

Не містить відомостей, заборонених до відкритого публікування

Студент _____ / Куріцин О.С. /
Керівник _____ / Ширяєв А.В. /

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет інфокомунікацій
Кафедра інформаційно-мережної інженерії
Рівень вищої освіти другий (магістерський)
Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка
(код і повна назва)
Тип програми Освітньо-наукова
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)
Освітня-наукова програма Інформаційні мережі зв'язку
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

«_____» _____ 2021 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Куріцину Олександр Сергійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Підвищення продуктивності систем пасивної ретрансляції у Wi-Fi
мережах

затверджена наказом по університету від «12» березня _____ 2021 р. № 350 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії «19» травня 2021 р.

3. Вихідні дані до роботи Розробити підвищення продуктивності систем пасивної ретрансляції у Wi-Fi мережах за стандартами IEEE 802.11 b,g,n.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____
Вступ та висновки

1. Огляд сімейства технологій стандарту IEEE 802.11 b, g, n

2. Загальні принципи систем пасивної ретрансляції

3. Аналіз типів спрямованих антен у пасивного ретранслятора

4. Моделювання антен із використанням ЕОМ

5. Аналіз продуктивності угруповання бездротової локальної мережі WiFi з урахуванням пасивного ретранслятора в межах будівлі

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) Слайди у форматі Power Point в кількості 15 слайдів

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Ознайомлення із завданням. Уточнення ТЗ.</i>	25.01.2021	
2	<i>Підбір літератури за темою роботи.</i>	26.01 – 02.02.21	
3	<i>Виконання розділу 1</i>	03.02 – 15.02.21	
4	<i>Виконання розділу 2</i>	16.02 – 28.02.21	
5	<i>Виконання розділу 3</i>	01.03 – 14.03.21	
6	<i>Виконання розділу 4</i>	15.03 – 25.03.21	
7	<i>Виконання розділу 5</i>	26.03 – 10.04.21	
8	<i>Оформлення пояснювальної записки</i>	11.04 – 27.04.21	
9	<i>Оформлення презентаційного матеріалу, підготовки до захисту у ЕК</i>	28.04 – 10.05.21	

Дата видачі завдання 25.01.2021

Студент _____

(підпис)

Керівник роботи _____

(підпис)

доц. Ширяєв А.В.

(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 96 с., 46 рис., 8 табл., 13 джерел.

Об'єктом дослідження є система радіо доступу для користувача пристроїв Wi-Fi.

Метою роботи є планування бездротової мережі абонентського доступу Wi-Fi та аналіз якості функціонування офісних бездротових систем стандарту IEEE 802.11 b/g в квартирах будинку.

Системи абонентського радіо доступу в останні роки набули широкого поширення у операторів зв'язку, в побутовому плані, при організації тимчасових заходів (виставки, заходи охорони, збори), на промислових підприємствах і в бізнес-центрах. Ці системи мають цілу низку унікальних переваг в порівнянні з провідними системами: швидкість розгортання і згортання, зручність використання, переміщення, можливість швидкого підключення до мережі, велика надійність, особливість у тимчасово створюваних структурах. Вважається, що частка систем абонентського радіо доступу в обсязі абонентських послуг становить всього 30%.

АБОНЕНТСЬКИЙ ТЕРМІНАЛ, БАЗОВА СТАНЦІЯ, ВПЛИВ, ЙМОВІРНІСТЬ, ЗАХИСНА ВІДСТАНЬ, ЗАХИСНА СМУГА ЧАСТОТ, КРИТЕРІЙ, ОЦІНКА, ПРОПУСКНА ЗДАТНІСТЬ, СИСТЕМА АБОНЕНТСЬКОГО РАДІО ДОСТУПУ, ЕФЕКТИВНІСТЬ, ІНТЕРНЕТ

ABSTRACT

A diploma project contains: 96 with., 46 fig., 8 tabl., 13, sources.

A research object is the system of the user device radioaccess Wi-Fi.

The purpose of work is planning of wireless network of the subscriber access Wi-Fi and analysis of quality of functioning of the office wireless systems of standard of IEEE 802.11b/g in the apartments of building.

The systems of subscriber radioaccess in the last few years acquired high vogue at the operators of communication, in domestic terms, during organization of temporal actions (exhibitions, guard measures, collections), in industrial enterprises and business centers. These systems are had whole row unique advantages by comparison to the wire systems: speed of development and rolling up, comfort of the use, moving, possibility of rapid network, large reliability, special in the temporally created structures. It is considered, stake of the systems of subscriber radioaccess in the volume of subscriber services make 30% all.

SUBSCRIBER TERMINAL, BASE STATION, INFLUENCING, PROBABILITY, PROTECTIVE DISTANCE, DEFENCE ZONAL OF FREQUENCIES, CRITERION, ESTIMATION, CARRYING CAPACITY, SYSTEM OF SUBSCRIBER RADIOACCESS, EFFICIENCY, INTERNET

ЗМІСТ

	с.
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ.....	9
ВСТУП.....	10
1 ОГЛЯД СІМЕЙСТВА ТЕХНОЛОГІЙ СТАНДАРТУ IEEE 802.11 b, g, n.....	11
1.1 Архітектура IEEE 802.11.....	11
1.2 Стандарт IEEE 802.11g.....	14
1.3 Особливості стандарту IEEE 802.11n.....	15
1.4 Антенні технології МІМО в стандарті IEEE 802.11n.....	19
1.5 Проблематика планування і аналіз параметрів якості функціонування мереж Wi-Fi.....	22
2 ЗАГАЛЬНІ ПРИНЦИПИ СИСТЕМ ПАСИВНОЇ РЕТРАНСЛЯЦІЇ.....	26
2.1 Пасивний ретранслятор з використанням двох антен.....	28
2.2 Вибір типів антен.....	29
2.3 Вибір зовнішньої антени.....	29
2.4 Вибір внутрішньої антени.....	33
3 АНАЛІЗ ТИПІВ СПРЯМОВАНИХ АНТЕН У ПАСИВНОГО РЕТРАНСЛЯТОРА.....	35
3.1 Антени Харченко для використання у стандарті WI-FI.....	35
3.2 Електрично керована пасивна антенна решітка.....	37
3.3 Опис ESPAR антени.....	38
3.4 Будова ESPAR антени.....	40
3.5 Опис та побудова активної антенної решітки	41
4 МОДЕЛЮВАННЯ АНТЕН ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ EOM.....	46
4.1 Моделювання діаграми спрямованості штатної антени.....	46
4.2 Моделювання діаграми спрямованості антени Харченко.....	48
4.3 Моделювання діаграми спрямованості ESPAR-антени.....	49
4.4 Моделювання діаграми спрямованості антени Beanflex.....	51
4.5 Вибір оптимальної антени за сукупністю показників якості.....	53

5 АНАЛІЗ ПРОДУКТИВНОСТІ УГРУПОВАННЯ БЕЗДРОТОВОЇ ЛОКАЛЬНОЇ МЕРЕЖІ WiFi З УРАХУВАННЯМ ПАСИВНОГО РЕТРАНСЛЯТОРА В МЕЖАХ БУДІВЛІ.....	57
5.1 Постановка завдання впливу декількох бездротових WiFi - мереж на одну досліджувану.....	57
5.1.1 Формування діаграми AX.....	57
5.1.2 Формування діаграми VeamFlex.....	62
5.2 Методика аналізу продуктивності.....	63
ВИСНОВКИ.....	72
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	73
ДОДАТОК А	
Методика експериментальних досліджень оцінки взаємних впливів в системах абонентського радіодоступу в середовищі MatLAB 16.....	75
ДОДАТОК Б	
Слайди презентації.....	85
.....	85

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,
СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ

АТ - абонентський термінал

БС - базова станція

РЕС - радіоелектронний засіб

РРЛ - радіорелейний лінія

ШПС - шумоподібний сигнал

CSMA / CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) - метод доступу з уникненням колізій

CSMA / CD (Carrier Sence Multiple Access with Collision Detection) - метод доступу з виявлення Коллз

ESPAR (Electrically-Steerable Parasitic Array Radiator) – електрично керована антенна решітка

FDD (Frequency Division Duplex) - дуплекс з частотним поділом

FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) - технологія розширення спектра стрибкоподібної зміною частоти

FH - frequency hopping - скачки по частоті

GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying) - частотна модуляція з мінімальним зрушенням.

ISM (Industrial, Science, Medicine) - неліцензований діапазон, в якому працюють промислові, наукові та медичні пристрої. MMDS (Multichannel Multipoint Distribution Service) - багатоканальні багатоточкові розподілені послуги.

OFDM (Orthogonal Frequency Domain Multiplexing) - ортогональна фазова маніпуляція

WLAN (Wireless Local Area Network) - бездротова локальна мережа

WLL (Wireless Local Loop) - бездротова локальна лінія зв'язку

ВСТУП

Інфокомунікаційні мережі Wi-Fi IEEE 802.11 b / g / n більше отримують популярність як серед професіоналів, так і користувачів. Завищену привабливість до таких систем викликають відносно низькі витрати на компанію зв'язку, простота розміщення і згортання мережі, зручність використання, пружність архітектури мережі та ін. Разом з перевагами в таких системах є і недоліки. Важливим серед яких є проблема нестійкого прийому, що виникає в результаті відкритості ефіру, а також у зв'язку з тим, що в діапазонах частот, які використовуються в 802.11 b/g/n працюють і другі радіоелектронні системи: засоби радіозв'язку інших служб, медичні, промислові, побутові та інші установки. Природно, що в такій ситуації між системами радіозв'язку виникають взаємні впливи та завади. Особливо складна електромагнітна обстановка (ЕМО) може виникнути в угрупованнях терміналів Wi-Fi, в ділових і культурних центрах. Наприклад, в межах одного будинку чи офісу, можлива ситуація, коли діє кілька локальних бездротових мереж. Найвища щільність і відразу функціонування в одному частотному спектрі мереж Wi-Fi в офісних, ділових і культурних центрах неминуче призводить до зміни електромагнітної обстановки і створення взаємних ненавмисних завад з погіршенням показників якості роботи мереж. В умовах нерівномірності радіопокриття мереж Wi-Fi в будівлі необхідно застосувати заходи, що дозволяють збільшити якість радіопокриття роботи мережі для збільшення її продуктивності. Такими заходами є використання систем пасивної ретрансляції та адаптивних антенних решіток які ефективно застосовуються в місцях щільних груп користувачів Wi-Fi мереж і дозволяють поліпшити показники якості і електромагнітні обставини мереж. При використанні таких підходів потрібні найменш одномоментні інвестиції, що є оптимальним варіантом для масштабування офісних бездротових мереж в Україні.

Таким чином, метою кваліфікаційної роботи є розробка питань підвищення якості функціонування бездротової мережі Wi-Fi (IEEE 802.11 b/g/n) на основі методів використання систем пасивної ретрансляції та адаптивних антенних решіток.

1 ОГЛЯД СІМЕЙСТВА ТЕХНОЛОГІЙ СТАНДАРТУ IEEE 802.11 b, g, n

1.1 Архітектура IEEE 802.11

Основні стандарти Wi-Fi відносяться до групи стандартів 802.11, розробкою яких займається організація IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers).

У стандарті 802.11 передбачено використання частотного діапазону від 2400 до 2483,5 МГц, тобто діапазону шириною 83,5 МГц, розбитого на кілька частотних підканалів.

На етапах розвитку технології найбільшого поширення набули стандарти IEEE 802.11, IEEE 802.11b, IEEE 802.11g, IEEE 802.11n за рахунок своїх швидкісних характеристик. Але на сьогоднішній день найпоширенішим є стандарт IEEE 802.11n.

Елементарною структурною одиницею бездротової локальної мережі є базовий набір послуг (basic service set - BSS), який складається з декількох станцій, що реалізують однаковий протокол MAC і змагаються за доступ до однієї спільно використовуваної середовищі. BSS може бути ізольований або сполучений з магістральною розподільною системою через точку доступу. Точка доступу в цій ситуації грає роль моста. Протокол MAC може бути повністю розподілений або керованим центральною координаційною функцією, розміщеною в точці доступу. Базовий набір послуг зазвичай відповідає тому, що в літературі називають осередком. Розподільна система може бути комутатором, провідний або бездротовою мережею.

На рисунку 1.1 показана найпростіша конфігурація, при якій кожна станція належить до одного BSS; тобто кожна станція знаходиться в межах досяжності тільки станцій того ж BSS. Діапазони охоплення BSS можуть перекриватися (географічно), так що одна станція може входити в кілька BSS. Більш того, співвіднесення станції і BSS є динамічним. Станції можуть відключатися, виходити з діапазону охоплення і входити в цей діапазон. Коли клієнт 802.11 потрапляє в зону дії однієї або декількох точок доступу, він на основі потужності сигналу і спостережуваного значення кількості помилок

вибирає одну з них і підключається до неї. Як тільки клієнт отримує підтвердження того, що він прийнятий точкою доступу, він налаштовується на радіоканал, в якому вона працює. Час від часу він перевіряє всі канали 802.11, щоб подивитися, чи не надає інша точка доступу для обміну більш високої якості. Якщо така точка доступу знаходиться, то станція підключається до неї, перенастроюючи на її частоту

Розширений набір послуг (extended service set - ESS) складається з двох або більшого числа базових наборів послуг, з'єднаних розподільною системою. Зазвичай в якості розподільної системи виступає провідна магістральна локальна мережа. Для рівня управління логічним каналом (logical link control - LLC) розширений набір послуг наведений єдиною логічною локальною мережею. У таблиці 1.1 наведено короткий опис основних термінів, що будуть використовуватися нижче.

На рисунку 1.1 показано, що точка доступу (access point - AP) реалізується як частина станції. Точка доступу - це логіка в межах станції, що забезпечує доступ до розподільчої системи шляхом надання їй послуг; крім того, точка діє як станція.

Рисунок 1.1 – Архітектура IEEE 802.11

Таблиця 1.1 - Термінологія 802.11 IEEE

Термін	Опис
Базовий набір послуг (basic service set - BSS)	Набір станцій, якими управляє одна координаційна функція
Координаційна функція	Логічна функція, яка визначає, коли станція може передавати і отримувати PDU
Модуль даних протоколу MAC (MPDU)	Модуль даних, яким обмінюються два тимчасових об'єкта MAC, використовуючи послуги фізичного рівня

Модуль даних служби MAC (MSDU)	Інформація, передана єдиним блоком між користувачами MAC
Розподільна система (Distribution system - DS)	Система, яка використовується для з'єднання декількох базових наборів послуг та інтеграції локальної мережі в розширений набір послуг
Розширений набір послуг (Extended service set - ESS)	Дві або більше число базових наборів послуг, з'єднаних розподільною системою. Для рівня управління логічним каналом (logical link control - LLC) розширений набір послуг представляється єдиною логічною локальною мережею
Станція	Будь-який пристрій, фізичний рівень і MAC - рівень якого відповідають стандарту IEEE 802.11
Точка доступу (Access point - AP)	Будь-який об'єкт, що володіє функціональними можливостями станції і забезпечує доступ співвіднесених з ним станцій до розподільчої системи за допомогою бездротової середовища

Для інтеграції архітектури IEEE 802.11 з традиційною провідною локальною мережею використовується портал. Логіка порталу реалізується в пристрої, такому, як міст або маршрутизатор, який входить до складу провідної локальної мережі і приєднаному до розподільчої системи.

У розподілі повідомлень в межах DS задіяні дві послуги: розподіл і інтеграція. Розподіл - це основна послуга, яка використовується станціями для обміну MAC-кадрами, коли кадр повинен пройти через розподільну систему, щоб пройти від станції з одного BSS до станції, що знаходиться в іншому BSS. Припустимо, наприклад, що потрібно доставити кадр від станції 2 (STA2) до станції 7 (STA7) (рис. 1.2). Кадр передається від STA2 до STA1, яка для даного BSS є точкою доступу. Точка доступу передає кадр розподільчій системі, яка повинна направити кадр до точки доступу (STA5) цільового BSS. STA5 отримує кадр і передає його STA7.

Якщо дві станції сполучаються в межах одного BSS, послуга розподілу надається точкою доступу цього BSS.

Послуга інтеграції дозволяє передавати дані між станцією локальної мережі IEEE 802.11 і станцією інтегральної локальної мережі IEEE 802.x. Інтегральною, називається провідна локальна мережа, фізично з'єднана з розподільною системою, причому станції цієї мережі можуть логічно з'єднуватися з локальної мережі IEEE 802.11 допомогою послуги інтеграції. Послуга інтеграції вирішує всі питання, пов'язані з логікою трансляції адрес і перетворень середовища, необхідних для обміну даними.

Одна точка доступу забезпечує обслуговування від 15 до 250 абонентів в залежності від конфігурації мережі і технології доступу. Збільшити ємність мережі можна, просто додавши нові точки доступу, при цьому не тільки розширюється зона обслуговування, але і знижується ймовірність перевантаження. Для безперервного зв'язку при пересуванні абонента (хендовера) точки доступу повинні утворювати суміжні стільники, що перекриваються. Відстань між станціями і точками доступу зазвичай не перевищує 100 м (вона залежить від швидкості передачі), а повна довжина WLAN обмежена довжиною магістральної лінії дротової розподіленої мережі. Дальність дії зазвичай становить від 20 до 500 м.

Вимоги до точок доступу визначені в документі ESSID (Extended Service Set Identification), який є частиною стандарту 802.11. Клієнтам необхідно ставити конфігурацію мережі відповідно до правил ESSID, які визначають процедуру встановлення з'єднання. Точки багатостанційного доступу однієї підмережі повинні мати однаковий ідентифікатор ESSID (це потрібно для хендовера).

У корпоративних мережах з великою кількістю офісів можлива схема організації зв'язку за допомогою карти вільного доступу (wild card), за допомогою якої встановлюється з'єднання з будь-якою точкою доступу незалежно від використаної в ній схеми ідентифікації (зазвичай вибирається така точка доступу, від якої приймається максимальний сигнал). Відзначимо, що використання карт вільного доступу знижує рівень безпеки мережі. Тому в такому режимі роботи бажано передбачити додаткові методи захисту.

1.2 Стандарт IEEE 802.11g

Стандарт IEEE 802.11g, прийнятий в 2003 році, є логічним розвитком стандарту 802.11b і передбачає передачу даних в тому ж частотному діапазоні 2,4 ГГц, але з більш високими швидкостями. Крім того, стандарт 802.11g повністю сумісний з 802.11b, тобто будь-який пристрій 802.11g має підтримувати роботу з пристроями 802.11b. Максимальна швидкість передачі даних в стандарті 802.11g становить 54 Мбіт/сек.

При розробці стандарту 802.11g розглядалися дві конкуруючі технології: метод ортогонального частотного поділу OFDM, запозичений зі стандарту 802.11a і запропонований до розгляду компанією Intersil, і метод двійкового пакетного згортального кодування PBCC, запропонований компанією Texas Instruments. В результаті стандарт 802.11g містить компромісне рішення: в якості базових застосовуються технології OFDM і ССК, а опціонально передбачено використання технології PBCC (Packet Binary Convolutional Coding).

1.3 Особливості стандарту IEEE 802.11n

Стандарт IEEE 802.11n заснований на технології OFDM-MIMO. Дуже багато реалізовані в ньому технічні деталі запозичені зі стандарту 802.11a, проте в стандарті IEEE 802.11n передбачається використання як частотного діапазону, прийнятого для стандарту IEEE 802.11a, так і частотного діапазону, прийнятого для стандартів IEEE 802.11b / g. Тобто пристрої, що підтримують стандарт IEEE 802.11n, можуть працювати в частотному діапазоні або 5 ГГц, або 2,4 ГГц, причому конкретна реалізація залежить від країни. Збільшення швидкості передачі в стандарті IEEE 802.11n досягається, по-перше, завдяки подвоєнню ширини каналу з 20 до 40 МГц, а, по-друге, за рахунок реалізації технології MIMO. В основі стандарту IEEE 802.11n використовується OFDM (Orthogonal frequency-division multiplexing) схема модуляції - мультиплексування з ортогональним частотним розподілом каналів) є цифровою схемою модуляції, яка використовує велику кількість близько розташованих ортогональних піднесучих. Кожна з піднесучих модулюється незалежно, наприклад, з використанням модуляції виду BPSK (Binary Phase-Shift Keying - двохпозиційна фазова маніпуляція), QPSK (Quadrature Phase-Shift Keying - квадратурна фазова маніпуляція) і їх різновидів або QAM (Quadrature

Amplitude Modulation - квадратурна амплітудна модуляція). Таким чином формується одночасна передача декількох паралельних каналів. На низькій символній швидкості, зберігаючи загальну швидкість передачі даних, як і у звичайних схем модуляції однієї несучої в тій же смузі пропускання. Швидкість передачі даних в даному стандарті може досягати 300 Мбіт/сек. У стандарті також використовують 3 які не перекриваються з робочою частотою 2,4 ГГц (2,4-2,4835 ГГц). При зменшенні швидкості передачі змінюється і спосіб модуляції. При високій швидкості використовується OFDM, а при погіршенні умов пристрою можуть задіяти CCK або DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) технологію розширення спектру сигналу прямої послідовністю.

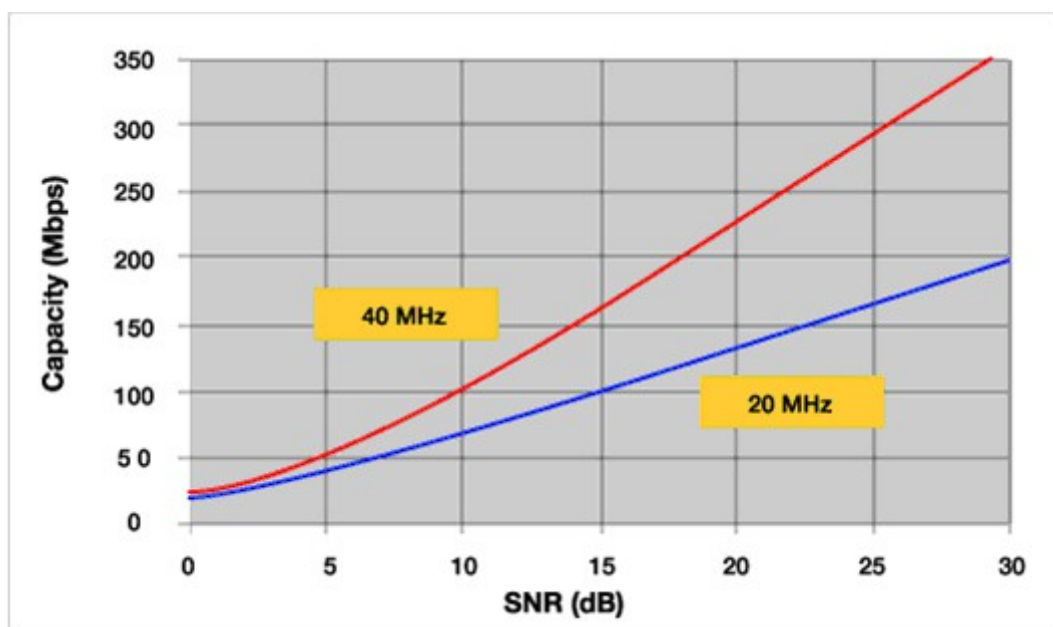


Рисунок 1.2 – Розширення частотного діапазону призводить до збільшення пропускної здатності каналу

Для стандарту IEEE 802.11n використовується OFDM схема модуляції, що дає пропускну здатність 65 Мбіт / сек по одному просторовому потоку (тоді як у версії 802.11g значення становить 54 Мбіт / сек) і скорочення захисного інтервалу з 800 до 400 нс, що додатково збільшує швидкість передачі символів OFDM. Підвищує швидкість передачі даних практично вчетверо в порівнянні з пристроями стандартів 802.11g (максимальна швидкість яких дорівнює 54 Мбіт / сек), за умови використання в режимі 802.11n з іншими пристроями

802.11n. Залежність швидкості від виду модуляції і величини захисного інтервалу можна побачити в таблиці.

Таблиця 1.2 - Залежність швидкості від виду модуляції

Індекс MCS	Потоки	Модуляція	Кодирование	Канальна корость, Мбит/сек)			
				Канал 20 МГц		Канал 40 МГц	
				800 ns	400 ns	800 ns	400 ns
0	1	BPSK	1/2	6.5	7.2	13.5	15
1	1	QPSK	1/2	13	14.4	27	30
2	1	QPSK	3/4	19.5	21.7	40.5	45
3	1	16-QAM	1/2	26	28.9	54	60
4	1	16-QAM	3/4	39	43.3	81	90
5	1	64-QAM	2/3	52	57.8	108	120
6	1	64-QAM	3/4	58.5	65	121.5	135
7	1	64-QAM	5/6	65	72.2	135	150
8	2	BPSK	1/2	13	14.4	27	30
9	2	QPSK	1/2	26	28.9	54	60
10	2	QPSK	3/4	39	43.3	81	90
11	2	16-QAM	1/2	52	57.8	108	120
12	2	16-QAM	3/4	78	86.7	162	180
13	2	64-QAM	2/3	104	115.6	216	240
14	2	64-QAM	3/4	117	130	243	270
15	2	64-QAM	5/6	130	144.4	270	300
16	3	BPSK	1/2	19.5	21.7	40.5	45
17	3	QPSK	1/2	39	43.3	81	90
18	3	QPSK	3/4	58.5	65	121.5	135
19	3	16-QAM	1/2	78	86.7	162	180
20	3	16-QAM	3/4	117	130	243	270
21	3	64-QAM	2/3	156	173.3	324	360
22	3	64-QAM	3/4	175.5	195	364.5	405
23	3	64-QAM	5/6	195	216.7	405	450
24	4	BPSK	1/2	26	28.8	54	60
25	4	QPSK	1/2	52	57.6	108	120
26	4	QPSK	3/4	78	86.8	162	180
27	4	16-QAM	1/2	104	115.6	216	240
28	4	16-QAM	3/4	156	173.2	324	360
29	4	64-QAM	2/3	208	231.2	432	480
30	4	64-QAM	3/4	234	260	486	540
31	4	64-QAM	5/6	260	288.8	540	600

Пристрої 802.11n працюють в діапазонах 2,4 або 5 ГГц. Приклад частотного розподілу каналів в смузі 2,4 можна побачити на рисунку і приклад частотне розділення каналів в смузі 5 ГГц можна побачити на рисунку 1.3, 1.4.

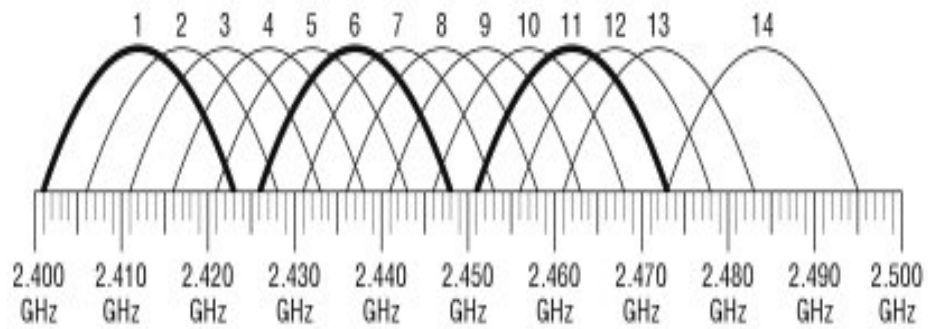


Рисунок 1.3 - Частотний розподіл каналів в смузі 2,4 ГГц

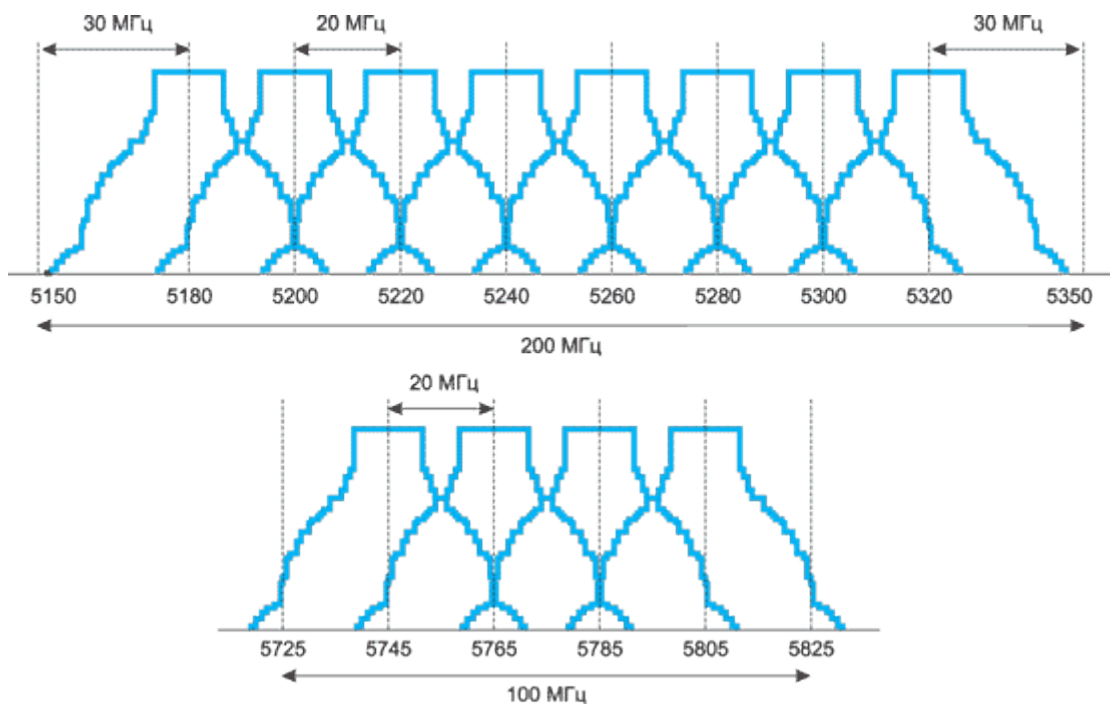


Рисунок 1.4 - Частотний розподіл каналів в смузі 5 ГГц

У стандарті 802.11n передбачено два режими передачі: стандартний режим передачі (L) і режим з високою пропускнуою здатністю (High Throughput, HT). У традиційних режимах передачі використовуються 52 частотних OFDM-підканалів (піднесучих частот), з яких 48 задіюється для передачі даних, а решта - для передачі службової інформації [2].

В режимах з підвищеною пропускнуою спроможністю при ширині каналу в 20 МГц застосовуються 56 частотних підканалів, з яких 52 задіюються для передачі даних, а чотири канали є пілотними. Таким чином, навіть при

використанні каналу шириною 20 МГц збільшення частотних підканалів з 48 до 52 дозволяє підвищити швидкість передачі на 8%. [2]

При застосуванні каналу подвоєної ширини, тобто каналу шириною 40 МГц, в стандартному режимі передачі мовлення фактично ведеться на здвоєному каналі. Відповідно кількість піднесучих частот збільшується вдвічі (104 подканала, з яких 96 є інформаційними). Завдяки цьому швидкість передачі збільшується на 100%. [2]

При використанні 40-мегагерцевого каналу і режиму з високою пропускною здатністю застосовуються 114 частотних підканалів, з яких 108 підканалів - інформаційні, а шість - пілотні. Відповідно це дозволяє збільшити швидкість передачі вже на 125%. [2]

В даний час стандарт IEEE 802.11n має одне з найширших розповсюджень в світі, швидкість передачі даних в стандарті досягає 300 Мбіт / сек (150 Мбіт / сек - у upload і 150 Мбіт / сек - в download швидкості) [2].

1.4 Антенні технології MIMO в стандарті IEEE 802.11n

Однією з основних особливостей стандарту 802.11n є підтримка технології MIMO (Multiple-Input Multiple-Output, Багатоканальний вхід/вихід). Технологія MIMO (Multiple Input Multiple Output) передбачає застосування декількох передавальних і приймальних антен. За аналогією традиційні системи, тобто системи з однієї передавальної і однієї приймаючої антеною, називаються SISO (Single Input Single Output).

Теоретично MIMO-система з n передають і n приймають антенами здатна забезпечити пікову пропускну здатність в n раз більшу, ніж системи SISO. Це досягається за рахунок того, що передавач розбиває потік даних на незалежні послідовності біт і пересилає їх одночасно, використовуючи масив антен. Така техніка передачі називається просторовим мультиплексуванням. Відзначимо, що всі антени передають дані незалежно один від одного в одному і тому ж частотному діапазоні. [2]

Розглянемо, наприклад, MIMO-систему, що складається з n передавальних і m приймаючих антен (рис. 1.5).

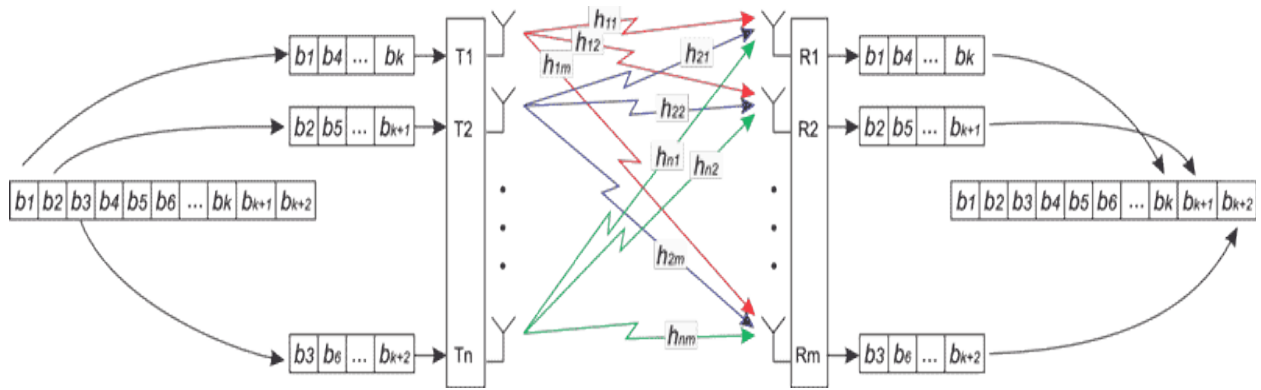


Рисунок 1.5 - Принцип реалізації технології MIMO

Передавач в такій системі посилає n незалежних сигналів, застосовуючи n антен. На приймальній стороні кожна з m антен отримує сигнали, які є суперпозицією n сигналів від всіх передавальних антен. Таким чином, сигнал R_1 , що приймається першою антеною, можна представити у вигляді[2]:

$$R_1 = h_{11}T_1 + h_{21}T_2 + \dots + h_{n1}T_n. \quad (1.1)$$

Записуючи подібні рівняння для кожної приймальної антени, отримаємо наступну систему:

$$\begin{cases} R_1 = h_{11}T_1 + h_{21}T_2 + \dots + h_{n1}T_n; \\ R_2 = h_{12}T_1 + h_{22}T_2 + \dots + h_{n2}T_n; \\ \dots \\ R_m = h_{1m}T_1 + h_{2m}T_2 + \dots + h_{nm}T_n. \end{cases} \quad (1.2)$$

Або, переписавши цей вислів в матричному вигляді[2]:

$$[R] = [H] \cdot [T], \quad (1.3)$$

де $[H]$ - матриця переносу, що описує MIMO-канал зв'язку.

Для того щоб на приймальній стороні декодер міг правильно відновити всі сигнали, він повинен перш за все визначити коефіцієнти h_{ij} , які характеризують кожну з $m \times n$ каналів передачі. Для визначення коефіцієнтів h_{ij}

Для визначення коефіцієнтів h_{ij} в технології MIMO використовується преамбула пакету.

Визначивши коефіцієнти матриці переносу, можна легко відновити переданий сигнал:

$$[T] = [H]^{-1} \cdot [R], \quad (1.4)$$

де $[H]^{-1}$ - матриця, зворотна матриці переносу $[H]$.

Важливо відзначити, що в технології MIMO застосування декількох передавальних і приймальних антен дозволяє підвищити пропускну здатність каналу зв'язку за рахунок реалізації кількох просторово рознесених підканалів, при цьому дані передаються в одному і тому ж частотному діапазоні.

Технологія MIMO ніяк не зачіпає метод кодування даних і в принципі може використовуватися в поєднанні з будь-якими методами фізичного та логічного кодування даних.

Вперше технологія MIMO була описана в стандарті IEEE 802.16. Цей стандарт допускає застосування технології MISO, тобто декількох передавальних антен і однієї приймаючої. У стандарті IEEE 802.11n допускається використання до чотирьох антен у точки доступу та бездротового адаптеру. Обов'язковий режим має на увазі підтримку двох антен у точки доступу і однієї антени і бездротового адаптера[2].

Стандарт 802.11n визначає різні антенні конфігурації "MxN", починаючи з "1x1" до "4x4" (найпоширеніші на сьогоднішній день це конфігурації "3x3" або "2x3"). Перше число (M) визначає кількість передавальних антен (T), а друге число (N) визначає кількість приймальних антен (R). Наприклад, точка доступу з двома передавальними і трьома приймальними антенами є "2x3" (або 2T3R) MIMO-пристроєм.

Чим більше пристрій 802.11n використовує антен для одночасної роботи передачі / прийому, тим буде вище максимальна швидкість передачі даних. Однак, саме по собі використання декількох антен не збільшує швидкість передачі даних або розширення діапазону. Основним в пристроях стандарту 802.11n є те, що в них реалізований вдосконалений метод обробки сигналу, який і визначає алгоритм роботи MIMO-пристрої при використанні декількох антен. Конфігурація "4x4" при використанні модуляції 64-QAM забезпечує

швидкість до 600 Мбіт/с, конфігурація "3x3" при використанні модуляції 64-QAM забезпечує швидкість до 450 Мбіт/с, в той час як конфігурації "2x3" і "1x2" забезпечать швидкість до 300 Мбіт/с[4].

1.5 Проблематика планування і аналіз параметрів якості функціонування мереж Wi-Fi

Основна проблема бездротових мереж - це обмежений частотний ресурс. У найбільш широко використовуваному діапазоні 2,4 ГГц в Європі є 13 частотних каналів з яких тільки 3 незалежних. При цьому слід розуміти, що частотний канал є ресурсом між усіма пристроями, які використовують його, тобто якщо на одному частотному каналі працює декілька бездротових мереж, то пропускна здатність каналу буде ділитися між усіма ними.

Мережі Wi-Fi будуються за схемою напівдуплекса, коли прийом і передача ведеться в одному частотному каналі з розподілом за часом, тобто в поточний момент часу пристрій або передає або приймає інформацію. При роботі декількох пристроїв на одному каналі вони будуть чекати поки інший пристрій звільнить канал. Чим більше пристроїв - тим більше час очікування, тим нижче продуктивність кожного пристрою.

Слід також зазначити, що пристрій який працює тільки на прийом займає канал і інші пристрої передавати в цей час не можуть.

Розподіл енергії, що передається в частотному діапазоні називається спектром сигналу, на рис. 1.6 приведена типова спектральна маска Wi-Fi каналу смугою 20 МГц.

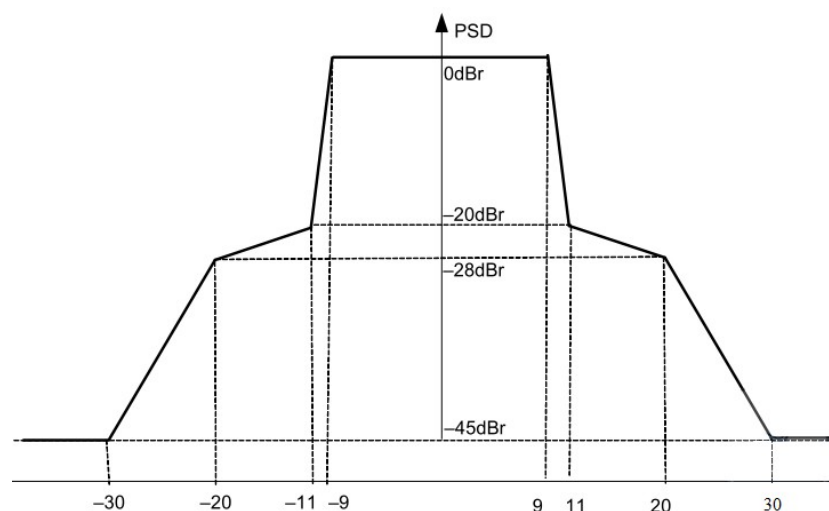


Рисунок 1.6 – Типова спектральна маска Wi-Fi каналу смугою 20 МГц

Повністю ж спектр займає ширшу смугу частот і це варто враховувати при проектуванні бездротової мережі для того, щоб уникнути появи перешкод. Загальна ж ширина спектра досягає 60 МГц, а це значить, що канали, які не перетинаються, в дійсності перетинаються, однак в звичайних умовах, коли рівні сигналів приблизно рівні, цим перетином можна знехтувати.

На практиці для оцінки рівня сигналу використовують показник рівня потужності сигналу RSSI (Received Signal Strength Indication), який виражається в мілліватт (mW), а так як потужність випромінюваного сигналу змінюється по логарифмічним законам, то загальноприйнятою одиницею став децибел-мілліватт (dBm) який показує відношення потужності до 1 mW.

У випадках, коли на одному каналі працюють кілька точок доступу спостерігаються збільшення часу очікування, так як пристрій буде сприймати передачу чужою точки як зайнятий канал і чекатиме його звільнення. Однак точки доступу можуть передавати одночасно - при цьому виникає колізія, яка зажадає повторної посилки пакета і викличе падіння продуктивності. Даний тип перешкод називається внутрішньоканальною перешкодою.

У той же час самі Wi-Fi пристрої здатні успішно протистояти внутрішньоканальним перешкодам, що обумовлено механізмом роботи пристроїв в рамках одного каналу. Навіть при наявності декількох мереж клієнтські пристрої не будуть здійснювати мовлення в ефір під час передачі чужих пристроїв і не засмічувати діапазон шумом. Щоб уникнути можливої проблеми у вигляді внутрішньоканальної перешкоди досить підняти рівень RSSI на 20 dB і більш, приклад підняття рівня RSSI на 20 dB наведений на рис. 1.7.

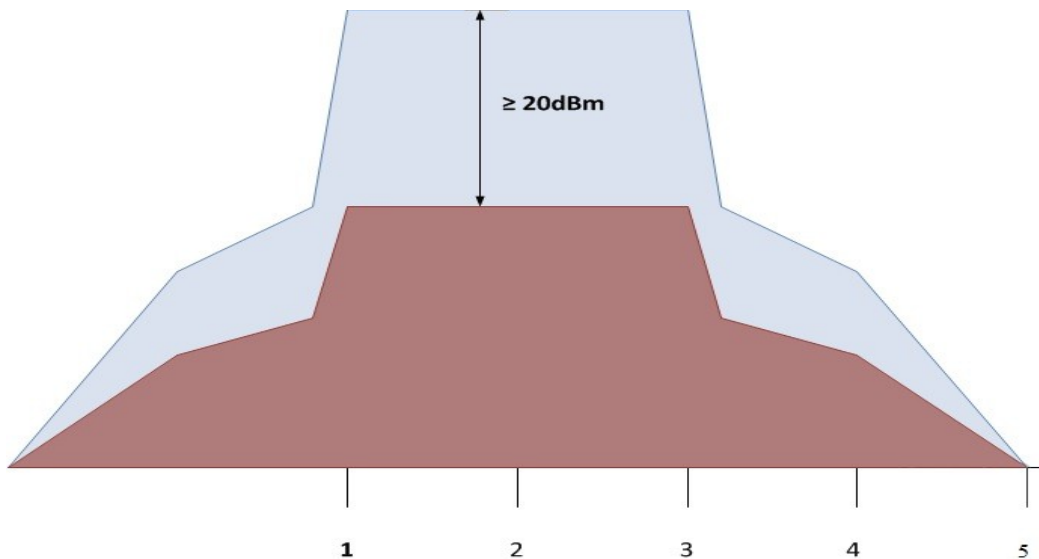


Рисунок 1.7 – Приклад підняття рівня RSSI на 20dB

Також може виникнути ситуація в разі роботи декількох мереж на сусідніх каналах. Незважаючи на те, що більша частина їх спектрів перекривається, пристрої будуть здійснювати передачу даних в ефір під час чужої передачі, вважаючи сусідню передачу даних сусідньої точки доступу звичайним шумом. Даний тип перешкод називається міжканальними перешкодами. Приклад міжканальних перешкод наведений на рис. 1.8.

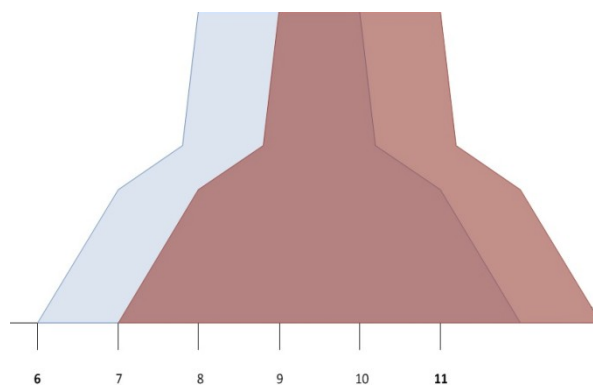


Рисунок 1.8 – Приклад міжканальних перешкод

З точки зору впливу на продуктивність мережі міжканальні перешкоди є гіршим варіантом, так як різко збільшують рівень шуму і навіть при достатній потужності передавача швидкість роботи і стабільність зв'язку будуть низькими

через постійну повторну передачу одних і тих же пакетів. Це відбувається через спроби використовувати двома мережами на 2/3 загальний частотний діапазон.

Крім внутрішньоканальних і міжканальних перешкод, існує ще один вид перешкод, виявлення і боротьба з якими є значно важким процесом. Це вид перешкод від пристроїв не є Wi-Fi пристроями, але працюють в цьому ж діапазоні частот. Це можуть бути як мікрохвильові печі (працюють в діапазоні 2,5 ГГц), бездротові телефони і т.д., також перешкоди в діапазоні 2,4 ГГц здатні створювати несправні електроприлади або електроінструмент. Приклад впливу мікрохвильової печі на канали 2,4 ГГц наведений на рис. 1.9.

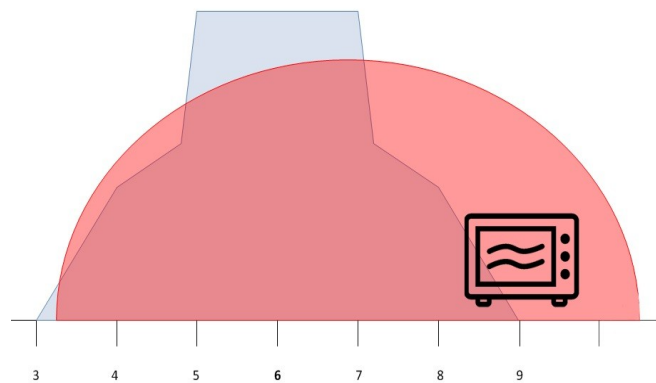


Рисунок 1.9 – Приклад впливу мікрохвильової печі на канали 2,4 ГГц

Таким чином, при проектуванні мережі, що включає в себе бездротову технологію Wi-Fi важливим аспектом є частотне планування, яке допоможе уникнути можливих труднощів при експлуатації мережі у вигляді різних перешкод і дозволить використовувати частотні ресурси діапазонів Wi-Fi з максимальною можливою вигодою.

2 ЗАГАЛЬНІ ПРИНЦИПИ СИСТЕМ ПАСИВНОЇ РЕТРАНСЛЯЦІЇ

Ретранслятор - це комплекс обладнання, призначеного для забезпечення зв'язку між двома і більш радіопередавачами, віддаленими один від одного на великі відстані.

Зустрічаються такі умови, коли звичний прийом сигналу виявляється неможливий через занадто низький рівень напруженості поля в точці прийому. Це може бути пов'язано з великою відстанню до передавача, але іноді причина полягає в тому, що несприятливий рельєф місцевості і точка прийому розташована в улоговині. При цьому прямому проходженню сигналу перешкоджає наявність пагорба або лісосмуги. В таких умовах вдаються до використання активного або пасивного ретранслятора.

Активний ретранслятор являє собою сукупність приймальної антени, радіоприймача повного телевізійного сигналу, перетворювача частотного спектра, радіопередавача перетвореного сигналу і передавальної антени. Перетворювач частотного спектра необхідний для того, щоб передача сигналу ретранслятором проводилася на іншому частотному каналі щодо того каналу, по якому сигнал був прийнятий. В даний час мережа діючих каналів зв'язку і державних активних ретрансляторів стала настільки густою, що вибрати вільний номер каналу, що не створює перешкод сигналам оточуючих передавачів, часом буває неможливо [1].

Пасивний ретранслятор відрізняється тим, що не містить приймально-передавальної або підсилювальної апаратури, а прийом і передача здійснюються виключно антенними системами.

Розрізняють пасивні ретранслятори трьох типів: заломлюючого, що відображає і перешкоди [1].

Ретранслятор заломлюючого типу в найпростішому випадку являє собою комбінацію двох гостронаправлених антен, одна з яких орієнтована на антену передавача, а друга спрямована в точку прийому. Таким чином, проводиться перевипромінювання сигналу в потрібному напрямку.

Ретранслятор відбиваючого типу виконується у вигляді одного або двох плоских антенних дзеркал, які забезпечують зміну напрямку поширення сигналу [1].

Пасивний ретранслятор типу перешкоди був запропонований в 1954 р Айзенбергом і А.М. Моделем. Такий ретранслятор являє собою металеву поверхню, розташовану між передавачем і приймачем, що знаходяться відносно передавача в зоні тіні. За відсутності ретранслятора антена передавача, встановлена в точці А, практично не створює в точці прийому Б електромагнітного поля, так як точка прийому затінена. При установці на шляху поширення сигналу в точці В перешкоди, в точці Б виникає поле. Це пов'язано з тим, що перешкода відповідно до принципу Гюйгенса порушується падаючою на нього хвилею і стає джерелом вторинного випромінювання. При відповідному виборі форми і розмірів перешкоди напруженість поля в точці Б може виявитися значною і достатньою для впевненого прийому телевізійного сигналу. Роль перешкоди в тому, що на трасі поширення сигналу утворюють поверхню з нульовою напруженістю поля на тій стороні, яка звернена до пункту прийому[1].

Деформації робочої поверхні ретранслятора типу перешкоди, викликані вітром, або відхилення її через неточності виготовлення не впливають на інтенсивність випромінювання і на рівень напруженості поля в точці прийому. Це - основна перевага ретрансляторів типу перешкоди перед ретрансляторами заломлюючого і відбиваючого типів. Тому полотно ретранслятора типу перешкоди може бути виконано не у вигляді жорсткої металевій конструкції, а у вигляді дротової сітки, жорсткість ж конструкції рами такої сітки визначається виключно необхідною механічною міцністю. Відпадає також необхідність виконання юстирування робочої поверхні ретранслятора після його установки, обов'язкової для ретрансляторів заломлюючого і відбиваючого типів. [1]

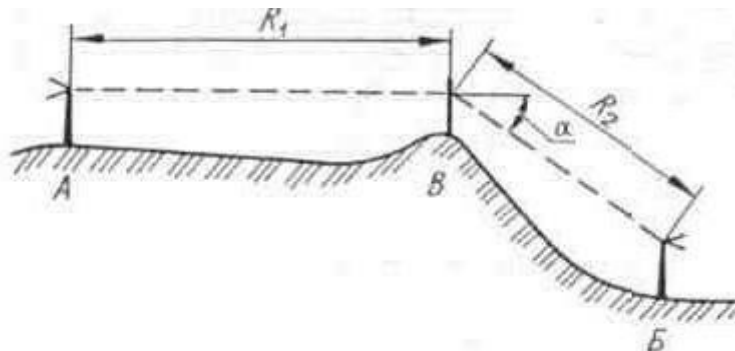


Рисунок 2.1 – До пояснення установки пасивного ретранслятора

Пасивні ретранслятори типу перешкоди доцільно встановлювати в умовах, коли точка прийому закрита в напрямку на передавач близько розташованою високою перешкодою, а на вершині цієї перешкоди, на якій буде встановлено ретранслятор, напруженість поля сигналу досить велика.

При використанні пасивного ретранслятора приймальна антена повинна бути орієнтована в напрямку на його полотно не тільки по азимуту, але також і по куту місця. Тому геометрична вісь антени виявляється не горизонтальною, як зазвичай, а повинна розташовуватися під відповідним кутом до горизонту. [1]

2.1 Пасивний ретранслятор з використанням двох антен

У даній роботі буде розглянуто пасивний ретранслятор, що складається з приймальної (зовнішньої) і передавальної (внутрішньої антени), які з'єднані за допомогою кабелю. Роботу ретранслятора ілюструє наступна схема - рисунок 2.2.

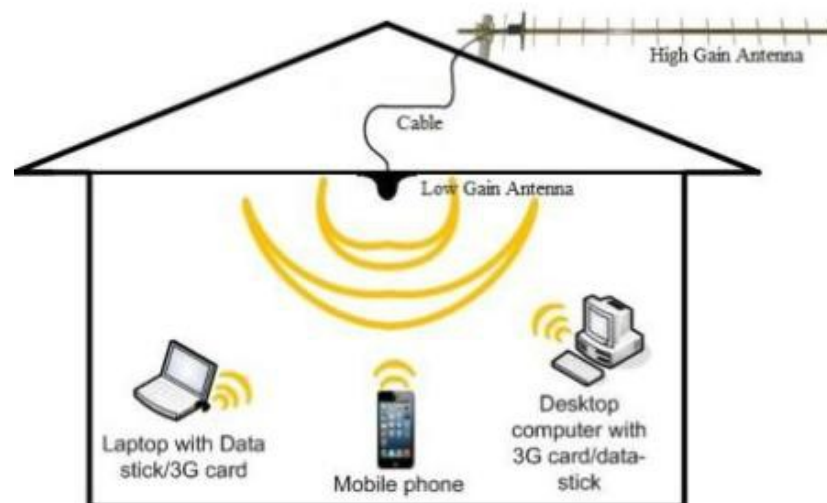


Рисунок 2.2 – Пасивний ретранслятор з двох антен

Сигнал приймається зовнішньою антеною, що має досить високе посилення, далі передається по кабелю до внутрішньої антени, встановленої в приміщенні, яка буде забезпечувати доступ до мережі різних пристроїв. Застосування такого виду ретранслятора доцільно тільки при нагоді, якщо рівень сигналу в приміщенні не задовольняє потребам користувачів.

2.2 Вибір типів антен

Антенa – пристрій, що призначений для випромінювання або прийому радіохвиль. Антенa здійснює перетворення енергії струму високої частоти в енергію радіохвиль або, навпаки, перетворює енергію радіохвиль в енергію струму високої частоти.

Від антени в значній мірі залежить якість сигналу, тому необхідно знати основні параметри антен і особливості їх конструкцій. За місцем установки антени можуть бути:

- кімнатні, призначені для установки усередині приміщення;
- вбудовані, встановлені всередині пристрою;
- зовнішні, призначені для установки поза приміщеннями.

До складу антенного пристрою у багатьох випадках, окрім самої антени, входить ще лінія фідера, яка необхідна для передачі електромагнітних хвиль з найменшими втратами від передавача до антени або від антени до приймача. Для правильної роботи антенного пристрою самі лінії фідерів не повинні мати антенного ефекту, тобто випромінювати або приймати радіохвилі, та бути узгодженими за хвильовими опорами.

Розглянемо принцип роботи антен для двох випадків – передачі і прийому. У режимі передачі струмопровідні елементи, що становлять антену, на які подається струм через радіопередавач, породжують в просторі змінне магнітне поле. Змінне магнітне поле створює змінне електричне поле, яке знову ж таки створює змінне магнітне. Таким чином виникає електромагнітна хвиля, яка поширюється від антени в просторі. В режимі прийому на струмопровідні елементи антени падає електромагнітна хвиля, яка за рахунок свого змінного електромагнітного поля, створює на них струми, що передаються далі в радіоприймач.

Основними параметрами антен є: амплітудна характеристика спрямованості; діаграма спрямованості; коефіцієнт спрямованої дії; коефіцієнт підсилення; коефіцієнт захисної дії; хвильовий опір в точці живлення та смуга пропускання.

2.3 Вибір зовнішньої антени

Зоною ближнього прийому можна назвати таку територію, де впевнений прийом досягається за допомогою найпростіших антен з порівняно невеликим коефіцієнтом посилення. У зв'язку з тим, що зона ближнього прийому розташовується всередині зони прямої видимості, напруженість поля сигналу в межах цієї зони в значній мірі залежить від потужності передавача. Чітко провести межу зони ближнього прийому, звичайно, неможливо, так як вона залежить і від потужності передавача, від рельєфу місцевості на трасі проходження сигналу від передавальної антени до приймальної, і від забудови населеного пункту, в якому необхідно здійснити прийом. Все це не дозволяє визначити радіус зони ближнього прийому в конкретних умовах методом розрахунку. Тому в кожному конкретному випадку необхідну антену доводиться вибирати досвідченим шляхом, починаючи з найпростішої і при негативному результаті переходячи до більш складної.

Найпростіша приймальна антена - розрізний напівхвильовий вібратор, наведений на рисунку 2.3.

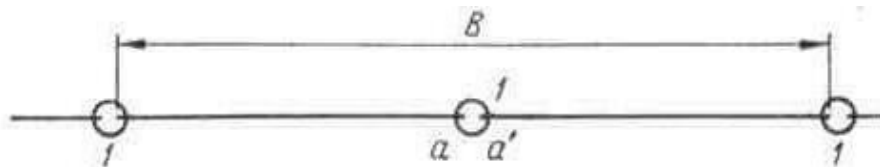


Рисунок 2.3 – Дротяний розрізний вібратор

Однак зовнішня антена, як правило, не може кріпитися до протилежних стін і натягтися таким шляхом, як кімнатні антени. Тому таку антену виконують у вигляді жорсткої конструкції з металеві трубки. Трохи складніше антена – , що володіє деякими перевагами перед розрізними, хоча його коефіцієнт посилення також дорівнює 0 дБ. Якщо напівхвильовий вібратор виявляється недостатньо ефективним в даних конкретних умовах, антена може бути ускладнена додаванням ще одного елемента - рефлектора, який значно послаблює прийом з заднього напрямку і підсилює з головного. Для цього рефлектор виконують трохи довше вібратора і мають у своєму розпорядженні позаду нього на деякій відстані. Така двохелементна антена носить назву «Хвильовий канал».

Завдяки рефлектору задня пелюстка діаграми спрямованості (ДС) значно зменшується, а головна пелюстка збільшується і звужується. Тому коефіцієнт

посилення антени стає більше, ніж у напівхвильового вібратора. Ще більший коефіцієнт посилення може бути досягнутий додаванням додаткових елементів попереду вібраторів, які називаються директорами. Розроблена велика кількість різних антен типу «хвильовий канал», що відрізняються одна від одної числом директорів і відстанню між ними. Антени цього типу відрізняються компактністю, жорсткою конструкцією, малим вітровим навантаженням, але мають і істотні недоліки, які обмежують можливості їх виготовлення в домашніх умовах.

В якості зовнішніх, так само як і кімнатних, використовують рамкові антени - двоелементні і трьохелементні. Хоча вони конструктивно складніше дво- і трьохелементних антен типу «хвильовий канал», але мають значно більший коефіцієнт підсилення. Рамкові антени добре узгоджуються з фідером, тому їх рекомендують використовувати в тих випадках, коли антена «хвильовий канал» не дає достатньо хороших результатів.

Орієнтуючись на необхідний коефіцієнт посилення антени - 10 дБ, я зупинив свій вибір на антені типу «хвильовий канал».

Антену «хвильовий канал», відома також як антена Уда-Яги, чи антена Яги, - антена, що складається з розташованих уздовж лінії випромінювання паралельно один одному активного і декількох пасивних вібраторів. [3]

Антену являє собою дискретну систему розташованих в одній площині паралельних симетричних вібраторів, розміри яких близькі до напівхвильового. Центри вібраторів можна кріпити безпосередньо до металевого стрижня, який не порушується через те, що силові лінії електричного поля перпендикулярні йому. Для захисту вхідних ланцюгів приймачів від грозових розрядів стрижень заземляється.

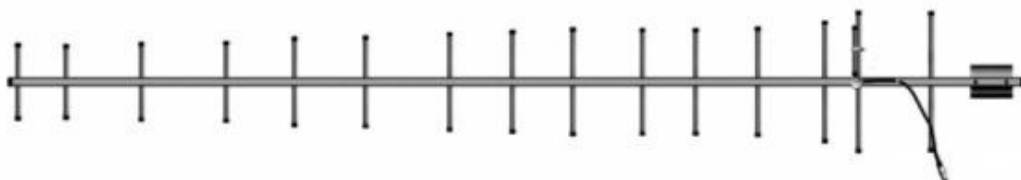


Рисунок 2.4 – Зовнішній вигляд антени «Хвильовий канал»

На рисунку 2.5 показана схема пристрою антени. Антена складається з розташованих на траверсі (на рисунку - Т) активного (А) і ряду пасивних вібраторів - рефлекторів (R), розташованих відносно напрямку випромінювання за активним вібратором, а також директорів (D), розташованих перед активним вібратором. Найчастіше застосовується один рефлектор, число директорів змінюється від нуля до десятків. Активний вібратор має довжину близько напівхвилі, рефлектор довжину трохи більшу 0,5л, директори мають довжину, меншу 0,5 л. Відстані від активного вібратора до рефлектора і до першого директора становлять близько 0,25 л.

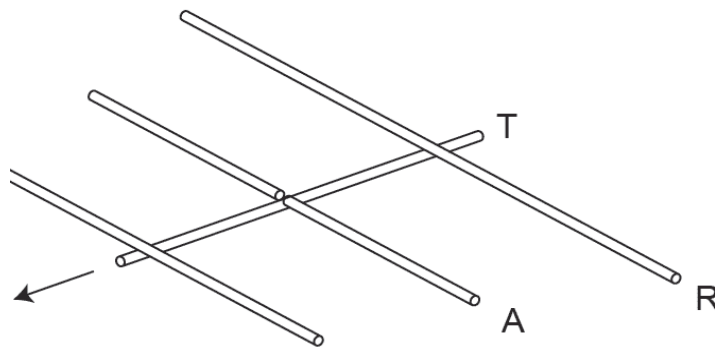


Рисунок 2.5 – Схема антени «хвильовий канал»

На рисунку 2.6 показаний принцип роботи антени. Випромінювання Активного диполя (червоного кольору), збуджує струм в пасивному Директорі, який перевипромінює хвилю (синього кольору), що має конкретний зсув фази. В результаті, випромінювання активного вібратора і директора (зеленого кольору), в напрямку рефлектора, складається в протифазі, а в напрямку директора - в фазі, що призводить до посилення випромінювання в напрямку Директорів.

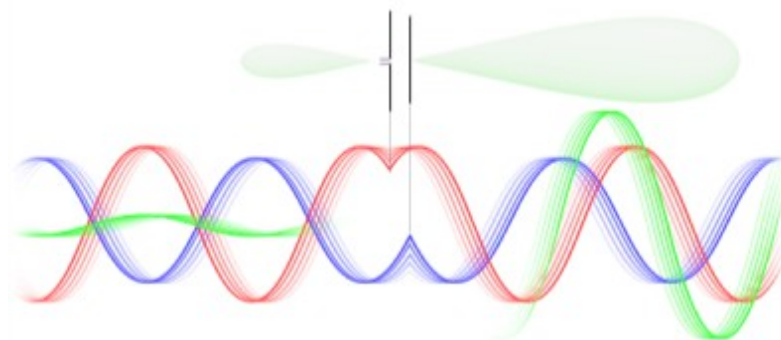


Рисунок 2.6 – Принцип роботи антени «хвильовий канал»

Електромагнітне поле, що випромінюється активним вібратором, направляється рефлектором і першим директором в сторону інших директорів, які за певних умов за допомогою електромагнітного зв'язку порушуються, утворюючи своєрідний хвильовий канал. Природно, більш віддалені директори збуджуються слабкіше. Уздовж антени поширюється хвиля, що біжить з уповільненою фазовою швидкістю і коефіцієнтом уповільнення $\rho > 1$. Тому максимум випромінювання збігається з осьовим напрямком. Уповільнююча структура утворюється системою директорів.

Поляризація поля випромінювання лінійна. Площина поляризації збігається з площиною, в якій лежать вібратори. За своїми властивостями директорної антени належать до антен бігучої хвилі [4].

Кожен додатковий рефлектор або директор дають надбавку посилення, але меншу, ніж попередній рефлектор і директор, причому для рефлектора ефект послаблення дії додаткових елементів набагато більш виражений, тому більше одного рефлектора застосовують досить рідко.

Антени «хвильовий канал» широко застосовуються в якості приймальних телевізійних, як прийомних і передавальних в системах бездротової передачі даних, в радіоаматорського зв'язку, в інших системах зв'язку, в радіолокації. Широкому їх поширенню сприяють високе посилення, хороша спрямованість, компактність, простота, невелика маса. Антену застосовують на діапазонах, починаючи з коротких хвиль, в діапазонах метрових і дециметрових хвиль і на більш високих частотах, на СВЧ-діапазонах.

2.4 Вибір внутрішньої антени

Оскільки внутрішня антена буде використовуватися всередині приміщення, як правило використовують всеспрямовану антену. Основною відмінністю всеспрямованих або як їх ще називають не спрямованих антен від секторних - це відсутність будь-якого пріоритетного напрямку випромінювання сигналу. Радіосигнал, що підводиться від базової станції випромінюється в усі

напрямки з однаковою потужністю. Тому така антена має кругову ДН, яка показана на рисунку 2.7.

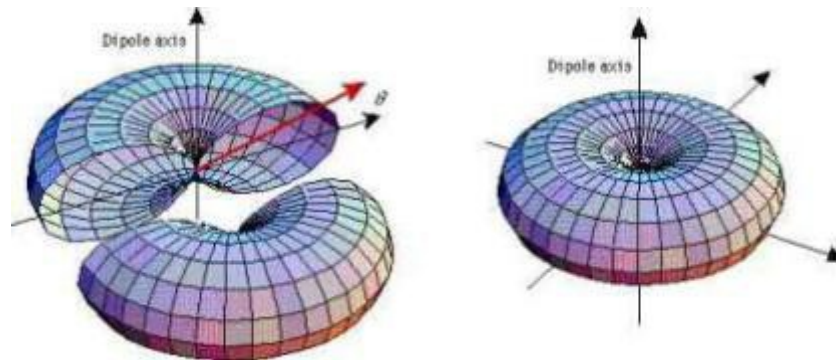


Рисунок 2.7 – ДС всенаправленої антени

Через зовнішній вигляд всеспрямовані антени ще називають штирковими. В даному конструктивному виконанні вона являє собою металевий стрижень, іноді розміщений в пластиковому корпусі, який перешкоджає корозії. Також іноді використовується конусоподібний обтічний корпус, який кріпиться або до стелі вістрям вниз, або до будь-якої іншої плоскої поверхні вістрям вгору (рис. 2.8).



Рисунок 2.8 – Вид всеспрямованої антени

Разом з тим, в атестаційній роботі в якості внутрішньої антени пропонує використовувати спрямовану антену в якості пасивного ретранслятора.

3 АНАЛІЗ ТИПІВ СПРЯМОВАНИХ АНТЕН У ПАСИВНОГО РЕТРАНСЛЯТОРА

3.1 Антени Харченко для використання у стандарті WI-FI

Антенна Харченко є підвидом рамкових антен, які у свою чергу відносяться до зигзагоподібних. Автором цієї антени є Харченко К. П., котрий в 1961 році запропонував подібну конструкцію для прийому телепередач.

У оригінальній конструкції антени, щоб не порушувати симетрування антени, яке може призвести до погіршення діаграми спрямованості, кабель що її живить приходить знизу, в'ється уздовж одного з боків рамки, заходить в центр. У розробленій нами конструкції використовується екран, через що конструктивно зручним буде проходження дроту через екран і під'єднання його до активного елемента. Для розрахунку геометричних параметрів антени було використано онлайн-калькулятор [4].

Для розрахунку антени була використана частота центрального каналу для стандарту 802.11n.

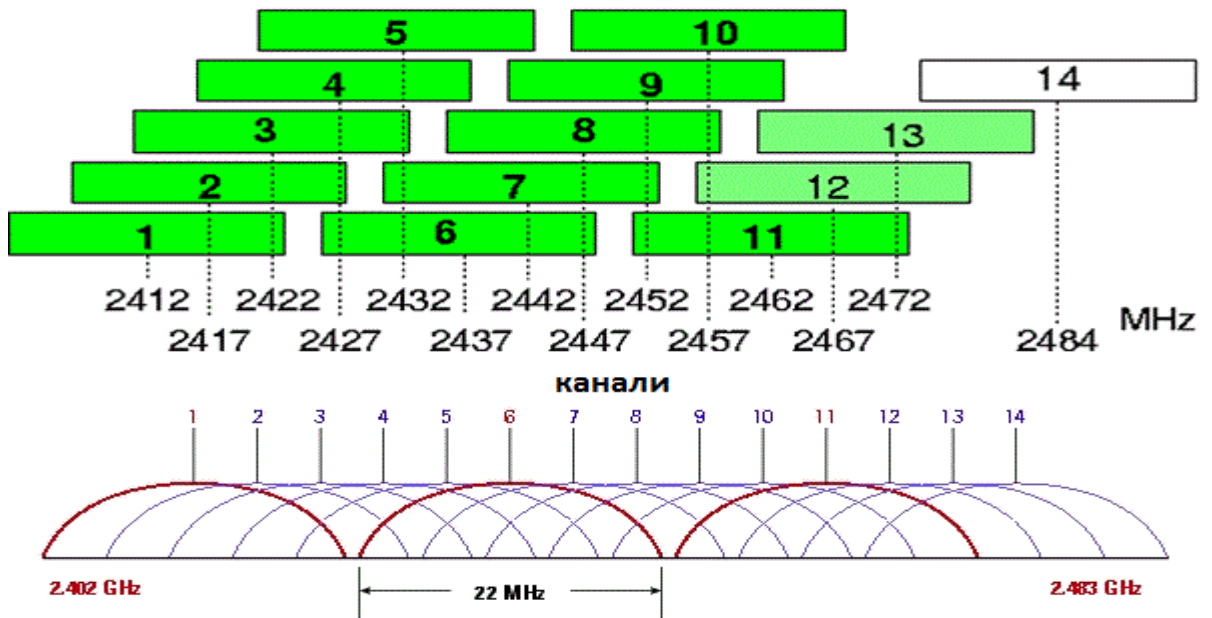


Рисунок 3.1 – Частотно-каналний розподіл у стандарті 802.11n

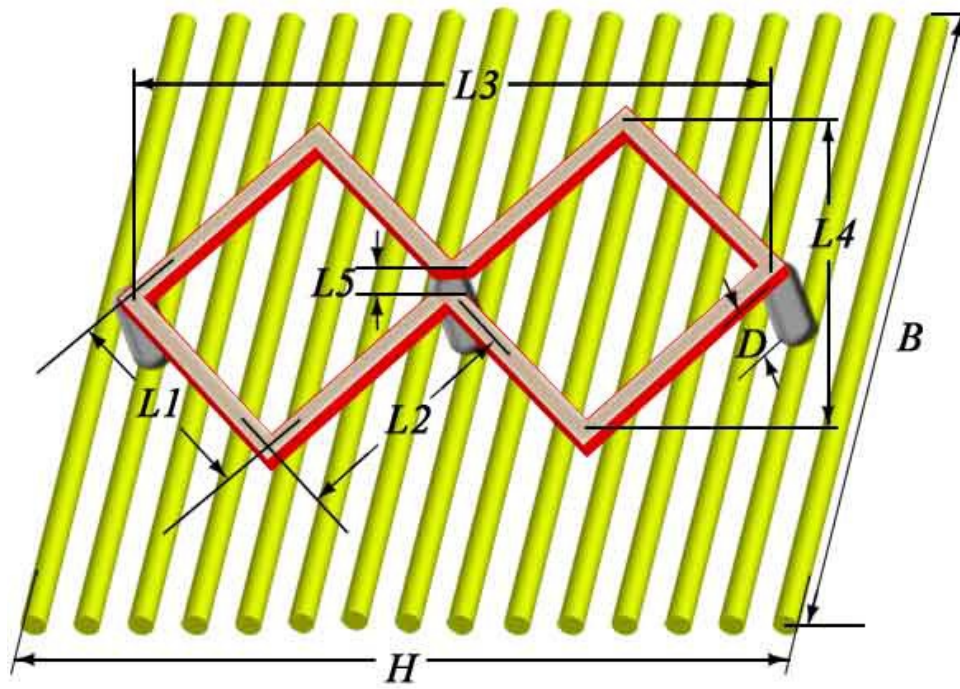


Рисунок 3.2 – Позначення габаритних розмірів антени Харченко



Рисунок 3.3 – Зовнішній вигляд антени, виготовленої за розрахунками

Таблиця 3.1 – Розраховані параметри антени Харченко

Параметр	Значення
Центральна частота, f , МГц	2442
Хвильовий опір антени, ρ , Ом	50
Довжина хвилі, λ , мм	123
Розмір L1 (зовнішня сторона квадрата), мм	30.8
Розмір L2 (внутрішня сторона квадрата), мм	29.6
Розмір L3 (загальна довжина рамок), мм	84
Розмір L4 (ширина рамок), мм	43
Розмір L5 (проміжок в місті підключення), мм	1.9
Відстань вібратор-рефлектор, D, мм	13.6
Розмір В (ширина рефлектора), мм	122
Розмір Н (довжина рефлектора), мм	122
Діаметр проволочки вібратора, мм	2.5
Загальна довжина проволочки (с запасом на повороти), мм	256.6

3.2 Електрично керована пасивна антенна решітка

У системах бездротового зв'язку, перешкоди стають домінуючим чинником, що обмежує якість і пропускну здатність. Застосування адаптивної антенної решітки стало актуальним протягом останніх кількох років завдяки її здатності збільшувати продуктивність бездротових систем за рахунок ефективного придушення перешкод.

Добре відомо, що майже всі існуючі методи для антенної решітки вимагають одну мережу приймача на гілку антени. Аналогові адаптивні формувачі діаграми спрямованості, наприклад ESPAR (Electrically-Steerable Parasitic Array Radiator - електрично керована пасивна антенна решітка) антени, як вихід мають тільки один порт. Вони не потребують багато компонентів апаратної частини, таким чином, мають потенціал для застосування в системах бездротового зв'язку.

3.3 Опис ESPAR антени

($M + 1$) - елементна ESPAR антена має тільки активний випромінювач, центральний елемент, підключений до приймача (Додаток А). Решта M -елементи пасивні, і заряджаються реактивними опорами. Діаграма спрямованості антени формується відповідно до значень заряджених реактивних опорів. У конфігурації ESPAR антени, ми зіткнулися з наступними трьома труднощами в розвитку оптимальних алгоритмів:

1) Сигнали на всіх елементах не можуть дотримуватися, крім як на виході.

2) Радіочастотні струми на елементах не є незалежними, але взаємно пов'язані один з одним.

3) Вихідний сигнал з одного порту є вельми нелінійною функцією змінних реактивних опорів, які включають інвертовану матрицю провідностей. Крім того, на відміну від цифрового формування діаграми спрямованості антени, звичайні критерії, такі як MMSE (Мінімальна середньоквадратична помилка) не приносять користі для оптимізації ESPAR антени, так як амплітуду на виході антени важко відрегулювати.

Були розроблені декілька алгоритмів для адаптивного формування променя ESPAR антени. Алгоритм на основі Градієнта, сходиться швидко, але іноді потрапляє в локальний мінімум, в залежності від початкових значень опорів.

З іншого боку, випадкові, такі як випадковий алгоритм пошуку, бореться з проблемою локального мінімуму, але досить повільно, щоб досягти кінцевої мети. Ті, що засновані на генетичній концепції, здаються певними на перший погляд, але вони насправді пов'язані зі зміною в довільному порядку, щоб вирватися з системного переривання.

Рівняння Гамільтона широко використовуються в гамільтоновій механіці та інших галузях теоретичної фізики і математики.

Гамільтонів алгоритм має на увазі відповідність двох суперечливих вимог, тобто він вільний від локальних проблем, і він певний. Гамільтонів алгоритм спочатку впливає з евристичної ідеї з автономним рухом маси, без тертя в потенційному просторі. Точка маси рухається відповідно до закону

збереження енергії, тобто кінетична енергія плюс потенційна енергія залишається постійною при русі. Гамільтонів алгоритм був застосований до оптимізації дизайну для ESPAR антени для знаходження оптимального реактивного опору. Далі ми досліджуємо застосування алгоритму Гамільтона в ESPAR антені. Тут ми застосовуємо Гамільтонів алгоритм до адаптивного формування діаграми спрямованості для ESPAR антени. Адаптивне (яке пристосовується) формування діаграми спрямованості ESPAR антени - проблема нелінійної оптимізації. Адаптивне формування діаграми спрямованості здійснюється шляхом знаходження оптимального вектора реактивного опору, такого, що цільова функція для формування діаграми спрямованості ESPAR мінімальна. У моїй роботі, цільова функція, нормована середньоквадратичної помилки, розглядається як потенційна енергія в алгоритмі Гамільтона. Питання формування діаграми спрямованості антени не з'являється, хоч і кінетична енергія діє імпульсами в алгоритмі, тому імпульси грають важливу роль, для того, щоб знайти оптимальний реактивний опір вектора. В алгоритмі Гамільтона, один з імпульсів швидкості руху стає більше, коли цільова функція прагне до локального мінімуму, тим часом відповідний реактивний опір отримує більший приріст. Це допомагає цільовій функції віддалитися від локального мінімуму, таким чином, забезпечивши більшу можливість пошуку глобального мінімуму. Моделювання показують, що ESPAR антена з алгоритмом Гамільтона може направити промінь і обнулитися автоматично.

Цільова функція в екстремальних задачах - функція, мінімум або максимум якої потрібно знайти. Це ключове поняття оптимального програмування. Знайшовши екстремум цільової функції і, отже, визначивши значення керованих змінних, які до нього призводять, ми тим самим знаходимо оптимальне рішення задачі. Таким чином, цільова функція виступає як критерій оптимальності рішення задачі.

Відрізняється ряд видів цільових функцій: лінійна, нелінійна, опукла, квадратична і ін. - відповідно до форми математичної залежності, яку вони відображають. Слід також виділити термін «цільовий функціонал»: він застосовується зазвичай, якщо цільова функція задачі є функцією від деяких функцій-обмежень.

3.4 Будова ESPAR антени

В () - елементній ESPAR антені (Додаток А), 0-й елемент є активним випромінювачем, розташованим в центрі кругового заземлення (круглої заземленої поверхні). Це довжини несиметричного вібратора (де довжина хвилі), і збуджується знизу коаксіальним способом. Це довжини несиметричного вібратора (де довжина хвилі), і збуджується знизу коаксіальним способом. Інші елементи довжини несиметричного вібратора паразитні випромінювачі, що оточують активний випромінювач симетрично, в колі радіуса . Кожен з цих елементів завершується змінною реактивного опору. Вектор називається реактивний вектор. Реактивний опір навантажується в кожному паразитному елементі при електронному регулюванні елемента його довжини і робить несиметричний вібратор в якості направляючого пристрою або відбивача, як і антенна решітка типу "хвильовий канал", в залежності від негативного чи позитивного значення реактивного опору. Елемент відображається як ефективно 'коротше' несиметричний вібратор (директор), якщо негативний реактивний опір завантажено, а позитивні реактивний забезпечує ефективно 'більше' несиметричний вібратор (рефлектор). Дія цих завантажених реактивних опорів викликає зміну діаграми.

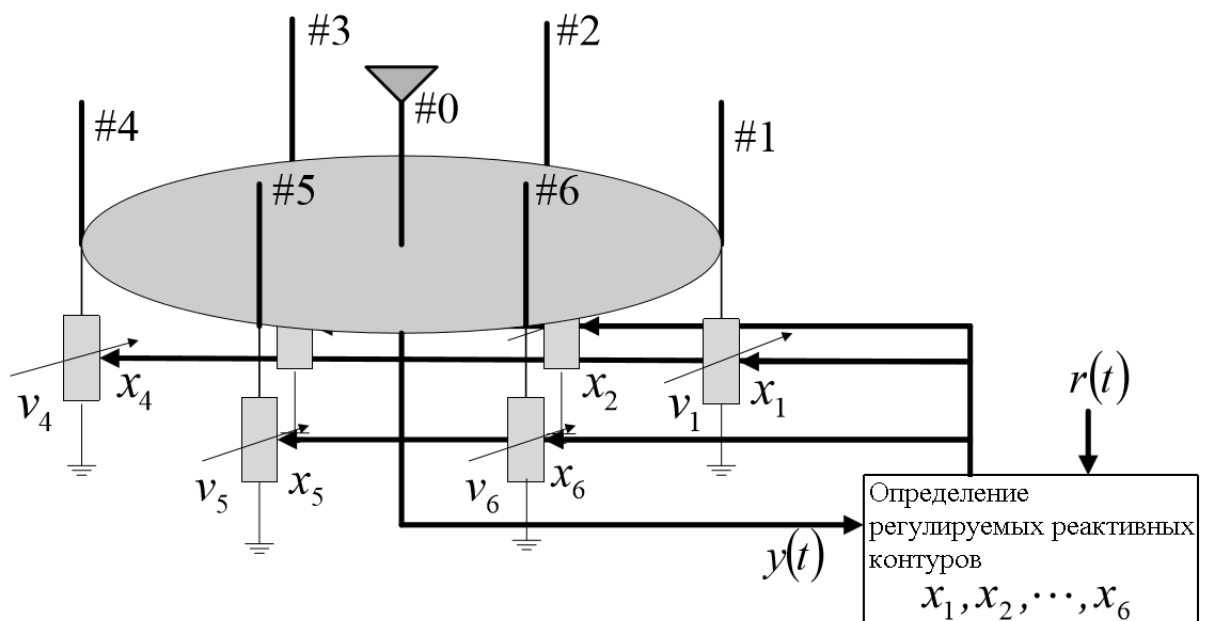


Рисунок 3.4 - ESPAR антена

Складається антена з розташованих на траверсі (Т) активного (А) і ряду пасивних вібраторів - рефлекторів (R), розташованих відносно напрямку випромінювання за активним вібратором, а також розташованих перед активним вібратором директорів (D). Найчастіше застосовується один рефлектор, число директорів змінюється від нуля до десятків. Активний вібратор має довжину близько напівхвилі ($0,5 \lambda$), директори мають довжину, меншу $0,5 \lambda$ рефлектор довжину трохи більшу $0,5 \lambda$. Відстані від активного вібратора до рефлектора і до першого директора становлять близько $0,25 \lambda$.

Випромінювання антени можна розглядати як суму випромінювань всіх складових її вібраторів. Струм, наведений випромінюванням активного вібратора в рефлекторі, наводить в ньому напруга. Для рефлектора, опір якого носить індуктивний характер за рахунок довжини, більшої $0,5 \lambda$, напруга відстає по фазі від напруги в активному вібраторі на 270° . В результаті випромінювання активного вібратора і рефлектора в напрямку рефлектора складається в протифазі, а в напрямку активного вібратора - в фазі, що призводить до посилення випромінювання в напрямку активного вібратора приблизно вдвічі. Аналогічно рефлектору працюють директори, однак через ємнісний характер їх опору (що визначається їх меншою довжиною) випромінювання посилюється в напрямку директорів. Кожен додатковий рефлектор або директор дають збільшення посилення, але меншу, ніж попередній рефлектор і директор, причому для рефлектора ефект послаблення дії додаткових елементів набагато більш виражений, тому більше одного рефлектора застосовують рідко.

3.5 Опис та побудова активної антенної решітки

Адаптивної антеною називається сукупність багатоелементної антени і адаптивного процесора, за допомогою якого здійснюється автоматичне зміна АФР в розкритті антени[14].

Процес адаптації полягає в цілеспрямованому зміні параметрів керованих елементів антенно-фідерного тракту, що впливають на АФР поля в розкритті [14].

Основною особливістю адаптивних антен (АА) є можливість управління формою характеристики спрямованості (ХС) з метою ослаблення впливу перешкод і до повного їх придушення. Управління ХС АА здійснюється шляхом зміни амплітудно-фазового розподілу (АФР) поля в апертурі антени [14].

Необхідна для роботи АА інформація може включати відомості про просторові, поляризаційних, тимчасових, частотних параметрах сигналів і перешкод. Сукупність апріорних відомостей, необхідних для роботи конкретної АА, прийнято називати опорним сигналом. Підвищення відношення сигналу до суміші шуму і перешкоди (скорочено відношення сигнал / (перешкода + шум) або ВСПШ) досягається шляхом формування мінімумів ХС в напрямках на джерела перешкод [14].

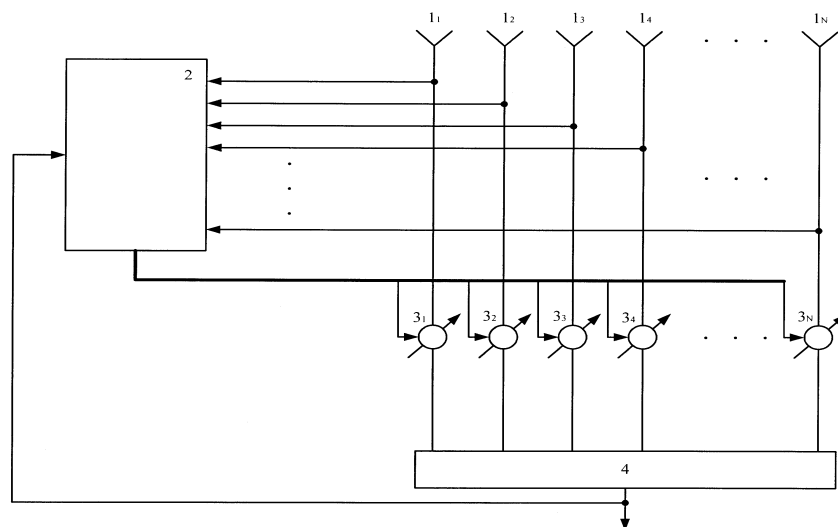


Рисунок 3.5 – Схема адаптивної антени.

Адаптивна антена BeamFlex включає в себе до 21 спрямованих антенних елементів, які формують понад 4200 діаграм спрямованості для оптимізації умов прийому даних конкретним клієнтським пристроєм.

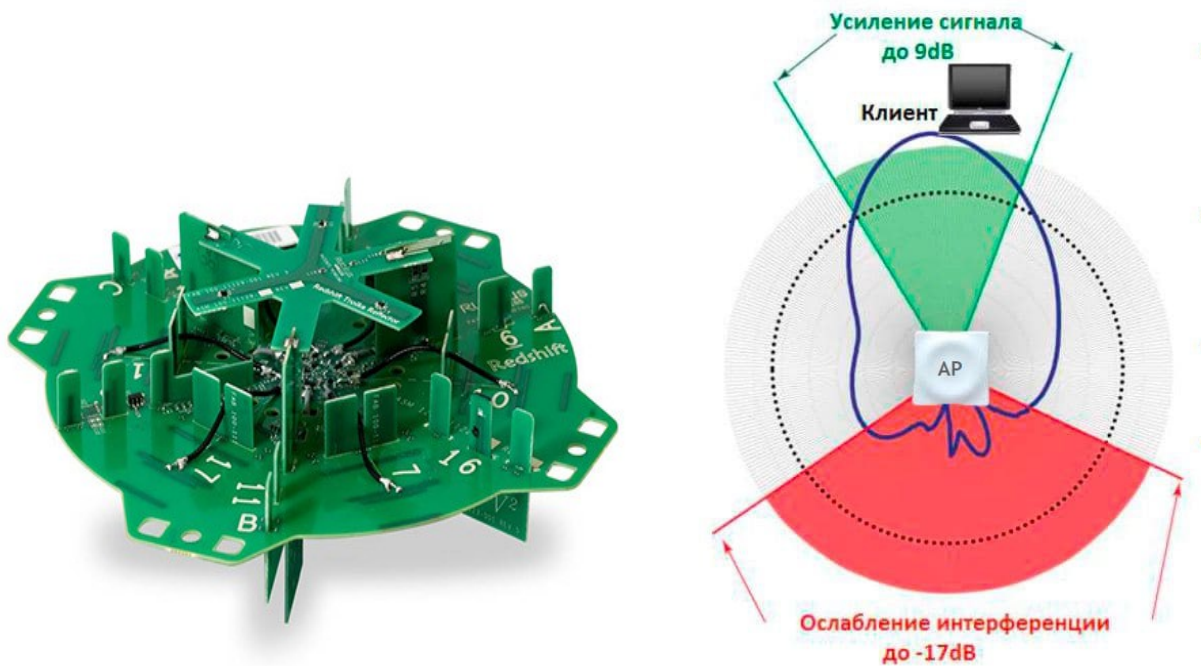


Рисунок 3.6 – Антена VeamFlex та приклад діаграми спрямованості

Критерій оптимальності пов'язаний з показником якості. Показник якості - це фізична величина, яка є кількісною мірою якості прийому корисного сигналу. Показниками якості можуть служити, наприклад, відношення сигнал/шум, середній квадрат помилки, відношення правдоподібності, потужність вихідного сигналу та ін[14].

Суть будь-якого критерію адаптації полягає в досягненні екстремуму відповідної цільової функції. Спосіб досягнення цього екстремуму називається методом адаптації наведений на рис. 3.7[14].



Рисунок 3.7 - Методи адаптивного пошуку екстремума.

Алгоритми адаптації мають цілу низку специфічних особливостей, які впливають зі спільного застосування критеріїв оптимальності і методів адаптації, а також вирішуються в процесі адаптації завдань. Тому адаптивні алгоритми поділяються як за ознаками класифікації критеріїв і методів адаптації, так і за своїми, тільки їм притаманним, ознаками. На рис. 3.8 представлена узагальнена класифікація алгоритмів адаптації[14]..

Кількість способів реалізації обраного методу адаптації для певного критерію оптимальності, тобто алгоритмів адаптації величезна[14]..

Вид алгоритму в великій мірі впливає на швидкість підстроювання ВК і на складність технічної реалізації ААР в цілому. Конкретний алгоритм реалізується в адаптивному процесорі, в зв'язку з чим адаптивний процесор є основою будь-якої ААР.

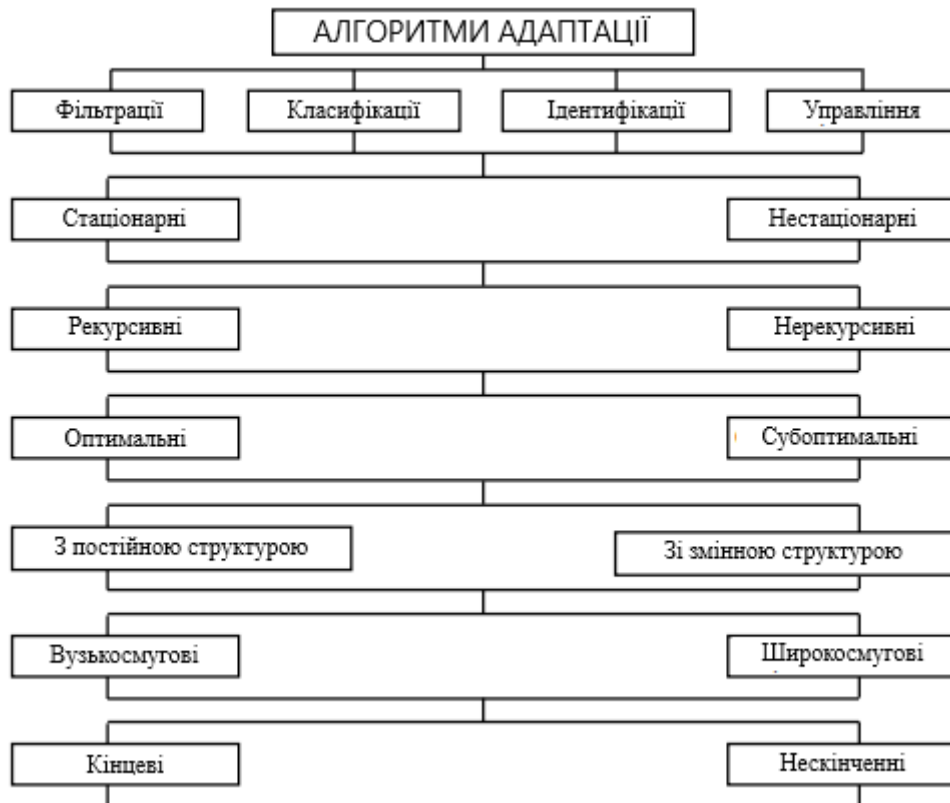


Рисунок 3.8 – Алгоритми адаптації.

4 МОДЕЛЮВАННЯ АНТЕН ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ЕОМ

Для визначення характеристик спрямованості антен і подальшого їх порівняння було здійснено моделювання штатної антени, антени Харченко, пасивної антенної решітки ESPAR та адаптивної активної антени BeamFlex за допомогою програми MMANA-GAL. Для кожної з них було побудовано віртуальну модель для центральної частоти стандарту 802.11n – 2442 МГц. Моделювання характеристик антен здійснюється для побудови діаграми спрямованості кожної з антен з метою отримання оцінки напрямку поширення сигналу та розрахунку всієї зони дії WiFi з урахуванням пасивної ретрансляції.

Були проведені виміри наступних параметрів: коефіцієнт стоячої хвилі (КСХ), ширина головної пелюстки та коефіцієнт підсилення G. Отримані значення зведені в табл.2 (п.3.3).

Далі розглянемо отримані моделі діаграм спрямованостей для штатної антени, антени Харченко та адаптивної активної антени BeamFlex.

4.1 Моделювання діаграми спрямованості штатної антени

У більшості випадків довжина штирвової антени вибирається рівній чверті довжини хвилі випромінювання. Довжина хвилі випромінювання знаходиться між 12.12 до 12.49 см, а чверть довжини хвилі приблизно дорівнює 31 мм. Саме такий розмір антени був закладений при моделюванні.

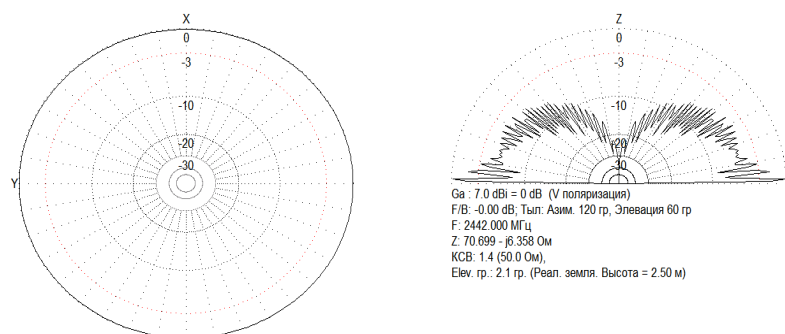


Рисунок 4.1 – Діаграма спрямованості штатної антени у декартовій системі координат

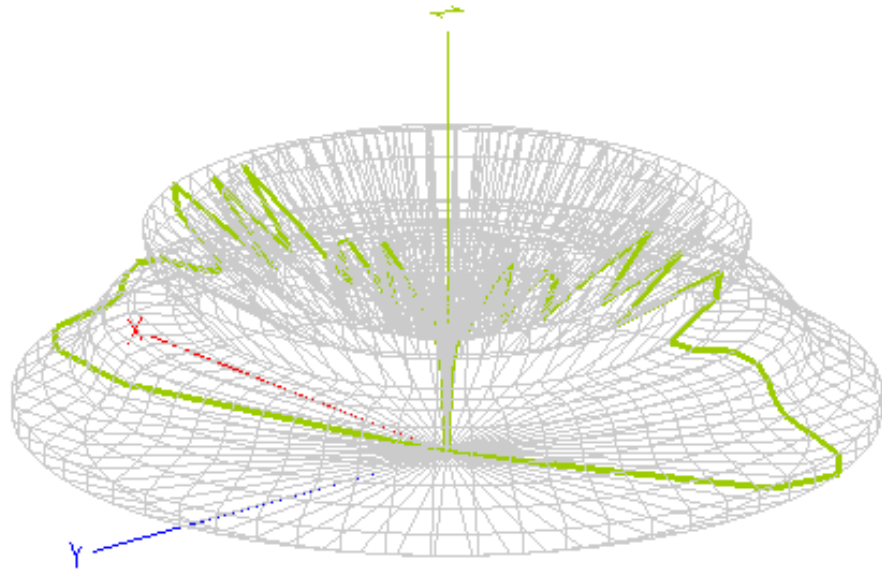


Рисунок 4.2 – 3Д діаграма спрямованості штатної антени з вертикальним перерізом

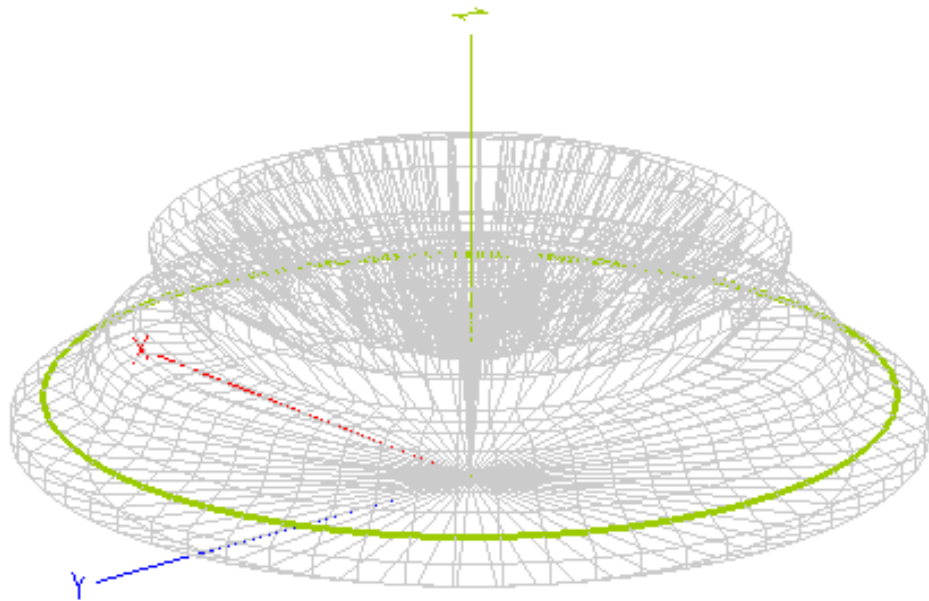


Рисунок 4.3 – 3Д діаграма спрямованості штатної антени з горизонтальним перерізом

4.2 Моделювання діаграми спрямованості антени Харченко

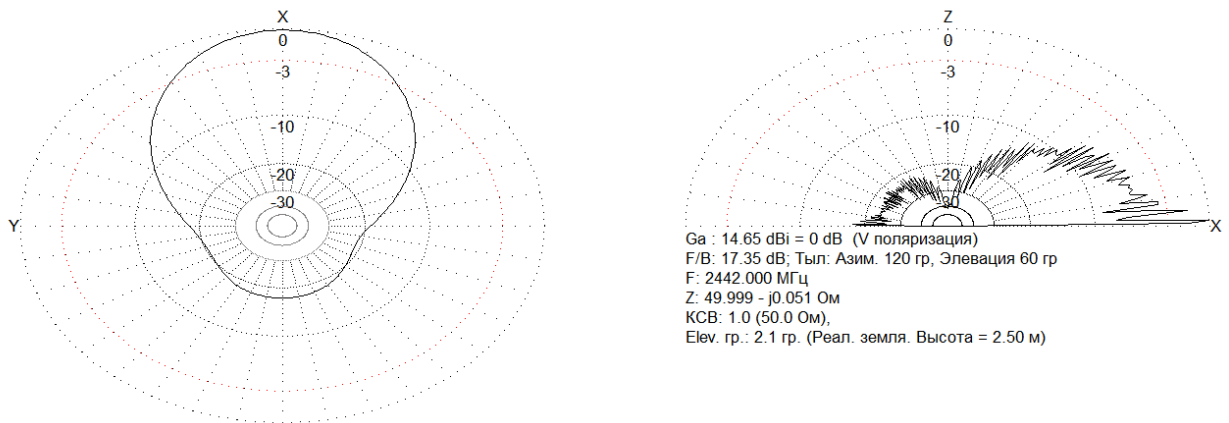


Рисунок 4.4 – Діаграма спрямованості антени Харченко

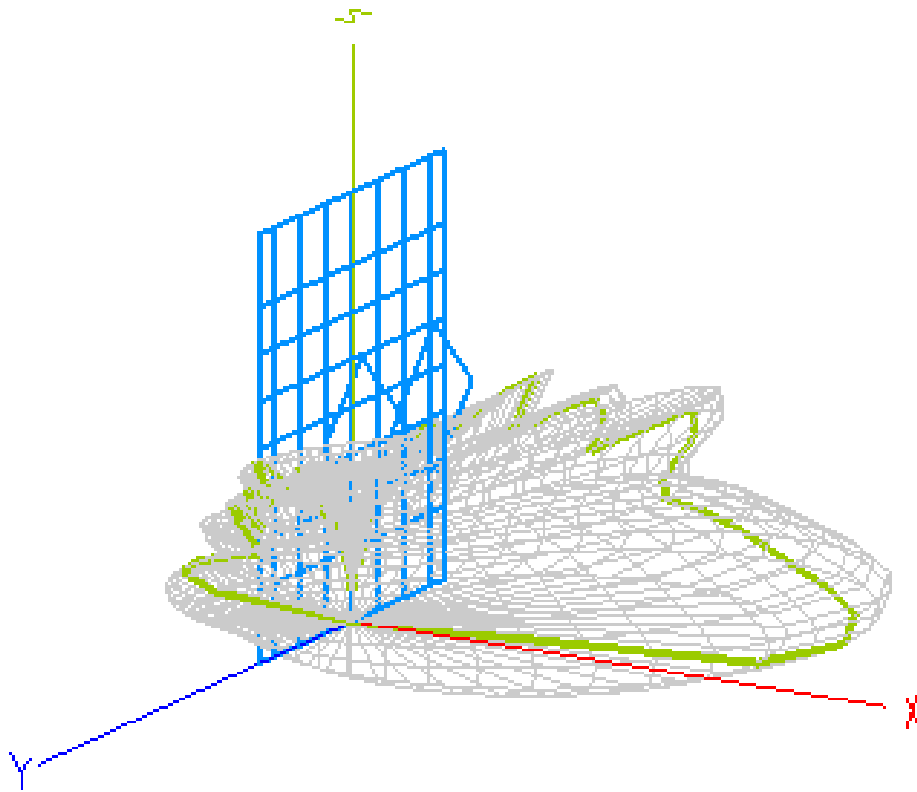


Рисунок 4.5 – 3Д діаграма спрямованості антени Харченко з вертикальним перерізом

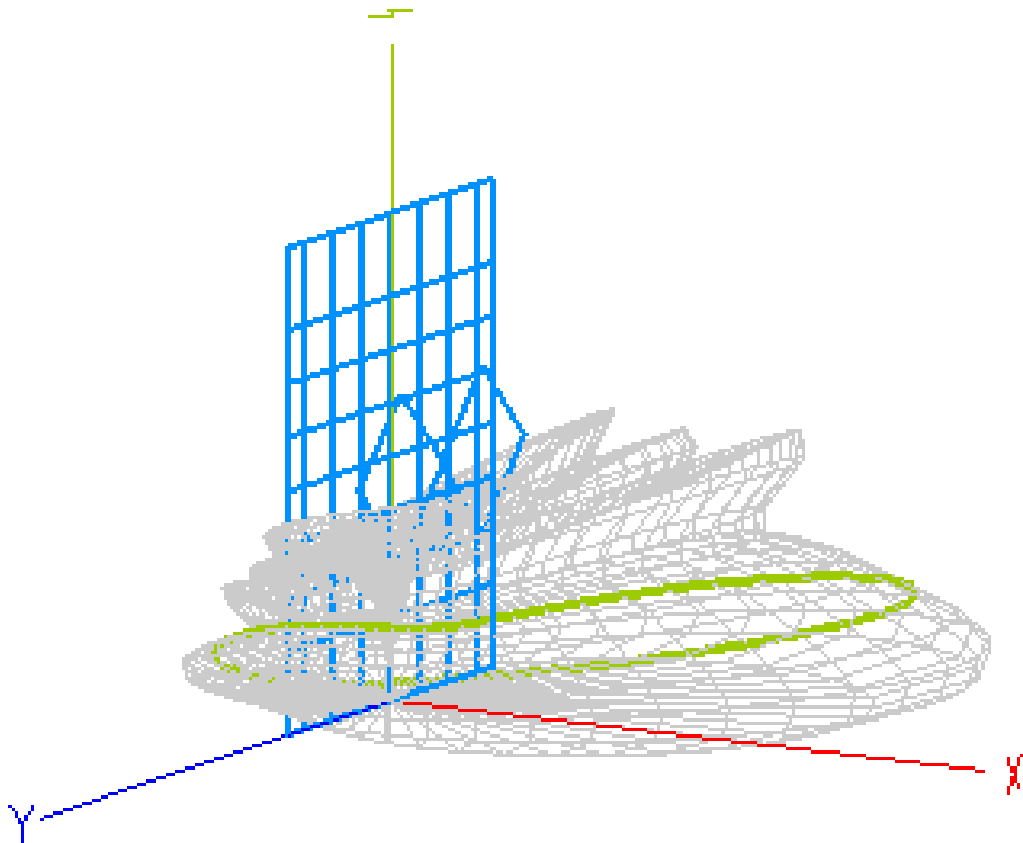


Рисунок 4.6 – 3Д діаграма спрямованості антени Харченко з горизонтальним перерізом

4.3 Моделювання діаграми спрямованості ESPAR-антени

У наших дослідженнях, 7-елемент ($M = 6$) зайнятий. Сигнал і опорний сигнал складаються в двійковій фазовій маніпуляції (BPSK). Відношення сигналу до потужності шуму = 20 дБ. Сила сигналу перешкоди така ж, як і сила корисного сигналу. Розмір блоку даних для кожного розрахунку NMSE у формулі (4.1) береться = 50. У цьому моделювання, число символів які використовуються для формування дорівнює:

$$P(N + 1)N = 50 \cdot (6 + 1) \cdot 10000 = 3.5 \cdot 10^6, \quad (4.1)$$

Оскільки потрібно часу для обчислення градієнта значення, розглянемо випадок, коли є два сигнали з різними напрямками - θ_1 і θ_2 . На початковому етапі, значення кожного реактивного опору встановлюється в нуль. Після $N = 10000$ ітерацій, ми знаходимо найменше значення цільової функції. З відповідним вектором реактивного опору $X = [-200 \ -119 \ 236 \ 67 \ 57 \ -122]$, промінь доведений до корисного сигналу, в той час глибокий нуль формується в напрямку сигналу перешкоди при рис. 4.7. Відношення потужності вихідного сигналу до перешкоди виходить 40 дБ. Це підтверджує, що алгоритм Гамільтона може керувати нулем до перешкод адаптивно.

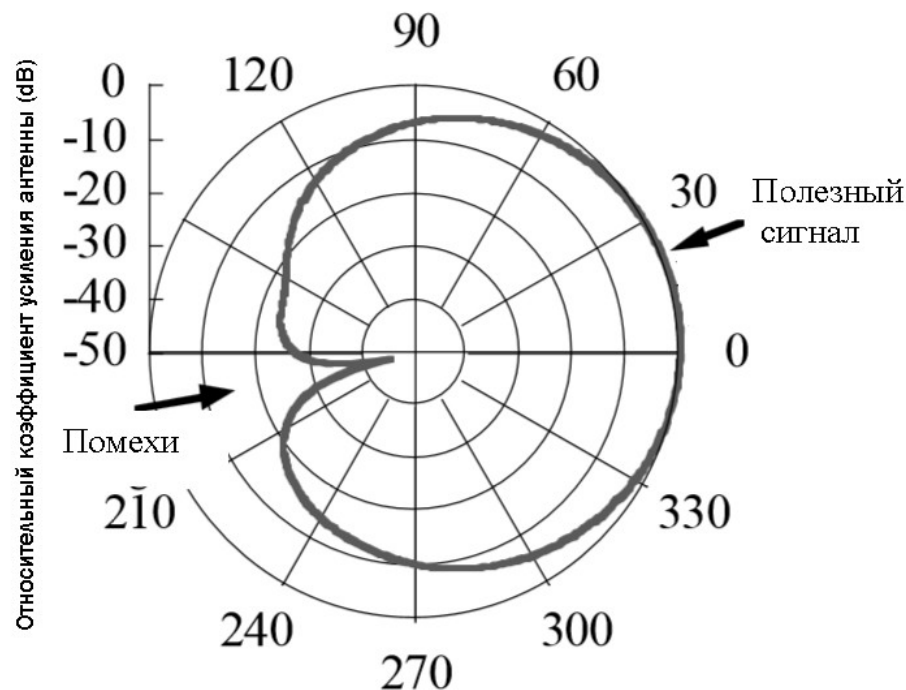


Рисунок 4.7 – Адаптивна модель для відносини сигнал/шум = 20 дБ. DoA: (бажане) θ_1

На рисунках Доповнення Б початкові точки в ітерації відзначені квадратами, і оптимальні точки позначені кружками. Для корисного сигналу на DoA (Direction of arrival - визначення напрямку приходу) θ_1 і сигналу перешкоди, у

відповідності з дією завантаженого реактивного опору, 1-й і 2-й елементи повинні виступати в якості директорів, завантажених негативних реактивних опорів, щоб сформувати промінь корисного сигналу. 4-ий і 5-ий елементи можуть виступати в якості рефлекторів, завантажених позитивних реактивних опорів.

Доповнення Б ілюструє, що траєкторія поширюється на більшій площі, але, як видається, обмежується більш хорошим діапазоном рішення. Наприклад, як видно з рис. 4.2 (а), в області пошуку реактивного опору часто охоплюються негативні значення, а в позитивні значення, але не потрапляють в локальний мінімум. Те ж саме явище можна спостерігати на рис. 4.2 (б), в якому реактивний опір часто коливався в діапазоні позитивних значень, і реактивний опір становить більш позитивні значення. Крім того, і розсіяні по всій можливій площі на рис. 4.2 (в), третій і шостий елементи не можуть точно реагувати - направляти свої промені і обнулятиметься на і. Обговорення вище показує, що алгоритм Гамільтона вільний від локальних мінімумів, і забезпечує більше можливостей для пошуку глобального мінімуму детерміновано. Відомо, що градієнтний алгоритм іноді мимоволі потрапляє в локальний мінімум. Траєкторія задається алгоритмом випадкового пошуку - рівномірним і випадковим чином розподілені на всьому просторі реактивного опору.

4.4 Моделювання діаграми спрямованості антени Beanflex

Електрорушійна сила (ЕРС) $E_{\text{вих}}$ на виході прийомної антени визначається відомим співвідношенням:

$$E_{\text{вих}} = E h_d F^*(\theta_0, \varphi_0). \quad (4.2)$$

де E - напруженість поля падаючої плоскої хвилі в області розташування антени; h_d - діюча довжина антени; θ_0, φ_0 - кутові координати джерела сигналу; F

$(0, 0)$ - значення нормованої ХС антени по напруженості поля в режимі передачі в напрямку на джерело сигналу [14].

Вираз (4.2) визначає ЕРС на виході прийомної антени. Тут обидві функції в правій частині рівності визначені щодо єдиного аргументу - хвильового вектора падаючої хвилі. Однак формально останнє співвідношення може бути записано і щодо хвильового вектора випромінюваної хвилі [14]:

$$\mathcal{E}_{\text{вих}}^* = E^* h_d F(\theta_0, \varphi_0) \quad (4.3)$$

Адаптивні антени Ruckus BeamFlex дозволяють точки доступу R320 динамічно вибирати діаграми спрямованості (до 64 різних комбінацій) в режимі реального часу для встановлення стабільного з'єднання з кожним пристроєм. В результаті забезпечується: більш повне покриття Wi-Fi та скорочення радіоперешкод.

Традиційні всеспрямовані антени, що зустрічаються в стандартних точках доступу, перенасичують навколишнє середовище радіосигналами, оскільки випромінюють їх у всіх напрямках. На відміну від них, адаптивна антена Ruckus BeamFlex направляє радіосигнали на певні пристрої на рівні окремих пакетів для оптимізації покриття і продуктивності мережі Wi-Fi в режимі реального часу і ефективної роботи в середовищах з високою щільністю пристроїв. Технологія BeamFlex не потребує зворотного зв'язку від пристрою і може ефективно працювати навіть з пристроями, що використовують застарілі стандарти.

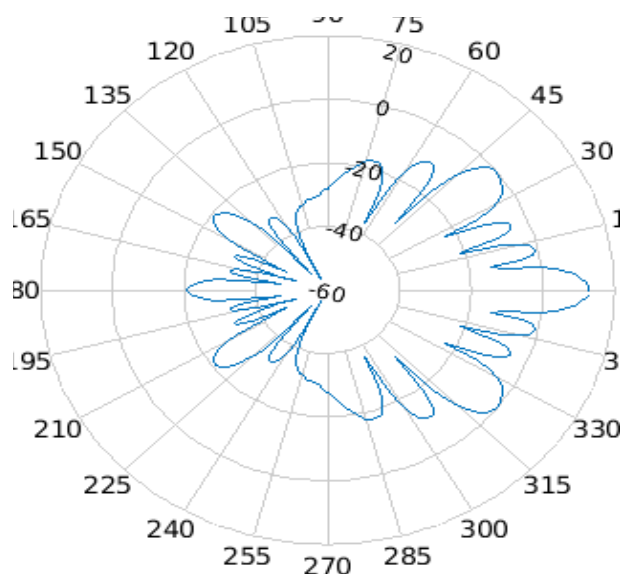
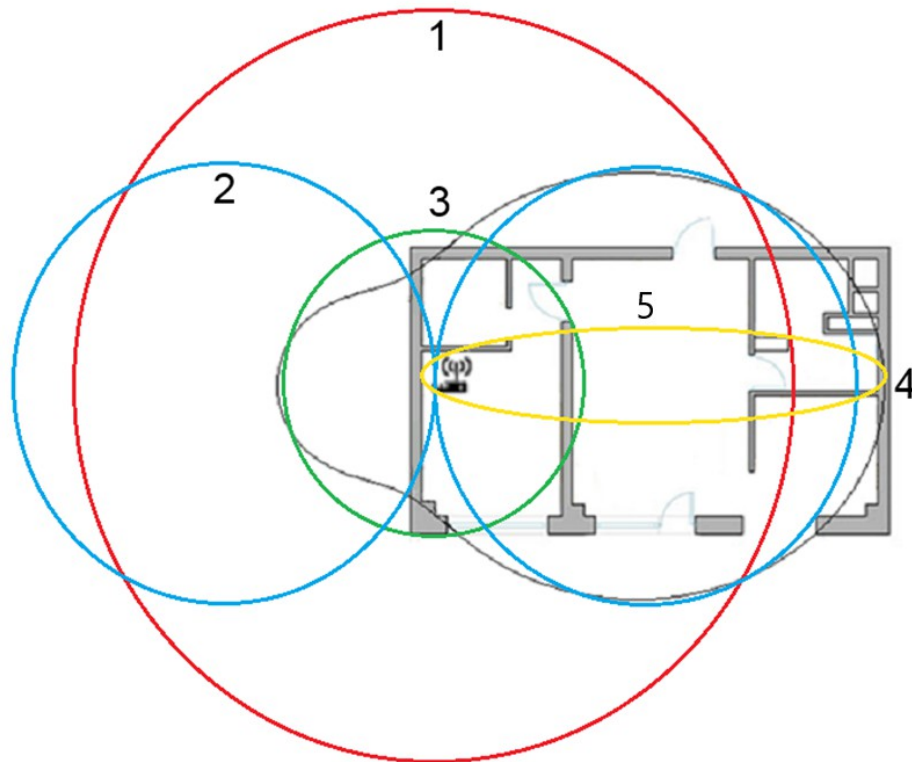


Рисунок 4.8 – Діаграма спрямованості антени BeamFlex

4.5 Вибір оптимальної антени за сукупністю показників якості

В таблицю, що наведено нижче, зведені основні характеристики антен, отримані в результаті моделювання. Також в таблицю для порівняння були додані комерційні антени, з близькими параметрами, характеристики яких були знайдені на сайті виробника.

Додатково було введено коефіцієнт покриття приміщення, який показує ступінь покриття площі приміщення. Він був розрахований для приміщення розмірами 7.6x4.3 м. Покриття приміщення різними діаграмами спрямованості зображено на рис.4.9.



- 1 – Діаграма спрямованості штирьової антени TL-ANT2412D;
- 2 – Діаграма спрямованості рамкової антени TL-ANT2414A;
- 3 – Діаграма спрямованості штатної антени;
- 4 – Діаграма спрямованості антени Харченко.
- 5 – Діаграма спрямованості антени BeamFlex

Рисунок 4.9 – Діаграми спрямованості різних антен на плані приміщення

Коефіцієнт покриття розраховується як відношення площі обслуговуваної території до площі всього приміщення:

(4.4)

Таблиця 4.1 – Порівняльна характеристика параметрів антен

Характеристика	Штатна Харченко	Рамкова (TL-ANT2414A)	Штирьова (TL-ANT2412D)	ESPAR антена	Адаптивна антена Beamflex	
Діапазон робочих частот, ГГц	2.4 – 2.5	2.4-2.5	2.4-2.5	2.4-2.5	2.4-2.5	
Складність конструкції	мала	середня	висока	Середня	висока	
КСХ	1.4	1.05	1.5	<2.0	1,01	
Ширина пелюстка ДС (гор/верт)	360°/60°	62°/3°	30°/30°	360°/120°	180°	адаптивна
Можливість зовнішньої установки	ні	існує можливість	можлива	можлива	можлива	можлива
Габарити, мм	120x10	120x60x20	80x80x15.8	1718x48	240x120x20	245x130x23
Коефіцієнт підсилення, dBi	5	15	14	12	40	9
Коефіцієнт покриття	0.36	0.99	0.93	0.82	0,99	0,99
Вартість, грн	100	150	1255	860	25000	10000

Для визначення оптимальної конструкції антени за зоною покриття для даного приміщення, серед вищенаведених характеристик були обрані наступні показники якості: КСХ, коефіцієнт підсилення, коефіцієнт покриття та вартість.

Таблиця 4.2 – Показники якості, обрані для вибору оптимальної антени

Характерист.	Штатна	Харченко	Рамкова - ANT2414 A)	Штирьова - ANT241XD)	ESPAR антена	AA BeamFlex
КСХ	1.4	1.05	1.5	<2.0	1.01	1.1
Коефіцієнт підсилення, dBi	5	15 (розрахунковий)	14	12	40	9
Коефіцієнт покриття	0.36	0.99	0.93	0.82	0,99	0.99
Вартість, грн	100	150	1255	860	25000	10000

Далі проноормуємо ці показники:

Таблиця 4.3 – Нормовані значення обраних показників якості

Характеристика	Штатна	Харченко	Рамкова (TL- ANT2414A)	Штирьова (TL- ANT241XD)	ESPAR антена	AA BeamFlex
КСХ	0.7	0.525	0.75	1	0,5	
Коефіцієнт підсилення	0.33	1	0.93	0.8	1	
Коефіцієнт покриття	0.364	1	0.94	0.83	1	
Вартість	0.08	0.12	1	0.67	0,01	

Визначимо, що переважною буде та антена, яка набере більше число за сумою показників якості. Для цього необхідно проінвертувати значення показників КСХ та вартості:

Таблиця 4.4 – Нормовані значення обраних показників якості із проінвертованими значеннями строк «КСХ» та «вартість»

Характеристика	Штатна	Харченко	Рамкова (TL-ANT2414A)	Штирьова (TL-ANT241XD)	ESPAR антена	AA BeamFlex
КСХ	0.3	0.475	0.25	0	0,5	
Коефіцієнт підсилення	0.33	1	0.93	0.8	1	
Коефіцієнт покриття	0.364	1	0.94	0.83	1	
Вартість	0.92	0.88	0	0.33	0,65	

Далі визначимо оптимальну антену за сукупністю показників якості, для цього просумуємо їх значення за стовпцями.

Таблиця 4.5 – Сума показників

Характеристика	Штатна	Харченко	Рамкова (TL-ANT2414A)	Штирьова (TL-ANT241XD)	ESPAR антена	AA BeamFlex
Показник	1.944	3.355	2.12	1.93	6,55	

Враховуючи отримані результати, можемо зробити висновок, що антена Харченко є переважною відносно інших антен. Саме вона має найбільше відношення «вартість-підсилення» При цьому запропонована антена має досить широку діаграму спрямованості у горизонтальній площині, що дозволяє ефективно організувати покриття обслуговуваної території.

Таким чином використання АХ може дати перевагу у певних умовах використання при значно менших матеріальних затратах.

5 АНАЛІЗ ПРОДУКТИВНОСТІ УГРУПОВАННЯ БЕЗДРОТОВОЇ ЛОКАЛЬНОЇ МЕРЕЖІ WiFi З УРАХУВАННЯМ ПАСИВНОГО РЕТРАНСЛЯТОРА В МЕЖАХ БУДІВЛІ

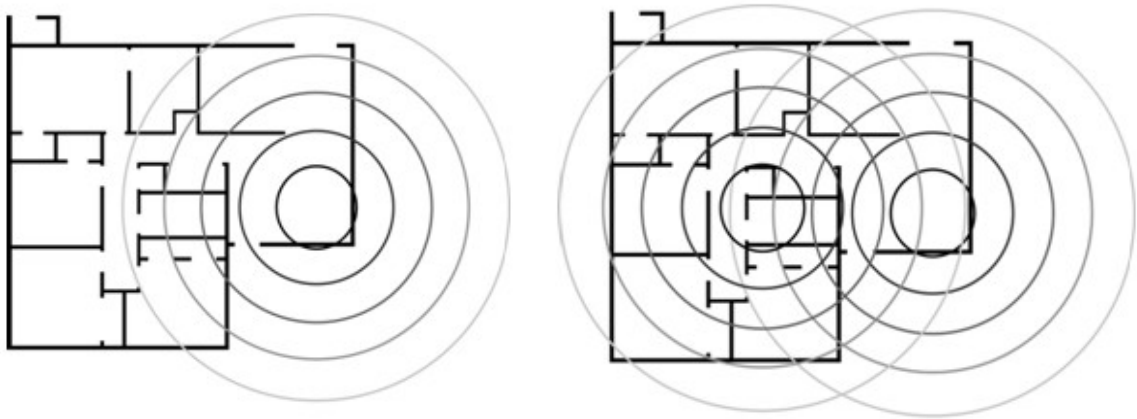
5.1 Постановка завдання впливу декількох бездротових WiFi - мереж на одну досліджувану

Поряд з перевагами в системах IEEE 802.11 b/g/n є і недоліки, серед яких однією з головних є проблема електромагнітної сумісності (ЕМС), що виникає в результаті відкритості ефіру. Слід зазначити, що проблема появи небажаних сигналів і завад виникає навіть в тих бездротових мережах, де дуже добре сплановано використання радіочастотного спектру, оскільки проблема ЕМС стає все більш складною щодо її вирішення. Особливо важка електромагнітна обстановка (ЕМО) в угрупованнях локальних бездротових мереж в межах однієї будівлі або офісу. В даному випадку можлива ситуація, коли в одній будівлі діє кілька локальних мереж, незалежних один від одного і використовують обладнання радіо доступу одного стандарту, наприклад, найбільш популярного стандарту IEEE.802.11 або IEEE.802.15 (Bluetooth). Згідно IEEE 802.11, IEEE.802.15 доступ абонентів рекомендується забезпечувати в радіочастотних неліцензованих діапазонах 2,4 ГГц і 5 ГГц. Оскільки, близько розташовані один від одного локальні мережі, які використовують обладнання одного стандарту, створюють проблему внутрісистемної ЕМС.

5.1.1 Формування діаграми АХ

В роботі було запропоновано використати антену Харченко у якості внутрішньої антени пасивного ретранслятора з метою розширення зони випромінювання передавача WiFi точки доступу. Як можна бачити з рис. 5.1 підсилення корисного сигналу збільшує радіо покриття мережі Wi-Fi, а разом з тим ускладнює електромагнітну обстановку у разі якщо навколо розгорнутої мережі одночасно працюють ще декілька мереж WiFi на тому самому частотному каналі. У такому випадку порушуються умови внутрісистемної електромагнітної сумісності і цю проблему потрібно вирішувати при

проектуванні або плануванні нової мережі радіоінженерам і адміністраторам мереж. Таким чином, виникає завдання оцінки продуктивності бездротової локальної мережі WiFi з урахуванням розширення зони радіо дії за рахунок пасивної ретрансляції в межах будівлі. Для вирішення цієї задачі, в атестаційній роботі запропонована модель аналізу електромагнітної обстановки угруповання локальних мереж WiFi, що дозволяє досить просто, на інженерному рівні, оцінити енергетику вже діючих мереж і надати рекомендації мереж, які знову вводяться.



а)

б)

Рисунок 5.1 – Радіус дії точки доступу мережі Wi-Fi
а) без ретрансляції; б) при наявності ретранслятора

Особливий інтерес представляє використання систем стандарту 802.11 в межах окремих приміщень і всередині будівлі. Основними ефектами, що спостерігаються при поширенні радіохвиль (РРВ) всередині приміщень, є багатопроменевість, що обумовлена багаторазовими відображеннями радіохвиль, дифракція на численних гострих крайках предметів, розташованих усередині кімнати, і розсіювання радіохвиль. Різноманіття умов РРВ призводить до необхідності використовувати деякі емпіричні моделі, засновані на численних експериментах.

При плануванні декількох WiFi-мереж в межах зони їх спільної дії враховують частотно-часові, енергетичні, просторово-поляризаційні і інші параметри сигналів, що використовуються. Найчастіше варіюють частотними і просторовими параметрами, вважаючи інші - фіксованими.

На прикладі технології IEEE 802.11 розглянемо формалізацію послідовності дій при забезпеченні EMC на етапі планування САРД. Частотний спектр і розподіл на канали в даній технології представлені на рис.5.1. Як видно з рисунку багато з каналів перекриваються по частоті, що за критеріями EMC неприпустимо. Однак можна вибрати 3 незалежних, що не перекриваються за частотою 1, 6 і 11 канали, які часто і використовують на практиці.

Таким чином, в одній і тій же кімнаті можливо задіяння трьох точок доступу, які використовували ці канали і не створювали взаємних завад. Якщо ж вирішується інше завдання – забезпечення радіопокриття обслуговуваних приміщень, то вибір каналів і призначення їх точок доступу здійснюється за принципом стільникового планування.

На рис. 5.2 б показаний план мереж стандарту 802.11b з повним покриттям території, що обслуговується.

У діапазоні частот 5 ГГц, в якому працює обладнання стандарту 802.11a, є вісім каналів, які не перекриваються, що робить його дуже привабливим для розгортання мереж. Однак при цьому слід мати на увазі, що радіус стільники мережі стандарту 802.11a менше радіуса стільники мережі стандарту 802.11b.

а)

б)

Рисунок 5.2 – Схема бездротової мережі стандарту 802.11b з сотами, що перекриваються, в яких використовуються частотні канали, які не перекриваються

На відміну від методу планування стільникових систем, де сам план реалізується на площині, при плануванні САРД необхідно перейти до тривимірного простору планування, що дозволить врахувати впливу інших систем на сусідніх поверхах і сусідніх будівлях.

Для дослідження ЕМО необхідно мати модель будівлі з приміщеннями в яких є взаємодіючі термінали WiFi або через які може проникати електромагнітна енергія.

На рис. 5.4 показана типова схема розташування досліджуваного приміщення з розміщеною WiFi-мережею і складається з 3-х поверхів і декількох приміщень.

Поблизу досліджуваної зони (центральна частина будівлі), в сусідніх приміщеннях можуть бути розгорнуті інші бездротові мережі та ін. пристрої, наприклад Bluetooth або НВЧ-піч. Як видно з рис. 5.2 всього прилеглих приміщень може скласти 26, які необхідно врахувати в рішенні задачі дослідження ЕМО.

Рисунок 5.3 – Схема розташування приміщень поблизу зони, що досліджується

Поблизу зони, що досліджується (локальна мережа в приміщенні 8) можуть перебувати такі приміщення:

- 1) два бокових офісу по широкій стінці (приміщення 1);
- 2) два бокових офісу по вузькій стінці (приміщення 2)
- 3) офіс поверхом вище або нижче (приміщення 3) (може бути два);
- 4) офіс, розташований в кутку (приміщення 4) (може бути чотири);
- 5) офіс боковий верхній або нижній, розташований по широкій стінці

(приміщення 5) (може бути чотири);

б) офіс боковий верхній або нижній, розташований по вузькій стінці (приміщення 6) (може бути чотири);

7) офіс, розташований в вершині (приміщення 7) (може бути 8).

Вочевидь можлива ситуація, коли в кожному з досліджуваних приміщень розгорнуті аналогічні системи з трьома точками доступу. Таким чином, на одне джерело корисного сигналу може припадати 78 джерел завад.

Продемонструємо можливість проведення аналізу ЕМО WiFi мереж в межах будівлі.

Такі взаємодії можуть розглядатися як дуельна ситуація, коли одна мережа є джерелом завад для іншої. В даному випадку, хоча і існує безліч інших джерел електромагнітних полів, ці завади не розглядаються і не враховуються. Така ситуація може виникнути в тому випадку коли на території, яка досліджується існує одна мережа і вводиться нова (рис.5.4).

Для оцінки впливу однієї мережі на іншу проводиться розрахунок всіх взаємних відстаней від кожного елемента мережі, що досліджується до кожного елемента мережі, яка впливає.

Взаємодії декількох мереж більш складні в порівнянні дуельної ситуації. В даному випадку існує безліч джерел завад. Така ситуація зазвичай виникає в будинках з великою кількістю офісів або в мікрорайоні та місті, де вже існує безліч мереж розподіленого типу і вводиться ще одна (рис. 5.4).

5.1.2 Формування діаграми BeamFlex

За матеріалом наданим вище була сформована діаграма спрямованості антени BeamFlex (рис. 5.5). Вона показує, що адаптація є постійною згідно рисунку 3.7 та рисунку 3.8, завдяки якій точка доступу постійно контролює якість прийому і виробляє обчислення для забезпечення найвищого свідчення співвідношення сигнал / шум. Це дозволяє забезпечити високу пропускну здатність передачі даних для абонентів, що обслуговуються, і завдяки спеціально сформованій діаграмі спрямованості сформувати умови для співіснування з іншими точками доступу працюють в тому ж частотному діапазоні.

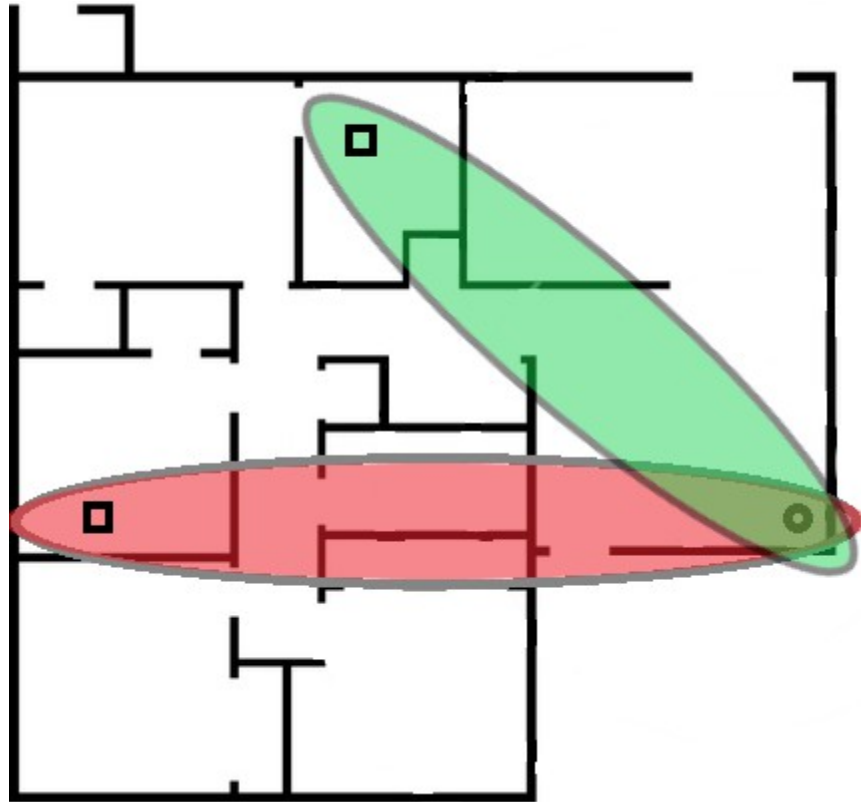


Рисунок 5.5 – Діаграма спрямованості для двох пристроїв

5.2 Методика аналізу продуктивності

Як критерій забезпечення ЕМС візьмемо показник (1), який прийнято називати ОСПШ. Критерій ОСПШ в даному випадку є цілком допустимим, оскільки, заважають сигнали виявляються повністю збіжні за частотним спектром. Крім того, ці перешкоди, в силу їх широкосмуговості, близькі за своєю структурою до білого шуму.

$$S_i = \frac{P_i}{P_n} \quad (5.1)$$

де „ P_i ” – відповідно потужність сигналу, i -й перешкоди і шуму в смузі частот прийому.

Для розрахунку ОСПШ в кожній зоні будівлі, що цікавить необхідна наявність таких вихідних даних:

- 1) розміри приміщень будівлі - висота h , ширина d , довжина l ;

- 2) товщина стін t і перекритій p ;
- 3) - потужність передавача;
- 4) α , β - коефіцієнти посилення передавальної і приймальної антен в напрямку досліджуваного приміщення;
- 5) γ - коефіцієнти корисної дії приймального і передавального фідерів;
- 6) λ - довжина хвилі несучої.

Рівень перешкоди на вході приймача можна розрахувати, використовуючи рівняння передачі (всі складові виражені в дБ).

$$(5.2)$$

де P_t – потужність передавача, що впливає;
 α – послаблення енергії у вільному просторі;
 β – додаткові втрати на відстані розносу R між рецептором і джерелом перешкод.

Далі проводиться розрахунок відстаней від досліджуваного споживача мережі до джерела корисного сигналу і джерел перешкод:

$$(5.3)$$

При розрахунку енергетики сигналів поширюються всередині будівель і приміщень, особливу роль відіграє величина додаткових втрат α , яку можна уявити

$$(5.4)$$

де α_1
 α_2 – додаткові втрати сигналу при заповненні простору різними предметами, дБ;
 α_3 – додаткові втрати сигналу з урахуванням стін та перегородок, дБ;
 α_4 – додаткові втрати сигналу з урахуванням міжповерхових перекритій, дБ;

- додаткові втрати сигналу з урахуванням завмирань сигналу, дБ.
- додаткові втрати сигналу з урахуванням частотної відбудови перешкоди і смуги пропускання приймача, дБ.

Розглянемо більш докладно складові додаткового загасання.

- враховує втрати енергії на розсіювання і поглинання в різних навколишніх радіоліній предметах. Даний показник являє собою масштаб відстаней між предметами, що заповнюють зведений до рівня :

$$, \quad (5.5)$$

Облік втрат у N стінах здійснюється за формулою [8]:

$$, \quad (5.6)$$

- втрати при проходженні сигналу крізь одну стіну.

Міжповерхові перекриття, як правило, мають більш складну металобетону конструкцію, тому використовують емпіричну формулу [15]

$$, \quad (5.7)$$

де

- кількість міжповерхових перекриттів;
- загасання міжповерхових перекриттів, дБ;
- поправочний коефіцієнт (α).

Випадкова складова додаткового загасання обумовлена завмиранням сигналу

$$, \quad (5.8)$$

де - відображають відповідно: повільні і швидкі випадкові завмирання.

У розрахункових задачах з енергетики радіоліній САРД швидкими завмираннями зазвичай нехтують, бо вони характерні для досить протяжних,

коли $>30-50$ км, переважно закритих або напівзакритих радіотрас. Для офісних, відомчих радіоліній або радіоліній в межах мікрорайону прийнято вважати .

Причиною, що породжує випадково змінні рівні сигналів, є різні переміщення людей і предметів, елементів меблів, переміщення транспортних одиниць та ін., відбитий сигнал від яких приходить в точку прийому з випадковою фазою і (або) з випадковою фазою і амплітудою. Квазіперіод цих завмирань становить секунди і триваліші часові відрізки. Повільні завмирання зі значно більшими квазіперіодами (годин) можуть бути результатом впливу атмосферних чинників. Повільні завмирання підкоряються випадковому логарифмічно-нормальному закону, коли логарифм від рівня сигналу - розподілений нормально з параметрами . Тоді [5,6]

$$, \text{ [дБ]} \quad (5.9)$$

де ρ - коефіцієнт кореляції між двома перетинами випадкового процесу зміни , рознесених на інтервал .

Додаткові втрати енергії сигналу за рахунок частотної розбіжності перешкоди і робочої смуги пропускання приймача обчислюють за формулою [10]:

$$, \quad (5.10)$$

де $F()$ – функція послаблення потужності радіоперешкоди за рахунок частотного неспівподання, дБ;

– параметр, який характеризує частотну розбудову між -м передавачем -джерелом перешкоди і -м приймачем-рецептором перешкоди.

У разі однотипних взаємодіючих систем .

Після розрахунку загасання проводиться розрахунок потужності сигналу, яка визначається в дБ відповідно до рівняння передачі:

$$. \quad (5.11)$$

Вочевидь, перешкоди, що діють від інших систем знижують показники досліджуваної або проектованої системи. Один з найбільш чутливих і важливих показників є пропускна здатність каналу.

При впливі білого гаусового шуму пропускна здатність каналу може бути знайдена відповідно до формули Шеннона:

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{P}{N_c} \right) \quad (5.12)$$

де B – база сигналу.

За отриманою пропускною здатністю і знаючи необхідну пропускну здатність каналу можна оцінити реальну можливість функціонування мережі в ЕМО, що склалася.

Для 802.11n при швидкості 54 Мбіт / с, ймовірність помилки прийняття сигналу

$$\left(\frac{P_c}{P_{Osh}} \right)_{5,5} = 24 \cdot Q(\sqrt{4 \cdot E_c / N_c}) + 16 \cdot Q(\sqrt{6 \cdot E_c / N_c}) + 174 \cdot Q(\sqrt{8 \cdot E_c / N_c}) + 16 \cdot Q(\sqrt{10 \cdot E_c / N_c}) + 24 \cdot Q(\sqrt{12 \cdot E_c / N_c}) + Q(\sqrt{16 \cdot E_c / N_c}) \quad (5.13)$$

Оскільки кожен символ кодує 8 біт, ефективна ймовірність помилки одного біта

$$P = \min \left(1 - \left(1 - P_c / P_{Osh} \right)_{11}^{\frac{1}{8}}, 0,5 \right) \quad (5.14)$$

Для аналізу ЕМС (рис.5.3) угруповання локальних мереж були взяті такі дані:

- 1) розміри приміщень будівлі – висота $h = 4$ м, ширина $d = 5$ м, довжина $= 10$ м;
- 2) товщина стін $t = 0,5$ м і перекриттів $p = 0,4$ м;
- 3) P_t - потужність передавача;
- 4) - КП передавальної і приймальної антен;

- 5) - коефіцієнти корисної дії приймального і передавального фідерів;
 б) довжина хвилі несучої - м.

За допомогою математичного моделювання проведено аналіз функціонування угруповання БЛС в будівлі (рис.5.4). У таблиці 5.1 представлені дані про затухання електромагнітної енергії в будівельних матеріалах на частоті 2,4 ГГц.

Таблиця 5.1 - Коефіцієнти загасання будматеріалів для радіохвиль з частотою 2,4 ГГц

№	Будівельний матеріал	Коефіцієнт загасання, дБ
1	Шлакоблок	5,013
2	Гіпсокартон	1,89
3	Цегла червона	8,38
4	Бетон	10,486
5	Бетон+ гіпсокартон	12,385

На рисунку 5.6 представлені залежності потужності корисного сигналу від відстані при користуванні стін приміщення з будматеріалами табл. 5.1.

- $P_c(R)$ – відкритий простір;
 $P_1(R)$ – стіна з шлакоблоків;
 $P_2(R)$ – стіна з червоної цегли;
 $P_3(R)$ – стіна з бетону;
 $P_4(R)$ – стіна з бетону + гіпсокартон;

Рисунок 5.6 – Залежність потужності корисного сигналу від відстані при користуванні стін приміщення з різними будматеріалами

З графіку 5.6 можна зробити висновок, що при мінімальному значенні потужності сигналу рівним -100 дБ, що відповідає чутливості приймача, відстань між робочими станціями різне при наявності стін виконаних з різних будматеріалів. Найбільше загасання корисного сигналу буде при наявності стін будівлі виконаних з бетону і облицьованих гіпсокартоном.

За допомогою математичного моделювання проведено аналіз функціонування угруповання БЛС в будівлі (рис. 5.5). В якості вихідних даних

був використаний сигнал з кодом Баркера з кількістю рівнів напруги $M=11$, базою - $V=8$ і частотою передачі $F=5$ МГц. При цьому пропускна здатність з Найквіста повинна відповідати 35 Мбіт/с. На практиці ж використовується не весь канал і при частоті $F=5$ МГц інформація передається зі швидкістю 1 Мбіт/с або 2 Мбіт/с.

На рис. 5.7 представлені залежності ОСПШ від впливу перешкод сусідніх офісів. На рис. 5.8 і рис. 5.9 представлені відповідно пропускні спроможності та ймовірності спотворення одного біта інформації, що передається. Номер приміщення відповідає такому переліку:

- 1 – бічний офіс, розташований по широкій стінці приміщення мережі, що досліджується;
- 2 - боковий офіс, розташований по вузькій стінці;
- 3 - офіс, розташований по верхом вище або нижче;

4 - кутовий офіс, розташований на поверсі мережі, що досліджується;

5 - боковий офіс, розташований по широкій стінці поверхом вище або нижче приміщення мережі, що досліджується;

6 - боковий офіс, розташований по вузькій стінці поверхом вище або нижче приміщення мережі, що досліджується;

7 - кутовий офіс, розташований поверхом вище або нижче приміщення мережі, що досліджується.

Криві 1 на рис. 5.7, рис. 5.8 і рис. 5.9 відповідають випадку впливу одного джерела перешкоди (працює одне джерело сусідньої мережі, розташоване в центрі свого приміщення) при відстані до джерела корисного сигналу дорівнює 1 метр. Криві 2 на цих же рисунках відповідають випадку впливу двох джерел перешкод. Криві 3 відповідають випадку впливу трьох джерел перешкод. Криві 4, 5 і 6 отримані для тих же вихідних даних відповідно 1, 2 і 3 джерел перешкод при відстані до джерела корисного сигналу рівному 3 метри.

З наведених графіків видно, що найбільший вплив надають БЛС, розташовані в приміщеннях 1 та 2. Тому, застосування в досліджуваному приміщенні системи того ж стандарту, який використовується мережами приміщень 1 і 2 небажано. Вплив БЛС, розташованих в приміщеннях 3 і 4 менше і дає допустимі показники. Найменший вплив надають БЛС, розташовані в приміщеннях 5, 6 і 7.

Проведено аналіз функціонування мережі при зміні відстані до джерела корисного сигналу в досліджуваному приміщенні при впливі БЛС, розташованої в приміщенні 4. Отримано залежності розглянутих вище показників від відстані до джерела корисного сигналу. На рис. 5.10, рис. 5.11 і рис. 5.12 показані відповідно залежності ОСПШ, пропускної спроможності і ймовірності спотворення одного біта інформації від відстані до джерела корисного сигналу.

Криві 1, 2 і 3 як і в попередньому дослідженні відповідають випадкам впливу 1, 2 і 3 джерел перешкод. З отриманих графіків видно, що вплив перешкод приміщення 4 несуттєво при відстані передавача від приймача досліджуваної мережі не більше 6 метрів.

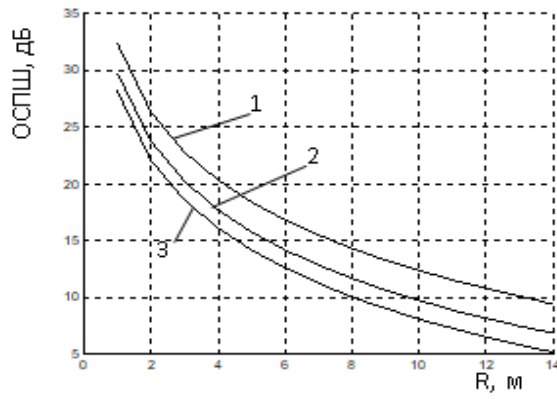


Рисунок 5.10 - Залежність ОСПШ від відстані до джерела корисного сигналу

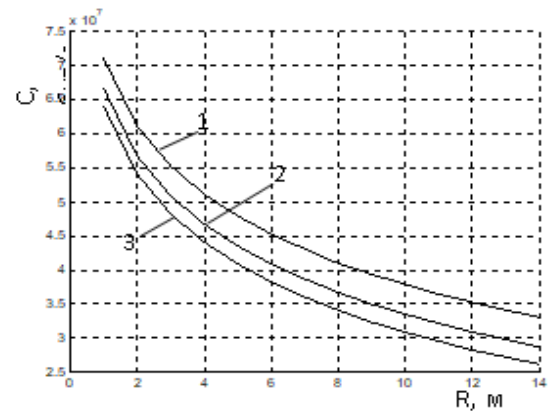


Рисунок 5.11 - Залежність пропускної здатності від відстані до джерела корисного сигналу

ВИСНОВКИ

1. В мережах Wi-Fi пропонується використовувати антену Харченко у якості пасивного ретранслятора, яка є ефективною при певних умовах сигнально-завадних обставин і відповідає значно меншим матеріальним витратам, що говорить про доцільність її впровадження в мережах бездротового доступу IEEE 80211b/g/n.

2. Проведено дослідження, що до використання адаптивної антени BeamFlex та зроблена модель діаграми спрямованості в будівлі. Вони показують що АА є найбільш доцільним при використанні в місцях угруповання великої кількості терміналів.

3. Розроблено модель множинних електромагнітних впливів в угрупованнях терміналів Wi-Fi-мереж в будівлі. При великій щільності мереж, що впливають один на одного в межах будівлі та зі збільшенням відстані між робочими терміналами - зменшується пропускна здатність і співвідношення сигнал/шум, збільшується ймовірність помилки.

4. Отримано графік залежності ослаблення потужності сигналу за рахунок стін і перекриттів будівлі виконаних з різних матеріалів (цегла, бетон, гіпсокартон та ін.), Що необхідно враховувати при плануванні бездротових мереж Wi-Fi.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

- 1 ПАССИВНЫЕ РЕТРАНСЛЯТОРЫ [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: http://gelezo.com/antennas/antennas_types/110500/110507/passivnie_retranslyatori.html.
- 2 [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://utalux.ru/uk/chto-znachit-wi-fi-802-11-n-standarty-wi-fi/>.
- 3 Расчет антенны Харченко (зигзагообразной) [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://3g-aerial.biz/onlajn-raschety/raschety-antenn/raschet-antenny-kharchenko-zigzagobraznoj> – 30.10.2019 – головна з екрану.
- 4 IEEE Std 802.11g-2003 : IEEE Standard for Information technology. Telecommunications and information exchange between systems. Local and metropolitan area networks. Specific requirements. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications. Amendment 4: Further Higher Data Rate Extension in the 2.4 GHz Band. IEEE, 2003. - 78 p.
- 5 Широкополосные беспроводные сети передачи информации / [Вишневецкий В.М., Ляхов А.И., Портной С.Л., Шахнович И.В.]. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.
- 6 Современные беспроводные сети, состояние и перспективы развития / [Гепко И.А., Олейник В.Ф., Чайка Ю.Д., Бондаренко А.В.]. – М.: ЕКМО, 2009. – 670 с.
- 7 Беспроводные сети Wi-Fi (2-е изд.) [Пролетарский А.В., Баскаков И.В., Федотов Р.А.] – НОУ "ИНТУИТ", 2016. – 284 с.
- 8 Олифер В.Г. Компьютерные сети: принципы, технологии, протоколы / В.Г. Олифер, Н.А. Олифер. – СПб.: Питер, 2003. – 864 с.
Безрук, В.М. Інформаційні мережі зв'язку. Ч. 2. Телекомунікаційні технології стаціонарних мереж зв'язку: навч. посібник. / В.М. Безрук, Ю.М. Бідний, Ю.М. Колтун та ін. – Харків: ХНУРЕ, 2011. – 492 с.
- 9 Уолрэнд, Дж. Телекоммуникационные и компьютерные сети. Вводный курс [/ Дж.. Уолрэнд. – М.: Постмаркет, 2001.
Кульгин М. Технология корпоративных сетей. Энциклопедия / М. Кульгин. – СПб.: Питер, 1999. – 704 с.

10 Олифер В.Г. Введение в IP-сети [Электронный ресурс] / В.Г. Олифер, Н.А. Олифер. – 2000. – Режим доступа до ресурсу: <http://citforum.ru/nets/ip/contents.shtml>. – Загл. с экрана.

11 Берлин А. Абонентские сети доступа и технологии высокоскоростных сетей [Электронный ресурс]. / Александр Берлин // НОУ «ИНТУИТ» – 2007. – Режим доступа до ресурсу: <https://www.intuit.ru/studies/courses/986/212/info>

12 Вильям С. Компьютерные системы передачи данных / Столлингс Вильям – М.: Издательский дом «Вильямс», 2002. – 928 с.

13 .Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами.-М.: Радио и связь, 1985.-384с.

14 Адаптивные антенные решетки. Учебное пособие в 2-ух частях. Часть 1.: В.А. Григорьев, С.С. Щесняк, В.Л. Гулюшин, Ю.А. Распаев, О.И. Лагутенко, Щесняк А.С./ под общ. ред. В.А. Григорьева. – СПб: Университет ИТМО, 2016. – с. 179.