слід передбачити угоду між операторами. Спочатку, такий підхід схожий на розвантаження без затримок. Можливість доставки вмісту із затримкою використовується тут, коли обмін даними відбувається між користувачем та різними точками доступу у різному місці і у різний час, як проілюстровано на рисунку 2.5. Рух кінцевих користувачів створює можливість контакту з фіксованими точками доступу, що надають розвантажувальну здатність мережі.

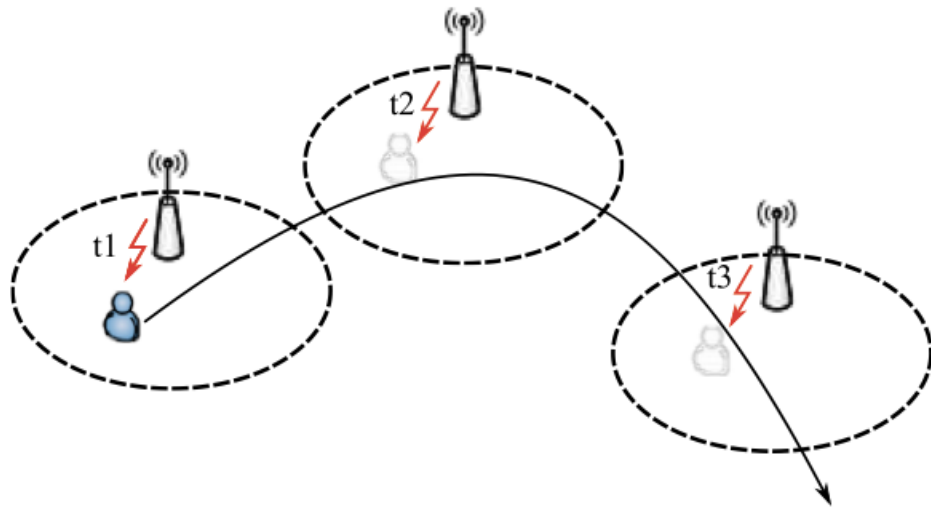


Рисунок 2.5 – Розвантаження із затримками. Мобільність дозволяє отримувати дані із затримками від різних точок доступу у різний час.

Поточні дослідницькі зусилля спрямовані на прогнозування майбутнього потенціалу розвантаження через минулу поведінку користувачів, таку як мобільність, контакти з точками доступу та пропускну здатність. Використовуючи це передбачення, координатор розвантаження може вирішити, яку частку даних вивантажувати, коли і кому. Можливо, подальший вміст може бути розділений на декілька частин, які потім проактивно надсилаються в точки доступу, з якими вузли (ймовірно) зіткнуться в майбутньому. Альтернативна область досліджень має на меті визначити оптимальну кількість фіксованих точок доступу та їх географічне розташування, базуючись на відомій моделі мобільності користувача.

Vasilios A. Siris та Dimitrios Kalyvas поєднали прогнозування рухливості вузлів зі знанням георозташування фіксованих точок доступу для посилення процесу розвантаження [18]. Прогнозувальник інформує координатора про те, скільки точок доступу мобільний вузол зустріне під час свого маршруту, коли вони будуть зустрічатися, і як довго користувач буде знаходитися в діапазоні точки доступу. Алгоритм прагне максимально збільшити кількість даних, що допускають затримку, для вивантаження в WiFi, забезпечуючи також те, що дані передаються у встановлений термін.

Подібним чином, архітектура MobTorrent використовує гібридну інфраструктуру, попередній вибір даних та реплікацію кешу у фіксованих точках доступу [19]. Запити на завантаження видаються через стільниковий канал. Запитані дані заздалегідь кешуються в точки доступу, використовуючи інформацію про місцезнаходження та історію мобільності користувачів.

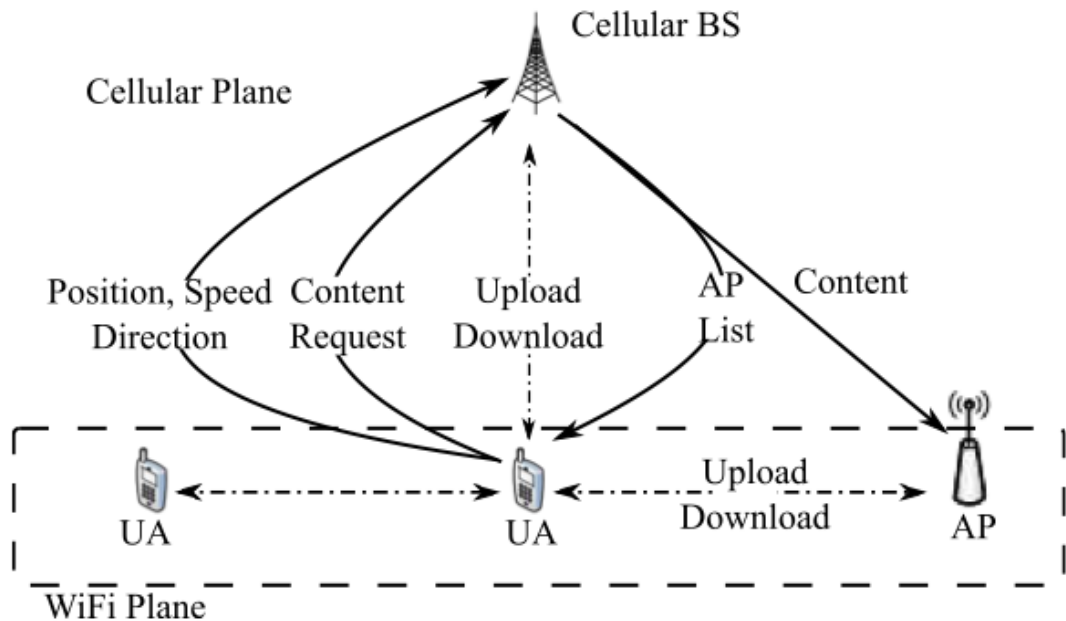


Рисунок 2.6 – Архітектура мережі MADNet

Savio Dimatteo, та інші співавтори, запропонували мережево-орієнтовану архітектуру під назвою MADNet [20], яка об'єднує стільникову мережу, точки доступу WiFi, та зв'язок між терміналами. MADNet використовує стільникову мережу як канал управління. Система пояснюється на рисунку 2.6. Коли мобільний користувач запитує деякий вміст, координатор розвантаження відповідає списком оточуючих точок доступу, де він може забрати запитувані дані. Координатор розвантаження прогнозує сусідні точки доступу, використовуючи позиційну інформацію, завантажену користувачами через канал управління. Основні результати, отримані в результаті моделювання, показують, що кілька сотень точок доступу, розгорнутих по місту, можуть розвантажити половину стільникового трафіку.

Moo-Ryong Ra, та інші співавтори, описали компроміс між затримкою та QoS, представивши централізований алгоритм оптимізації, який називається SALSА [21]. Цей алгоритм визначає, коли відкладається передача (у разі якщо вона повинна бути відкладена), адаптуючи процес розвантаження до інформації про доступність мережі та місцезнаходження пристрою. Основним внеском роботи є дослідження енергоефективності затримки передачі, оскільки WiFi, як правило, має кращу енергоефективність, ніж стільниковий радіомодуль, як показано на рисунку 2.7. Рішення про передачу залежить від прогнозування майбутньої доступної смуги пропускання для кожної можливої доступної мережі, яка оцінюється як середня швидкість, досягнута за минулі передачі, або як функція отриманого RSSI. Автори також проводили синтетичні та реальні експерименти, щоб підтвердити ефективність SALSА, яка може заощадити до 40% енергії у порівнянні з іншими стратегіями розвантаження стільникової мережі.

Younghwan Go, та інші співавтори, пропонують неоднорідну мобільну мережу міського масштабу, яка оппортуністично перевантажує частину стільникового трафіку на існуючі точки доступу Wi-Fi [22]. Ядро системи покладається на DTP (Delay Tolerant Protocol) для маскуванню мережевих збоїв на рівні програми. DTP пов'язує з'єднання з унікальним ідентифікатором потоку, а не з набором фізичних IP-адрес та портів, надаючи додаткам ілюзію безперервного з'єднання. Запропонована система використовує спеціальні проксі-сервери, які приховують відключення користувачів від серверів додатків.

Стратегія мінімальної затримки мінімізує загальну затримку, завжди вибираючи канал з найшвидшою швидкістю передачі даних; стратегія Always WiFi використовує лише точки доступу WiFi, незалежно від швидкості передачі даних; Енергетично оптимальна стратегія мінімізує споживання енергії, використовуючи завжди найбільш енергоефективний канал.

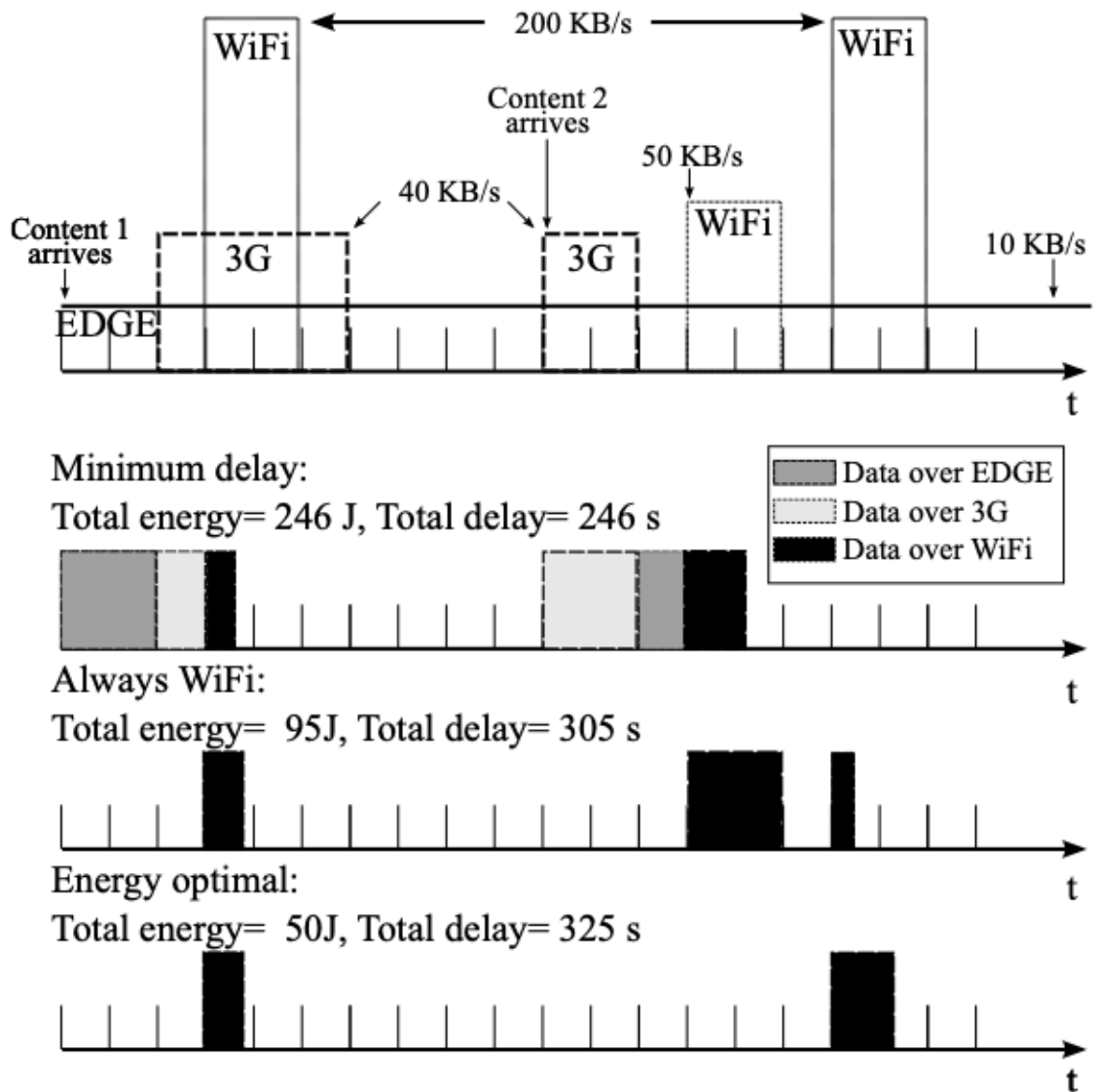


Рисунок 2.7 – Три стратегії розвантаження що запропоновані у SALSA фреймворку.

Натомість, зосередившись на політиці, орієнтованій на користувача, Aruna Balasubramanian, та інші співавтори, розробили Wiffler [23], алгоритм, здатний використовувати можливість затримки вмісту та контакти із фіксованими точками доступу. Wiffler передбачає майбутні зустрічі з точками доступу, відкладаючи передачу, лише якщо це економить стільниковий трафік, використовуючи схему, детально описану в алгоритмі 1. Wiffler передбачає розмір передачі по Wi-Fi, позначений як  $W$ , на основі минулих зустрічей з точками доступу. Історія контактів використовується для оцінки часу взаємодії та середньої пропускної здатності на контакт. За допомогою моделювання на основі слідів, автори показують, що при

передбаченні, заснованому лише на останніх чотирьох зустрічах, Wiffler отримує низьку похибку прогнозування для майбутніх інтервалів близько однієї хвилини. Система може розвантажувати від 20 до 40 відсотків навантаження інфраструктури, залежно від границь затримки вмісту.

---

**Algorithm 1:** Wiffler offloading decision heuristic [25].

---

$D \leftarrow$  earliest deadline among queued transfers.

$S \leftarrow$  size in bytes to be transferred by  $D$ .

$W \leftarrow$  estimated WiFi transfer size.

$c \leftarrow$  tuning parameter.

**if** *WiFi is available* **then**

| send data on WiFi and update  $S$

**end**

**if**  $W < S \cdot c$  **and** *3G is available* **then**

| send data on 3G and update  $S$

**else**

| wait

**end**

---

Рисунок 2.8 – Рішення про розвантаження, під назвою Wiffler

Da Zhang та Chai Kiat Yeo зосередили увагу на тому, як знайти оптимальну миттєву передачу даних у стільниковій мережі [24]. Хоча затримка передачі може суттєво покращити ефективність розвантаження стільникових мереж, затримка всіх передач до максимально можливого часу затримки часто є неефективною стратегією. У разі відсутності Wi-Fi, кожна затримка передачі заважає користувачькому досвіду. Ідеальним рішенням є визначення оптимального моменту часу, після якого користувач повинен припинити відстрочку передачі та розпочати передачу даних за допомогою стільникового інтерфейсу, створюючи компроміс між ефективністю розвантаження та задоволенням користувача. З цієї причини, запропонований алгоритм максимізує функцію корисності, залежно від завантаження даних та задоволеності користувачів.

Ключовою вимогою для ефективного розвантаження на основі точок доступу є здатність прогнозувати майбутню пропускну здатність. Рішення дочекатися можливої майбутньої можливості розвантаження або передати дані по стільниковому каналу (розглядається як дефіцитний та дорогий ресурс) має надзвичайно важливе значення при роботі з даними, що допускають затримку. Розподілені та централізовані методи прогнозування були розроблені на основі знань про попередні зустрічі, моделі мобільності, розташування точок доступу та доступності смуги пропускання.

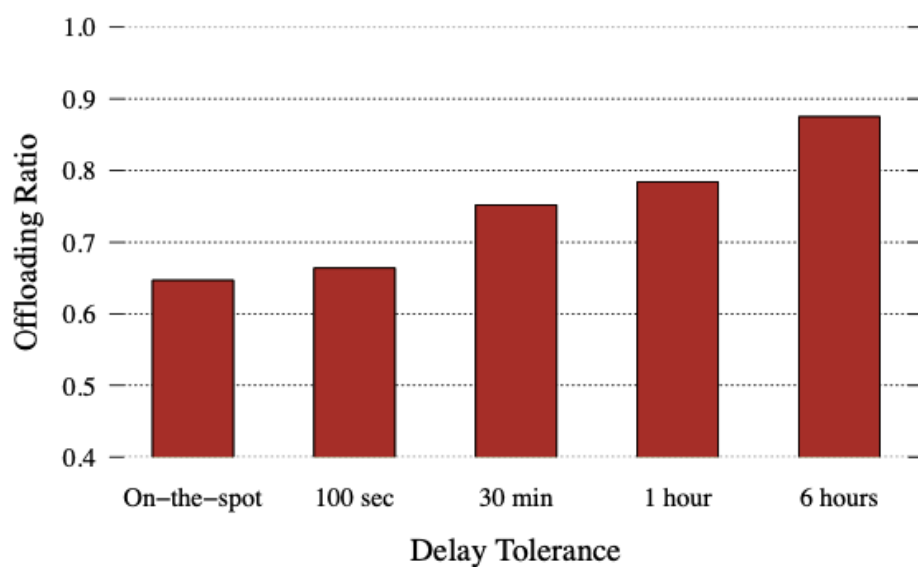


Рисунок 2.9 – Коефіцієнт розвантаження при розвантаженні з затримками із різними допусками затримки.

Kyunghan Lee, та інші співавтори, демонструють, що збільшення граничних значень затримки вмісту суттєво покращує коефіцієнт завантаженого трафіку, як показано на рисунку 2.9 [9]. Додаткові дослідження свідчать про те, що середній час завершення передачі для розвантаження із затримками завжди набагато нижчий за максимальний відведений термін. Автори також виявили, що при роботі з великими об'ємами даних, передача із затримкою може відбуватися швидше ніж у випадку прямої передачі без затримок через стільникову мережу. Це пояснюється

тим, що WiFi, як правило, пропонує більш високу швидкість передачі даних, ніж стільникові мережі, що означає коротший загальний час для передачі усіх даних.

Подібно до випадку із розвантаженням без затримок, продуктивність розвантаження із затримками прив'язана до щільності точок доступу. Тим не менш, часові проміжки в даному випадку грають значну роль, оскільки підвищена толерантність до затримки дозволяє розширити частку розвантажених даних.

### 2.3.2. T2T

При розвантаженні із затримками на основі T2T передачі, розподіл вмісту делегується кінцевим користувачам, тобто, у широкому розумінні, користувачі є мережею. Вони беруть активну участь у процесі розповсюдження трафіку, використовуючи комунікації T2T. Мобільність - це додатковий транспортний механізм, що створює можливості для передачі даних від несучих користувачів, які використовують передачу, що є толерантною до затримок (DTN). DTN дозволяє переадресацію даних за допомогою прийняв-переніс-передав, незалежно від наявності прямого шляху між відправниками та одержувачами, за рахунок додаткових затримок передачі.

Negin Golrezaei, та інші співавтори, проаналізували теоретичну продуктивність, обмежену пропускну здатністю [25]. Прийняв-переніс-передав маршрутизація, що поєднується з простими політиками кешування на вузлах, може призвести до лінійного збільшення пропускну здатності кількості вузлів. З цих причин, розвантаження із затримками, на основі T2T, часто розглядається як швидкий і недорогий спосіб збільшити пропускну здатність мобільної мережі та подолати прогнозоване цунамі даних. На відміну від підходів на основі AP, виграш цієї схеми повністю залежить від надлишкового трафіку. Більше того, підхід DTN підтримує умови, коли стандартні підходи багатоадресної передачі та широкомовної трансляції не можуть бути використані. Наприклад, він підтримує випадки, коли популярний вміст запитується користувачами протягом певного періоду часу (досить короткий, щоб гарантувати, що користувачі все ще фізично розташовані в одному регіоні), але не обов'язково точно в той самий час. Однак,

слід зауважити, що розвантаження на основі DTN також є корисним, коли можна використовувати багатоадресну передачу в стільниковій мережі.

З характеристик DTN випливає, що даний підхід може вирішувати питання дифузії даних лише з дуже гнучкими термінами доставки. В ідеалі, вміст надається лише невеликій частині вибраних користувачів серед тих, хто його запитував. Ці користувачі започатковують розповсюдження, шляхом надсилання вмісту користувачам, які знаходяться у межах діапазону передачі, як показано на рисунку 2.9. Інтерфейси T2T, як правило, енергоємні, і до них можна застосовувати політики енергозбереження, динамічно перемикаючись між станами активності та очікування.

Для мотивації використання розвантаження на основі DTN, Vladimir Vukadinovic та Gunnar Karlsson запропонували систему, спеціально розроблену для розповсюдження подкастів [26]. Подкасти - ідеальний тип вмісту для розвантаження на основі DTN, враховуючи їх популярність та терпимість до затримок. Якщо замість розгортання більшої кількості інфраструктури, щоб задовольнити всі запити на дані, лише користувачі з найкращим підключенням використовуються як ретранслятори, які отримують подкаст безпосередньо від інфраструктури, то решта користувачів можуть збирати відсутні дані лише після опортуністичних зустрічей з ретрансляторами тих самих даних. Результати демонструють, що опортуністичний розподіл вмісту є ресурсоефективним методом підвищення спектральної ефективності та сукупної пропускної здатності мережі за меншими витратами, ніж розгортання додаткової інфраструктури. Оптимальний відбір користувачів-ретрансляторів, разом із ефективністю дифузії DTN, може сприяти подальшим значним покращенням розвантаження RAN.

З причин, перерахованих вище, більшість дослідницьких зусиль у цій галузі зосереджені на розробці ефективних алгоритмів для оптимального відбору несучих користувачів, щоб мінімізувати кількість користувачів, які отримують вміст через стільниковий інтерфейс. З іншого боку, низка робіт стосується архітектури мережі та дизайну протоколів. Перший підхід спирається на аналіз соціальних мереж або методи машинного навчання, щоб передбачити, які користувачі є найкращими

шлюзами для передачі контенту. Останній вирішує питання про те, який тип трафіку краще розвантажувати і як, визначаючи протоколи зв'язку та мережеві архітектури. У наступних розділах детальніше описані ці два підходи.

### Вибір підмножини передачі

Patrick Vaier, та інші співавтори, підійшли до проблеми вибору підмножини, передбачивши рух кінцевих споживачів, щоб оцінити майбутнє підключення між пристроями [27]. Система під назвою ТОМР (Traffic Offloading with Movement Predictions - розвантаження трафіку з передбаченнями руху) отримує інформацію про фактичне розташування та швидкість мобільних пристроїв, а не про схеми підключення. У якості пересилачів, фреймворк вибирає вузли, які мають найбільшу ймовірність майбутнього підключення до інших вузлів, на основі прогнозування руху користувачів. Як зображено на рисунку 2.11, ТОМР пропонує три метрики покриття для прогнозування майбутніх переміщень вузлів: статичне покриття (а), покриття вільного простору (b) та покриття на основі графів (c).

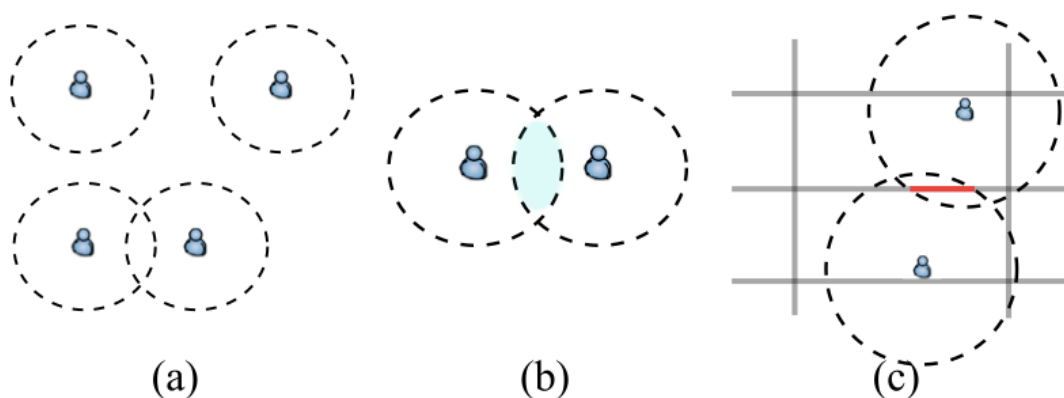


Рисунок 2.10 – Метрики покриття фреймворку ТОМР

Статичне покриття (а) не враховує будь-яке майбутнє переміщення, тому вузли вважаються контактуючими або не контактуючими враховуючи лише їх поточне положення. Покриття вільного простору (b) розглядає можливий рух вузлів у вільному просторі: ймовірність майбутньої зустрічі - це область перетину двох кіл, що являють собою можливу зону переміщення двох вузлів. Покриття на

основі графів (с) враховує наявну структуру дорожнього графу, щоб звузити прогнозування переміщення, до конкретних існуючих маршрутів користувачів.

Вибір вузлів з високим потенціалом як передавачів для процесу розповсюдження впливає на ефективність стратегії розвантаження. Доцільно обрані передавачі можуть поширити дані на більшу кількість вузлів, що призводить до менш пізніх ретрансляцій. Алгоритми вибору підмножин зазвичай використовують інформацію про соціальну взаємодію користувачів та їхні моделі мобільності, щоб з'ясувати, які вузли мають найкращі характеристики. Варто зауважити, що для передачі контекстної інформації, як правило, необхідний канал управління, що прив'язує кінцеві вузли до центрального (передавача). Продуктивність алгоритму розвантаження, в значній мірі, залежить від аналізу динаміки системи. Кількість розвантажених даних варіюється від 30 до 50% для всіх досліджуваних статей, залежно від допуску на затримку, та розглянутих наборів даних.

### Механізми розвантаження

Найун Луо, та інші співавтори, розробили уніфіковану архітектуру стільникових та бездротових динамічних мереж (ad hoc), щоб використати переваги кожної технології [28]. Їх метою є збільшення пропускної здатності користувачів мобільних пристроїв, використовуючи переваги сусідів з кращим стільниковим зв'язком, задіяних як проксі. Робоча схема, як показано на рисунку 2.10, дозволяє мобільним користувачам, у яких низька швидкість каналу низхідної лінії зв'язку, підключатися за допомогою спеціальних з'єднань до сусіда, який має кращі умови стільникового каналу. Проксі вузол виконує роль шлюзу для передачі трафіку своїх сусідів. Далі, дані передаються за допомогою IP-тунелювання (IP tunneling), через проміжні клієнти-ретранслятори, до місця призначення, використовуючи ad hoc посилання.

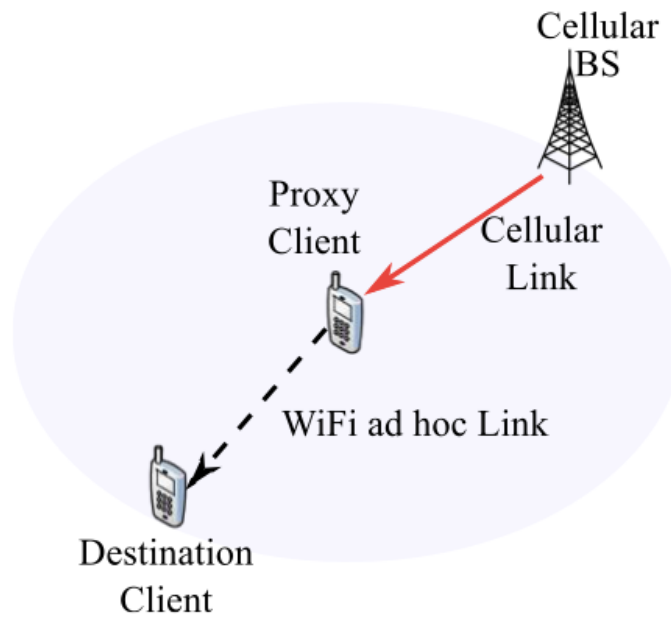


Рисунок 2.11 – Схема передачі даних на пристрій, з поганим пропускним каналом, через інший пристрій, з кращим пропускним каналом

Фреймворк Push-and-Track вирішує проблему розповсюдження популярного вмісту із гарантованими затримками [29]. На рисунку 2.12 представлено основний підхід даного фреймворку. Спочатку, лише підмножина користувачів отримує дані через стільникову інфраструктуру. Далі, вміст пересилається за допомогою T2T з'єднань, коли вузли зустрічаються. Мобільні вузли, після прийому вмісту, надсилають легковагове повідомлення про підтвердження координатору, через стільникову інфраструктуру. Центральний координатор може повторно вводити дані, якщо статус розповсюдження поганий, щоб прискорити процес розповсюдження. Повідомлення про підтвердження можуть також містити інформацію про вузли, що зустрічаються, і навіть, географічне положення зустрічі. Механізм моніторингу дозволяє координатору у реальному часі мати стан розповсюдження даних, та передбачити, які вузли найкраще підходять для повторної ін'єкції копії вмісту (наприклад, які неінфіковані вузли мають найкращий потенціал для "посилення" дифузії). Варто звернути увагу, що у цьому випадку, рішення про опортуністичне розповсюдження залишається за мобільними користувачами, а координатор лише час від часу перевіряє стан дифузії, іноді

провокуючи повторні ін'єкції. Наприклад, коли час наближається до кінцевого терміну доставки, координатор потрапляє в «зону паніки», а вміст передається до всіх неінфікованих вузлів через стільникову інфраструктуру, щоб задовольнити терміни затримки доставки даних. Оскільки повідомлення про підтвердження набагато менше фактичного вмісту, система дозволяє значно зменшити навантаження на стільникову інфраструктуру.

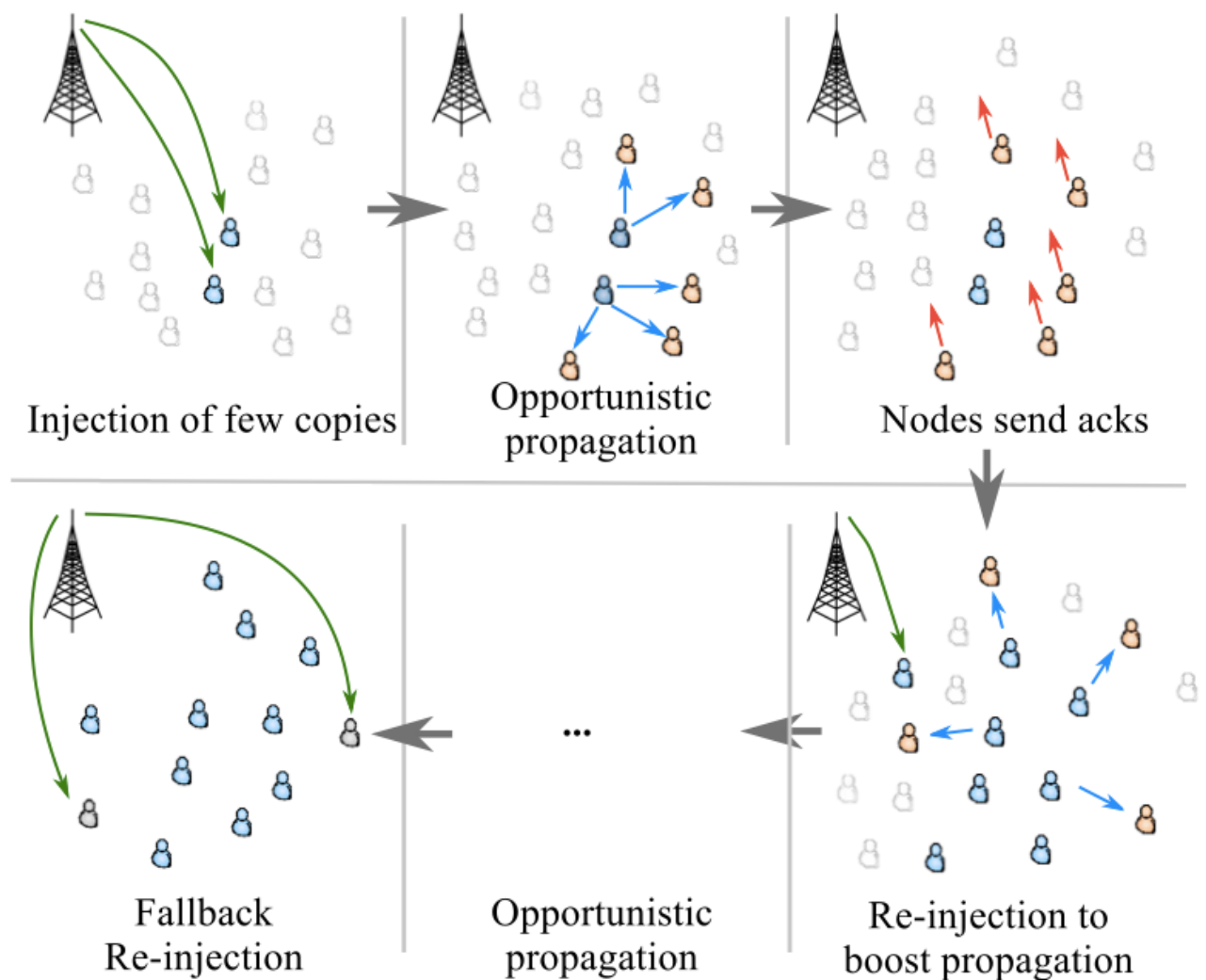


Рисунок 2.12 – Схема роботи фреймворку Push-and-Track.

## Висновки до розділу

Визначення мережевих архітектур, здатних використовувати різні технології для доставки контенту, є ключовим досягненням для дослідницького співтовариства. Сучасна тенденція спрямована на схеми розвантаження, де стільникова мережа здійснює керування підключених користувачів для виявлення сусідів, та управління їх підключенням. Схема маршрутизації використовує перевагу близько розміщених сусідів, які використовуються як шлюзи для переадресації даних. Значне використання контекстної інформації, отриманої від кінцевих користувачів, використовується для покращення маршрутизації через оптимальний інтерфейс. Оператори стільникового зв'язку особливо зацікавлені в розробці інноваційних моделей, які здатні надати додаткові вигоди, що забезпечуються розвантаженням, та плануванням об'єму трафіку, який вони можуть розвантажити зі своєї базової мережі.

### 3. СПОСІБ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ У ВИСОКОНАВАНТАЖЕНИХ МЕРЕЖАХ

При надвеликому скупченні пристроїв у межах невеликої території пропускної смуги базової станції може не вистачити. Це призведе до того, що деяка кількість пристроїв не зможе отримати доступ до мережі через нестачу ресурсів базової станції, а отже, не зможуть повноцінно функціонувати. З кожним роком дана проблема стає все актуальнішою, адже все більше пристроїв отримують модулі зв'язку. У реальному житті користувачі часто стикаються з перенавантаженням мережі у місцях масового скупчення людей, наприклад, на концертах, коли навіть повідомлення з декількох слів може передаватися протягом десятків хвилин, або, навіть, не передаватися взагалі.

На сьогоднішній день, у місцях потенційного скупчення людей, оператори мобільного зв'язку встановлюють додаткову базову станцію, для того, щоб покращити якість зв'язку з мобільними пристроями. Проте, зазвичай, такий спосіб не повністю вирішує проблему погіршеного зв'язку та перевантаженості мережі, тому вона не може забезпечувати повноцінне обслуговування клієнтів і підтримувати прийнятну швидкість передачі даних. У результаті, під'єднані пристрої отримують з'єднання погіршеної якості, а нові клієнти не можуть приєднатися через нестачу ресурсів базової станції.

Зазвичай, пропускна здатність каналу зв'язку значно перевищує фактичне навантаження, що надходить від користувача. Це означає, що канал зв'язку використовується не оптимально. З іншої сторони, якщо кількість абонентів значно перевищує допустиме значення, то деяким абонентам не надається повноцінний доступ до мережі.

Для того, щоб зменшити надмірне навантаження на мережу, можна покращити роботу мобільних пристроїв таким чином, щоб зменшити кількість активних підключень до базової станції і водночас ефективніше використовувати активні канали зв'язку. Цього можна досягти, якщо об'єднати мобільні пристрої у групи по декілька пристроїв (кількість пристроїв може залежати від степені навантаження мережі). У таких групах лише один пристрій буде мати активне підключення до

базової станції. Будемо називати такий пристрій головним пристроєм групи. Всі інші пристрої групи, назвемо їх другорядними пристроями, будуть мати з'єднання не з базовою станцією, а з головним пристроєм групи, використовуючи технологію Wi-Fi або Bluetooth. Таким чином, дані з другорядних пристроїв будуть спочатку передаватися на головний пристрій, а вже далі, з головного пристрою на базову станцію. Враховуючи те, що стандарт LTE надає швидкість передачі даних у середньому до 20 Mbit/s, а для середньостатистичного користувача така швидкість є надлишковою, то пропускна здатність головного пристрою зможе задовольняти потреби під'єднаних до нього пристроїв.

### 3.1. Детальний опис

Існуючий спосіб передачі даних у стільникових мережах представлений на рисунку 3.1. У межах одного стільника усі пристрої мають підключення з базовою станцією, яка у свою чергу виділяє для кожного користувача ресурси, та канал зв'язку. Для передачі даних потрібно, щоб канал зв'язку був у активному стані. Якщо ж пристроїв, що хочуть одночасно передавати дані у стільнику більше, ніж базова станція може підтримувати, то ті користувачі, які не отримали виділений активний канал зв'язку повинні очікувати поки базова станція виділить для них ресурси. Час на очікування підключення може змінюватися в залежності від наднормової кількості користувачів у стільнику. Дана затримка може значно погіршити QoS, та користувацький досвід в цілому.

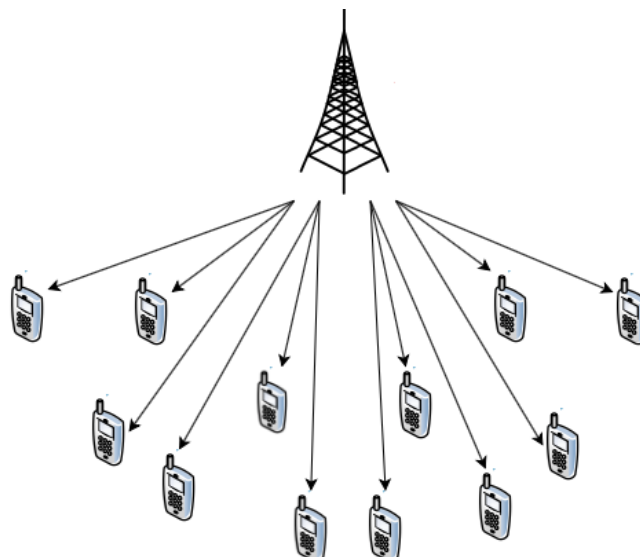


Рисунок 3.1 – Схема роботи існуючого способу передачі даних

Новий спосіб полягає у тому, що не всі користувачі будуть мати з'єднання з базовою станцією, а лише вибірккові. Пристрої, що матимуть активне з'єднання з базовою станцією будемо називати головним пристроєм групи. До головного пристрою буде підключено декілька інших пристроїв, за допомогою технологій WiFi чи Bluetooth. Пристрої, що не мають з'єднання з базовою станцією, а з'єднані лише з головним пристроєм, будемо називати другорядними пристроями. Схематичне зображення запропонованого способу представлено на рисунку 3.2.

Цільними стрілками на схемі позначені з'єднання головного пристрою групи з базовою станцією, а пунктирною стрілкою позначені з'єднання другорядних пристроїв із головним. На рисунку зображені групи по три пристрої, де один з них головний, а інші два другорядні.

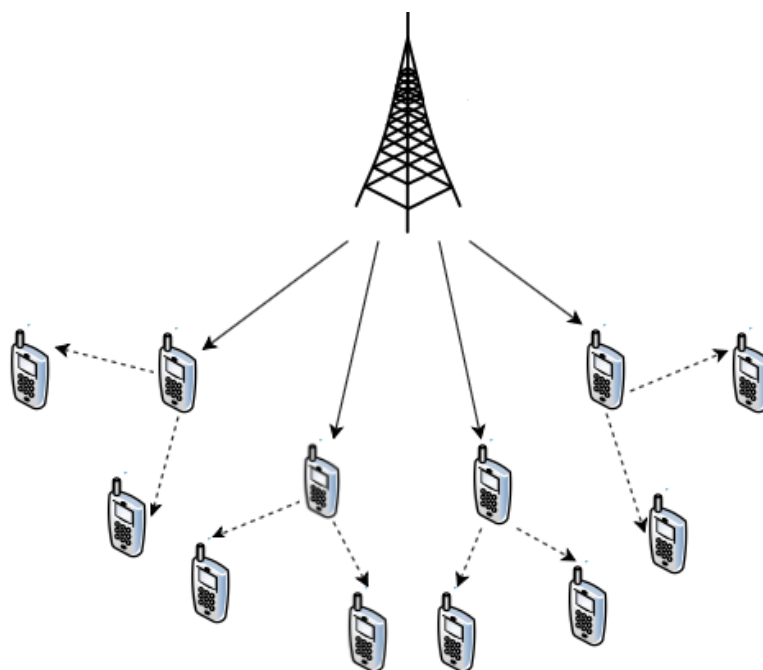


Рисунок 3.2 – Схема роботи запропонованого способу

Даний спосіб може підлаштовуватися під конкретну ситуацію, та конкретне навантаження мобільної мережі, і змінювати структуру мережі у реальному часі, намагаючись розвантажити якомога більше трафіку. Кількість пристроїв у групі можна динамічно змінювати, в залежності від перевантаження мережі. Наприклад,

коли перевантаження мінімальне, то можна створювати групи по 2 пристрої, де всього один головний і один другорядний пристрій. Також, динамічно можна змінювати технологію передачі між головним і другорядним пристроєм, наприклад перемикаєти 2.4 ГГц на 5ГГц WiFi з'єднання.

Головна станція не буде знати про наявність другорядних пристроїв, адже вони не будуть мати з'єднання з базовою станцією. Таким чином, досягається зменшення навантаження на базову станцію. Перевагою цього способу для базової станції є те, що він не потребує ніяких змін у наявному обладнанні базової станції. Таким чином, програмне та апаратне забезпечення базової станції не потребує модифікацій, адже базова станція буде працювати як і раніше. Так як оновлення обладнання базових станцій є дуже ресурсозатратним для операторів, вони намагаються мінімізувати випадки оновлення обладнання. Запропонований спосіб не потребує ніяких оновлень обладнання, тому може з нульовими витратами для операторів мобільного зв'язку бути впроваджений у роботу.

## 3.2. Переваги

Запропонований у даній роботі спосіб передачі даних має ряд переваг, перед існуючим способом передачі даних, у випадку коли мережа перевантажена і не здатна задовольняти вимоги користувачів. У даному розділі розглядаються та пояснюються основні переваги запропонованого способу.

### 3.2.1. Зменшення навантаження на базову станцію

Базова станція підтримує обмежену кількість активних підключень, адже для встановлення з'єднання потрібно виділити ресурси для кожного користувача. Останній впроваджений у широке використання стандарт – LTE. Паралельна передача даних у стандарті LTE основана на принципі частотного поділу каналів. Це дозволяє розділити загальну пропускну здатність, що доступна в середовищі зв'язку, на ряд частотних смуг, що не перекриваються, кожна з яких використовується для передачі окремого сигналу. За допомогою такого підходу, у

спільному середовищі передавання даних, такому як кабель, оптичне волокно або радіо, можна спільно використовувати кілька незалежних сигналів.

Коли кількість пристроїв у стільнику перевищує норму, одним з найбільш обмежених ресурсів є смуга пропускання. Якщо кількість користувачів перевищує максимальну допустиму, то базова станція просто не в змозі створити активне з'єднання з новим пристроєм через нестачу вільної смуги пропускання. Через це, деякі користувачі можуть знаходитися в стільнику без активного з'єднання з базовою станцією, і перебувати у режимі очікування вільної смуги пропускання, без можливості передачі будь яких даних.

Запропонований у даній роботі спосіб дозволить зменшити кількість активних з'єднань з базовою станцією шляхом передачі трафіку з другорядних пристроїв на головний, який вже буде передавати спільний трафік на базову станцію. Таким чином, головний пристрій акумулює дані від другорядних пристроїв до моменту появи активного з'єднання. Коли з'єднання з базовою станцією встановлене, головний пристрій групи передає всі зібрані дані з другорядних пристроїв, включаючи, також, власні дані.

Для того щоб задовольнити користувацькі потреби, потрібно використати вже значно менше активних підключень до базової станції. Це досягається за рахунок відсутності з'єднання з базовою станцією у другорядних пристроїв, через що, значно зменшується кількість необхідних активних підключень до базової станції. Чим більше пристроїв збирається у групу, тим менша кількість підключень до базової станції необхідна для задоволення QoS.

У результаті, даний спосіб дозволяє покращити QoS за рахунок зменшення необхідної кількості активних підключень до базової станції, а також дозволяє надати доступ до мережі набагато більшій кількості користувачів.

### 3.2.2. Ефективніше використання активних з'єднань

Даний спосіб збільшить навантаження на головний пристрій групи, адже весь трафік групи буде передаватися через нього. Це може дещо сповільнити передачу даних, враховуючи затримки на передачу від другорядного пристрою до головного,

а потім від головного пристрою до базової станції. Проте, технологія 4G (LTE) підтримує передачу даних на швидкості, в середньому, до 20 Mbit/s. Трафік середньостатистичного користувача значно менший за вищевказаний показник, а отже, і пропускна здатність головного пристрою буде задовольняти потреби переважної більшості користувачів.

Таким чином, пропускної здатності головного пристрою групи достатньо для забезпечення допустимих затримок передачі даних, навіть враховуючи, що передається не тільки трафік головного пристрою, а й другорядних пристроїв. А якщо взяти до уваги те, що пропускна здатність каналу буде використовуватися більш повно, то можна стверджувати, що з'єднання використовується ефективніше.

Варто також взяти до уваги проблему енергетичних хвостів. Внаслідок зміни станів стільникового зв'язку, які керуються таймерами, деякі схеми доступу до мережі, забезпечують поганий користувацький досвід роботи для інтерактивного трафіку, і високе споживання акумулятора. Така ситуація можлива, якщо доступ до мережі відбувається незадовго після того, як модуль перейшов у стан низької потужності. У підсумку, пристрій може витратити сотні мілісекунд на передачу даних, а інший час просто бездіятиме, перебуваючи в режимі високої потужності. Найгірший сценарій можливий, якщо пристрій переходить в режим низької витрати енергії, щоб прокинутися знову всього через кілька сотень мілісекунд, що призведе до постійних затримок передачі даних, та значного споживання акумулятора пристрою.

Кожна радіопередача, якою б малою вона не була, змушує переходити у стан високої потужності. Потім, після передачі, радіостанція залишатиметься у такому потужному стані, поки не закінчиться термін дії бездіяльності. Фактичний розмір даних, що передаються, не впливає на таймер. Далі, пристрою, можливо, доведеться також пройти ще кілька проміжних станів, перш ніж він зможе повернутися в режим очікування.

"Енергетичні хвости" створюються переходами стану, що керуються таймером, та роблять періодичні передачі дуже неефективним шаблоном доступу до мережі в

мобільних мережах. Як наслідок, спочатку отримуємо затримку переходу стану, щоб перейти в активний стан, потім відбувається передача даних, а далі радіоприймач працює в режимі простою, витрачаючи потужність, поки всі таймери не спрацюють, і пристрій не зможе повернутися в стан низької потужності.

У запропонованому способі лише головний пристрій групи матиме з'єднання з базовою станцією, відповідно, лише головний пристрій групи буде керуватися переходами стану RRC машини. За рахунок того, що дані з другорядних пристроїв передаються на головний пристрій, кількість простою радіомодуля головного пристрою зменшується, що вказує на більш ефективне використання стільникового з'єднання.

### 3.2.3. Збільшення загальної пропускної здатності мережі

Якщо кількість пристроїв перевищує максимальне допустиме, то базова станція не в змозі виділяти ресурси, та смугу пропускання, для з'єднання нових користувачів. Через це, деякі користувачі можуть перебувати у стані очікування на з'єднання, при цьому не маючи ніякого доступу до мережі. На таких пристроях буде накопичуватися трафік, поки з'єднання не буде встановлене, і почнеться передача усіх накопичених даних.

За рахунок групування пристроїв, збільшується максимальна допустима ємність мережі, тобто більше пристроїв одночасно можуть передавати дані. Хоча другорядні пристрої не будуть мати підключення до базової станції, вони передаватимуть усі свої дані на головний пристрій групи, який вже передаватиме ці дані на базову станцію. Таким чином, дані на другорядних пристроях не будуть накопичуватися, а будуть одразу передаватися через головний пристрій на базову станцію. Відповідно, збільшиться і загальна пропускна здатність мережі, адже більше користувачів одночасно матимуть змогу передавати дані.

### 3.2.4. Адаптація до навантаження мережі

Багато параметрів запропонованого способу можуть змінюватися, та адаптуватися під фактичне навантаження мережі. Це дозволяє підлаштовуватися

під різні ситуації та використовувати тактики з найбільш вигідними параметрами для максимального збільшення ефективності роботи мережі.

Змінюючи кількість другорядних пристроїв у групі, можна регулювати загальну ємність мережі. При цьому, якщо збільшувати кількість пристроїв у групі, то зростатиме загальна кількість користувачів у мережі, що можуть одночасно передавати дані, проте зменшуватиметься швидкість передачі даних для пристроїв групи, адже збільшиться загальний трафік, що проходить через головний пристрій групи. Якщо ж зменшувати кількість другорядних пристроїв у групі, то дані будуть передаватися швидше, за рахунок меншого навантаження на головний пристрій групи.

Збільшувати кількість пристроїв у групі можна, якщо для нових користувачів не вистачає вільного підключення до базової станції, а також немає вільного місця у існуючих групах. У такому випадку, пристрій можна приєднати до вже існуючої групи, збільшивши кількість пристроїв у групі. Це може дещо сповільнити передачу даних для вже існуючих користувачів групи, проте дозволить підтримувати більшу кількість пристроїв, що можуть передавати дані без з'єднання з базовою станцією.

Зменшувати кількість пристроїв у групі можна, якщо поточна кількість користувачів у групі є надлишковою. Тобто, якщо є можливість розподілити користувачів на менші групи, або перерозподілити пристрої у вже існуючих групах, для збільшення швидкості передачі даних.

Таким чином, якщо перевантаження мінімальне, то можна створювати групи по 2 пристрої, де всього один пристрій буде другорядним. Це мінімальна кількість пристроїв у групі, відповідно, забезпечується найбільша швидкість передачі даних, у порівнянні з більшими групами. Якщо ж перевантаження настільки велике, що групи по 2 пристрої не надають достатнього приросту у якості обслуговування, то можна залучати до групи по 2 і більше пристрої. Таким чином, швидкість передачі даних для окремо взятих пристроїв буде менша, ніж в групах по 2 пристрої, проте, більша кількість пристроїв матимуть змогу передавати дані, через що, загальна пропускна здатність мережі підвищиться.

Інший параметр, який можна динамічно змінювати – це технологія передачі. Якщо щільність головних пристроїв настільки висока, що сигнали від них створюють перешкоди один одному, може погіршитися зв'язок головного пристрою зі своїми другорядними пристроями. Це становить небезпеку погіршення якості обслуговування другорядних пристроїв, що може призвести до втрати сигналу чи значних затримок у передачі даних від другорядного пристрою на головний. Для того, щоб зменшити інтерференцію між головними пристроями, можна використовувати різні технології передачі даних для різних головних пристроїв. Таким чином, комбінуючи Bluetooth, WiFi 2.4 та WiFi 5 можна створити структуру мережі, яка буде мати мінімально можливі накладання сигналів від головних пристроїв. Це дозволить підтримувати більшу кількість головних пристроїв на одиницю простору, а отже, і більше другорядних пристроїв зможуть мати доступ до мережі.

Головним пристроєм групи може бути будь який пристрій, який обладнаний модулем передачі даних, який може слугувати як приймач. Наприклад, у більшості сучасних смартфонів є режим точки доступу, який дозволяє смартфону функціонувати як повноцінна точка доступу WiFi. Враховуючи, що більшість сучасних смартфонів мають вищевказаний модуль, можна вважати, що головний пристрій у групі може змінюватися з часом, враховуючи параметри всіх пристроїв у групі. Таким чином, головний пристрій може періодично мінятися, нормалізуючи використання трафіку та заряду акумулятора для всіх пристроїв групи. Також, можливий варіант, коли група користувачів спеціально виділяє один головний пристрій, який не буде змінюватися з часом. Це може бути корисно, якщо є пристрій з необмеженою кількістю трафіку, таким чином, зі сторони оператора мобільних послуг, не зніматиметься додаткова плата за користування понаднормовим трафіком. А якщо підключити обраний головний пристрій до додаткового джерела живлення, такого як, наприклад, портативна батарея, то головний пристрій матиме додатковий ресурс батареї на довший період часу.

### 3.2.5. Відсутність потреби у модифікації існуючого обладнання операторів

Заміна обладнання, чи оновлення модулів зв'язку, таких як базові станції, потребує значних капіталовкладень, тому оператори мобільного зв'язку стараються мінімізувати випадки, коли потрібно здійснювати маніпуляції з обладнанням. Запропонований спосіб не потребує ніякої модифікації у існуючому обладнанні операторів мобільного зв'язку, через що, може бути впроваджений у інфраструктуру будь якого оператора, незалежно від його обладнання. Це надає гнучкість у використанні запропонованого способу та може сприяти його поширенню, адже даний спосіб може використовуватися у різних кутках світу та працювати з різними мобільними пристроями, а також, із різним обладнанням оператора.

## 3.3. Недоліки способу та методи їх вирішення

### 3.3.1. Збільшене споживання енергії головним пристроєм

Модуль радіозв'язку мобільного пристрою відноситься до елементів, які споживають найбільше заряду акумулятора. Якщо казати точно, то радіопередавач є другим елементом в смартфоні по споживанню енергії. На першому місці знаходиться екран, а саме його підсвітка. Саме екран споживає найбільше заряду батареї, проте тільки у ввімкненому стані. Проте, більшість часу роботи смартфона екран знаходиться вимкнений. Натомість, радіомодуль постійно увімкнений, але може знаходитися у станах активного та зниженого споживання енергії. Тому, час активної роботи радіомодулю є дуже важливим фактором для енергоефективності всього мобільного пристрою.

Запропонований спосіб дозволяє економити заряд батареї другорядних пристроїв, адже модуль стільникового зв'язку споживає значно більше енергії ніж модуль WiFi. За рахунок того, що вся передача даних у другорядних пристроях відбувається без участі стільникового радіомодуля, то і заряду батареї витрачається менше. Також, враховуючи, що WiFi технологія працює без машини станів, такої

яка присутня у стільниковому зв'язку, то на перехід WiFi модуля з активного стану у стан збереження енергії потрібно значно менше часу. Отже, і час простою у активному стані значно зменшується для другорядних пристроїв.

Проте, споживання заряду батареї головного пристрою значно збільшиться, за рахунок того, що модуль стільникового зв'язку більший час буде знаходитися у активному стані. Дані будуть поступати не тільки від програм головного пристрою, але і від другорядних пристроїв, тому модулю зв'язку потрібно буде частіше передавати дані.

Іншим модулем, який провокуватиме значне споживання енергії є точка доступу WiFi головного пристрою. Через те, що головний пристрій буде не тільки мати зв'язок із базовою станцією, а й працювати у режимі точки доступу, передаючи та приймаючи дані по WiFi, витрати заряду батареї значно зростуть.

Для вирішення цієї проблеми користувачі можуть використовувати портативні зарядні пристрої, наприклад, у вигляді додаткової зовнішньої батареї. Головний пристрій можна підключити до зовнішньої батареї, що дозволить значно подовжити час роботи головного пристрою.

### 3.3.2. Затримки передачі через головний пристрій

У запропонованому способі передача даних з другорядних пристроїв відбувається через посередника – головного пристрою групи. Після того, як головний пристрій прийняв дані з другорядного пристрою, почнеться передача цих даних від головного пристрою на базову станцію. І навпаки, після того, як головний пристрій отримав дані для другорядного пристрою, він пересилатиме ці дані шляхом WiFi чи Bluetooth з'єднання на другорядний пристрій.

Пересилання даних через головний пристрій групи додає деякі затримки, проте швидкість передачі даних по WiFi технології є досить швидкою, щоб ці затримки були незначними, тому, в більшості випадків, вони будуть задовольняти потреби користувача щодо часу доставки даних.

### 3.3.3. Інтерференція

Зі зростанням кількості головних пристроїв, може виникати інтерференція. Інтерференція – це явище накладання сигналів на подібних смугах частот, які перетинаються у просторі. У результаті інтерференції, сигнал може пошкодитися або зовсім загаснути.

Перешкоди WiFi мережі можуть породжувати наступні проблеми для користувачів:

- низький рівень сигналу, навіть якщо пристрій знаходиться поблизу точки доступу WiFi;
- повільніша передача даних;
- неможливість приєднатися до точки доступу WiFi або Bluetooth, навіть коли пристрій знаходиться поруч з передавачем;
- періодично переривається з'єднання.

Щоб уникнути інтерференції, можна розташовувати головні пристрої на достатній відстані один від одного, щоб сигнали не перекривали один одного, і відповідно, не виникала інтерференція. Цього можна досягти, якщо у режимі реального часу відслідковувати кількість сусідніх точок доступу, та потужність їх сигналу і адаптувати структуру мережі, враховуючи можливі перешкоди сигналу.

Також, щоб збільшити щільність головних пристроїв, можна комбінувати технології WiFi 2.4 ГГц та WiFi 5 ГГц, адже їх сигнали не створюють перешкод один одному. Найпростішою схемою розташування є позиціонування головних пристроїв у вигляді шахматної дошки, де чорні клітинки відповідають одній технології, а білі клітинки - іншій. Проте, радіус дії у цих двох технологій відрізняється, тому краще підлаштовувати структуру мережі, та місцезоташування головних пристроїв під умови, що наявні у конкретній мережі в режимі реального часу.

При цьому, подібним чином можна також комбінувати технології Bluetooth та WiFi 5 ГГц. Ці дві технології працюють на різних частотах, а отже, не створюють перешкод один одному. Натомість, не можна комбінувати WiFi 2.4 ГГц із Bluetooth, адже їх сигнали створюватимуть перешкоди один одному.

### 3.3.4. Одночасна підтримка всього 2х другорядних пристроїв

При дослідженні роботи мобільного пристрою у режимі точки доступу WiFi було виявлено, що всього два пристрої можуть одночасно обмінюватися даними з головним пристроєм. Таке обмеження присутнє на телефонах, що працюють на операційній системі Android версії 11. Одинадцята версія ОС Android є останньою доступною на даний момент, тому при дослідженні враховувалася саме ця версія, адже вона буде актуальною ще декілька років поспіль.

Якщо у групі більше двох другорядних пристроїв, то деяким пристроям прийдеться очікувати на звільнення каналу WiFi, щоб передати дані. Таким чином, якщо два другорядні пристрої вже отримали активне з'єднання, і обмінюються даними з головним пристроєм, інші другорядні пристрої повинні очікувати на звільнення каналу, і вже потім вони матимуть змогу передавати дані на головний пристрій. При цьому, враховуючи що WiFi технологія мінімізує таке явище, як енергетичні хвости, а другорядним пристроям не потрібно щоразу здійснювати перепідключення до точки доступу WiFi головного пристрою, перемикання каналів між другорядними пристроями відбувається досить швидко, і не створює значних затримок для кінцевого користувача.

### 3.3.5. Мобільність користувачів

Мобільність користувачів є одною з головних перешкод використання запропонованого методу. Враховуючи, що дальність дії мобільної точки доступу дуже невелика, а підключення до нової точки доступу займає багато часу, в середньому 10 секунд, то можна сказати, що запропонований спосіб передачі даних не підходить для високомобільних користувачів. Таким чином, якщо користувач постійно рухається, то він не матиме змоги у повній мірі отримати користь від запропонованого способу, адже потрібно буде постійно перепідключатися до різних головних пристроїв, що займає багато часу.

У випадку, якщо користувач дуже активно переміщується, можна вважати, що його дані не можна розвантажити запропонованим способом. Натомість, можна позначити такий пристрій як інертний, тобто такий, що не буде підключатися до

головного пристрою, та не буде сам ставати головним пристроєм. У результаті, за рахунок зменшення навантаження на базову станцію, а отже, і зменшення активних підключень до базової станції, для інертних користувачів ресурсів базової станції може бути достатньо, і вони можуть передавати трафік звичайним способом, обмінюючись даними напряму з базовою станцією. Після того, як користувач довгий час буде знаходитися на певній обмеженій ділянці, можна вважати що він може приймати участь у розвантаженні і переводити його в режим, який підтримує запропонований у даній роботі спосіб передачі даних. Позначати пристрої як інертні потрібно для того, щоб такі пристрої не очікували на передачу даних через головний пристрій, адже для цього потрібно деякий час перебувати в межах певного головного пристрою, щоб встановити з ним з'єднання та передати дані.

### 3.3.6. Необхідність встановлення ПЗ для користувача

Для впровадження способу, що запропонований у даній роботі, потрібно щоб користувачі завантажили відповідне програмне забезпечення, яке дозволить створювати структуру мережі, яка потрібна для роботи даного способу. З точки зору користувача, встановлювати додатки на свій мобільний пристрій зазвичай є небажаною дією, якщо тільки цей додаток не вирішує якусь проблему чи задачу. Запропонований спосіб дозволить збільшити пропускну здатність мережі, і, відповідно, дозволить користувачам швидше обмінюватися даними, якщо мережа перевантажена. Таким чином, користувачеві потрібно пояснити мету та результат роботи додатку, щоб він захотів його встановити собі на мобільний пристрій. За рахунок більшого покриття мережі пристроями, що підтримують даний спосіб, можна буде розвантажити більшу кількість трафіку.

## Висновки до розділу

Запропоновано спосіб передачі даних, який об'єднує мобільні пристрої у групи. Тільки один пристрій з групи, який називається головним, має підключення з базовою станцією. Усі інші пристрої будуть передавати дані на головний пристрій групи, використовуючи технології WiFi чи Bluetooth. Головний пристрій, у свою чергу, передає ці дані на базову станцію.

Запропонований спосіб допоможе суттєво зменшити кількість активних з'єднань з базовою станцією мобільного зв'язку, а також дозволяє більш повно використовувати активні з'єднання, що сумарно дозволяє ефективніше використовувати мобільний зв'язок у мережах з високим навантаженням.

#### 4. ТЕСТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАПРОПОНОВАНОГО СПОСОБУ

Для тестування запропонованого способу була створена програмна модель, яка симулює роботу мережі: поведінку базової станції та кінцевих користувачів. Базова станція обробляє запити від мобільних пристроїв, та керує їхніми переходами RRC станів. Кінцеві пристрої користувачів слухають керування станами, якими керує базова станція, та генерують випадкові дані для передачі, у розмірі від 1 кілобайту до 100 мегабайт.

Якщо пристрій має дані для передачі, то базова станція перевіряє, чи можна для цього користувача виділити необхідні ресурси та створити з'єднання. Якщо ресурсів вистачає, то базова станція виділяє смугу пропускання для пристрою, та переводить пристрій у активний режим (RRC Active). Активний режим переводить радіомодуль пристрою у стан високого споживання, у якому пристрій може почати передачу даних. Після того, як передача даних закінчена, активується лічильник бездіяльності. Даний лічильник потрібен, щоб переводити радіомодуль пристрою у стан пониженого споживання енергії, тобто RRC Idle. Щоб вийти зі стану RRC Idle пристрій повинен спровокувати передачу даних, і дочекатися встановлення з'єднання з базовою станцією, для переходу у активний режим.

Джерелом даних у мережі виступають кінцеві користувачі, тобто пристрої, які випадковим чином щосекунди генерують дані у розмірі від 1 кілобайту до 100 мегабайт. Можливий також варіант, коли ніяких нових даних не згенеровано. Повідомлення розмірами до одного мегабайту виникають із заданою ймовірністю, симулюючи повідомлення від поштових програм та месенджерів. Повідомлення розміром від одного мегабайту виникають рідше, симулюючи передачу фото, відео або аудіо контенту.

Побудована програмна модель містить перелік параметрів для встановлення різних режимів роботи мережі, та симуляції різних типів поведінки користувачів:

- 1) ймовірність виникнення нових даних розміром від 1 кілобайту до 1 мегабайту;

- 2) ймовірність виникнення нових даних розміром від 1 мегабайту до 100 мегабайт;
- 3) швидкість передачі даних через стільникову мережу;
- 4) швидкість передачі даних по WiFi (враховується саме швидкість обміну даними між головним пристроєм і другорядним);
- 5) загальна кількість пристроїв;
- 6) максимальна кількість пристроїв що може одночасно обслуговуватися базовою станцією;
- 7) кількість головних пристроїв;
- 8) ймовірність відмови WiFi з'єднання між пристроями (для симуляції переміщення користувачів);
- 9) час, який необхідний для встановлення з'єднання по WiFi між пристроями;
- 10) кількість одночасних підключень до головного пристрою;
- 11) кількість максимально можливих підключень до головного пристрою;
- 12) час простою для переходу зі стану RRC Active у стан RRC Idle;
- 13) час роботи мережі.

Комбінуючи вищевказані показники можна симулювати роботу мережі в різних умовах, досліджувати ефективність роботи запропонованого алгоритму та порівнювати показники з існуючим способом передачі даних.

#### 4.1. Отримані результати

Для проведення аналізу запропонованого способу передачі даних у високонавантажених мережах потрібно оцінити роботу мережі у різних ситуаціях, під різним навантаженням, та з різною поведінкою користувачів. Для цього, розроблена програмна модель надає можливість змінювати перелік параметрів, за допомогою яких можна проаналізувати роботу мережі у різних станах.

Аналіз роботи мережі буде проводитися на основі зміни кожного з параметрів. Враховуватимуться три значення кожного параметру:

- мінімальне;
- середнє;

- максимальне.

Таким чином, наглядно показана робота мережі у граничних випадках, та результат при середньостатистичному значенні.

#### 4.1.1. Середньостатистичні значення

У даному розділі проаналізовані середні показники кожного з параметрів, та пояснено, чому саме такі значення параметрів були обрані для аналізу. У подальших тестах буде змінюватися один з параметрів, та перевірятися робота мережі на граничних значеннях окремого параметру.

У цьому розділі, та у всіх подальших будуть використовуватися наступні значення параметрів:

1. Кількість пристроїв – 70000 шт. Це максимальна кількість сидячих місць, яку вміщує у себе НСК «Олімпійський» у місті Києві.
2. Максимальна підтримувана кількість пристроїв у стані RRC Active. Даний показник встановлено у значення 30000 пристроїв.
3. Час неактивності до переходу в RRC Idle становить 11 секунд [30].
4. Час з'єднання WiFi – 10 секунд.
5. Максимальна кількість головних пристроїв – 20000. Загальна площа спортивного комплексу «Олімпійський» у місті Києві складає 56400 метрів. Якщо розташовувати пристрої так, щоб інтерференція не заважала повноцінному обміну даними між пристроями, то можна розташовувати по одній 2.4 ГГц точці доступу кожні 8 квадратних метрів, а 5 ГГц точки доступу кожні 4 квадратні метри. Відповідно, загальна сума складає 21150. Проте, це значення дещо перебільшує максимально потрібне, для ефективної роботи способу, значення, при вищевказаних умовах. Тому, обране значення складає 20000 пристроїв.
6. Час перевірки (час роботи мережі) – 1 година.
7. Кількість ітерацій – 10. Збір статистики проводився на 10 наборах різних даних. Це означає, що симулювання мережі відбувалося 10 разів, з різними генераторами випадкових чисел для кожного вимірювання.
8. Швидкість передачі даних по LTE у середньому складає 10 Мб/с.

9. Швидкість передачі даних по WiFi у середньому складає 5 Мб/с.
10. Кількість можливих підключених пристроїв до головного пристрою – 2.
11. Кількість одночасних підключень до головного пристрою – 2.
12. Ймовірність перепідключення до головного пристрою по WiFi (симуляція руху користувачів) – 0.02 щосекундно.
13. Ймовірність виникнення нового трафіку – 0.2 щосекунди. У середньому, це складає 12 повідомлень кожену хвилину.
14. Ймовірність виникнення великих даних – 0.02 щосекунди.

Отримані результати представлені на рисунку 4.1. Синім на графіку позначено результати роботи існуючого способу, оранжевим – запропонованого. На графіку представлено порівняння роботи двох способів передачі даних. Результати подані у вигляді відсоткового співвідношення та представлені у вигляді графіку, для наглядності.

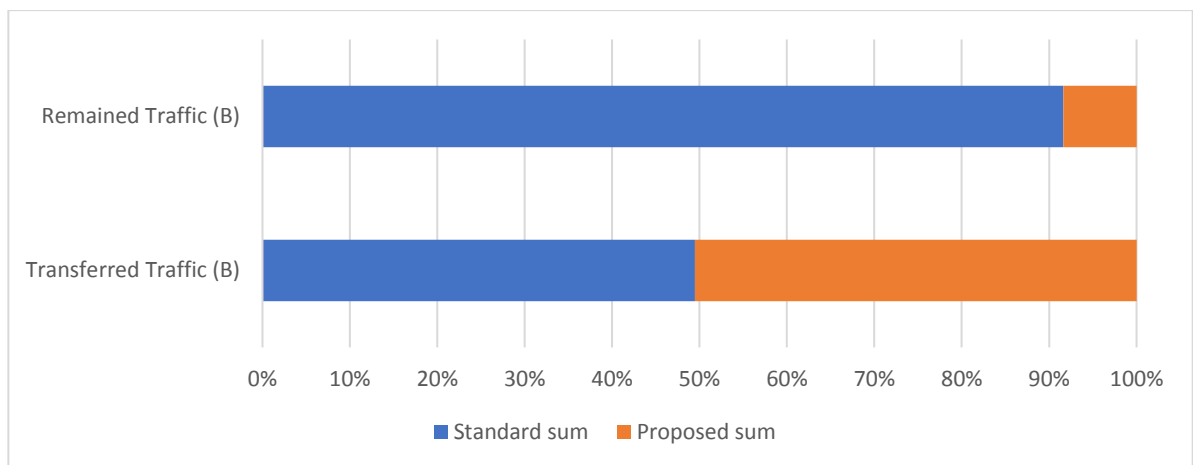


Рисунок 4.1 – Порівняння роботи існуючого способу (синій) та запропонованого (оранжевий)

Для порівняння роботи двох способів особливо важливими є два показники:

1. Загальний трафік - обсяг інформації, переданої через мережу за певний період часу. Вимірюється у байтах.
2. Надлишковий трафік – обсяг інформації, яку мережа не змогла передати. Даний параметр означає кількість даних, які не передалися кожної секунди.

Фактично, чим більше значення надлишкового трафіку, тим більша затримка передачі даних для кінцевих користувачів. Вимірюється у байтах.

При середньостатистичних параметрах мережі отримано незначний приріст загального переданого трафіку, який складає 2%, або 40 242 440 738 816 байт. Приріст складає всього 2% адже за час тестування, що складає 1 годину, пристрої, у існуючому способі, переходили у стан RRC Idle, що давало змогу іншим пристроям перейти у стан RRC Active та передати усі, накопичені за довгий час неактивності, дані. Проте, перехід у стан RRC Idle відбувався не часто, за рахунок того, що період переходу складає 11 секунд, а обмін даними відбувався, у середньому, кожні 10 секунд. Це привело до того, що пристроям зі станом RRC Idle потрібно було очікувати значний час для переходу у стан RRC Active, щоб мати змогу передати накопичені дані. У результаті, пристрої, які отримали канал зв'язку з базовою станцією, утримували його значний період часу, що не давало можливості іншим пристроям передавати свої дані.

З іншого боку, запропонований спосіб використовує активні з'єднання більш ефективно, за рахунок того, що дані поступають ще й від другорядних пристроїв. Це означає, що стан бездіяльності у пристроїв з активним з'єднанням скорочується, тим самим затримки передачі даних для другорядних пристроїв значно зменшуються. У запропонованому способі, зменшення надлишкових даних, у порівнянні з існуючим способом, складає 91 відсоток. Для кінцевих користувачів це означає, що затримка передачі даних, у середньому, значно менша, порівнюючи з існуючим способом.

#### 4.1.2. Кількість головних пристроїв

Одним з основних недоліків запропонованого способу передачі даних є інтерференція. При великому скупченні головних пристроїв, які являють собою мобільні точки доступу WiFi, їх сигнали можуть конфліктувати один з одним, створюючи інтерференцію.

Для того, щоб уникнути інтерференції, потрібно розташовувати головні пристрої на достатній відстані один від одного так, щоб їх сигнали не

перешкождали один одному. Цього можна досягнути, якщо в режимі реального часу аналізувати пристрої, що знаходяться поруч, та на основі цих даних вирішувати в якому місці розміщувати головні пристрої.

Для тестування роботи мережі можна явно вказувати кількість головних пристроїв, що буде створена при симуляції мережі. Таким чином, знаючи загальну площу обслуговування мережі, можна вирахувати середню відстань між головними пристроями, а далі і їх кількість, та перевірити роботу мережі із заданими даними.

При аналізі розглядалися два значення кількості головних пристроїв:

1. 10000 головних пристроїв. При цьому, для більшого охоплення користувачів, до головного пристрою приєднано по 4 другорядних пристроїв.
2. 30000 головних пристроїв, а кількість другорядних пристроїв – по 2 на кожен головний пристрій.

Якщо кількість пристроїв складає 10000, то доцільно об'єднувати у групи по 5 пристроїв, де один пристрій є головний, а інші 4 – другорядні. Таким чином, охоплюється більша кількість користувачів, і робота способу є більш ефективною. Як показано на рисунку 4.2, результати роботи мережі вказують на те, що кількість надлишкових даних, які не були передані, скоротилася на 91%.

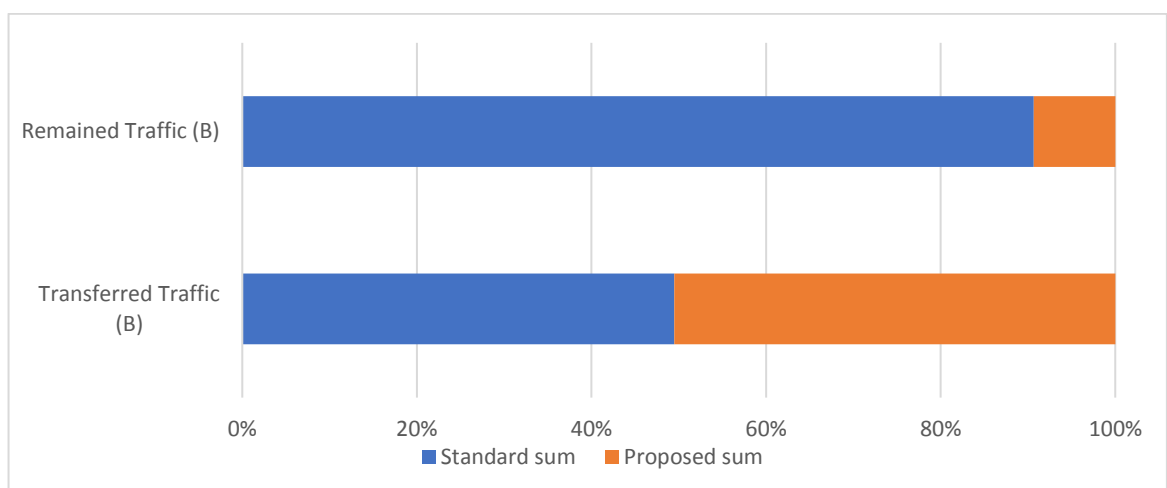


Рисунок 4.2 – Порівняння роботи існуючого способу (синій) та запропонованого (оранжевий), якщо кількість головних пристроїв складає 10000, а кількість з'єднань з головним пристроєм дорівнює 4.

Якщо кількість головних пристроїв складає 30000, то обсяг надлишкового, та переданого трафіку є схожим, із середнім показником, коли кількість головних пристроїв складає 20000, як показано на рисунку 4.3. Проте, кількість активних з'єднань зменшилася на 22 відсотки, і в середньому, склала 23296, при 29985 для стандартного способу, як показано на рисунку 4.4. Це означає, що мережа додатково може обробити, у середньому, ще 6689 головних пристроїв, не погіршуючи показники передачі даних для існуючих пристроїв, тобто, не створюючи перевантаження мережі.

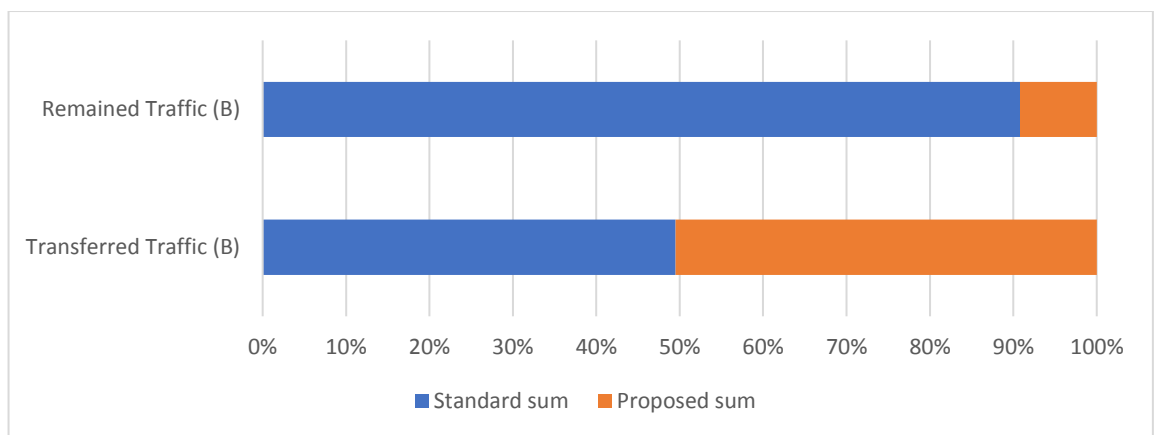


Рисунок 4.3 – Порівняння роботи існуючого способу (синій) та запропонованого (оранжевий), якщо кількість головних пристроїв складає 30000.

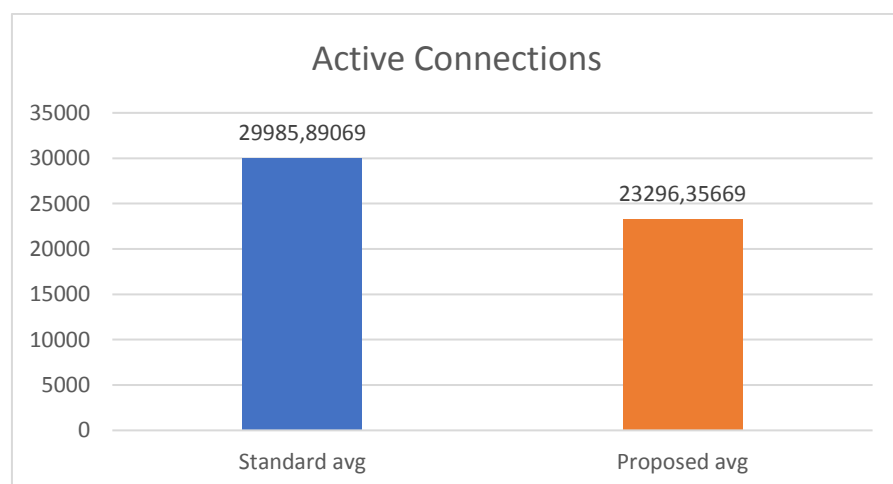


Рисунок 4.4 – Порівняння кількості активних з'єднань з базовою станцією для стандартного (синій) та запропонованого (оранжевий) способів, якщо кількість головних пристроїв складає 30000.

### 4.1.3. Швидкість передачі стільникових даних

Швидкість передачі даних відіграє ключову роль для формування користувацького досвіду. В залежності від багатьох параметрів навколишнього середовища, а також потужності базової станції, швидкість передачі даних по стільниковому каналу зв'язку може кардинально змінюватися. Тестування роботи мережі проводилося на двох граничних значеннях стандарту LTE: мінімальне значення – 1 Мб/с, максимальне значення – 100 Мб/с.

Якщо швидкість передачі даних у мережі LTE складає 1 Мб/с, то ефективність запропонованого способу значно погіршується. На рисунку 4.5 представлені результати роботи мережі при швидкості стільникового зв'язку 1 Мб/с. При таких умовах, запропонований спосіб має гіршу пропускну здатність, та створює більші затримки, у порівнянні зі стандартним способом передачі даних. Це обумовлено тим, що дані з другорядних пристроїв накопичуються на головних пристроях, які не мають змоги передати всі накопичені дані, у результаті чого, дані накопичуються на головних пристроях. Отже, при низькій швидкості стільникового з'єднання ефективність запропонованого способу є гіршою, ніж у звичайному способі.

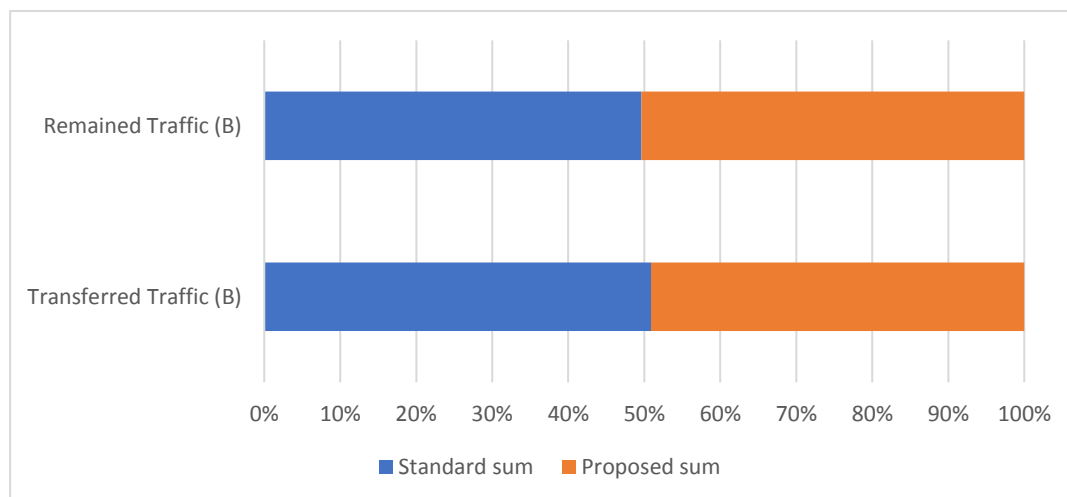


Рисунок 4.5 – Порівняння роботи існуючого способу (синій) та запропонованого (оранжевий), якщо швидкість передачі стільникових даних складає 1 Мб/с.

Якщо швидкість стільникового з'єднання складає 100 Мб/с, то результати роботи мережі є схожі з тими, які були отримані при середніх значеннях (рисунок 4.6). Це обумовлено тим, що швидкість передачі стільникових даних у 20 Мб/с є достатньою для повноцінної обробки групи пристроїв, що складається з одного головного пристрою та двох другорядних. Приріст у швидкості стільникових даних не надає ніяких переваг, адже і середня швидкість повністю задовольняє потреби користувачів.

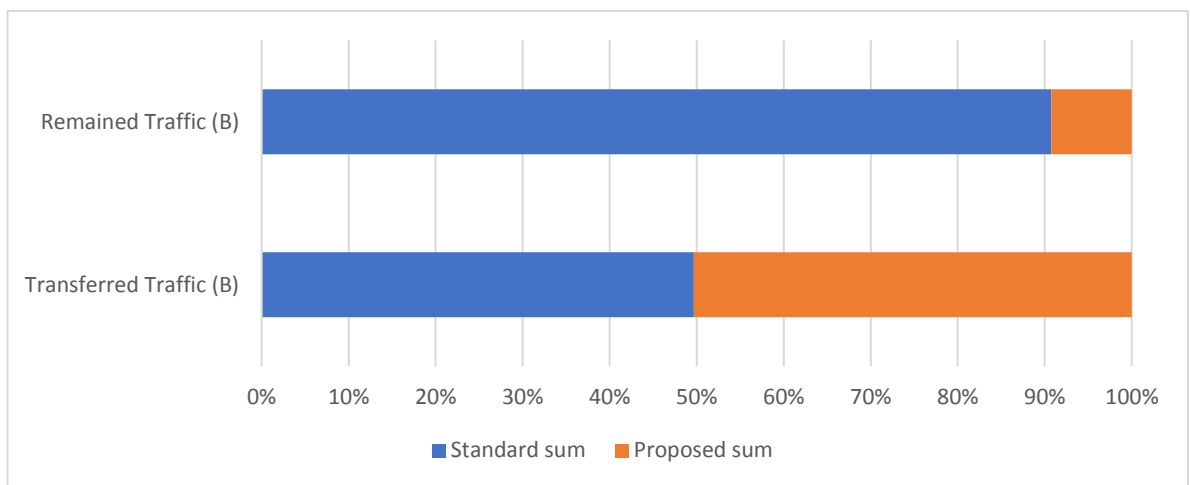


Рисунок 4.5 – Порівняння роботи існуючого способу (синій) та запропонованого (оранжевий), якщо швидкість передачі стільникових даних складає 100 Мб/с.

#### 4.1.4. Швидкість передачі даних по WiFi

Швидкість обміну даними між другорядними пристроями та головним пристроєм відіграє ключову роль у ефективності запропонованого способу. Якщо обмін даними відбувається занадто повільно, то дані будуть передаватися зі значними затримками. Проте, технологія WiFi забезпечує досить високу швидкість передачі даних для забезпечення відсутності значних затримок при передачі даних.

Якщо швидкість передачі даних між головним та другорядним пристроєм складає 1 Мб/с, то запропонований спосіб надає можливість зменшити надлишковий трафік на 78%, у порівнянні зі звичайним способом передачі даних (рисунок 4.6).

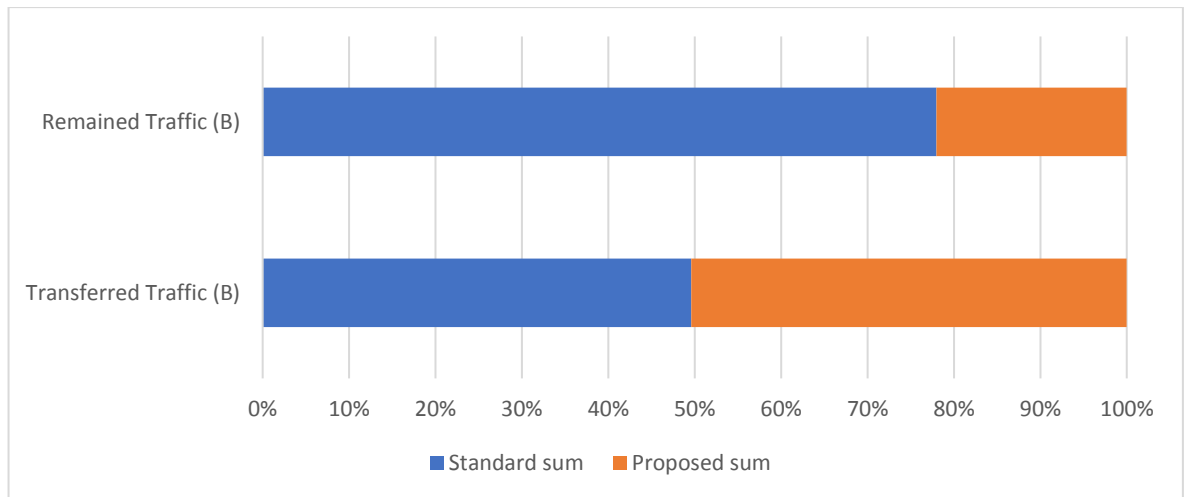


Рисунок 4.6 – Порівняння роботи існуючого способу (синій) та запропонованого (оранжевий), якщо швидкість передачі даних по технології WiFi складає 1 Мб/с.

Якщо припустити, що швидкість передачі даних по WiFi складає 20 Мб/с, то така швидкість буде надлишкова для двох другорядних пристроїв у групі. Тому, щоб скористатися перевагами швидкої передачі даних по WiFi, можна об'єднувати по 8 другорядних пристроїв до головного. Враховуючи високу швидкість передачі даних по WiFi, кожному другорядному пристрою знадобиться менше часу на обмін даними, що дозволить більшій кількості пристроїв передавати свої дані у межах короткого періоду часу. Це дозволяє підтримувати до 8 пристроїв одночасно, без значного збільшення затримки передачі даних від другорядних пристроїв. Як показано на рисунку 4.7, зменшення надлишкового трафіку складає близько 87 відсотків, у той самий час, зменшення кількості активних підключень до базової станції складає 79 відсотків. У числовому вираженні, запропонований спосіб, у середньому, використовує 7768 підключень, у той час, стандартний спосіб – 29985. Це означає, що при використанні запропонованого способу, мережа зможе підключити ще 22217 головних пристроїв, які, у свою чергу, зможуть підключити ще 177736 другорядних пристроїв. Таким чином, чим швидше з'єднання WiFi між головними та другорядними пристроями, тим більшу кількість користувачів може підтримувати мережа.

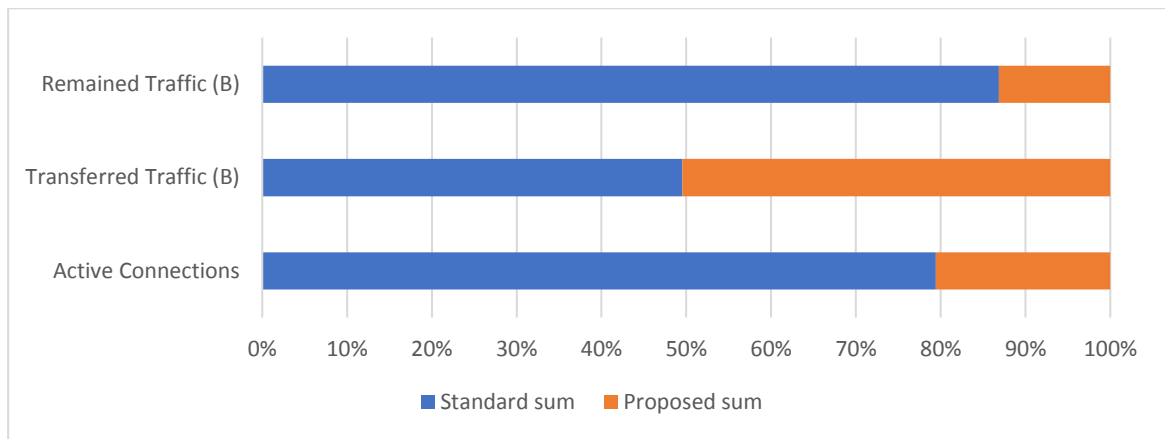


Рисунок 4.7 – Порівняння роботи існуючого способу (синій) та запропонованого (оранжевий), якщо швидкість передачі даних по технології WiFi складає 20 Мб/с, а кількість другорядних пристроїв у групі складає 8 шт.

#### 4.1.5. Ймовірність виникнення трафіку

З кожним роком інформації стає усе більше, більше пам'яті у мобільних пристроях, та більше додатків, що генерують дані. Збільшення трафіку є одним з основних факторів, що змушує операторів мобільного зв'язку модифікувати своє обладнання, та вкладати велику кількість ресурсів на удосконалення мережевої інфраструктури так, щоб справлятися зі зростаючим трафіком.

Для того, щоб продемонструвати роботу запропонованого способу було обрано два значення ймовірності генерації даних випадкового розміру: 0.05, та 0.5. У кількісному значенні це означає, у середньому, 3 та 30 повідомлень щохвилини відповідно.

У випадку, коли для кожного пристрою генерується, у середньому, по 3 повідомлень на хвилину, запропонований спосіб має гіршу пропускну здатність, та більші затримки, у порівнянні зі стандартним (рисунок 4.8). Дана поведінка обумовлена тим, що пристрої у стандартному способі постійно обмінюються активними станами, тому не створюються значні затримки у передачі даних.

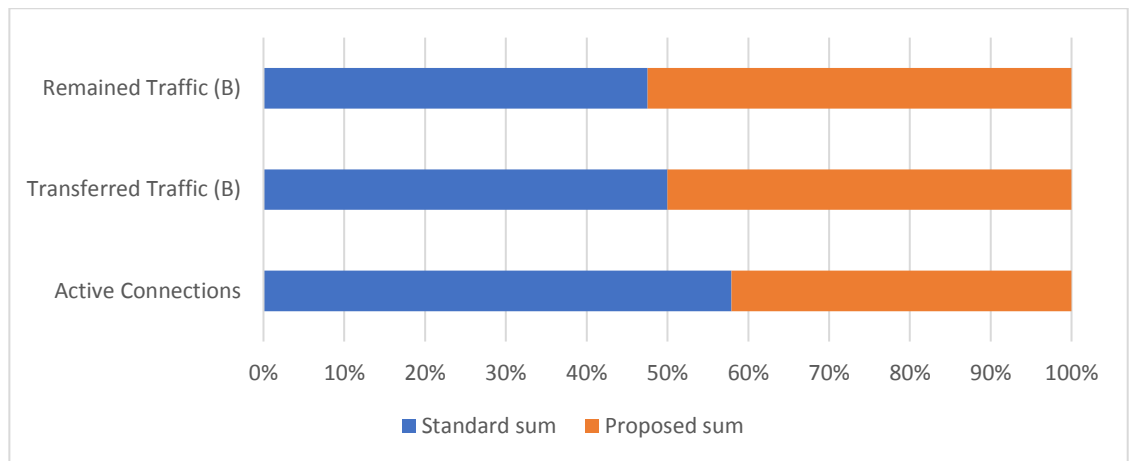


Рисунок 4.8 – Порівняння роботи існуючого способу (синій) та запропонованого (оранжевий), якщо для кожного пристрою, у середньому, генерується 3 повідомлень у хвилину.

З іншого боку, якщо для кожного пристрою генерується, у середньому, по 30 повідомлень на хвилину, то запропонований спосіб має значні переваги, у порівнянні зі стандартним способом передачі даних. Як показано на рисунку 4.9, при використанні запропонованого способу, кількість надлишкового, не переданого трафіку, менше на 99%, а обсяг загального переданого трафіку більше на 67%. Даний приріст обумовлений тим, що у стандартному способі, через збільшену частоту генерації повідомлень, пристрої, що першими отримали активний канал зв'язку, по суті, утримують його впродовж усього часу. Для того, щоб перейти у неактивний стан, та звільнити канал з'єднання, потрібно щоб спрацював таймер неактивності, а це стається тільки після 11 секунд відсутності передачі даних. При збільшеній частоті генерації даних, перехід у стан неактивності є дуже мало ймовірним, через що, пристрої, які не отримали канал зв'язку не мають змоги передати дані, що значно погіршує користувацький досвід.

Натомість, запропонований спосіб значно краще справляється з передачею даних при збільшеній частоті генерації даних. Завдяки тому, що дані з другорядних пристроїв не накопичуються, а передаються через другорядні пристрої, не створюється значна затримка передачі даних. За рахунок того, що другорядні пристрої не потребують активного з'єднання з базовою станцією, мережа може підтримувати більшу кількість пристроїв.

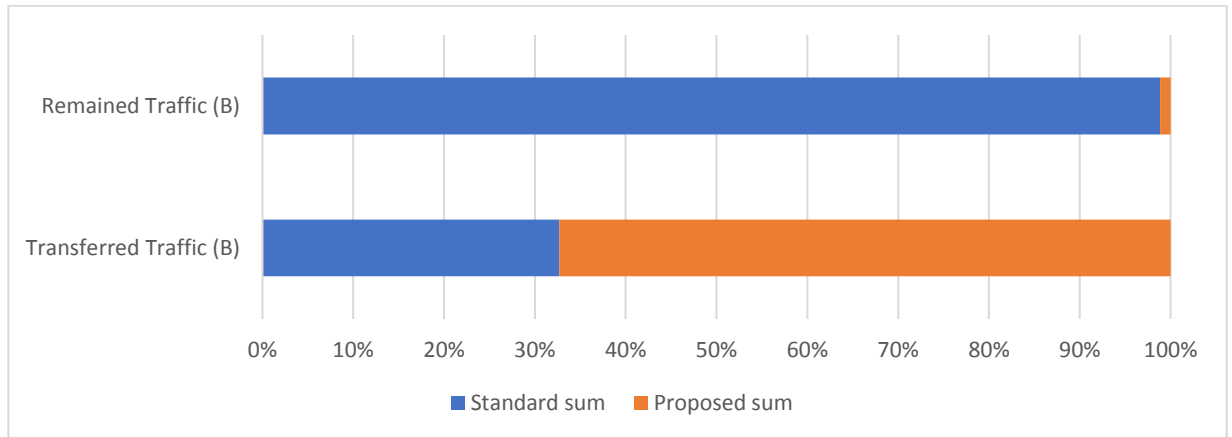


Рисунок 4.9 – Порівняння роботи існуючого способу (синій) та запропонованого (оранжевий), якщо для кожного пристрою, у середньому, генерується 30 повідомлень у хвилину.

#### 4.1.6. Ймовірність перепідключення до головного пристрою

Оператори мобільного зв'язку намагаються створити умови, при яких мобільність користувачів не створюватиме значних проблем у роботі мобільних пристроїв. Користувачі повинні мати можливість безперешкодно переміщуватися, при цьому, якість мобільного зв'язку повинна залишатися на достатньому рівні, щоб забезпечувати потреби користувача. Якщо користувач переміщається з зони дії однієї базової станції в іншу, то керування дзвінком, або передачею даних переходить до тої базової станції, в зону дії якої переходить користувач. При цьому, користувач навіть не помічає цього переходу.

При пересуванні, використовуючи запропонований спосіб, користувачеві, що рухається, потрібно шукати нові з'єднання з головним пристроєм, що знаходиться в зоні доступності. Даний процес є схожим до процесу переміщення користувача у стільниковій мережі. Основна відмінність полягає у тому, що у ролі базової станції виступає головний пристрій.

На рисунку 4.10, та 4.11 представлені результати роботи мережі при різних значеннях ймовірності перепідключення другорядних пристроїв до головного. Для порівняння були взяті наступні значення ймовірності перепідключення головного

пристрою: 0.4, 0.3, 0.2, 0.1, 0.05, 0.02. Також, у порівнянні представлені показники передачі даних стандартного способу, для тих же параметрів мережі.

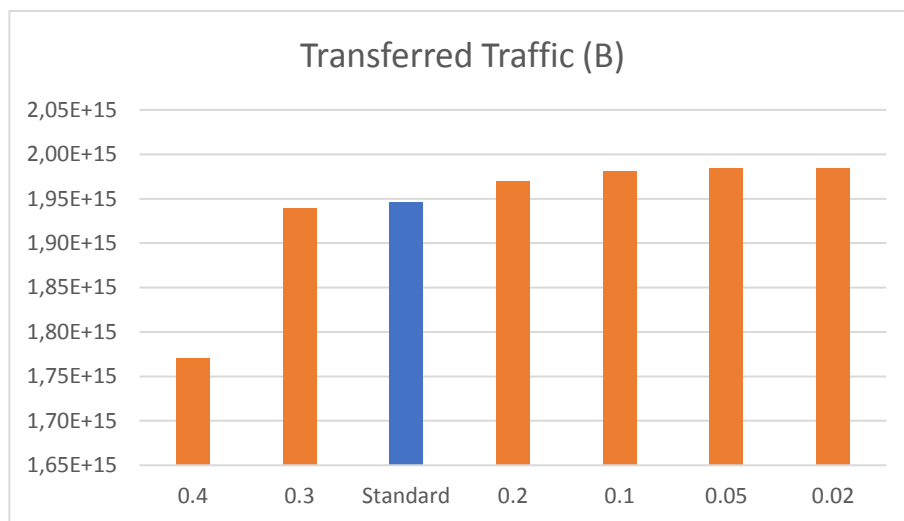


Рисунок 4.10 – Порівняння обсягу переданих даних при різних значеннях ймовірності перепідключення другорядних пристроїв.

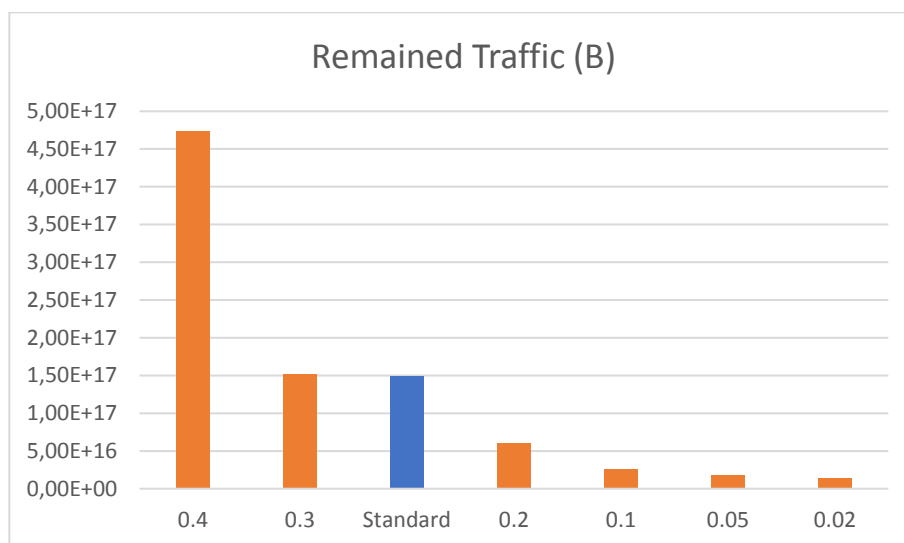


Рисунок 4.11 – Порівняння обсягу надлишкових даних при різних значеннях ймовірності перепідключення другорядних пристроїв.

Якщо користувачі переміщатимуться дуже активно, то зв'язок між головним пристроєм, та другорядними не зможе встановитися, або час з'єднання буде недостатнім для ефективної передачі даних з головного пристрою до другорядного. Тому, зі збільшенням мобільності користувачів, ефективність запропонованого

способу знижується. Як показано на рисунку 4.10 та 4.11, при ймовірності перепідключення 0.3 ефективність запропонованого способу менша ніж у звичайного способу передачі даних. З іншої сторони, якщо ймовірність перепідключення складає 0.2, та нижче, то запропонований спосіб показує кращі показники, ніж стандартний.

## Висновки до розділу

Запропонований спосіб спроможний зменшити кількість активних підключень до базової станції, та, у той же час, зменшити обсяг надлишкових даних, що накопичуються на пристроях кінцевих користувачів через нестачу ресурсів мережі. Найкраща ефективність запропонованого способу досягається у випадку генерації частих, невеликих за обсягом (до 1 Мб) даних, та стабільному довгостроковому з'єднанні по WiFi між головними та другорядними пристроями. З іншої сторони, використання запропонованого способу не є доцільним, якщо користувачі дуже активно переміщуються, так, що період перебування користувача у зоні дії одного головного пристрою менший, ніж час, який потрібний для встановлення з'єднання та обміну даними між пристроями.

## ВИСНОВКИ

Мобільні мережі еволюціонували протягом серії поколінь, кожна з яких пропонувала значні технологічні вдосконалення, порівняно з попередніми поколіннями, але фізичне впровадження цих мереж - це і дорога, і трудомістка робота. Крім того, після розгортання нової мережі, попередні стандарти необхідно підтримувати значний проміжок часу, щоб компенсувати витрати та утримати існуючих клієнтів у мережі.

Сучасна тенденція спрямована на схеми розвантаження, де стільникова мережа здійснює керування підключених користувачів для виявлення сусідів, та управління їх підключенням. Схема маршрутизації використовує переваги близько розташованих сусідів, які використовуються як шлюзи для переадресації даних. Значне використання контекстної інформації, отриманої від кінцевих користувачів, використовується для покращення маршрутизації.

Запропоновано спосіб передачі даних, який об'єднує мобільні пристрої у групи. Тільки один пристрій з групи має підключення з базовою станцією. Усі інші пристрої будуть передавати дані на головний пристрій групи, використовуючи технології WiFi чи Bluetooth. Головний пристрій, у свою чергу, буде передавати ці дані на базову станцію.

Для тестування запропонованого способу створені програмні засоби, що симулює роботу мережі, а саме, поведінку базової станції та кінцевих користувачів. Базова станція обробляє запити від мобільних пристроїв, та керує їхніми переходами RRC станів. Кінцеві пристрої користувачів слухають керування станами, якими керує базова станція, та генерують випадкові дані для передачі, у розмірі від 1 кілобайту до 100 мегабайт. Результати роботи мережі записуються у файл, де показані основні параметри мережі у кожен момент тестування. Далі, ці дані збираються для формування загальної статистики. Загальна статистика представляє собою CSV файл, де вказані основні показники роботи мережі, та їх порівняння, за весь час, та з усіх спроб, які були здійснені під час тестування.

Запропонований спосіб спроможний зменшити кількість активних підключень до базової станції, та, у той же час, зменшити обсяг надлишкових

даних, що накопичуються на пристроях кінцевих користувачів через нестачу ресурсів мережі. Найкраща ефективність запропонованого способу досягається у випадку генерації частих, невеликих за обсягом (до 1 Мб) даних, та стабільному довгостроковому з'єднанні по WiFi між головними та другорядними пристроями. З іншої сторони, використання запропонованого способу не є доцільним, якщо користувачі дуже активно переміщуються, так, що період перебування користувача у зоні дії одного головного пристрою менший, ніж час, який потрібний для встановлення з'єднання та обміну даними між пристроями.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Grigorik I. High Performance Browser Networking: What every web developer should know about networking and web performance / Илья Grigorik., 2013.
2. WiFi Sensor Networks: A study of energy consumption [Електронний ресурс] // 11th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD) Carlos Andres Trasviña Moreno. – 2014. – Режим доступу до ресурсу: [https://www.researchgate.net/publication/271464478\\_WiFi\\_Sensor\\_Networks\\_A\\_study\\_of\\_energy\\_consumption](https://www.researchgate.net/publication/271464478_WiFi_Sensor_Networks_A_study_of_energy_consumption).
3. Profiling Resource Usage for Mobile Applications: A Cross-layer Approach [Електронний ресурс] / [F. Qian, Z. Wang, A. Gerber та ін.]. – 2011. – Режим доступу до ресурсу: [https://web.eecs.umich.edu/~zmao/Papers/aro\\_mobisys11.pdf](https://web.eecs.umich.edu/~zmao/Papers/aro_mobisys11.pdf).
4. Ergen M. Mobile Broadband: including WiMAX and LTE / Mustafa Ergen., 2009. – (Springer, Boston, MA).
5. Chang R. Synthesis of band-limited orthogonal signals for multichannel data transmission / Robert Chang. // The Bell System Technical Journal. – 1966. – №45. – С. 1775 – 1796.
6. Mölleryd B. Decoupling of revenues and traffic - Is there a revenue gap for mobile broadband? / B. Mölleryd, J. Markendahl, Ö. Mäkitalo. – 2010.
7. Dimatteo S. Cellular Traffic Offloading through WiFi Networks / S. Dimatteo, P. Hui, B. Han. – 2011.
8. Tight Coupling Internetworking Between UMTS and WLAN: Challenges, Design Architectures and Simulation Analysis [Електронний ресурс] / [A. Aziz, M. Naufal, N. Armi та ін.]. – 2011. – Режим доступу до ресурсу: [https://www.researchgate.net/publication/228514542\\_Tight\\_Coupling\\_Internetworking\\_Between\\_UMTS\\_and\\_WLAN\\_Challenges\\_Design\\_Architectures\\_and\\_Simulation\\_Analysis](https://www.researchgate.net/publication/228514542_Tight_Coupling_Internetworking_Between_UMTS_and_WLAN_Challenges_Design_Architectures_and_Simulation_Analysis).
9. Mobile Data Offloading: How Much Can WiFi Deliver? [Електронний ресурс] / [K. Lee, I. Rhee, J. Lee та ін.]. – 2012. – Режим доступу до ресурсу: [https://conferences.sigcomm.org/co-next/2010/CoNEXT\\_papers/26-Lee.pdf](https://conferences.sigcomm.org/co-next/2010/CoNEXT_papers/26-Lee.pdf).

10. Measurement-Based Small-Cell Coverage Analysis for Urban Macro-Offload Scenarios [Електронний ресурс] / [P. Fuchjager, I. Gojmerac, H. Fischer та ін.] – Режим доступу до ресурсу: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5956629>.
11. Realistic Indoor Wi-Fi and Femto Deployment Study as the Offloading Solution to LTE Macro Networks [Електронний ресурс] / [L. Hu, C. Coletti, N. Huan та ін.] // 2012 – Режим доступу до ресурсу: [https://vbn.aau.dk/ws/portalfiles/portal/73395939/VTC\\_2012\\_Fall.pdf](https://vbn.aau.dk/ws/portalfiles/portal/73395939/VTC_2012_Fall.pdf).
12. Realistic Indoor Wi-Fi and Femto Deployment Study as the Offloading Solution to LTE Macro Networks [Електронний ресурс] / [L. Hu, C. Coletti, N. Huan та ін.] – Режим доступу до ресурсу: [https://vbn.aau.dk/ws/portalfiles/portal/73395939/VTC\\_2012\\_Fall.pdf](https://vbn.aau.dk/ws/portalfiles/portal/73395939/VTC_2012_Fall.pdf).
13. Gundlach M. Overview of D2D Proximity Services Standardization in 3GPP LTE [Електронний ресурс] / Michael Gundlach. – 2014. – Режим доступу до ресурсу: [https://www.researchgate.net/profile/Michael\\_Gundlach/publication/272086476\\_Overview\\_of\\_D2D\\_Proximity\\_Services\\_Standardization\\_in\\_3GPP\\_LTE/links/54da07a40cf246475820268e/Overview-of-D2D-Proximity-Services-Standardization-in-3GPP-LTE.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Michael_Gundlach/publication/272086476_Overview_of_D2D_Proximity_Services_Standardization_in_3GPP_LTE/links/54da07a40cf246475820268e/Overview-of-D2D-Proximity-Services-Standardization-in-3GPP-LTE.pdf).
14. Seung-Seok K. A mobile peer-to-peer approach for multimedia content sharing using 3G/WLAN dual mode channels [Електронний ресурс] / K. Seung-Seok, M. Mutka – Режим доступу до ресурсу: [https://www.researchgate.net/publication/220098774\\_A\\_mobile\\_peer-to-peer\\_approach\\_for\\_multimedia\\_content\\_sharing\\_using\\_3GWLAN\\_dual\\_mode\\_channels](https://www.researchgate.net/publication/220098774_A_mobile_peer-to-peer_approach_for_multimedia_content_sharing_using_3GWLAN_dual_mode_channels).
15. Leung M. Broadcast-Based Peer-to-Peer Collaborative Video Streaming Among Mobiles [Електронний ресурс] / M. Leung, G. Chan – Режим доступу до ресурсу: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4114808>.
16. Device-to-Device Communication as an Underlay to LTE-Advanced Networks [Електронний ресурс] / [K. Doppler, M. Rinne, C. Wijting та ін.] – Режим

- доступу до ресурсу: [http://wire.cs.nctu.edu.tw/Group\\_Meeting/Hank/Device-to-Device\\_Communication\\_as\\_an\\_Underlay\\_to\\_LTE-Advanced\\_Networks.pdf](http://wire.cs.nctu.edu.tw/Group_Meeting/Hank/Device-to-Device_Communication_as_an_Underlay_to_LTE-Advanced_Networks.pdf).
17. LTE for public safety networks [Електронний ресурс] / [T. Doumi, M. Dolan, S. Tatesh та ін.] – Режим доступу до ресурсу: [https://www.researchgate.net/publication/260670411\\_LTE\\_for\\_public\\_safety\\_networks](https://www.researchgate.net/publication/260670411_LTE_for_public_safety_networks).
  18. Siris V. Enhancing Mobile Data Offloading with Mobility Prediction and Prefetching [Електронний ресурс] / V. Siris, D. Kalyvas – Режим доступу до ресурсу: [http://www2.aueb.gr/users/vsiris/publications/js2\\_MobileDataOffload\\_journal.pdf](http://www2.aueb.gr/users/vsiris/publications/js2_MobileDataOffload_journal.pdf).
  19. Chen B. MobTorrent: A Framework for Mobile Internet Access from Vehicles [Електронний ресурс] / B. Chen, M. Chan – Режим доступу до ресурсу: [https://www.illinois.adsc.com.sg/talks/mobtorrent\\_infocom\\_slides.pdf](https://www.illinois.adsc.com.sg/talks/mobtorrent_infocom_slides.pdf).
  20. Cellular Traffic Offloading through WiFi Networks [Електронний ресурс] / S. Dimatteo, P. Hui, B. Han, V. Li – Режим доступу до ресурсу: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6076617>.
  21. Energy-Delay Tradeoffs in Smartphone Applications [Електронний ресурс] / [R. Moo-Ryong, J. Paek, A. Sharma та ін.] – Режим доступу до ресурсу: [http://www.cs.ucf.edu/~turgut/COURSES/EEL6788\\_AWN\\_Spr11/Papers/Ra-MobiSys10.pdf](http://www.cs.ucf.edu/~turgut/COURSES/EEL6788_AWN_Spr11/Papers/Ra-MobiSys10.pdf).
  22. Go Y. Enabling DTN-based Data Offloading in Urban Mobile Network Environments [Електронний ресурс] / Y. Go, Y. Moon, K. Park – Режим доступу до ресурсу: <https://www.ndsl.kaist.edu/~yhwan/papers/cfi12.pdf>.
  23. Balasubramanian A. Augmenting Mobile 3G Using WiFi [Електронний ресурс] / A. Balasubramanian, R. Mahajan, A. Venkataramani – Режим доступу до ресурсу: <https://people.cs.umass.edu/~arun/papers/wiffler.pdf>.
  24. Zhang D. Optimal handing-back point in mobile data offloading [Електронний ресурс] / D. Zhang, C. Yeo – Режим доступу до ресурсу: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6407435>.

25. Golrezaei N. Scaling Behavior for Device-to-Device Communications With Distributed Caching [Электронный ресурс] / N. Golrezaei, A. Dimakis, A. Molisch – Режим доступа до ресурсу: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6805204>.
26. Vukadinovic V. Spectral efficiency of mobility-assisted podcasting in cellular networks [Электронный ресурс] / V. Vukadinovic, G. Karlsson – Режим доступа до ресурсу: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:318810/FULLTEXT02.pdf>.
27. Baier P. TOMP: Opportunistic traffic offloading using movement predictions [Электронный ресурс] / P. Baier, F. Dürr, K. Rothermel – Режим доступа до ресурсу: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6423668>.
28. The Design and Evaluation of Unified Cellular and Ad-Hoc Networks [Электронный ресурс] / [H. Luo, X. Meng, R. Ramjee та ін.] – Режим доступа до ресурсу: <http://www.cs.columbia.edu/~lierranli/publications/MOBICOM03.pdf>.
29. Push-and-Track: Saving Infrastructure Bandwidth Through Opportunistic Forwarding [Электронный ресурс] / [J. Whitbeck, Y. Lopez, J. Leguay та ін.] – Режим доступа до ресурсу: [https://www.researchgate.net/publication/51990760\\_Push-and-Track\\_Saving\\_Infrastructure\\_Bandwidth\\_Through\\_OpportunisticForwarding](https://www.researchgate.net/publication/51990760_Push-and-Track_Saving_Infrastructure_Bandwidth_Through_OpportunisticForwarding).
30. A Close Examination of Performance and Power Characteristics of 4G LTE Networks [Электронный ресурс] / [J. Huang, F. Qian, A. Gerber та ін.] – Режим доступа до ресурсу: [http://www.cs.columbia.edu/~lierranli/coms6998-7Spring2014/papers/rclte\\_mobisys2012.pdf](http://www.cs.columbia.edu/~lierranli/coms6998-7Spring2014/papers/rclte_mobisys2012.pdf).
31. Ukil A. Dynamic OFDMA Resource Allocation for QoS Guarantee and System Optimization of Best Effort and Non Real-time Traffic [Электронный ресурс] / A. Ukil, J. Sen, D. Vera – Режим доступа до ресурсу: <https://arxiv.org/pdf/1107.1038.pdf>.
32. A. El-Aasser M. Time division multiplexing and its application in high-speed optical communication [Электронный ресурс] / Mostafa A. El-Aasser – Режим

доступу

до

ресурсу:

[https://www.researchgate.net/publication/27405171\\_Time\\_division\\_multiplexing\\_and\\_its\\_application\\_in\\_high-speed\\_optical\\_communication](https://www.researchgate.net/publication/27405171_Time_division_multiplexing_and_its_application_in_high-speed_optical_communication).

33. Generalized Frequency Division Multiplexing for 5th Generation Cellular Networks [Електронний ресурс] / [N. Michailow, M. Matthé, I. Gaspar та ін.] – Режим доступу до ресурсу: [https://www.vodafone-chair.org/media/publications/legacy/n-michailow/Generalized\\_Frequency\\_Division\\_Multiplexing\\_for\\_5th\\_Generation\\_Cellular\\_Networks.pdf](https://www.vodafone-chair.org/media/publications/legacy/n-michailow/Generalized_Frequency_Division_Multiplexing_for_5th_Generation_Cellular_Networks.pdf).