

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

(повне найменування вищого навчального закладу)

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та робототехніки

(повна назва факультету)

Кафедра автоматичної, електроніки та телекомунікацій

(повна назва кафедри)

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

бакалавр

(освітній рівень)

на тему «Дослідження способів оптимізації трафіка мереж
мобільного зв'язку»

Виконав: студент 4 курсу, групи 401-ТТ

спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

(шифр і назва спеціальності)

Комісаренко Д.А.

(прізвище та ініціали)

Керівник: Сокол Г.В.

(прізвище та ініціали)

Рецензент _____

(прізвище та ініціали)

Полтава – 2021 року

РЕФЕРАТ

Текстова частина бакалаврської роботи: 58 сторінки, 23 рисунків, 4 таблиць, 22 джерела.

Об'єкт дослідження: процес функціонування мереж мобільного зв'язку

Предмет дослідження: способи оптимізації трафіку мереж мобільного зв'язку.

Мета роботи: підвищення ефективності функціонування систем мобільного зв'язку.

Методи дослідження. Для досягнення поставленої мети роботи були використані методи аналізу і синтезу, теорії електрозв'язку, системного аналізу, математичної статистики, ймовірності.

У бакалаврській роботі приведено аналіз тенденцій розвитку сучасних мереж мобільного зв'язку, виявлено їх системні та технічні особливості. Визначено завдання щодо підвищення ефективності функціонування мереж мобільного зв'язку за допомогою впровадження цифрових антенних решіток для оптимізації покриття та зниження перевантаження мережі рухомого радіозв'язку.

На основі проведених у бакалаврській роботі досліджень була запропонована імітаційна модель руху абонентів для прогнозування локальних перевантажень у мережах мобільного радіозв'язку.

МОДЕЛЬ, МОБІЛЬНИЙ ЗВ'ЯЗОК, ТРАФІК, МЕРЕЖА, АЛГОРИТМ,
ХЕНДОВЕР, ЧАСТОТА, ПЛОЩА ПОКРИТТЯ, ПРОПУСКНА СПРОМОЖНІСТЬ,
ЯКІСТЬ ОБСЛУГОВУВАННЯ

ABSTRACT

Text part of the bachelor's thesis: 58 pages, 23 figures, 4 tables, 22 sources.

Object of research: the process of functioning of mobile communication networks

Subject of research: ways of optimization of traffic of networks of mobile communication.

Purpose: to increase the efficiency of mobile communication systems.

Research methods. To achieve this goal, methods of analysis and synthesis, telecommunication theory, systems analysis, mathematical statistics, probability were used.

The bachelor's thesis analyzes the development trends of modern mobile networks, identifies their system and technical features. The task of increasing the efficiency of mobile communication networks through the introduction of digital antenna arrays to optimize coverage and reduce congestion of the mobile radio network.

Based on the research conducted in the bachelor's thesis, a simulation model of subscriber traffic was proposed to predict local congestion in mobile radio networks.

MODEL, MOBILE COMMUNICATION, TRAFFIC, NETWORK, ALGORITHM, HANDOVER, FREQUENCY, COVERAGE AREA, CAPACITY, QUALITY OF SERVICE

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	4
ВСТУП.....	6
1 АНАЛІЗ ПРОБЛЕМ ТА ПЕРСПЕКТИВ РОЗВИТКУ МЕРЕЖ СТІЛЬНИКОВОГО ЗВ’ЯЗКУ	8
1.1 Аналіз стану розвитку ринку мобільного зв’язку.....	8
1.2 Аналіз існуючих проблем в мобільних мережах операторів зв’язку.....	10
1.3 Аналіз перспектив зростання трафіку мобільних мереж	12
1.4 Аналіз показників і критеріїв ефективності управління ресурсами мобільних мереж	14
1.5 Аналіз особливостей розподілу частотного ресурсу в Україні між операторами ринку стільникового зв’язку.....	18
1.6 Постановка завдання дослідження.....	26
Висновки до першого розділу.....	27
2 АНАЛІЗ АЛГОРИТМУ ОПТИМІЗАЦІЇ ПОКРИТТЯ ТА ЗНИЖЕННЯ ПЕРЕВАНТАЖЕННЯ МЕРЕЖІ РУХОМОГО РАДІОЗВ’ЯЗКУ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ЦИФРОВИХ АНТЕННИХ РЕШІТОК.....	29
2.1 Огляд можливостей антенної техніки на основі цифрових антенних решіток.....	29
2.2 Залежність абонентського навантаження навантаження від площі зони покриття базової станції стільникового зв’язку.....	31
2.3 Розрахунок залежності площі покриття від кута нахилу антени.....	32
Висновки до другого розділу	
3 ОБГРУНТУВАННЯ РЕКОМЕНДАЦІЙ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ПРОПУСКНОЇ СПРОМОЖНОСТІ СТІЛЬНИКОВОЇ МЕРЕЖІ ЗВ’ЯЗКУ НА ОСНОВІ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ MASSIVE-MIMO.....	38

3.1	Технологія Beamforming.....	38
3.2	Характеристика просторового каналу між базовою станцією та користувачем	41
3.3	Обробка сигналу для Massive-MIMO	44
3.4	Massive-MIMO в 5G	46
3.5	Особливості передачі інформації у Massive-MIMO системах.....	49
3.6	Переваги системи Massive-MIMO.....	51
3.6.1	Виграш в просторовому рознесенні.	
3.6.2	Енергетична ефективність.	
3.6.3	Спектральна ефективність.	
	Висновки до третього розділу.....	53
	ВИСНОВКИ.....	54
	ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	56

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

BER	(Bit Error Rate) - ймовірність бітових помилок
BPSK	(Binary Phase Shift Keyin) - двопозиційна фазова маніпуляція
CDD	(Cyclic Delay Diversity) - циклічне рознесення часової затримки сигналів
CoS	(Class of Service) - клас обслуговування
DL	(DownLink)- низхідний канал зв'язку
eMBMS	(evolved Multimedia Broadcast/Multicast Service) – багатопотокова трансляція мультимедійного контенту
FDD	(Frequency-division Duplexing) — дуплексування з частотним поділом.
TDD	(time division duplex) - дуплексування з часовим поділом.
SDR	(Software-defined radio) – програмно-обумовлена радіопідсистема
SDN	(software-defined networking) програмно-конфігурована мережа
VoIP	(Voice over IP) - передача голосу по через пакети
OFDM	(Orthogonal frequency-division multiplexing) — мультиплексування з ортогональним частотним розділенням каналів
MIMO	(Multiple Input Multiple Output) - метод просторового кодування сигналу
QAM	(Quadrature Amplitude Modulation) - модуляція методом квадратичної амплітуди
QoE	(Quality of Experience)- якість сприйняття
QoS	(Quality of Service) - якість обслуговування
LTE	Long Term Evolution - технологія мобільного зв'язку, яка передбачає її еволюційний довгостроковий розвиток
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access – технологія

	широкосмугового радіодоступу в мікрохвильовому діапазоні
АС	абонентська станція
БС	базова станція
ДС	діаграма спрямованості
РРЗ	рухомий радіозв'язок

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Стрімкий розвиток інформаційних технологій сприяє появі нових, більш функціональних мобільних пристроїв. Все це обумовлює необхідність забезпечення бездротового інтернет з'єднання з високою пропускнуою спроможністю. Сучасні смартфони, планшети, персональні комп'ютери, ноутбуки та інші девайси пристрої надають користувачам нові можливості. Існуючий стан справ спонукає операторів мобільного зв'язку до розвитку та впровадження у свої мережі нових високотехнологічних систем для забезпечення необхідної пропускнуої спроможності і гарантованої якості зв'язку. Однією з таких технологій є LTE (англ. Long Term Evolution – довготерміновий розвиток).

Оператори мобільного зв'язку констатують різке зростання обсягів переданих даних. Це зумовлено зростанням кількості смартфонів і планшетних комп'ютерів. Вони забезпечують зручний доступ користувачів до всіх нових додатків і сервісів та стали буденним атрибутом життя суспільства. Під час планування розвитку мобільних мереж оператори закладають двократне зростання трафіка передачі даних на рік. Щоб забезпечити конкурентоспроможність операторам необхідно впроваджувати нові з високою спектральною ефективністю технології, підвищувати просторову ефективність шляхом розгортання малих сот і просторового ущільнення сигналів.

Існує проблема перевантаження мереж рухомого радіозв'язку внаслідок великої кількості абонентів, що скупчуються на окремих ділянках місцевості в години найвищого навантаження (години пік). Наведена проблема характерна для великих населених пунктів і міст. Тому, *завдання дипломної роботи* полягає в розробці рекомендацій щодо підвищення пропускнуої спроможності мобільних мереж зв'язку на основі існуючих технічних та технологічними рішень.

Об'єкт дослідження: процес функціонування мереж мобільного зв'язку.

Предмет дослідження: способи оптимізації трафіку мереж мобільного зв'язку.

Мета роботи: підвищення пропускної спроможності систем мобільного зв'язку.

Для досягнення мети дипломної роботи було вирішено наступні *часткові завдання дослідження:*

провести аналіз проблем та перспектив розвитку мереж стільникового зв'язку;

провести аналіз алгоритму оптимізації покриття та зниження перевантаження мережі рухомого радіозв'язку при використанні цифрових антенних решіток;

обґрунтувати рекомендації щодо підвищення пропускної спроможності стільникової мережі зв'язку на основі застосування технології Massive-MIMO.

Важливим практичним значенням роботи є проведення за допомогою імітаційної моделі математичного моделювання процесів балансування навантаження між базовими станціями різних типів. Результати моделювання підтвердили підвищення якості обслуговування клієнтів операторами мобільного зв'язку у разі застосування запропонованих у роботі рекомендацій.

Робота складається із реферату, вступу, 3 розділів, висновків, списків скорочень та посилань. Всього ___ аркушів, ___ рисунків і ___ таблиць.

1. АНАЛІЗ ПРОБЛЕМ ТА ПЕРСПЕКТИВ РОЗВИТКУ МЕРЕЖ СТІЛЬНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ

1.1. Аналіз стану розвитку ринку мобільного зв'язку

В сучасних економічних умовах телекомунікаційна галузь надає 6 відсотків валового внутрішнього продукту України з тенденцією до подальшого зростання. Розвиток інформаційно-телекомунікаційної інфраструктури є найважливішою передумовою для зростання економіки та інтеграції України у світове співтовариство, розширює можливості людини отримувати доступ до різних інформаційних ресурсів, сприяє поліпшенню якості життя [1-7].

Ринок мобільного зв'язку найбільш динамічно розвивається у галузі зв'язку. Основними видами зв'язку на ринку залишаються мобільний, телефонний фіксований та комп'ютерний зв'язок. Їх спільна частка у загальних доходах складає 83 відсотки. Доходи від надання послуг мобільного зв'язку та комп'ютерного зв'язку демонструють найвищі темпи зростання за останні роки.

Проведений аналіз свідчить, що найбільшим попитом серед споживачів послуг користуються послуги мобільного зв'язку і широкопasmового доступу до Інтернету. На рисунку 1.1. наведено структуру доходів від надання телекомунікаційних, поштових і кур'єрських послуг за 2020 рік. Як і раніше найбільша частка ринку належить мобільному зв'язку. Його частка склала 56 % проти 11 % послуг фіксованого телефонного зв'язку. При цьому послуги стільникового зв'язку складають 99,9 % від загальних послуг рухомого (мобільного) зв'язку [4, 5].

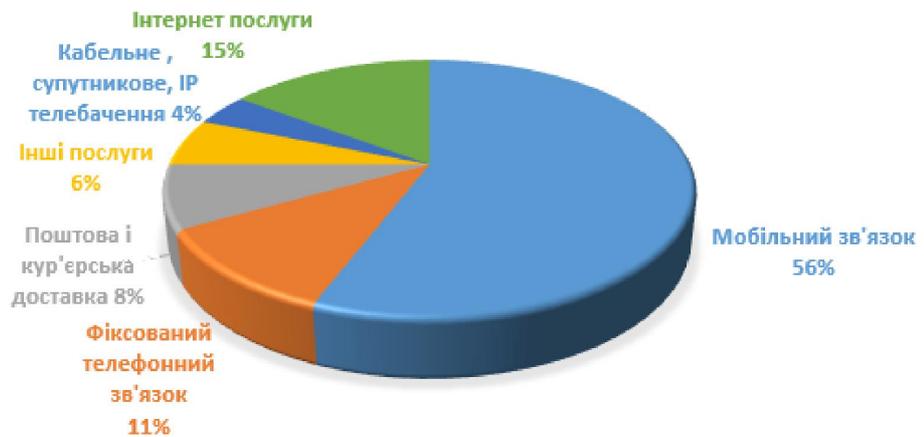


Рис.1.1. Структура доходів від надання телекомунікаційних послуг.

Аналіз ринку показує низький рівень зростання доходів від надання Інтернет-послуг. Всього на рівні 15 %. Причиною є стрімке зростання трафіку мобільного Інтернету. Статистичні данні свідчать про стрімке зростання зон покриття мережами 3G і 4G.

Стрімке зростання кількості кінцевих мобільних пристроїв створило умови для зростання попиту абонентів на інформаційно-телекомунікаційні послуги на основі широкосмугових технологій радіодоступу. Також сприяло зростанню абонентської бази мобільного зв'язку впровадження нової послуги, можливості переходити абонентам від одного оператора до іншого, без зміни свого номера абонента [6, 7].

Аналогічну тенденцію демонструє показник забезпеченості населення мобільним зв'язком у розрахунку на 100 мешканців. У 2020 році він склав 134,8 %. Це зумовлено популярністю мобільних телефонів з 2-ма SIM -картками. Також сім-картки використовуються в інших пристроях, які потребують зв'язку для передачі даних чи віддаленого управління ними.

Загальна ємність ринку послуг мобільного зв'язку складає більше 60 млн. абонентських пристроїв. Основними операторами є Київстар, ВД Україна та Lifecell. Разом вони обіймають понад 96 % ринку мобільного зв'язку України [7-9].

Однак існують і проблеми у подальшому розвитку мобільного зв'язку України. За даними [10] це: не набуття спроможностей створеним Держспезв'язку Національним центром оперативно-технічного управління телекомунікаційними мережами України; незадовільний розвиток системи мобільного зв'язку та широкопasmового безпроводового доступу у сільській, гірській місцевості і депресивних регіонах; порушення цілісності системи на тимчасово окупованих територіях України; ускладнення доступу суб'єктів господарювання до будинкового фонду та елементів інфраструктури різних форм власності, тощо.

1.2 Аналіз існуючих проблем в мобільних мережах операторів зв'язку

Для стандартів 3G і 4G характерним є на додаток до частотного ущільнення використання просторового ущільнення сигналів. Такий підхід надає можливість досягнути більшої пропускної спроможності мережі за рахунок підвищення коефіцієнта використання частотного спектру, що використовується.

Для ефективного використання просторового ущільнення створюються соти малого розміру (комірки). Це базові станції з меншою потужністю випромінювання та меншим радіусом дії сигналу. На сьогодні розгортання комірок відбувається стаціонарним методом. Наведений метод є ефективним для мобільної мережі однорідної топології з фіксованим розміром комірок для врахування міжкоміркової інтерференції [11,12].

Наведений метод є неефективним для планування гетерогенних телекомунікаційних мереж через використання моделювання покриття із

конкретним розміром комірок. В умовах міста або урбанізованої території розгортання мобільних мереж сильно ускладнюється за рахунок неоднорідності абонентського навантаження, перевідбиття і нерівномірного загасання сигналу. Порушується фіксована геометрична структура мобільної мережі (топологія) та не виконуються вимоги до пропускну здатності системи [11,12].

Широкосмуговий бездротовий доступ забезпечує високу пропускну здатність підключення різних девайсів до інтернету. Широкосмуговою вважають передачу даних зі швидкістю понад 2 Мбіт/с. На сьогоднішній день не завжди є можливість через неоднорідність абонентського навантаження, багатопроменевість випромінювання, завмирання та навмисні перешкоди забезпечення наведеної швидкості передавання [13].

Таким чином, існуючі мережі і системи мобільного радіодоступу орієнтовані створення площі покриття без урахування абонентського навантаження. Наведений недолік потрібно виправити і орієнтуватися на користувача [14,15]. Для цього потрібно враховувати у процесі планування мереж статистичні данні щодо поведінки користувачів. Мережа повинна пристосовуватися до вимог користувачів, а не навпаки. Одним із способів такого планування стільникових мереж - зміна існуючої топології мережі і застосування нерегулярного розподілу у ній сот зв'язку [16].

1.3 Аналіз перспектив зростання трафіку мобільних мереж

Одна із провідних корпорацій світу у галузі ІТ, Cisco, передбачала, що до кінця 2020 року темпи зростання світового мобільного трафіку будуть втричі випереджати темпи зростання фіксованого трафіку. Аналіз проведений у 2021 році підтвердив попередню оцінку корпорації Cisco.

Ключовими факторами істотного зростання мобільного трафіку стало різке збільшення числа сучасних мобільних пристроїв меж машинного з'єднань у поєднанні з розширенням доступу до високошвидкісних стільникових мереж. Таким чином, мобільні телефони все частіше стають інструментами для доступу до сервісів, для яких раніше був потрібний стаціонарний комп'ютер. Передача голосу та звичайних SMS вже не має значної ваги у загальному трафіку.

Обсяг мобільного дата-трафіку у період з 2013 по 2020 рік зріс у 10 разів. Головним чином, за рахунок зростання кількості власників смартфонів та можливості перегляду нами відео з високою якістю, широкого розповсюдження соціальних мереж та додатків реального часу. Загальний мобільний трафік, генерований мобільними телефонними, перевищив трафік мобільних персональних комп'ютерів, планшетів і роутерів. Аналітичні данні щодо зростання та якісної характеристики мобільного трафіку наведено на рисунку 1.2.

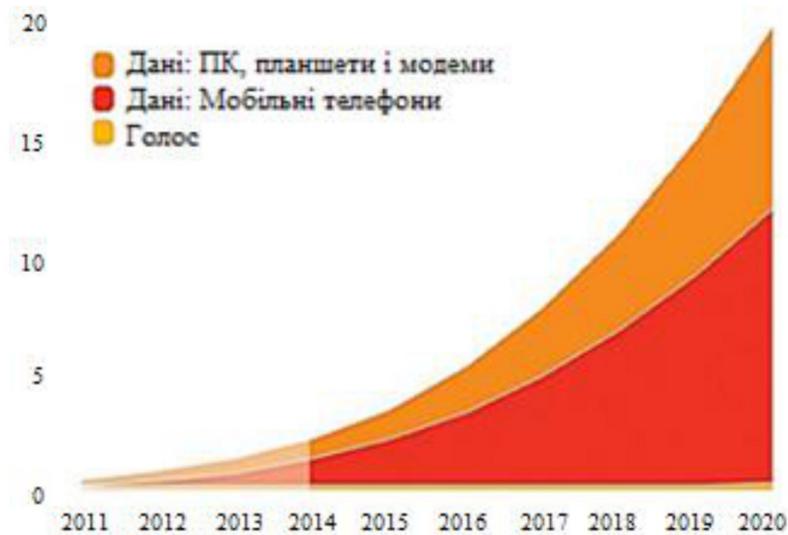


Рис.1.2. Прогноз зростання мобільного дата трафіку

Наступним кроком у розвитку мереж радіодоступу буде перехід до технології 5G, телекомунікаційного стандарту зв'язку нового покоління. Новий стандарт має більші переваги порівняно з попередниками. У стандарті передбачено використання ряду новел.

По-перше, впровадження технології масивних МІМО-систем. Вона передбачає використання цифрових антенних решіток для базових станцій зв'язку і особистих мобільних пристроях абонентів. При цьому відбувається перехід від МІМО 2x2, 4x4 до більш розвинутих версій 32x32 та вище. Пропускна спроможність мережі зростає пропорційно кількості антенних елементів у цифрових антенних решітках. Прийом сигналу відразу декількома антенними елементами дозволяє ефективно протидіяти спотворенням сигналу, багатопроменевості розповсюдження електромагнітних хвиль, перевідбиттям від об'єктів місцевості, частотно-селективним завмиранням та навмисним перешкодам.

По-друге, перехід до більш високого частотного діапазону. Це зумовлено високою завантаженою нижніх діапазонів спектру частот та потребою у значній ширині вільної смуги передавання. Перехід до більш високого діапазону зменшить дальність зв'язку у сотах внаслідок значного затухання сигналу під час розповсюдження та буде потребувати більш щільного розміщення базових станцій. Перевагою буде використання квазіоптичного випромінювання, при якому відсутні інтерференція і пов'язані з нею перешкоди.

По-третє, це перехід до так званої мультитехнологічності стандарту. Мається на увазі підтримка і можливість спільної роботи з існуючими стандартами UMTS, GSM, LTE та інших.

По-четверте. Підтримка можливості зустрічної роботи мобільних пристроїв (девайсів) D2D (Device-to-device) без участі базових станцій

мобільного зв'язку. Такий підхід надасть можливість частково розвантажити трафік базових станцій.

Зважаючи на значну завантаженість нижніх діапазонів частот, розгортання мереж 5G буде проводитися в діапазонах 2,5-2,69 ГГц або 5 ГГц. Роботи щодо вивільнення потрібної частини спектру частот для розгортання мереж 5G вже почалися.

1.4 Аналіз показників і критеріїв ефективності управління ресурсами мобільних мереж

Мобільність слугує основним показником оцінювання ефективності у мобільній мережі. Вона складається з двох часткових компонентів. Це управління розташуванням мобільного пристрою і управління передачею його обслуговування [17].

Управління розташуванням здійснює функцію визначення і супроводження мобільного пристрою або User Equipment (UE). Управління передачею виконує функцію взаємодії між базовими станціями для роумінгу UE при зміні місця знаходження абонента. Безмежна мобільність може бути досягнута шляхом підключення мобільного пристрою до будь-якої із наявних точок доступу (Wi-Fi, LTE, Cloud-RAN, UMTS, GSM).

Критерієм для визначення оптимальної точки доступу для UE є максимальна потужність сигналу на прийомі. Під час руху рівень сигналу зменшується і спрацьовує механізм передачі обслуговування UE на іншу (кращу за рівнем сигналу) базову станцію або точку доступу. Передача обслуговування надзвичайно складний процес. Вона включає у себе контроль, алгоритми, метрики, протоколи та показники ефективності. У центрі уваги цієї роботи є алгоритм вирішення передачі обслуговування та суміжної метрики. Для

подальшого розгляду питання передачі обслуговування автор вважає за доцільне зупинитися на особливостях та класифікації хендовера, для того щоб зрозуміти процеси передачі обслуговування.

Передачі обслуговування можна класифікувати за ознаками мережі, що використовується. Випадок, коли абонент переміщається всередині однієї системи (технології), будемо вважати горизонтальними, а між різними технологіями горизонтальними.

Цілком природно, що реалізація вертикальної передачі обслуговування більш складна через різні характеристики доступних мереж на апіорі невідомому шляху абонента.

Класифікують два різні типи вертикальної передачі обслуговування "вгору і вниз". «Вгору» - це передача обслуговування до безпроводної мережі з великим розміром охоплення і низькою пропускнуою спроможністю. «Вниз» - це передача обслуговування до мережі з меншим розміром території охоплення але збільшеною пропускнуою спроможністю мережі [18].

Також передачу обслуговування класифікують на «м'яку» і «жорстку». «Жорстка» - це коли UE може бути підключений тільки до однієї точки доступу. «М'яка» - коли UE може взаємодіяти з більш ніж однією точкою приєднання під час передачі обслуговування.

Безшовною передачею обслуговування вважається коли перехід між точками доступу відбувається без помітного зниження рівня якості обслуговування (QoS).

Процес передачі обслуговування або процес хендовера можливо навести трьома послідовними етапами. Збір інформації про доступні мережі, прийняття рішення про передачу обслуговування, і здійснення передачі обслуговування.

Суть процесу збору інформації про доступні мережі полягає у виявленні мобільним девайсом всіх наявних точок доступу. Для їх виявлення він повинен підтримувати декілька технологій радіодоступу. Окрім виявлення потрібно

визначити їх характеристики: потужність сигналу, швидкість передавання, доступність, налаштування, політика безпеки, пріоритетність. Встановлені характеристики будуть використанні під час наступного кроку.

Рішення про передачу обслуговування - це потреба прийняти рішення щодо виконання горизонтальної або вертикальної передачу обслуговування. Рішення приймається на основі визначення кращої мережі серед доступних. Для цього використовують так звані метрики передачі обслуговування при прийнятті рішення. використовуються для вирішення, потрібна чи ні передача обслуговування.

В традиційних горизонтальних передачах рішення приймається з використанням метрики RSS, рівня сигналу на прийомі. Рішення приймається, якщо RSS сусідньої точки доступу перевищує RSS поточної на визначений виробником рівень. Фактично має життя нерівність:

$$RSS_{new} > RSS_{old} \text{ і } RSS_{old} < T,$$

де T – визначене (граничне) виробником значення рівня сигналу.

Методика прийняття рішення при вертикальній передачі обслуговування буде мати більш складний характер. У вертикальних передачах обслуговування традиційний підхід на основі індикації прийнятої потужності сигналу (RSS) буде недостатнім. Будуть потребувати для прийняття рішення врахування інших часткових показників. Вони систематизовані та наведені на рисунку 1.3.



Рис. 1.3. Часткові показники для рішення щодо запуску вертикального хендовера

На етапі передачі обслуговування здійснюється встановлення зв'язку мобільного пристрою з обраною мережею безпроводного доступу. Він реалізується за допомогою стандартних протоколів Mobile IP і управління передачею потоків всередині мережі передачі даних.

1.5 Аналіз особливостей розподілу частотного ресурсу в Україні між операторами ринку стільникового зв'язку

Найвищі показники розвитку у галузі інформаційних технологій демонструє стільниковий зв'язок. Характерною особливістю його розвитку на протязі останнього десятиліття стрімке збільшенні пропускної спроможності каналів стільникового зв'язку. Наприклад, для системи другого покоління стандарту GSM (Global System for Mobile Communications) з надбудовою пакетної переданих даних GPRS (General Packed Radio Services), а потім і EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution) максимальна пропускна спроможність 474 кбіт/с.

Основні оператори на ринку стільникового зв'язку України фактично на 100 % охоплюють покриттям зони радіодоступу її територію. Для стандарта GSM вони складають Київстар 99 %, Vodafone 98 % і Lifecell 94,5 % території України.

Цікавим також є розподіл частот у діапазонах GSM 900/1800 між основними гравцями ринку стільникового зв'язку України. Він наведений на рисунку 1.4.

Наступним кроком у розвитку систем стільникового зв'язку стала поява та широке впровадження системи стільникового зв'язку третього покоління або універсальної мобільної телекомунікаційної системи, UMTS (Universal Mobile Telecommunications System). Теоретично вони дозволяють досягти швидкості передачі інформації до 21 Мбіт/с в багатоканальному режимі. На практиці найкращими показниками є для інформаційного напрямку від базової станції до мобільного пристрою 7,2 Мбіт/с для станцій HSDPA (High-Speed Downlink Packet Access).

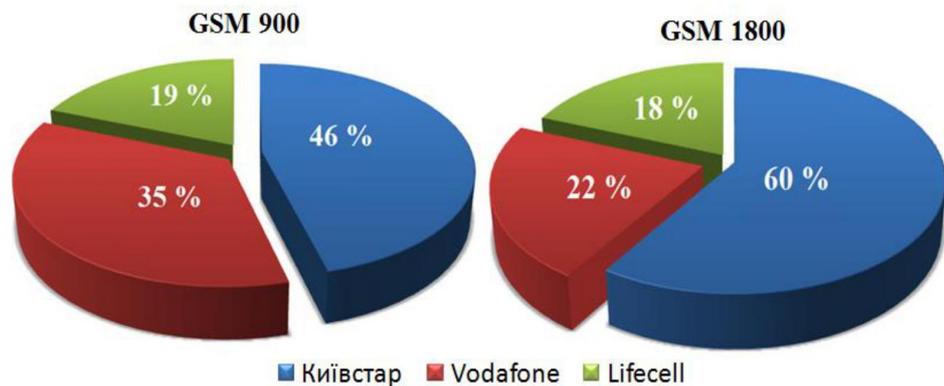


Рис. 1.4. Розподіл частот в мережі GSM 900/1800 між основними операторами стільникового зв'язку України

Пропускна спроможність стільникових систем стандарту 3G значно перевищує пропускну спроможність стільникових систем стандарту 2G. Найвні

технічні можливості стандарту 3G зробили можливим створити абонентам канал доступу до мережі Інтернет з повним набором сервісів, що надається стільниковим оператором, у тому числі і для користування мультимедіа ресурсами.

Проте мережі стандарту 2G почали свій розвиток набагато раніше і мають значно більшу зону радіопокриття порівняно з мережами стандарту 3G. Технологічне обладнання мереж 2G хоч і морально застаріло але не відпрацювало своїх термінів. Тому впровадження стандарту 3G іде відповідно з планами впровадження операторів стільникового зв'язку. Цікавим фактом є існування комбінованих мереж, коли існуюча мережа 2G використовується для передачі голосової інформації, а мережа 3G використовується для передачі даних Інтернет-трафіку.

Тривалий час розгортанню мереж 3G не сприяла відсутність потрібної смуги частот. Не було згоди між користувачами загальної і спеціальної смуги частот щодо вивільнення необхідної частини спектру. Нарешті, у 2015 році зацікавленні суб'єкти ринку дійшли згоди і Генеральний штаб Збройних Сил України здійснив перерозподіл частот між спеціальними користувачами та здійснив заходи конверсії необхідної смуги частот. При цьому представники сектору безпеки і оборони України одержали 1,6 мільярда гривень для закупівлі сучасної техніки зв'язку, що працює в інших частотних діапазонах.

Тендер з продажу частот для реалізації стандарту 3G відбувся у грудні 2015 року. У результаті відкритих торгів смуги частот одержали Lifecell 1,920-1,935 і 2,110-2,125 ГГц; Київстар - 1,965-1,980 і 2,155-2,170 ГГц; Vodafone - 1,950-1,965 і 2,140-2,155 ГГц.

Розподіл радіочастотного ресурсу Національною комісією, що здійснює регулювання у галуззі зв'язку та інформатизації в Україні, не завжди здійснювався логічно, на основі здорового глузду і оптимальних потреб ринку

мобільного зв'язку. Наведена ситуація призвела до нерівномірного розподілу смуг частот і їх кількості між основними гравцями ринку мобільного зв'язку у різних регіонах та областях України.

Для функціонування та розвитку 2G мереж такий стан справ не створював ускладнень. З початком впровадження 3G мереж стільникового зв'язку ситуація змінилася. Впровадження сигналу LTE стандарту 3G потребувало суцільних часток спектру частот.

Спроба усунути описаний автором недолік у розподілі спектру частот в Україні була зроблена під час другого аукціону з продажу частот операторам. Відбулася процедура так званого рефармінгу – обміну частотами між операторами для формування суцільних ділянок спектру частот.

Наступним кроком у розвитку стільникових мереж став початок впровадження систем четвертого покоління, 4G. Для впровадження 4G мереж між операторами зв'язку відбулося формування 2 смуг частот для технології LTE. Смуги 7 і 3 за поділом частотного спектру Міжнародним союзом електрозв'язку FDD 2600 (Band 7) і FDD 1800 (Band 3).

Мережі FDD 2600 (Band 7) будуть розгортати у містах та урбанізованих місцевостях з високою щільністю населення, що зумовлено можливістю більш щільного розташування базових станцій зв'язку і зменшеними відстанями для розповсюдження радіосигналів. Мережі FDD 1800 (Band 3) у більш нижчому діапазоні частот будуть розгортатися у сільських та малозаселених місцевостях.

Загальні витрати найбільших операторів мобільного зв'язку для одержання ліцензії у діапазоні 2,5-2,6 ГГц за результатами другого тендеру склали 2,456 мільярди гривень.

lifecell витратив 909,25 млн грн за купівлю двох смуг частот шириною 15 МГц кожна. Київстар одержав три смуги спектру частот загальною шириною 15 МГц за 916,3 млн грн. Vodafone зміг купити ліцензії лише на дві смуги частот

шириною 10 МГц загальною вартістю 631 млн грн. Аналіз проведеного конкурсу з продажу частот свідчить про найбільші витрати lifecell з розрахунку гривні за герц спектру.

Проте основна боротьба на другому тендері розгорнулася за лоти у діапазоні частот 1800 МГц. Він найбільш придатний і універсальний для розвитку операторів стільникового зв'язку на основі стандарту 4G з технологією LTE. На сьогоднішній день більша половини мереж стандарту 4G функціонує на частотах 1800 МГц.

Привабливість діапазону частот 1800 МГц для операторів стільникового зв'язку підкреслюється його більшою пристосованістю для розповсюдження радіохвиль. Після повного освоєння діапазону 1800 МГц можливо його нарощування для збільшення каналної ємності мереж за рахунок інтеграції з діапазоном 2,6 ГГц.

Остаточні результати розподілу смуг частот стандарту 4G у частотних діапазонах 1800 і 2600 МГц між операторами стільникового зв'язку наведено у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Результати розподілу смуг частот радіоресурсу у частотних діапазонах 1800 і 2600МГц між операторами стільникового зв'язку

Частота	Ширина каналу	Діапазон/Лот	Компанія
1800 МГц			
1770-1775/1865-1870 МГц	10 МГц	1800/4	Київстар
1775-1780/1870-1875 МГц	10 МГц	1800/6	Київстар
1725-1750/1820-1845 МГц	50 МГц	1800/2	Київстар
1750-1770/1845-1865 МГц	40 МГц	1800/3	Vodafone Україна

1780-1785/1875-1880 МГц	10 МГц	1800/5	Vodafone Україна
1710-1725/1805-1820 МГц	30 МГц	1800/1	lifecell
2600 МГц			
2540-2545, 2565- 2570/2660-2665, 2685- 2690 МГц	20 МГц	2600/1	lifecell
2535-2540/2655-2660	10 МГц	2600/2	lifecell
2530-2535/2650-2655 МГц	10 МГц	2600/3	Київстар
2525-2530/2645-2650 МГц	10 МГц	2600/4	Київстар
2520-2525/2640-2645 МГц	10 МГц	2600/5	Київстар
2510-2515/2630-2635 МГц	10 МГц	2600/6	Vodafone
2515-2520/2635-2640 МГц	10 МГц	2600/7	Vodafone

На наведених нижче на рисунку 1.5 відображено зони радіопокриття базових станцій стільникового зв'язку стандарту LTE компаній lifecell та Київстар відповідно на 2020 рік.

Проводячи огляд ринку стільникового зв'язку стандарту 4G в Україні не можливо оминати мережі побудовані на основі стандарту IEEE 802.16x. Це так названа технологія WiMAX, що використовує стандарт передачі даних IEEE 802.16.

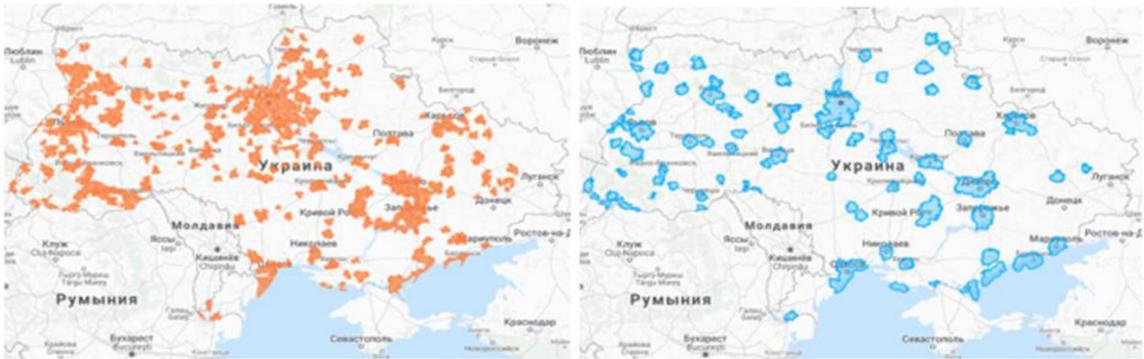


Рис. 1.5. Зони радіопокриття мережі стандарту LTE компаній lifecell та Київстар на 2020 рік

Назва WiMAX та індексне позначення має схожість з технологією Wi-Fi (IEEE 802.11). Але це тільки схожість. Технологія WiMAX відрізняється збільшеною швидкістю передачі даних у мережі, дальністю прямого зв'язку до декількох десятків кілометрів та можливістю працювати на закритих та півзакритих інтервалах зв'язку завдяки багатопробному розповсюдженню радіохвиль та використанню технології цифрових антенних решіток у якості антенних систем базових станцій стільникового зв'язку.

Існують два різновиди технології WiMAX. Звичайний WiMAX, IEEE 802.16d, і Mobile WiMAX, IEEE 802.16e. Відмінність звичайного від мобільного WiMAX полягає у можливості останнім підтримувати процедуру хендвера. Тобто здійснювати передачу мобільного абонента між базовими станціями. Це дозволяє створювати мережі суцільного радіодоступу подібні до мереж стільникового зв'язку і робить стандарт Mobile WiMAX прямим конкурентом стандартам стільникового зв'язку.

На жаль технологія WiMax в Україні не набула масового розповсюдження. Його використовують регіональні провайдери зв'язку на частотах 2,3 ГГц, 3,5-3,7

ГГц і 5.2-5.5 ГГц для організації невеликих мереж FreshTel та Girafe, які розгорнуті тільки у деяких населених пунктах з невеликою щільністю та якістю покриття. Орієнтовні зони покриття наведено на рисунку 1.6.



Рис1.6. Зони покриття мережі стандарту WiMax в Україні

Основні причиною низького розповсюдження технології WiMax в Україні це надто висока частота роботи технологічного обладнання, що ускладнює розповсюдження сигналу у просторі.

Перспективами подальшого розвитку мереж стільникового зв'язку в Україні є проведення конверсії спектру частот спеціальних користувачів 800-900 МГц для видачі на них ліцензій Національною комісією з питань регулювання зв'язку та інформатизації. Наведене дозволить основним операторам ринку стільникового зв'язку (Київстар, Vodafone Ukraine, lifecell,

Інтертелеком) покращити свої зони покриття території України 3G і 4G мережами.

Розподіл частот між спеціальними користувачами сектору безпеки і оборони України відповідно до положень Закону України “Про радіочастотний ресурс” здійснюється Генеральним штабом Збройних Сил України. Вивільнення визначених смуг частот доволі складний і коштовний процес. У визначених смугах працюють деякі засоби зв'язку спеціальних користувачів і радіонавігаційна апаратура забезпечення польотів бойової авіації. Тому конверсія потребує компенсаційних заходів для спеціальних користувачів і перехід на сучасні техніку зв'язку, що працює в інших смугах частот. В умовах ведення Російською Федерацією гібридної війни проти України питання конверсії радіочастотного ресурсу потребує виваженого підходу з огляду на потребу стійкої і безперебійної роботи засобів зв'язку і радіонавігаційного управління, як систем бойового управління, але роботи у даному напрямку провадяться і будемо сподіватися на їх шкоре успішне завершення.

Наступним кроком Національної комісії з питань регулювання зв'язку та інформатизації повинно бути запровадження нового частотного плану у діапазоні 800-900 МГц для основних операторів стільникового зв'язку. Тобто потребує проведення процедура рефармінгу смуг частот між операторами, що дозволить досягти максимальної спектральної ефективності при організації мереж стандартів 3G або 4G.

Тут починається зона конфлікту між операторами стільникового зв'язку. Кожен із них розвивав свої мережі виходячи із придбаних ліцензій. Заміна частотного плану буде вимагати зміну технологічного обладнання і вкладення додаткового фінансування. Одночасно проведення рефармінгу смуг частот для деяких гравців ринку буде вважатися не бажаним через неадекватність заміни ліцензій.

Поряд з наведеними труднощами, за поглядами британських аналітиків з Analysys Mason, які робили для України розрахунок вартості ліцензій для проведення попередніх тендерів, вважається, що частоти в діапазоні 900 МГц повинні коштувати орієнтовно до 645 млн грн за смугу частот у 10 МГц. Тому у разі досягнення Національної комісії з питань регулювання зв'язку та інформатизації позитивних результатів щодо формування цивілізованого ринку стільникового зв'язку в Україні мова може йти про декілька мільярдів гривень надходжень до зведеного бюджету України від Національної комісії з питань регулювання зв'язку та інформатизації.

1.6 Постановка завдання дослідження

Проведений автором у першому розділі дипломної роботи аналіз дозволяє дійти висновку про актуальність наукового завдання дипломної роботи, що полягає в розробці рекомендацій щодо підвищення пропускної спроможності мобільних мереж зв'язку на основі існуючих технічних та технологічними рішень.

Для вирішення наукового завдання автором визначена мета дипломної роботи, що полягає у підвищенні пропускної спроможності систем мобільного зв'язку.

Для досягнення мети дипломної роботи автором було вирішено наступні часткові завдання дослідження:

провести аналіз проблем та перспектив розвитку мереж стільникового зв'язку;

провести аналіз алгоритму оптимізації покриття та зниження перевантаження мережі рухомого радіозв'язку при використанні цифрових антенних решіток;

обґрунтувати рекомендації щодо підвищення пропускної спроможності стільникової мережі зв'язку на основі застосування технології Massive-MIMO.

Висновки до першого розділу.

1. Проведений автором аналіз розвитку ринку мобільного зв'язку у встановив, що 99 % від усього об'єму ринку становлять послуги стільникового зв'язку. Кількість мобільних абонентів постійно збільшується з одночасним збільшенням трафіку стільникового зв'язку, при цьому трафік фіксового зв'язку набув сталих об'ємів та має тенденцію до скорочення.

2. Основною проблемою у функціонування стільникового зв'язку є зростаюча потреба у пропускній спроможності мереж стільникового зв'язку. Існуючі мережі і системи радіодоступу орієнтовані створення площі покриття без урахування абонентського навантаження. Для виправлення цього потрібно враховувати у процесі планування мереж статистичні данні щодо поведінки користувачів. Мережа повинна пристосовуватися (бути адаптивною) до вимог користувачів, а не навпаки. Одним із способів такого планування стільникових мереж - зміна існуючої топології мережі і застосування нерегулярного розподілу у ній комірок.

3. Наступним кроком у розвитку мереж радіодоступу буде удосконалення та подальший розщиток мереж стандартів 3G, 4G з переходом у подальшому до технології 5G, телекомунікаційного стандарту зв'язку нового покоління. Новий стандарт має більші переваги порівняно з попередниками.

4. Однією із найбільш складних процедур у функціонуванні мереж стільниковго зв'язку є реалізація методики прийняття рішення при передачі обслуговування між базовими станціями зв'язку (процедура хендовера). Вона буде мати складний хараткер і потребувати для прийняття рішення, окрім максимальної потужноості сигналу, врахування інших часткових показників.

2. АНАЛІЗ АЛГОРИТМУ ОПТИМІЗАЦІЇ ПОКРИТТЯ ТА ЗНИЖЕННЯ ПЕРЕВАНТАЖЕННЯ МЕРЕЖІ РУХОМОГО РАДІОЗВ'ЯЗКУ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ЦИФРОВИХ АНТЕННИХ РЕШІТОК

У другому розділі дипломної роботи проводиться аналіз особливостей використання цифрових антенних решіток у якості антенних систем для базових станцій стільникової мережі зв'язку у залежності від кута нахилу діаграми спрямованості базової станції. Здійснюється аналіз характеристик антенної техніки, що впливають на показники завантаження мережі стільникового зв'язку. Формуються перспективи можливого застосування цифрових антенних решіток у поєднанні з алгоритмами раннього виявлення локальних перевантажень мережі стільникового зв'язку на основі статистичних параметрів мобільності абонента.

2.1 Огляд можливостей антенної техніки на основі цифрових антенних решіток

На протязі останніх десятиліть технологія цифрових антенних решіток знаходить активне впровадження у стандартах стільникового зв'язку третього та четвертого покоління. Підвищення вимог до пропускнуєї спроможності мереж стільникового зв'язку спонукає до подальшого розвитку технології цифрових антенних решіток, переходу від лінійних до плоских та конформних пірамідальних цифрових антенних решіток із збільшеною кількістю антенних елементів.

Перевагами технології цифрових антенних решіток є можливість адаптивного формування діаграми спрямованості антенної системи за рахунок

реалізації різниць фаз на входах різних антенних елементів цифрової антенної решітки та формування діаграми спрямованості антенної системи у цифровому вигляді у процесорі приймально-передавальної системи. Управління діаграмою спрямованості антенної системи одночасно поєднується із технологією МІМО, створюючи синергетичний ефект.

Таким чином здійснюючи управління діаграмою спрямованості базової станції за кутом місця або в азимутальній площині можливо здійснювати зміни площі обслуговування базової станції. Антенна техніка подібного класу широко використовується як комерційними так і спеціальними користувачами.

Зміна кута нахилу ДС за кутом місця або в азимутальній площині цифрової антенної решітки базової станції можна здійснювати двома способами. Механічним нахилом антени або формуванням діаграми спрямованості у електронному вигляді.

Найпростіший метод нахилу променя ДС ЦАР у вертикальній площині здійснюються за рахунок роботи механічного вузла повороту для нахилу всієї антенної системи. Він, як правило, реалізується у фазованих антенних решіток (ФАР), що впроваджувалися до появи потужних обчислювальних засобів для формування ДС у цифровому вигляді. При механічному повороті вузла антенної системи спотворюється форма ДС антени в горизонтальній площині, з'являється аналітична залежність коефіцієнта посилення антени від кута нахилу антенної системи. При формуванні ДС в електронному вигляді цей недолік усувається, кут нахилу не залежить від азимута, а форма ДС антени залишається незмінною.

На відміну від механічного нахилу антенної системи у більш розвинутих системах нахил ДС забезпечується формуванням різниці фаз на входах антенних елементів ЦАР. Сама антена залишається у вертикальному положенні без руху. Наведена схема реалізується або кабельною розводкою, що статично фіксує

нахил ДС ЦАР, або фазовертачами для кожного антенного елементу ФАР. Описаний варіант структурної схеми ФАР наведено на рисунку 2.1.

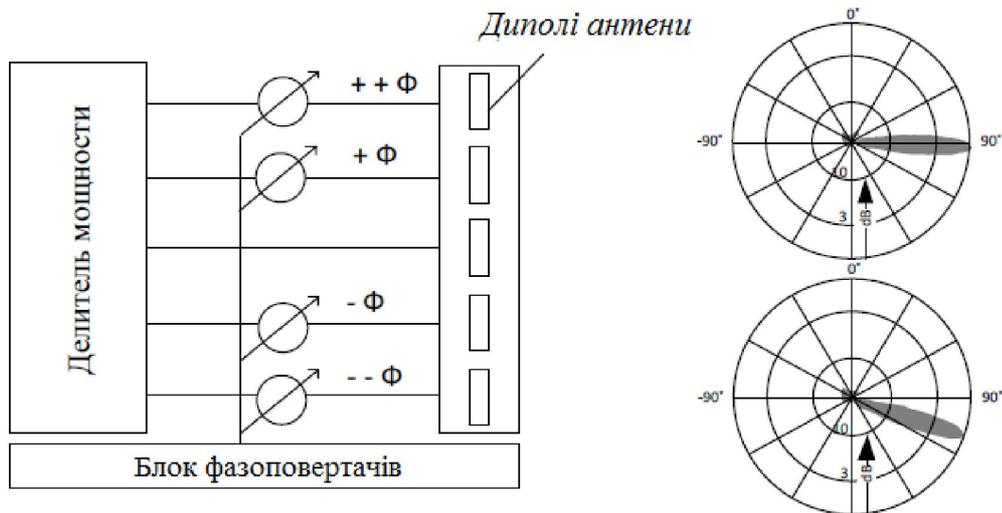


Рис. 2.1. Варіант структурної схеми ФАР

2.2 Залежність абонентського навантаження від площі зони покриття базової станції стільникового зв'язку

Як наведено у попередньому підрозділі управління площею соти БС можливо здійснювати за допомогою зміни кута місця ДС антени. Для встановлення аналітичних співвідношень для абонентського навантаження в соті від її площі прийємо припущення про рівномірність розподілу абонентів у соті та однакове абонентське навантаження, що створюється кожним. Для визначення навантаження скористаємося моделлю Ерланга для каналу з відмовами. Для наведеного випадку загальне абонентське навантаження буде мати вигляд:

$$\rho_{\Sigma} = I\rho_{\text{сн}}, \quad (2.1)$$

де $\rho_{\text{сн}}$ - середнє навантаження, що створюється кожним абонентом (Ерланг);

I - число абонентів у соті.

Очевидно, що I залежить від кількості абонентів, а кількість абонентів залежить від площі S зони покриття БС. Тоді кількість абонентів можливо описати наступним виразом:

$$I = \rho S, \quad (2.2)$$

де ρ - щільність абонентів стільникового зв'язку на заданій території (аб/км²);

S - площа покриття соти зв'язку базової станції (км²).

Таким чином, було встановлено аналітичну залежність абонентського навантаження соти зв'язку від площі покриття БС за умови припущення про рівномірність розподілу абонентів у соті та однакового абонентського навантаження у них.

2.3 Розрахунок залежності площі покриття від кута нахилу антени

Визначення площі зони покриття БС є доволі складним завданням. Оскільки на площу зони покриття крім величини кута нахилу антени також впливає рельєф місцевості. Тому площа зони покриття буде мати складну форму. Для визначення її площі скористаємося методичним прийомом умовного розбиття на декілька еквівалентних трикутників і наведемо загальну площу зони покриття S сумою площ еквівалентних трикутників S_i , де $i=1 \dots a$ (Рис. 2.2.)

Площі еквівалентних трикутників приблизно рівні $\triangle OBC \approx \triangle O'B'C'$. Тому при відомих значеннях сторін трикутника r_i, r_{i+1} та кута δ обчислення площі i -го трикутника набуде виразу:

$$S_i = tg(\delta) \left(\frac{r_i + r_{i+1}}{2} \right)^2. \quad (2.3)$$

Таким чином ми отримаємо апроксимовану оцінку площі i -го але при спрямування кута трикутника δ до 0 точність оцінювання буде підвищуватися.

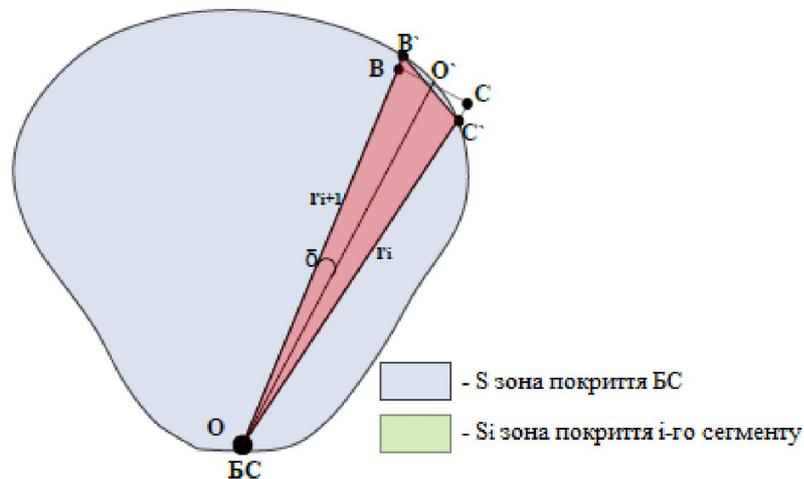


Рис.2.2 Умовний поділ зони покриття базової станції на еквівалентні трикутники

Для обчислення дальності зв'язку скористаємося загальновідомими моделями поширення електромагнітного випромінювання на трасі каналу зв'язку. Ключовими показниками буде потужність сигналу, коефіцієнти посилення приймальної та передавальної антен, чутливість приймача. Визначимо допустимий рівень втрати потужності корисного сигналу на трасі розповсюдження сигналу:

$$L_{\text{допі}} = P_{\text{випр}} - \varepsilon_{\text{пр}} + Ku_{\text{при}} + Ku_{\text{пері}}, \quad (2.4)$$

де $P_{\text{випр}}$ - потужність випромінювання мобільного абонента (МА);

ε - чутливість приймача БС;

$Ku_{\text{при}}$ - коефіцієнт посилення антени приймача БС;

$Ku_{\text{пер}}$ - коефіцієнт посилення антени передавача МА;

$i=1 \dots a$ - напрямок від БС до МА або крок апроксимації площі покриття БС

за наведеним на рисунку 2.2 принципом.

Для спрощення обчислень $L_{\text{доп}i}$ можливо скористатися спрощеною формулою розрахунку, що використовує відомості про частоту сигналу та висоту розміщення приймальних та передавальних антен:

$$L_{\text{доп}i} = 69,55 + 26,15 \lg(f) - 13,82 \lg(h_{\text{бс}}) - \alpha(h_{\text{ма}}) + (44,9 - 6,55 \lg(h_{\text{бс}})) \lg(r_i), \quad (2.5)$$

де $h_{\text{бс}}$ - висота розміщення антени БС;

$h_{\text{ма}}$ - висота розміщення антени МА;

f - частота сигналу;

r_i - відстань між БС та МА.

З виразу 2.5 легко визначити дальність зв'язку для i -го напрямку між БС та МА

$$r_i = 10 \wedge \left(\frac{L_{\text{доп}i} - 69,55 - 26,15 \lg(f) + 13,82 \lg(h_{\text{бс}}) + \alpha(h_{\text{ма}})}{(44,9 - 6,55 \lg(h_{\text{бс}}))} \right). \quad (2.6)$$

Наступним кроком встановимо залежність дальності зв'язку на інформаційному напрямку базова станція – мобільний абонент від кута азимута ДС ЦАР базової станції. Рішення визначеного питання можливо здійснити у декілька способів: аналітичним способом встановити математичний вираз, що

описує залежність; провести практичні випробування та встановити експериментальним шляхом; використати спеціальне програмне забезпечення. Дослідимо всі наведені способи при рішенні нашого завдання.

Для вирішення завдання аналітичним способом введемо деякі обмеження. Будемо вважати що мобільний абонент знаходиться на межі впевненого прийому сигналу (на максимальній відстані).

За наведеного автором припущення, значень (приблизних) для наведеного інформаційного напрямку (табл. 2.1) та вважаючи кут місця діаграми спрямованості антени від 0 до 1 градуса, користуючись виразом (2.6) значення дальності зв'язку сягатиме 6 кілометрів.

Таблиця 2.1.

Типові значення інформаційного напрямку базова станція – мобільний абонент стандарту GSM

Параметр	Значення	Одиниця виміру
f	900	МГц
h_{bc}	30	м
h_{ma}	2	м
$P_{випр}$	25	дВм
ϵ_{np}	-110	дВм
Ku_{bc}	17,15	дВі
$L_{дон}$	152,15	дВ

Наведений випадок, розповсюдження сигналу без відхилення ДС ЦАР за кутом місця або з мінімальними відхиленнями, ілюструється на рисунку 2.3.

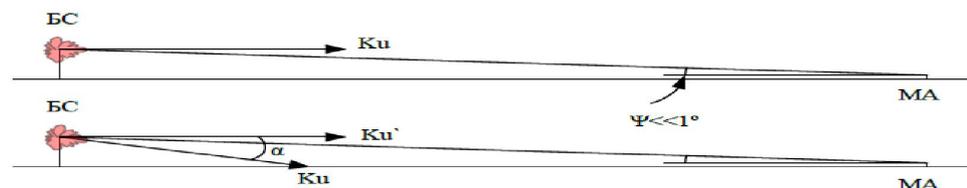


Рис.2.3. Приклад розповсюдження сигналу базової станції з мінімальними відхиленням за кутом місця

Проводячи подальше узагальнення наведеного автором підходу з апроксимації полінома (2.6), можливо розробити алгоритм обчислення значення r_i з метою написання на його основі інформаційно-розрахунковою задачі. Проте таких підхід є доволі спрощеним та не враховує частотно-селективні завмирання та багатопроменевість розповсюдження сигналу.

Суть практичного способу встановлення закономірностей полягає у проведенні експериментальних досліджень в спеціально створених умовах, які наближені до реальних умов функціонування інформаційного напрямку. При цьому під час створення моделі системи потрібно врахувати і виключити всі умови проведення, що можуть спотворити його результати. Дослідження також потребує проведення значної кількості експериментальних вимірювань за всіма потрібними напрямками. Значні затрати, відсутність у користувачів потрібної метрологічної апаратури робить цей метод не завжди прийнятним та громіздким для практичного застосування.

Використання спеціалізованого програмного забезпечення надає можливість поєднати простоту розрахунків і надійність одержаних результатів. Використовуючи спеціалізоване програмне забезпечення для розрахунку рівня потужності електромагнітного поля, можливо одержати вибірку результатів залежності дальності зв'язку від значень кута азимута ДС ЦАР α .

Висновки до другого розділу

1. На основі проведеного аналізу перспектив застосування цифрових антенних решіток для вирішення питання управління діаграмою спрямованості антени з метою оперативного управління зоною покриття і запобігання перевантаженням мережі стільникового зв'язку було зроблено припущення про необхідність удосконалення методики запобігання перевантаженням.

2. Були одержані основні співвідношення для прогнозування перевантаження: поріг запуску процедури перерозподілу ресурсу, тривалість процедури додаткового контролю.

3. ОБГРУНТУВАННЯ РЕКОМЕНДАЦІЙ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ПРОПУСКНОЇ СПРОМОЖНОСТІ СТІЛЬНИКОВИХ МЕРЕЖ ЗВ'ЯЗКУ НА ОСНОВІ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ MASSIVE-MIMO

Під назвою MIMO-система розуміється антенна система яка має декілька входів та виходів. Технологія MIMO передбачає декілька різновидів цієї технології. Вони об'єднуються спільної можливістю приймати та передавати більше одного сигналу даних одночасно по одному радіоканалу. Під системою Massive-MIMO розуміється антенна система з особливо високою кількістю антенних елементів у системі. Від десятків до сотень елементів, що дозволяє формувати декілька десятків променів діаграми спрямованості антенної системи у цифровому вигляді і суттєво збільшити пропускну спроможність мережі. За своєю суттю, застосування технології Massive-MIMO є альтернативним рішенням щодо збільшення пропускну спроможності стільникових мереж і не потребує запровадження складних методів управління на основі хендоверу [19].

3.1 Технологія Beamforming

Сучасні станції стільникового зв'язку обмежені за спектром частот, що використовують. Фактично подальше нарощування пропускну спроможності мережі можливо за рахунок впровадження нових методів управління мережею на основі хендоверу, системних рішень та перерозподілу ресурсу мережі між базовими станціями. Проте у багатьох місцях наведені методи вже вичерпали себе та потребують альтернативних рішень. Одне із них це впровадження і подальший розвиток технології цифрових антенних решіток.

Цей шлях - це розгортання базових станцій стільникового зв'язку на основі багатоелементних цифрових антенних решіток. Вони мають можливість підтримувати декілька просторово відокремлених каналів передачі даних, забезпечуючи тим самим багатошарову передачу на одній ділянці спектру частот. В основі цієї спроможності лежить ідея формування спрямованого електромагнітного пучка за допомогою антенних елементів ЦАР. Воно носить англійську назву *Beamforming*. Отже, потребує окремих пояснень визначення поняття *Beamforming*.

Слово *Beamforming* несе різне змістовне поняття у залежності від тієї середи де застосовується. Його основний зміст, у нашому випадку, полягає у можливості адаптувати схему випромінювання антенного масиву ЦАР за певним алгоритмом. Більшість користувачів вважають це, як формування променя шляхом направлення більшої частини потужності електромагнітних коливань у певному напрямку (до абонента) (рис. 3.1). До кожного антенного елемента ЦАР застосовуються певним чином скориговані амплітудні та фазові зсуви з метою їх синфазного складання і формування діаграми спрямованості у певному напрямку або, навпаки, формування нуля у небажаному напрямку. При цьому особливості розповсюдження радіохвиль на маршруті каналу зв'язку також враховуються.

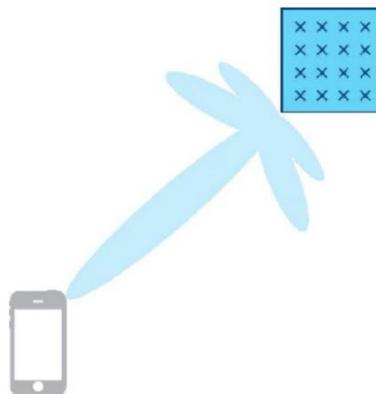


Рисунок 3.1 Формування пучка

Для технології *Massive-MIMO* наведений автором підхід також є традиційним. Термін *Massive* означає значну кількість антенних елементів в антенній системі ЦАР. *MIMO* свідчить про використання цієї технології для зв'язку з декількома абонентами [20].

У реальних системах *Massive-MIMO* данні, що передаються, можуть бути спотворені за рахунок впливу інтерференції, перешкод або згасання на маршруті розповсюдження сигналу. Корисний сигнал може мати декілька шляхів розповсюдження. Він може перевідбиватися від перешкод та прийти до абонента декількома променями, мати затримку за часом та некогерентно скластися у точці прийому (рис. 3.2).

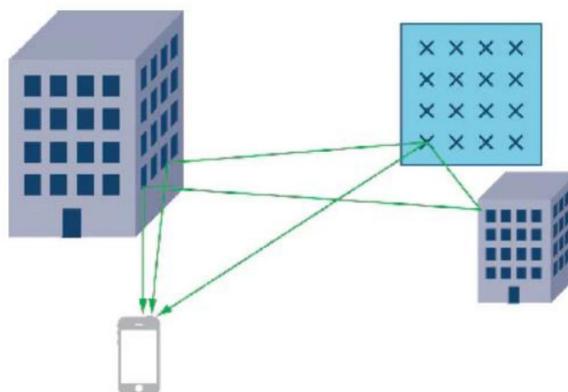


Рисунок 3.2 Відбиття сигналу від перешкод

Для того, щоб багатопрореневе розповсюдження сигналу позитивно впливало на його обробку необхідно провести його аналітичний запис для подальшої роботи з ним. Фактично мова йде про визначення передаточних характеристик каналу для кожного променя у деякий проміжок часу. На протязі якого будемо вважати передаточні характеристики незмінними. Формально цей

термін називається інформацією про стан каналу (далі – ІСК). Наведена інформація зазвичай формалізується у вигляді матриці (рис. 3.3).

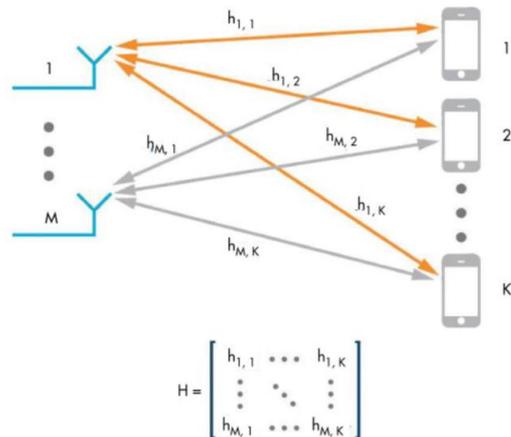


Рисунок 3.3 Матриця передаточних характеристик каналів МІМО

ІСК у подальшому використовується для цифрової обробки сигналів з метою їх декодування на приймальній стороні та кодування на передавальній.

3.2 Характеристика просторового каналу між базовою станцією та користувачем

Найбільш наближеним і спрощеним прикладом описаного у попередньому підрозділі факту багатопроменевості є перевідбиття звуку. Наприклад, звук розповсюджується у певному напрямку і на його шляху опиняється повітряна куля. Відбувається відбиття сигналу і звук можливо записати мікрофоном з іншого місця (рис. 3.4). Має місце ефект еха і звук, що записаний мікрофоном, - це просторовий імпульсний відгук корисного сигналу. Відгук містить корисну інформацію і інформацію про положення джерела сигналу і об'єкта перевідбиття.

Фактично має місце поєднання технологій зв'язку та радіолокації. Джерелами інформації також є час затримки сигналу і його послаблення [20].

Наведений випадок притаманний звичайній радіолінії. Для розширення і узагальнення його для застосування технології МІМО нам потрібно більше повітряних куль (рис.3.5).

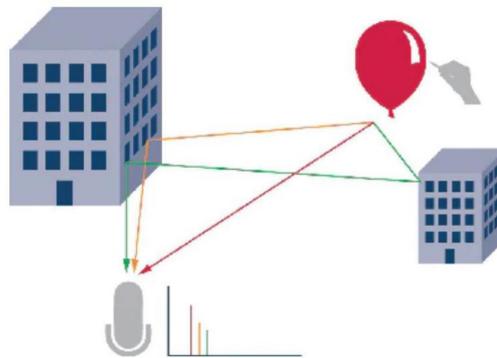


Рисунок 3.4 Відбиття звуку

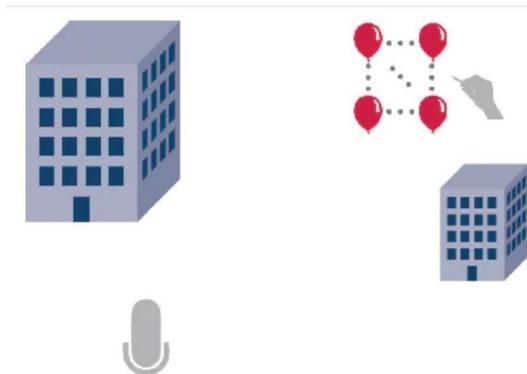


Рисунок 3.5 Приклад з багатьма кулями

Зауважимо, що для встановлення передаточних характеристик кожного окремого каналу потрібно здійснювати виміри відгуків від кожної кулі в окремі терміни часу. Це робиться для того, щоб відгуки різних сигналів від різних куль

не накладалися та спотворювалися між собою. Можливе також вимірювання і у зворотному напрямку (рис. 3.6).

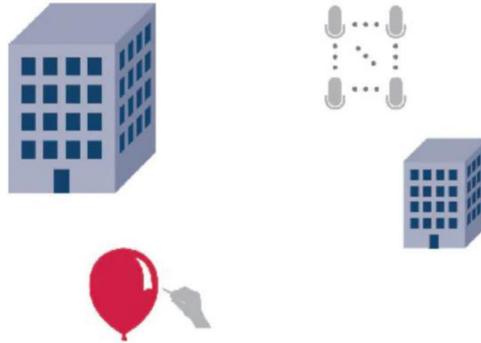


Рисунок 3.6 Аналогія з багатьма мікрофонами

У наведеному випадку всі виміри відгуків сигналів можуть бути виконані одночасно, що значно зменшить їх виконання за часом.

Для проведення вимірювань передавальних характеристик каналів у радіочастотному просторі зазвичай використовують пілотні сигнали (рис. 3.7). Тобто відбувається передача заздалегідь встановлених за параметрами (тестових) сигналів. Канали мають однакові характеристики на приймання та передачу але потрібно пам'ятати, що характеристики будуть змінюватися у залежності від частоти. Це має свої особливості для систем, що працюють з ущільненням за часом (далі – *TDD*) і за частотою (далі – *FDD*).



Рисунок 3.7 Використання пілот-сигналів

3.3 Обробка сигналу для Massive-MIMO

Математична складність оцінювання передаточних характеристик каналу пропорційна кількості антенних елементів в антенних системах ЦАР і кількості абонентів. З плином часу передаточні характеристики будуть змінюватися. Також місце знаходження абонентів може змінюватися. Це визначає періодичність проведення тестових вимірювань. Істотною перевагою, що значно спрощує проведення вимірювань, є необхідність проводити вимірювання тільки на базовій станції, а не на терміналі абонента.

У попередньому підрозділі описано спосіб формування матриці передаточних характеристик каналу H . Існує також декілька методів обчислення значень корисних сигналів на основі цих матриць. Рисунок 3.8 та 3.9 дають опис того, як працює обробка цифрова обробка сигналів за трьома методами на базовій станції та на терміналах абонентів [21, 22].

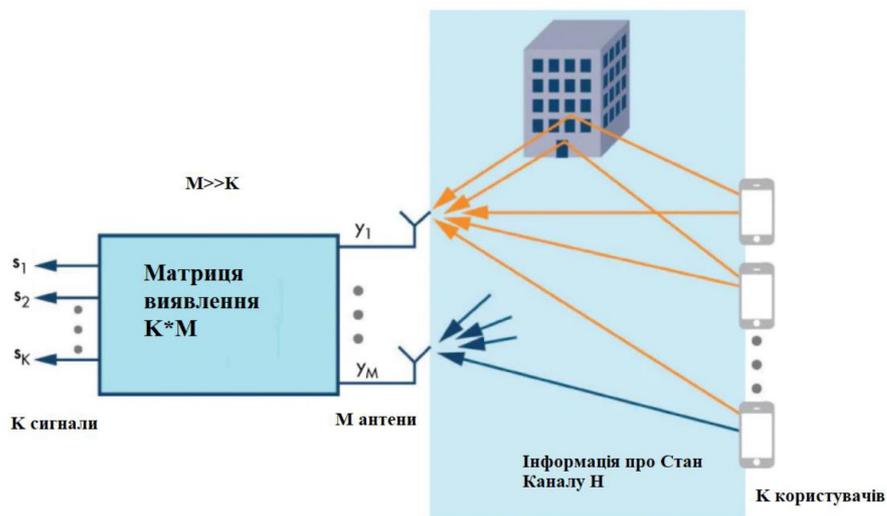


Рисунок 3.8 Модель приймання сигналу базовою станцією зв'язку

Таблиця 3.1

Методи цифрової обробки сигналу (до рис.3.8)

Метод обробки	Аналітичний вираз
<i>MR</i>	$s=H^H y$
<i>ZF</i>	$s=(H^H H)^{-1} H^H y$
<i>MMSE або RZF</i>	$s=(H^H H + \beta I)^{-1} H^H y$

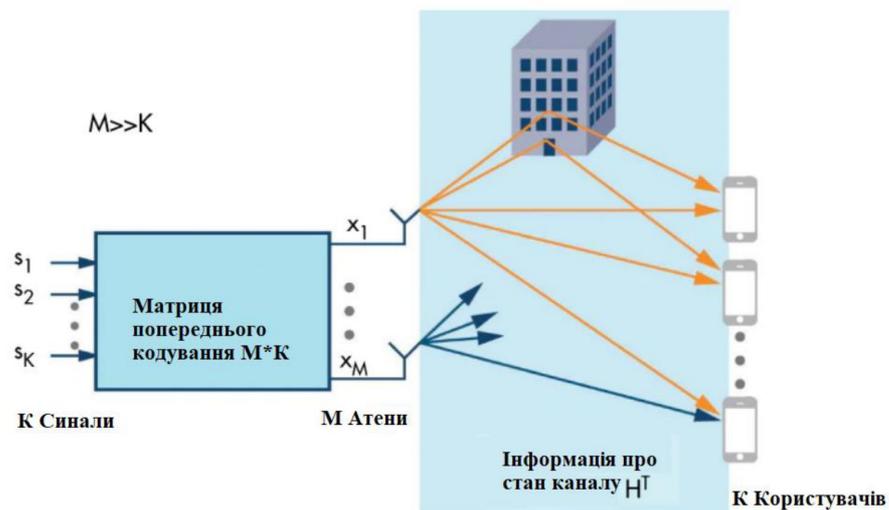


Рисунок 3.9 Модель передачі сигналу базовою станцією зв'язку

Таблиця 3.2

Методи цифрової обробки сигналу (до рис.3.9)

Метод обробки	Аналітичний вираз
<i>MR</i>	$x=H^* s$
<i>ZF</i>	$x=H^*(H^T H^*)^{-1} s$
<i>MMSE або RZF</i>	$x=H^*(H^T H^* + \beta I)^{-1} s$

У наведених в таблицях аналітичних виразах T позначає транспоновану матрицю, а $*$ позначає ермітово сполучену матрицю.

Метод максимальної фільтрації (далі – *MR*) орієнтований на виявлення максимального співвідношення сигнал/шум. Він найбільш аналітично простий з точки зору обробки сигналів. Суттєвим недоліком методу є ігнорування енергетикою перешкод та взаємних завад.

Метод нульового форсування (далі – *ZF*) попереднього кодування призначений для вирішення проблеми врахування взаємної інтерференції користувачами. Він є дещо складніший у порівнянні з попереднім методом. Також має місце зменшення потенційної точності методу.

Метод мінімізації середньо-квадратичної помилки (*MMSE* або метод найменших квадратів) намагається знайти баланс між одержанням оптимальної оцінювання сигналу та врахуванням енергетики перешкод у сумарній сигнальній суміші на вході приймальної системи.

Наведений перелік методів цифрового оцінювання параметрів сигналів далеко не повний. Проте він дає уявлення про аналітичний апарат цифрової обробки сигналів. Можуть також використовуватися і інші, нелінійні методи обробки сигналів. Ці методи також пропонують високу точність вимірювань але занадто складні математично, потребують значнішу кількість операцій і важкі у використанні.

Неведені автором методи придатні для роботи за технологією *Massive-MIMO*. Конкретний вибір методу для роботи залежить від конкретних умов. Це кількість абонентів, антен, антенних елементів у ЦАР, обчислювальних потужностей та інших важливих умов.

3.4 Massive-MIMO в 5G

У цей час технологія 5G знаходиться на етапі своєї розробки та сертифікації. Велика кількість представників зацікавлених стейкхолдерів

проводять спільні дослідження для вироблення єдиного бачення майбутнього обрису технології. Найголовнішою метою є збільшити кількість абонентів та пропускну спроможність стільникової мережі. Для виконання наведеного завдання існує потреба у базових станціях на основі нових наукових досягнень.

Сучасна базова станція зв'язку 4G має біля десятка портів для антен. Проте розробники дійшли висновку, що майбутні станції, базові станції 5G, повинні підтримувати декілька ЦАР з масивами близько сотні антенних елементів у кожній. Такий підхід дозволить збільшити кількість абонентів і пропускну спроможність стільникової мережі зв'язку в десятки і сотні разів (рис. 3.10).



Рисунок 3.10 Експериментальне обладнання *Massive-MIMO*

Наведена технологія одержала назву *Massive-MIMO*. Вона використовує у десятки разів більше приймально-передавальних пристроїв. Тобто, антен з підтримкою технології *MIMO* в одному масиві (рис. 3.11) [21, 22].



Рисунок 3.11 Порівняння кількості антен *MIMO* та *Massive-MIMO*

Збільшення кількості антен дозволить сформувати більшу кількість променів та охопити більш дрібні області простору. Наведене збільшить пропускну спроможність, частотну ефективність радіомережі, здешевить виробництво окремих компонентів ЦАР, збільшить конкурентну спроможність операторів шляхом зменшення витрат, спростить роботи на рівні *MAC*.

Експериментальні дослідження проведені з використанням платформи прототипування від National Instruments з програмним забезпеченням LabVIEW і апаратним забезпеченням PXI (Рис. 3.10) підтвердили ефективність технології. За умови підключення 22-х абонентів, ширині радіоканалу у 20 МГц, модуляції 256-QAM була досягнута частотна ефективність передачі даних у 145,6 (б/с)/Гц. Що вважається значним досягненням у галузі стільникового зв'язку.

Загалом до мереж мобільного зв'язку 5G вважається досягнутою реалізація часткових показників ефективності:

досягнення пікової швидкості передачі даних до 20 Гбіт/с на лінії від базової станції (далі – БС) до абонентської станції (далі – АС) – *Down line* (далі – *DL*), та 10 Гбіт/с на лінії від АС до БС – *Up Line* (далі – *UL*);

забезпечення швидкості передачі даних 100 Мбіт/с одночасно для багатьох користувачів в умовах мегаполісу;

підвищення спектральної ефективності до 30 біт/с/Гц для *DL* та 15 біт/с/Гц для *UL*;

одночасне підключення декількох сотень тисяч безпроводних датчиків;

досягнення надвисокої надійності мережі (вірогідність успішної доставки пакета протягом 1 мс повинна досягати 99,9999%);

зниження затримки на рівні управління в мобільному зв'язку до 5 мс, в супутниковому зв'язку – до 600 мс;

збереження якості обслуговування (далі – *QoS*) при швидкості руху мобільних терміналів до 500 км/год;

збільшення об'єму мережі до 1 000 000 терміналів на 1 км².

3.5 Особливості передачі інформації у Massive-MIMO системах

Вважається за доцільне навести, що одержані досягнення були одержані за ідеальних умов у кабінетах та лабораторіях дослідників. Реальна комерційна експлуатація значно знизить одержані результати. Абоненти будуть перебувати у русі, антенні системи абонентів будуть мати різні кути нахилу до базових станцій, урбанізована територія, наявність перешкод – все це буде негативно впливати.

Окремо хочеться відмітити, що різке збільшення випромінюючих елементів різко ускладнить вирішення питання електромагнітної сумісності радіо систем. Буде потребувати розробки методи боротьби з взаємними перешкодами. Значного ускладнення набуде цифрова обробка даних такими системами. В іншому випадку ефективна робота *Massive-MIMO* буде неможлива, тому потрібна доробка методів обробки інформації.

Приклад взаємних перешкод у роботі Massive-MIMO наведено на рисунку 3.12.

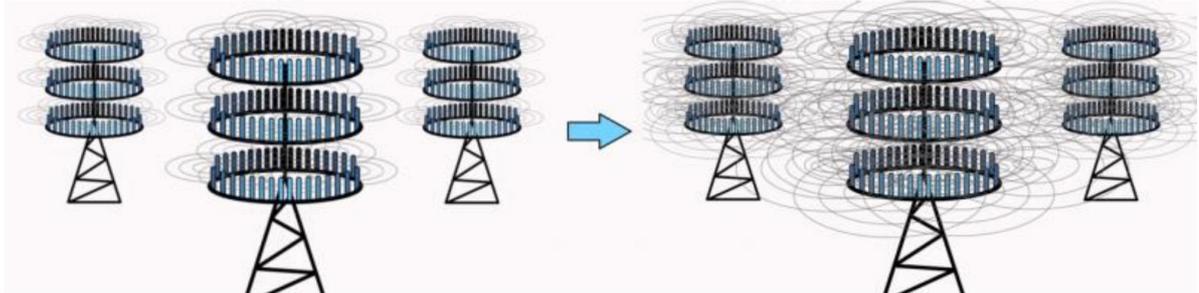


Рисунок. 3.12 Приклад перешкод

Наведене потребує творчого використання апробованих технологічних рішень. Це використання для організації робіт радіосистем з довжиною хвилі міліметрового діапазону, організація стільників невеликих розмірів; використання технології beamforming і дуплексних режимів передача даних.

Технологія *Massive-MIMO* має великий потенціал розвитку. Буде прекрасно масштабуватись. Коефіцієнт використання спектру частот було збільшено більш ніж у 2 рази. Досвід реальної експлуатації безумовно внесе свої корективи але вже зараз можливо стверджувати про значний успіх у розвитку стільникових систем.

У якості прикладу на рисунку 3.13 зображена дослідна модель практичної реалізації технології *Massive-MIMO* у лабораторії університету Лунд, Швеція. Воно складається із обладнання *USRP RIO* (зліва) і крос-поляризованої цифрової антенної решітки (справа) [20].

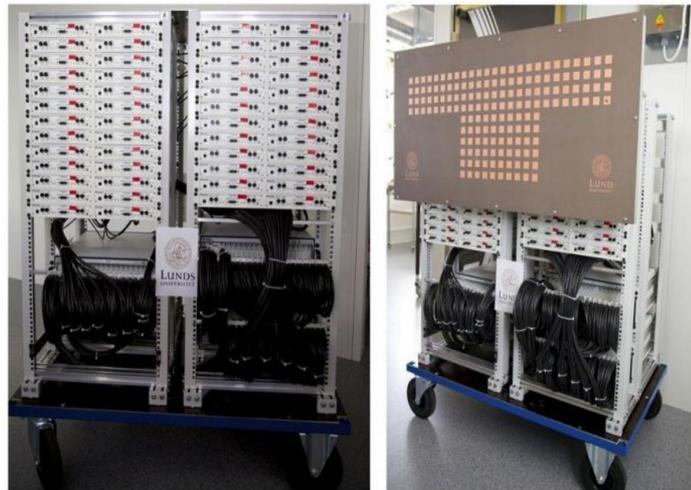


Рисунок 3.13 Обладнання *USRP RIO* та крос-платформенна антенна решітка.

3.6 Переваги системи Massive-MIMO

3.6.1 Виграш в просторовому рознесенні. Значною перевагою технології *Massive-MIMO* у порівнянні із звичайними системами *MIMO* є використання можливостей адаптивного діаграмоутворення (формування множинності променів (*beamforming*) у багатокористувацькому режимі (*Multi-user Massive-MIMO*). Приклад передачі даних з формавунням декількох променів цифровою антенною решіткою базової станції у напрямку на користувачів наведено на рисунку 3.14.

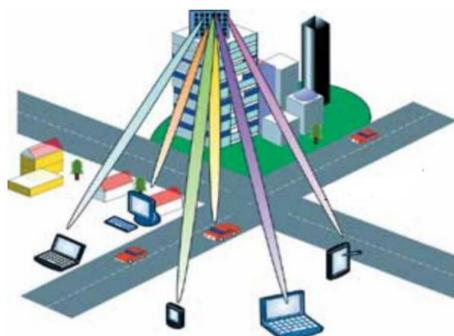


Рисунок 3.14 Формування променів для конкретних абонентів

Наведений на рисунку приклад дозволяє досягти просторового рознесення променів. При цьому є можливість формувати нулі у діаграмі спрямованості цифрової антенної решітки у напрямку на перешкоди. Таким чином покращується питання боротьби з перешкодами та електромагнітної сумісності. Наведене дозволяє підвищити спектральна ефективність функціонування мереж стільникового зв'язку. За рахунок зниження інтерференційних завад, більше немає потреби у складних механізмах ортогоналізації сигналів, що значно спрощує попередню обробку сигналів і збільшує енергетичну ефективність.

3.6.2 Енергетична ефективність. Енергетична ефективність визначається як відношення швидкості передачі інформації (біт/с) до 1 Вт потужності сигналу. З урахуванням віднесеної до спектральної щільності шумів [9]. Очевидно, що чим більша енергетична ефективність, тим менше відношення сигнал/шум необхідне для передачі одного біта даних, тим менше потужність потрібна на виході антенної системи базових станцій. Це дозволить зменшити енергоспоживання обладнання, покращити електромагнітну сумісність за рахунок зниження випромінюваної потужності. І головне знизити потужність випромінювання у районах розташування базових станцій, що покращить екологічну безпеку передавальних радіотехнічних об'єктів і населення у місцях його розташування.

Науково доведено, що при збільшенні на базовій станції кількості антенних елементів у системі *Massive-MIMO* до величини M , потужність електромагнітного випромінювання пропорційно зменшиться на $1/M$. Наведене справедливо для ідеальних у мов функціонування базової станції. Реальність дозволяє перейти до співвідношення $1/\sqrt{M}$.

3.6.3 Спектральна ефективність. Спектральна ефективність це відношення швидкості передачі даних (б/с) до ширини спектру частот сигналу.

Вона вимірюється у біт/с/Гц. Пропускна спроможність системи з використанням технології *Massive-MIMO* збільшується пропорційно із збільшенням кількості антенних елементів у цифрової антенній решітці. Так, за умови використання смуги частот шириною 20 МГц, дослідниками були одержані наступні результати: кожен абонент у зоні покриття базової станції збільшив швидкість передачі даних до 17 Мбіт/с; загальна пропускна спроможність базової станції становила 730 Мбіт/с (36,5 біт/с/Гц).

Деякі виробники телекомунікаційного обладнання стверджують про одержання 79,4 біт/с/Гц. Що відповідає швидкості передачі даних в 1,59 Гбіт/с. Порівнюючи із середнім значенням *MIMO 4*4* в *LTE-Advanced* (3,7 біт/с), перевага складає близько 20 разів за спектральною ефективністю.

Висновки до третього розділу

У даному розділі було обгрунтовано альтернативний шлях збільшення пропускної спроможності систем стільникового зв'язку за рахунок впровадження технології *Massive-MIMO*. Було розглянуто її переваги та недоліки.

Було здійснено аналіз виграшу у просторовому рознесенні, спектральну та енергетичну ефективність з просторовою модуляцією.

Було рекомендовано до впровадження і використання системи *Massive-MIMO* з урахуванням рекомендацій щодо обов'язкового використання технологій *beamforming*, планування використання стільників невеликих розмірів, та інших особливостей у роботі систем стільникового зв'язку.

ВИСНОВКИ

Для досягнення мети та часткових завдань дослідження, автором у дипломній роботі проведено аналіз технологій мобільного зв'язку. Визначено перелік вимог необхідних для забезпечення необхідної якості обслуговування абонентам. Стрімке зростання абонентського навантаження у мережах мобільного зв'язку, зміна його характеру і структури потребують безперервного і значного збільшення пропускної спроможності систем зв'язку. Технології радіоінтерфейсів практично досягають теоретичних меж каналної пропускної спроможності, і наступним кроком для підвищення ємності мереж є просторове ущільнення та вдосконалення методів управління розподілом радіоресурсом. Для досягнення більшої продуктивності мережі обґрунтовано застосування технології запропоновано використовувати мобільні мережі із стільниками різних розмірів.

У першому розділі виконано аналіз критеріїв ефективного управління ресурсами мережі. Проведено аналіз особливості та класифікація хендовера, функціонування і види передачі обслуговування між різними стандартами (вертикальний) та у середині однієї мережі (горизонтальний), що дещо збільшує ефективність обслуговування і розвантаження мережі.

У другому розділі проводиться аналіз особливостей використання сучасних антенних систем. Досліджено залежності навантаження у стільниковій мережі рухомого радіозв'язку (РРЗ) від кута місця діаграми спрямованості (ДС) базової станції (БС). Визначаються характеристики антенної техніки, яка найбільшим чином впливає на показники завантаження стільника. Автором визначиться перспективи використання інтелектуальних антенних систем (цифрових антенних систем) для удосконалення систем стільникового зв'язку.

У третьому розділі обґрунтовано рекомендації щодо збільшення пропускної спроможності мережі стільникового зв'язку шляхом впровадження технології

Massive-MIMO в мережі 5G, результати дослідження показали, що отримана швидкість буде значно перевищувати попереднє покоління мережі, що в свою чергу дозволить збільшити якість покриття, швидкість надання послуги та дозволить проводити надшвидкі обчислення на відстані;

У цілому, мета дипломної роботи досягнута, а отримані результати показали, що використання системи Massive-MIMO в мережі 5G є актуальним.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Бойко А. Б. Оцінка сучасного стану галузі зв'язку та інформатизації в Україні / А. В. Бойко // Економіка. Управління. Інновації. – Випуск № 1 (13). – 2015.
2. Зубко Л. В. Аналіз конкуренції на ринку мобільного зв'язку України / Л. В. Зубко, Т. Л. Зубко, Я. В. Сапега // «Економіка. Менеджмент. Бізнес». – № 3(13). – 2015. – С. 107-114.
3. Яцкевич І. В. Особливості конкурентоспроможності підприємств мобільного зв'язку України / І. В. Яцкевич, Ю. О. Жаданова // Розвиток методів управління та господарювання на транспорті № 1(42). – 2013. – 210-224.
4. Усик С. П. Аналіз послуг мобільного зв'язку на ринку України / С. П. Усик, С. А. Пономаренко // Сталий розвиток економіки. – 2013. – № 3. – С. 341-346.
5. Офіційний сайт державної служби статистики України. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.ukrstat.gov.ua>.
6. Послугу з перенесення номера мобільного телефону (MNP) впровадять у 2016 році, – УДЦР. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://ua.112.ua/suspilstvo/posluhu-z-perenesennia-nomera-mobilnoho-telefonuMNP-vprovadiat-v-2016-rotsi-udtsr-249010.html>.
7. Українці поступово відмовляються від зайвих SIM-карт. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://itc.ua/news/ukrainsyi-postепенno-otkazyivayutsya-ot-lishnih-sim-kart>.

8. Сьогодні компанії «Інтертелеком» виповнилось 15 років. – [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://itc.ua/news/segodnya-kompanii-intertelekom-ispolnilos-15-let>.
9. Сравнение тарифов 3G в Украине. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://trushenk.com/sravnenie-tarifov-3g-v-ukraine.html#sravnenie3g-2>.
10. Звіт про роботу Національної комісії, що здійснює регулювання у сфері зв'язку та інформатизації за 2015 рік. – Київ: 2016. – 94 с.
11. Столлингс В. «Современные компьютерные сети» 2-е издание – СПб.: Питер, 2003. – 783 с.
12. Ипатов В. П. Системы мобильной связи . - Горячая линия –Телеком, 2003.- 272 с.
13. Гольдштейн Б.С., Ехриель И.М., Рерле Р.Д Интеллектуальные сети . - Радио и связь, 2000.- 500 с.
14. Волков А. Н. UMTS. Стандарт сотовой связи третьего поколения / А. Н. Волков, А. Е. Рыжков, М. А. Сиверс. – СПб. : Издательство “Линк”, 2008.— 224 с.
15. Кааринен Х. Сети UMTS. Архитектура, мобильность, сервисы / Х. Кааринен, А. Ахтиайнен. —М. : Тех-носфера, 2007.—464 с.
16. 3GPP TS 36.104. Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) radio transmission and reception (Release 8).
17. Стрихалюк Б.М. Моделювання та тестування системи управління гетерогенної мережі доступу / Б.М. Стрихалюк, М.І. Бешлей, Г.В. Холявка, М.В. Брич // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – К.: - 2015. – №1 - С. 22-31.
18. M. Klymash, M. Beshley and B. Stryhaluk, "System for increasing quality of service of multimedia data in convergent networks," 2014 First International

Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology, Kharkov, 2014, pp. 63-66.

19. Тихвинский В.О., Терентьев С.В., Коваль В.А. Сети мобильной связи 5G: технологии, архитектура и услуги. – М.: Медіа Паблішер, 2019.

20. Xiang Gao, Massive MIMO в реальных средах распространения, Лундский университет, 2016.

21. Активные антенны и Massive MIMO для 5G Активные антенны и Massive MIMO для 5G [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://shalaginov.com/2021/01/15/active-antenna-massive-mimo-5g/>

22. 5G White Paper. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ngmn.org/work-programme/5g-white-paper-2.html>

Додаток А

2

ANALYSIS OF THE COVER OPTIMIZATION ALGORITHM AND REDUCTION OF MOBILE RADIO COMMUNICATION NETWORKING USING DIGITAL ANTENNA ANTENNAS

In the second section of the thesis the author analyzes the features of the use of digital antenna arrays as antenna systems for base stations of the cellular network depending on the angle of the radiation pattern of the base station. An analysis of the characteristics of the antenna technology that affect the performance of the cellular network. Prospects for the possible use of digital antenna arrays in combination with algorithms for early detection of local congestion of the cellular network based on statistical parameters of subscriber mobility are formed.

2.1 Overview of the capabilities of antenna technology based on digital antenna arrays

In recent decades, digital antenna array technology has been actively implemented in third and fourth generation cellular standards. Increasing the bandwidth requirements of cellular networks encourages the further development of digital antenna array technology, the transition from linear to flat and conformal pyramidal digital antenna arrays with an increased number of antenna elements.

The advantages of digital antenna array technology are the possibility of adaptive generation of the antenna system due to the implementation of phase differences at the inputs of different antenna elements of the digital antenna array and the formation of the antenna system in digital form in the processor. Control of the pattern of the antenna system is simultaneously combined with MIMO technology, creating a synergistic effect.

Thus, by controlling the pattern of the base station at an angle or in the azimuthal plane, it is possible to change the service area of the base station. Antenna equipment of this class is widely used by both commercial and special users.

Changing the angle of the DS at an angle or in the azimuthal plane of the digital antenna array of the base station can be done in two ways. Mechanical tilt of the antenna or the formation of the radiation pattern in electronic form.

The simplest method of tilting the beam DS CAR in the vertical plane is carried out due to the operation of a mechanical rotation unit for tilting the entire antenna system. It is usually implemented in phased array antennas (FAR), which were implemented before the advent of powerful computing tools for the formation of DS in digital form. When mechanically rotating the node of the antenna system distorts the shape of the DS antenna in the horizontal plane, there is an analytical dependence of the gain of the antenna on the angle of the antenna system. When forming the DS in electronic form, this disadvantage is eliminated, the angle does not depend on the azimuth, and the shape of the DS antenna remains unchanged.

In contrast to the mechanical inclination of the antenna system in more advanced systems, the inclination of the DS is provided by the formation of the phase difference at the inputs of the antenna elements of the CAR. The antenna itself remains in a

vertical position without movement. The given scheme is realized either by cable distribution, which statically fixes the inclination of DS CAR, or by phase shifters for each antenna element of HEADLIGHTS. The described variant of the structural scheme of headlights is shown in Figure 2.1.

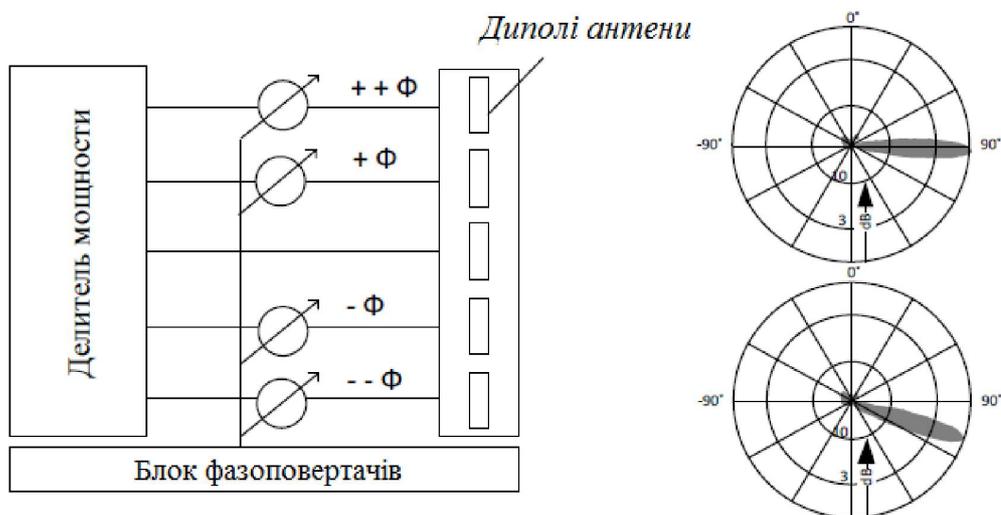


Fig. 2.1. A variant of the structural scheme of the headlights

2.2 Dependence of the subscriber load on the area of the coverage area of the cellular base station

As shown in the previous section, the control of the area of the cell BS can be done by changing the angle of the DS antenna. To establish analytical ratios for the subscriber load in the cell from its area, we assume the assumption of uniform distribution of subscribers in the cell and the same subscriber load created by each. To

determine the load, we use the Erlang model for the channel with failures. For this case, the total subscriber load will look like:

$$\rho_{\Sigma} = I\rho_{\text{CH}}, \quad (2.1)$$

where ρ_{CH} - average load created by each subscriber (Erlang);

I - the number of subscribers in the cell.

Obviously, I depends on the number of subscribers, and the number of subscribers depends on the area S of the coverage area of the BS. Then the number of subscribers can be described by the following expression:

$$I = \rho S, \quad (2.2)$$

where ρ - the density of cellular subscribers in a given area (rpm);

S - the coverage area of the base station's communication cell (km²).

Thus, the author established the analytical dependence of the subscriber load of the communication cell on the coverage area of the BS, provided that the assumption of uniform distribution of subscribers in the cell and the same subscriber load in them.

2.3 Calculation of the dependence of the coverage area on the angle of the antenna

Determining the area of the BS coverage area is quite a difficult task. Because the area of the coverage area in addition to the value of the angle of the antenna is also affected by the terrain. Therefore, the area of the coverage area will have a complex

shape. To determine its area, we use the methodical method of conditional division into several equivalent triangles and give the total area of the coverage area S by the sum of the areas of equivalent triangles S_i , where $u = 1 \dots a$ (Fig. 2.2.)

The areas of equivalent triangles are approximately equal to $\Delta OBC \approx \Delta OB'C'$. Therefore, for known values of the sides of the triangle r_i, r_{i+1} and the angle δ , the calculation of the area of the i -th triangle will take the expression:

$$S_i = tg(\delta) \left(\frac{r_i + r_{i+1}}{2} \right)^2. \quad (2.3)$$

Thus, we obtain an approximate estimate of the area of the i -th, but when the angle of the triangle δ is directed to 0, the accuracy of the estimate will increase.

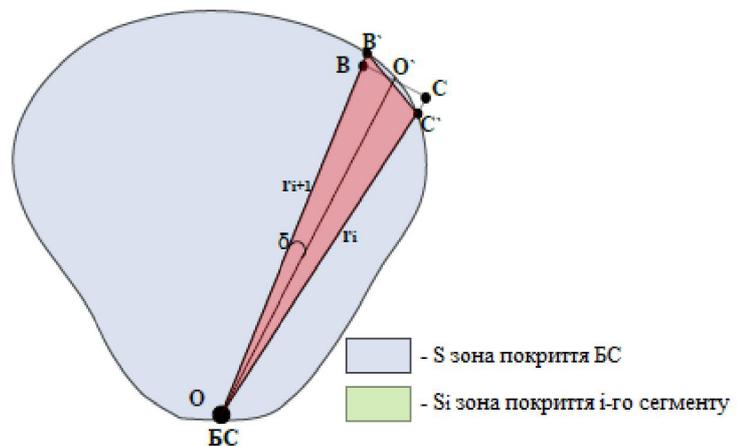


Fig.2.2 Conditional division of the coverage area of the base station into equivalent triangles

To calculate the communication range, we will use well-known models of electromagnetic radiation propagation on the route of the communication channel. The key indicators will be the signal power, the gain of the receiving and transmitting antennas, the sensitivity of the receiver. Determine the allowable level of power loss of the useful signal on the signal propagation path:

$$L_{\text{доп}i} = P_{\text{випр}} - \varepsilon_{\text{пр}} + Ku_{\text{при}} + Ku_{\text{неpi}}, \quad (2.4)$$

where P_{exam} - radiation power of the mobile subscriber (MA);

ε is the sensitivity of the BS receiver;

$Ku_{\text{при}}$ - gain of the antenna of the receiver BS;

$Ku_{\text{неpi}}$ - the gain of the antenna of the MA transmitter;

$i=1 \dots a$ - the direction from BS to MA or the step of approximation of the area BS coverage according to the principle shown in Figure 2.2.

To simplify the calculations of $L_{\text{доп}i}$, it is possible to use a simplified calculation formula that uses information about the signal frequency and the height of the receiving and transmitting antennas:

$$L_{\text{доп}i} = 69,55 + 26,15 \lg(f) - 13,82 \lg(h_{\text{бс}}) - \alpha(h_{\text{ма}}) + (44,9 - 6,55 \lg(h_{\text{бс}})) \lg(r_i), \quad (2.5)$$

where $h_{\text{бс}}$ is the height of the BS antenna;

$h_{\text{ма}}$ - height of MA antenna placement;

f - signal frequency;

r_i - the distance between BS and MA.

From expression 2.5 it is easy to determine the communication distance for the i -th direction between BS and MA

$$r_i = 10 \wedge \left(\frac{L_{\text{доп}} - 69,55 - 26,15 \lg(f) + 13,82 \lg(h_{6c}) + \alpha(h_{\text{ма}})}{(44,9 - 6,55 \lg(h_{6c}))} \right). \quad (2.6)$$

The next step is to establish the dependence of the communication range on the information direction base station - mobile subscriber from the azimuth angle of the DS CAR of the base station. The solution of a certain question can be done in several ways: analytically establish a mathematical expression describing the dependence; to conduct practical tests and establish experimentally; use special software. Let's explore all the above methods in solving our problem.

To solve the problem in an analytical way, we introduce some restrictions. We will assume that the mobile subscriber is on the verge of confident signal reception (at the maximum distance).

According to the author's assumption, the values (approximate) for the given information direction (Table 2.1) and considering the angle of the antenna pattern from 0 to 1 degree, using expression (2.6), the value of the communication range will reach 6 kilometers.

Table 2.1.

Typical values of the information direction of the base station - a mobile subscriber of the GSM standard

Параметр	Значення	Одиниця виміру
f	900	МГц
h_{bc}	30	м
h_{ma}	2	м
$P_{випр}$	25	дБм
ϵ_{np}	-110	дБм
Ku_{bc}	17,15	дБі
$L_{дон}$	152,15	дБ

This case, the propagation of the signal without the deviation of the DS CAR at an angle or with minimal deviations, is illustrated in Figure 2.3.

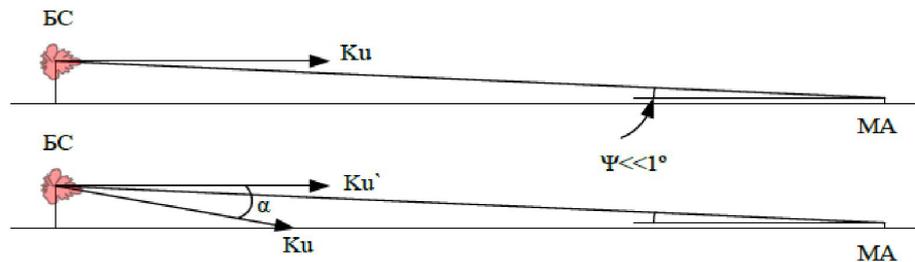


Fig.2.3. An example of signal propagation of a base station with minimal deviation at an angle

Carrying out a further generalization of the approach given by the author on the approximation of the polynomial (2.6), it is possible to develop an algorithm for calculating the value of r_i in order to write on its basis an information-calculation problem. However, such an approach is quite simplified and does not take into account frequency-selective fading and multipath signal propagation.

The essence of the practical way to establish patterns is to conduct experimental research in specially created conditions that are close to the real conditions of the information direction. Thus at creation of model of system it is necessary to consider and exclude all conditions of carrying out which can distort its results. The study also

requires a significant number of experimental measurements in all necessary directions. Significant costs, lack of the necessary metrological equipment for users makes this method not always acceptable and cumbersome for practical application.

The use of specialized software provides an opportunity to combine simplicity of calculations and reliability of the obtained results. Using specialized software to calculate the power level of the electromagnetic field, it is possible to obtain a sample of the results of the dependence of the communication distance on the values of the azimuth angle of the DS CAR α .

Conclusions to the second section

1. Based on the analysis of prospects for the use of digital antenna arrays to address the issue of antenna pattern control in order to quickly manage the coverage area and prevent congestion of the cellular network, it was suggested the need to improve congestion prevention techniques.

2. The author obtained the basic relations for forecasting congestion: the threshold for starting the procedure of redistribution of resources, the duration of the procedure of additional control.

Додаток Б

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та робототехніки
Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА

НА ТЕМУ **Дослідження способів оптимізації трафіка мереж мобільного зв'язку**

*Виконав: студент 4 курсу, групи 401-ТТ
Комісаренко Д.А.
Керівник: д.т.н., доцент Сокол Г.В.*

Полтава-2021

Слайд 2 **МЕТА ТА ЗАВДАННЯ БАКАЛАВРСЬКОЇ РОБОТИ**

Мета роботи: дослідження функціональності систем мобільного зв'язку та покращення якості послуг шляхом розвантаження частини трафіка мереж.

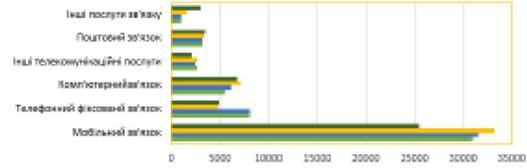
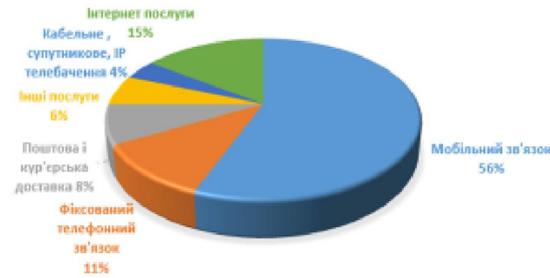
Об'єкт дослідження: процес забезпечення ефективності функціонування мережі шляхом розподілу ресурсів при перевантаженні в мобільних мережах зв'язку

Предмет дослідження: методи та засоби розвантаження трафіку мереж мобільного зв'язку.

Завдання

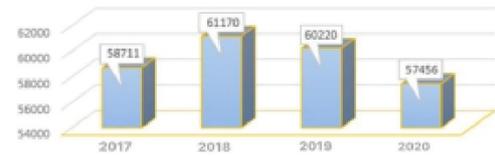
1. Аналіз сучасного стану розвитку мережах стільникового зв'язку
2. Аналіз алгоритму оптимізації покриття та зниження перевантаження мережі рухомого радіозв'язку при використанні інтелектуальних антен
3. Моделювання процесів функціонування і динамічного розподілу ресурсів при перевантаженні в мобільних мережах зв'язку.

Слайд 3 **ОЦІНКА СУЧАСНОГО СТАНУ РОЗВИТКУ РИНКУ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ В УКРАЇНІ**



	Мобільний зв'язок	Телефонний фіксований зв'язок	Комп'ютерний зв'язок	Інші телекомунікаційні послуги	Поштовий зв'язок	Інші послуги зв'язку
2018	25425	4880	6686	2068	8525	2983
2017	33205	4845	7144	2856	5426	1618
2016	31566	8057	8100	2476	3215	972
2015	30965	8653	5592	2588	8242	1005

Оператор	Технології	Кількість абонентів, млн.	Частка ринку
КИЇВСТАР	GSM,UMTS,LTE	25,3	44%
vodafone	GSM,CDMA,UMTS,LTE	20,7	36%
lifecell	GSM, UMTS,LTE	9,7	16,9%
ІНТЕРТЕЛКОМ	CDMA	1,313	2,3%
Інші оператори	GSM,CDMA,UMTS,WiMax		0,8%



Слайд 4 **АНАЛІЗ ДИНАМІКИ ЗРОСТАННЯ ТРАФІКУ В МОБІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ ЗВ'ЯЗКУ**

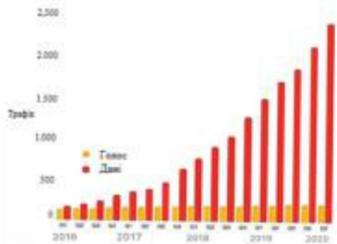


Рис. 1. Швидкість зростання голосового та даних трафіку

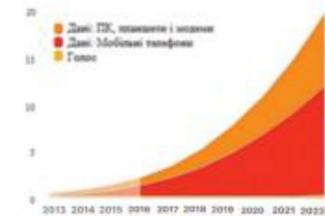


Рис. 2. Прогноз зростання мобільного даних трафіку

Тенденції розвитку, що визначають зростання мобільної передачі даних:

- зростання числа мобільних користувачів.
- зростання числа мобільних підключень.
- збільшення швидкості мобільної передачі
- зростання мобільної передачі відео.

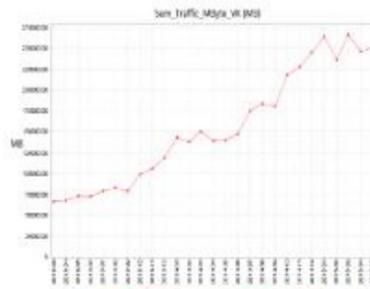


Рис. 3. Динаміка зростання трафіку на 3G мережі реального оператора

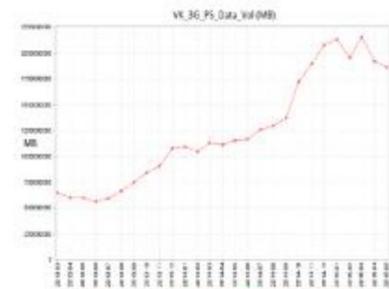


Рис. 3. Динаміка зростання трафіку на 4G мережі реального оператора

Слайд 5 **КРИТЕРІЙ ЕФЕКТИВНОГО УПРАВЛІННЯ РЕСУРСАМИ МЕРЕЖІ**

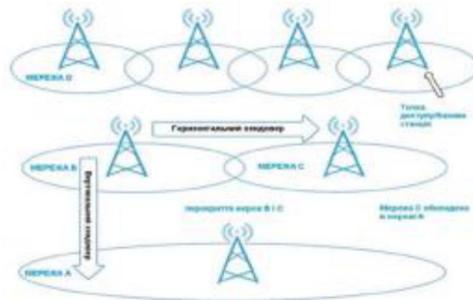


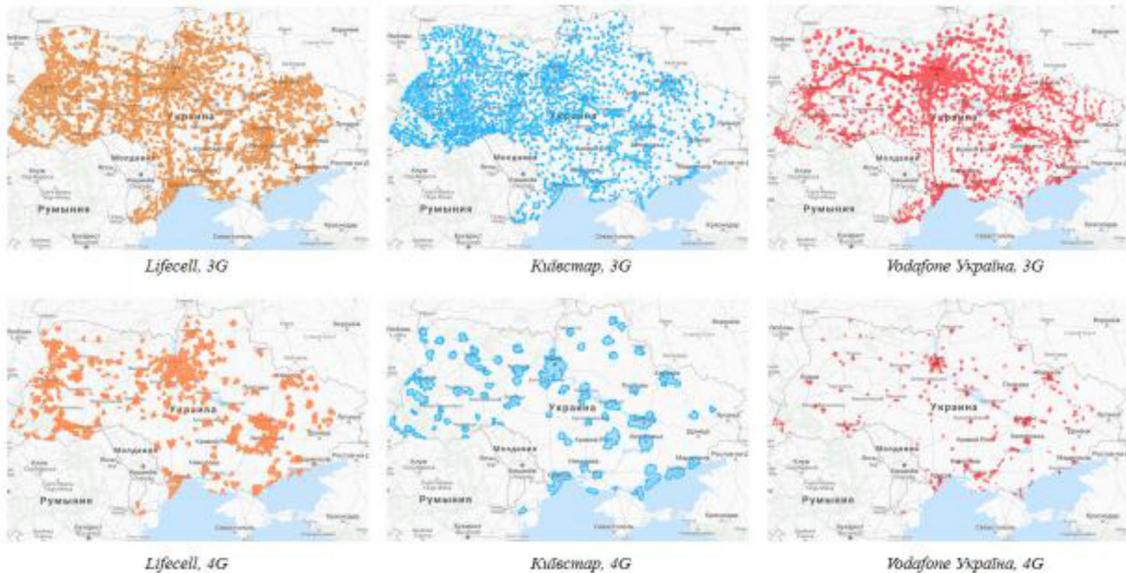
Рис. 1. Вертикальний і горизонтальний хендовер

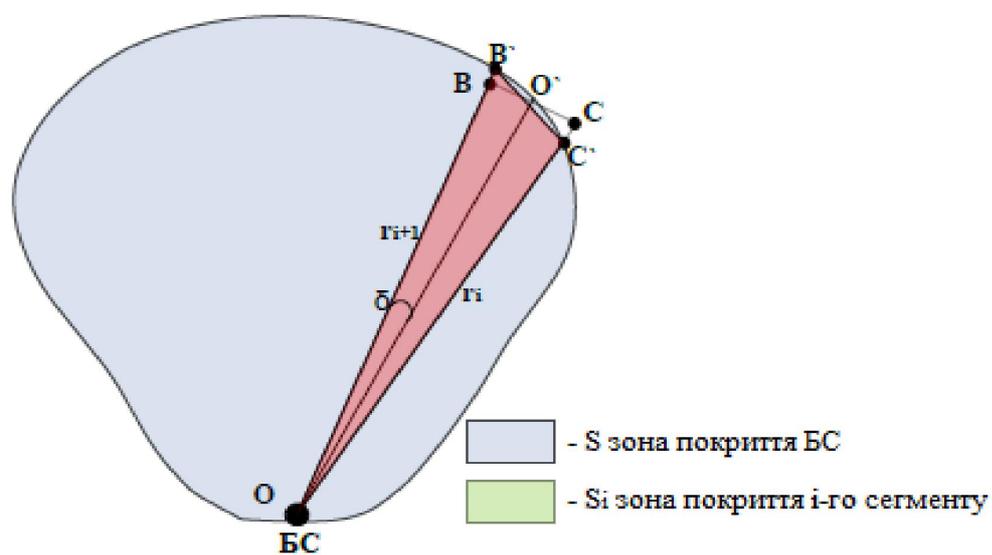


Рис. 2 Критерій для рішення запуску хендовера

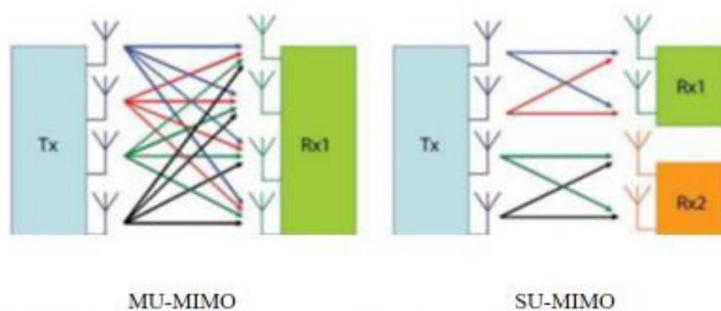
Управління мобільністю і завантаженістю є досить складними процесами в мобільній мережі, тому при плануванні та подальшому безперебійному функціонуванні мережі, для уникнення перевантаження, оператори приділяють велику увагу процесу передачі обслуговування (хендовер) як в середині (горизонтальний) одного стандарту так і між різними (вертикальний).

Слайд 6 **ПОКРИТТЯ МЕРЕЖ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ В УКРАЇНІ**





Слайд 8 Технологія MIMO



При однаковій пропускній здатності систем *SU-MIMO* і *MU-MIMO*, остання дозволяє знизити вимоги до кількості антен клієнтів, що в свою чергу веде до зниження вартості пристрою і його розмірів.

Слайд 9 Аналіз відмінностей між звичайними MU-MIMO та Massive MIMO

Критерій	Звичайний MU-MIMO	Massive MIMO
Зв'язок між кількістю антен BS (M) та користувачів (K)	$M \approx K$ обидва малі (наприклад, нижче 10)	$M \gg K$ обидва можуть бути великими (наприклад, $M = 100; K = 20$).
Дуплексний режим	Призначений для роботи як з TDD, так і з FDD	Призначений для роботи TDD для взаємного використання каналу
Придбання каналу	В основному на основі кодових книг із набором заздалегідь визначених кутових променів	Засноване на відправленні проб висхідної лінії зв'язку та взаємного використання каналів
Якість послання після попереднього кодування / комбінування	Змінюється з плином часу та частотою внаслідок вибіркової та дрібних завад	Майже відсутні зміни в часі та частоті завдяки зміцненню каналів
Розподіл ресурсів	Розподіл повинен швидко змінюватися, враховуючи зміни якості каналу	Розподіл можна спланувати заздалегідь, оскільки якість каналу змінюється повільно
Ефективність стільникового краю	Добра, лише якщо базові станції співпрацюють	SNR для краю соти збільшується пропорційно кількості антен, не викликаючи більших перешкод між сотами

Слайд 10. Діапазони спектру мереж 5го покоління

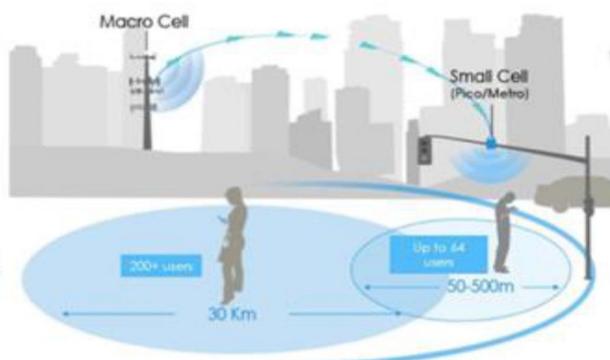
6

Frequency Range 1

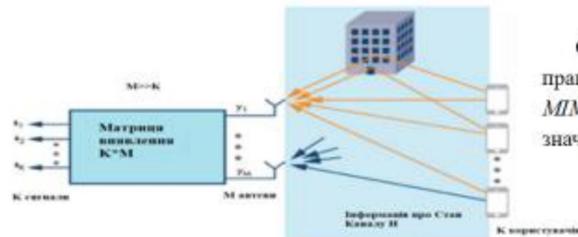
< 6 ГГц.

Frequency Range 2

24 ГГц - 50 ГГц



Слайд 11 Методика застосування Massive MIMO в мережах 5 покоління

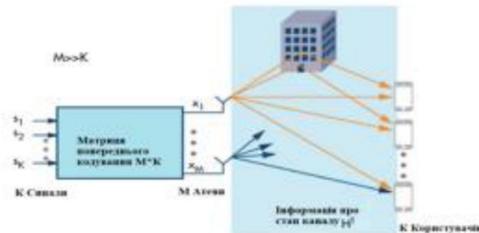


Описані лінійні підходи, як правило, достатні для *Massive-MIMO*, де кількість антен стає значною.

Зображення вхідної лінії зв'язку

Метод обробки	Аналітичний опис методу
<i>MR</i>	$s=H^H y$
<i>ZF</i>	$s=(H^H H)^{-1} H^H y$
<i>MMSE або RZF</i>	$s=(H^H H + \beta I)^{-1} H^H y$

Слайд 12 Методика застосування Massive MIMO в мережах 5 покоління



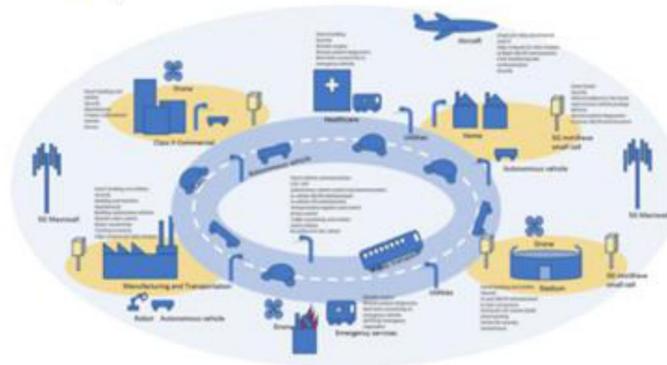
Описані лінійні підходи, як правило, достатні для *Massive-MIMO*, де кількість антен стає значною.

Зображення вихідної лінії зв'язку

Метод обробки	Аналітичний опис методу
<i>MR</i>	$x=H^* s$
<i>ZF</i>	$x=H^* (H^T H^*)^{-1} s$
<i>MMSE або RZF</i>	$x=H^* (H^T H^* + \beta I)^{-1} s$

Слайд 13 Приклади практичного впровадження 5G мереж

- Охорона здоров'я
- Виробництво
- Віртуальна і доповнена реальність (VR/AR)
- Автомобільна галузь
- Фіксований бездротовий доступ
- Мегаполіси
- Енергія
- Хмарні технології



Слайд 13 **ВИСНОВКИ**

Отже, підсумовуючи вищесказане, у дипломній роботі проведено аналіз технологій мобільного зв'язку та їх технічних характеристик. Визначено, перелік вимог необхідних для забезпечення необхідної якості обслуговування абонентам.

У другому розділі досліджено перспективи використання інтелектуальних антенних систем. Аналіз показав, що зміна параметрів діаграми спрямованості антени є ефективним методом регулювання навантаження в мережах мобільного зв'язку, при цьому характер зміни ймовірності блокування безпосередньо залежить від параметрів діаграми спрямованості

У практичній частині за допомогою імітаційної моделі проведено дослідження процесу балансування навантаження між БС різних типів, що дозволяє підвищити якість обслуговування клієнтів, уникаючи перевантажень на мережі зв'язку.

*ДЯКУЮ ЗА УВАГУ
ДОПОВІДЬ ЗАВЕРШЕНО*