

**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ**

**НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ  
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ**

## **Пояснювальна записка**

до магістерської кваліфікаційної роботи

на тему: **“МЕТОДИ ТА АЛГОРИТМИ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ ПРИ  
ПОБУДОВІ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ РОЗМІЩЕННЯ БЕЗПРОВІДНИХ ТОЧОК  
ДОСТУПУ”**

Виконав: студент 6 курсу, групи ТСДМ-61  
спеціальності

172 Телекомунікації та радіотехніка

(шифр і назва спеціальності)

Старенченко Я.Ю.

(прізвище та ініціали)

Керівник

Тарбаєв С.І.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(прізвище та ініціали)

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ  
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

Кафедра Телекомунікаційних систем та мереж

Ступінь вищої освіти Магістр

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

телекомунікаційних систем та мереж

В.Ф. Заїка

“ ”

\_\_\_\_\_ 2019 року

**З А В Д А Н Н Я**

**НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Старенченкові Ярославу Юрійовичу

1. Тема роботи: “Методи та алгоритми, що використовуються при побудові та оптимізації розміщення безпроводних точок доступу”,  
керівник роботи Тарбаєв Сергій Іванович, к.т.н., доцент,  
затверджені наказом вищого навчального закладу від 14.11.2019 №518.

2. Строк подання студентом роботи 20.12.2019 р.

3. Вихідні дані до роботи:

1. Сучасні стандарти технології Wi-Fi;
2. Топології безпроводових локальних мереж;
3. Широко смугові види модуляції - FHSS, DSSS, OFDM;
4. Науково-технічна література..

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

1. Організація безпроводових локальних мереж на основі технології Wi-Fi.
2. Дослідження технологій фізичного рівня стандарту 802.11.
3. Технічна реалізація побудови локальної мережі за технологією Wi-Fi

5. Перелік графічного матеріалу (назва слайдів презентації):

1. Мета роботи;
2. Еволюція розвитку технології Wi-Fi;
3. Принципи побудови мереж на основі технології Wi-Fi;
4. Технології фізичного рівня;
5. Ортогональний частотний розподіл каналів з мультиплексуванням;
6. Основні етапи планування безпроводової мережі в офісі;
7. Програмне забезпечення для розгортання безпроводової мережі;
8. Розрахунок радіусу дії точок доступу Wi-Fi (1);
9. Розрахунок радіусу дії точок доступу Wi-Fi (2);
10. Безпроводові точки доступу для тестування мережі;
11. Результати тестування безпроводових точок доступу;
12. Висновки.

6. Дата видачі завдання 11.09.2019

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Підбір науково-технічної літератури	27.09.19	Викон.
2.	Організація безпроводових локальних мереж на основі технології Wi-Fi	15.10.19	Викон.
3.	Дослідження технологій фізичного рівня стандарту 802.11	08.11.19	Викон.
4.	Технічна реалізація побудови локальної мережі за технологією Wi-Fi	29.11.19	Викон.
5.	Висновки, вступ, реферат	10.12.19	Викон.
6.	Розробка демонстраційних аркушів	18.12.19	Викон.

**Студент**

Старенченко Я.Ю.  
\_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали)

**Керівник роботи**

Тарбаєв С.І.  
\_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

Текстова частина магістерської кваліфікаційної роботи: 78 сторінок, 35 рисунків, 30 джерела.

*Об'єкт дослідження* - процес функціонування комп'ютерні мережі передачі даних на основі технології Wi-Fi.

*Предмет дослідження* - безпроводові комп'ютерні мережі передачі даних на основі технології Wi-Fi.

*Мета роботи* полягає дослідженні методів та розробці алгоритмів, що використовуються при побудові та оптимізації розміщення безпроводових точок доступу.

*Метод дослідження* – методи системного аналізу; аналітичний та метод експериментальних досліджень.

В роботі досліджено організацію безпроводових локальних мереж на основі технології Wi-Fi. Представлено принципи побудови і особливості технології Wi-Fi. Дається загальний опис, історія її розвитку, класифікація і поточні перспективи розвитку.

Досліджено принципи побудови стандартів фізичного рівня, що використовуються при побудові Wi-Fi-обладнання. До яких відносяться розширення спектру цифровою послідовністю (DSSS), розширення спектру стрибками частоти (FHSS) та ортогональне частотне мультиплексування (OFDM).

Для проведення досліджень направлених на ефективну технічну реалізацію побудови локальної мережі за технологією Wi-Fi застосовано програмне забезпечення AirMagnet Survey.

БЕЗПРОВОДОВА ЛОКАЛЬНА МЕРЕЖА, РОЗВИТОК, IEEE 802.11X, НЕПЛАНОВА МЕРЕЖА, ЗОНА ОБСЛУГОВУВАННЯ, РОЗШИРЕННЯ СМУГИ, DSSS, FHSS OFDM, АНТЕНА, ПРОЦЕС РОЗГОРТАННЯ, РАДІООБСТЕЖЕННЯ, ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ, AIRMAGNET SURVEY

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	9
1. ОРГАНІЗАЦІЯ БЕЗПРОВОДОВИХ ЛОКАЛЬНИХ МЕРЕЖ НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЇ WI - FI.....	11
1.1. Топологія безпроводових локальних мереж технології Wi - Fi.....	11
1.2. Аналіз особливостей поширення радіохвиль в Wi-Fi-мережах.....	14
2. МЕТОДИ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ ПРИ ПОБУДОВІ БЕЗПРОВОДОВИХ ТОЧОК ДОСТУПУ .....	22
2.1. Необхідність застосування сигналів з розширеним спектром.....	22
2.2. Сигнал з безпосереднім розширенням спектру і широкосмугові сигнали із стрибками частоти.....	24
2.3. Сигнали з ортогональним частотним мультиплексуванням.....	28
2.4. Формування сигналу OFDM-МІМО.....	31
3. АЛГОРИТМИ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ ПРИ ОПТИМІЗАЦІЇ РОЗМІЩЕННЯ БЕЗПРОВОДОВИХ ТОЧОК ДОСТУПУ .....	33
3.1. Основні етапи планування безпроводової мережі в офісі.....	33
3.2. Алгоритм оптимізації розміщення безпроводових точок доступу.....	40
3.2. Програмне та апаратне забезпечення і методика тестування.....	43
3.3. Тестування мережі.....	48
3.4. Результати проведених тестувань .....	60
ВИСНОВКИ .....	63
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ .....	65

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ**

ATM	(Asynchronous Transfer Mode) – асинхронний режим передачі;
BER	(Bit Error Rate) - ймовірність появи бітових помилок;
ITU-T	(International Telecommunication Union) - Міжнародний телеко- мунікаційний союз;
ISI	(Intersymbol Interference) - міжсимвольна інтерференція;
LTE	(Long Term Evolution) - еволюція в довгостроковій перспективі;
MIMO	(Multiple Input Multiple Output) - декілька входів та виходів;
NGN	(Next Generation Network) – мережа наступного покоління;
OFDM	(Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) – мультиплексуван- ня ортогонально розділених несучих;
TMN	(Telecommunication Management Network) – мережа управління телекомунікаціями;
UMTS	(Universal Mobile Telecommunications System) - універсальна мо- більна телекомунікаційна система;
Wi-Fi	(Wireless Fidelity) - безпроводна технологія з'єднання комп'ютерів в мережу;
Wi-MAX	(Worldwide Interoperability for Microwave Access) – глобальна сумісність для мікрохвильового доступу.

## ВСТУП

На сьогоднішній день інтерес багатьох до безпроводного доступу визначається вступом телекомунікацій в новий етап свого технологічного розвитку і відповідної трансформації бізнес-середовища даної галузі. Перехід до інформаційного суспільства супроводжується конвергенцією мереж, глобалізацією і персоналізацією телекомунікаційних послуг [1].

Безпроводні телекомунікаційні технології переживають у наш час етап бурхливого розвитку і широкого поширення, темпи якого змушують задуматися про перспективи використання нових стандартів і систем зв'язку вже в найближчому майбутньому. У перманентному динамічному розвитку знаходяться процеси розробки, вдосконалення та реалізації різних інноваційних рішень. Сучасні засоби, призначені для користувача, вже не лімітовані орієнтацією тільки на єдину технологію, а є багатофункціональними модулями, що забезпечують доступ користувача до широкого спектру послуг: передача даних, голосу і відео.

Так, згідно з даними компаній, які надають послуги мобільного зв'язку в 97 країнах світу кількість мобільних пристроїв перевищила чисельність населення. Відповідно до результатів досліджень Cisco до 2020 року обсяг світового мобільного трафіку зросте до 10,8 ексабайт на місяць [2].

За даними Федеральної комісії з телекомунікацій США, існує чітка кореляція між щільністю заселеності певних територій, освіченістю людей і їх віковим складом, з одного боку, а також проникненням і швидкісними характеристиками телекомунікаційних технологій - з іншого [3].

Крім соціального ефекту розвиток безпроводних телекомунікаційних технологій робить істотний вплив на рівень розвитку економічних систем. Це переконливо доводять дослідження Ericsson.

Так, подвоєння швидкості широкосмугового інтернету може забезпечити зростання ВВП більш ніж на 0,3%, а збільшення швидкості в чотири рази - дати стимул зростання ВВП на 0,6%. Це призводить до спрощення процесів, підвищенню продуктивності і поліпшення доступу до базових послуг, таких як освіта

та охорона здоров'я. Дослідження також показало, що кожні 10% зростання проникнення широкосмугового доступу збільшують ВВП країни на 1% [4].

З урахуванням вищевикладеного, дослідження, присвячені методам та алгоритмам, що використовуються при побудові та оптимізації розміщення безпроводних точок доступу, є актуальними.

**Мета роботи** полягає дослідженні методів та розробці алгоритмів, що використовуються при побудові та оптимізації розміщення безпроводних точок доступу.

**Предмет дослідження** - безпроводні комп'ютерні мережі передачі даних на основі технології Wi-Fi.

**Об'єкт дослідження** - процес функціонування комп'ютерні мережі передачі даних на основі технології Wi-Fi.

**Метод дослідження** – методи системного аналізу; аналітичний та метод експериментальних досліджень.

**Апробація результатів магістерської роботи.** Основні результати магістерської атестаційної роботи доповідалися на конференціях Державного університету телекомунікацій та опубліковано в науковому журналі “Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку».

# 1. ОРГАНІЗАЦІЯ БЕЗПРОВОДОВИХ ЛОКАЛЬНИХ МЕРЕЖ НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЇ WI - FI

## 1.1. Топологія безпроводових локальних мереж технології Wi - Fi

Безпроводові локальні мережі стандарту 802.11 набувають все більшого поширення в основному завдяки тому, що вони прості в розгортанні і зручні в експлуатації. З точки зору користувача їх функції і характеристики такі самі, як і у локальних мереж Ethernet. Але архітектуру 802.11 не можна назвати простою. Проблеми, які доводиться вирішувати в неконтрольованому середовищі, складніші, ніж в контрольованому проводовому середовищі Ethernet.

Підрівень MAC стандарту 802.11 має керувати механізмом, що забезпечує беззавадний доступ до середовища передачі. Станції стандарту 802.11 не мають здатності виявляти колізії, як це роблять Ethernet-станції, що здійснюють множинний доступ до мережі з контролем несучої і виявленням колізій. Внаслідок цього для доступу до середовища потрібний складніший і масштабований підрівень MAC при мінімальних додаткових витратах.

Мережі стандарту 802.11 можна конструювати по-різному. Розробник вільний вибрати будь-яку з наступних топологій [1]:

- Незалежні базові зони обслуговування (independent basic service sets, IBSSs).
- Базові зони обслуговування (basic service sets, BSSs).
- Розширені зони обслуговування (extended service sets, ESSs).

Зона обслуговування (service set) в даному випадку - це логічно згруповані пристрої. Технологія WLAN забезпечує доступ до мережі шляхом передачі широкотовних сигналів через ефір на несучій в діапазоні радіочастот. Приймаюча станція може отримувати сигнали в діапазоні роботи декількох передавальних станцій. Передавальна станція спочатку передає ідентифікатор зони обслуговування (service set identifier, SSID). Станція-приймач використовує SSID для фільтрації отримуваних сигналів і виділення того, який їй потрібний.

IBSS є групою працюючих відповідно до стандарту 802.11 станцій, що зв'язуються безпосередньо одна з іншою. IBSS також називають спеціальною, або неплановою (ad - hoc), мережею, тому що вона по суті є простою одноранговою WLAN. На рис. 1.1 показано, як дві станції, обладнані безпроводовими мережевими інтерфейсними картами (network interface card, NIC) стандарту 802.11, можуть формувати IBSS і безпосередньо зв'язуватися одна з іншою.

Спеціальна мережа, або незалежна базова зона обслуговування (IBSS), виникає, коли окремі пристрої-клієнти формують мережу, що самопідтримується, без використання окремої точки доступу. При створенні таких мереж не розробляють які-небудь карти місця їх розгортання і попередні плани, тому вони зазвичай невеликі і мають обмежену протяжність, достатню для передачі спільно використовуваних даних при виникненні такої необхідності. На відміну від варіанту використання розширеної зони обслуговування (ESS), клієнти безпосередньо встановлюють з'єднання один з одним, внаслідок чого створюється тільки одна базова зона обслуговування (BSS), що не має інтерфейсу для підключення до проводової локальної мережі (тобто відсутня яка-небудь розподільна система, яка потрібна для об'єднання BSS і організації таким чином ESS). Не існує яких-небудь обумовлених стандартом обмежень на кількість пристроїв, які можуть входити в одну незалежну базову зону обслуговування. Але, оскільки кожен пристрій є клієнтом, часто певне число членів IBSS не може зв'язуватися один з іншим внаслідок проблеми прихованого вузла (hidden node issue). Незважаючи на це, в IBSS не існує якого-небудь механізму для реалізації функції ретрансляції.

Оскільки в IBSS відсутня точка доступу, розподіл часу (timing) здійснюється нецентралізовано. Клієнт, починаючий передачу в IBSS, задає сигнальний (його ще називають маячок) інтервал (beacon interval) для створення набору моментів часу передачі сигналу (set of target beacon transmission time, TBTT) маячка. Коли завершується TBTT, кожен клієнт IBSS виконує наступне.

- Призупиняє усі таймери затримки (backoff timer), що не спрацювали, з попереднього TBTT;
- Визначає нову випадкову затримку;

- Якщо сигнал маячка поступає до закінчення випадкової затримки, поновлює роботу призупинених таймерів затримки. Якщо ніякий сигнал маячка не поступає до закінчення випадкової затримки, посилає маячковий сигнал і поновлює роботу призупинених таймерів затримки.

Розподіл часу для передачі сигналів маячків здійснюється в спеціальних мережах не точкою доступу і не якимсь одним з клієнтів. Оскільки такій схемі зв'язку властива проблема прихованого вузла, цілком можливо, що впродовж сигнального інтервалу буде передана безліч сигналів маячків від різних клієнтів і інші клієнти отримають безліч сигналів маячків. Проте стандарт цілком допускає таку ситуацію і жодних проблем не виникає, оскільки клієнти чекають прийому тільки першого сигналу маячка, що відноситься до їх власного таймера випадкової затримки.

У сигнали маячків вбудована функція синхронізації таймера (timer synchronization function, TSF). Кожен клієнт порівнює TSF в сигналі маячка зі своїм власним таймером і, якщо отримане значення більше, вважає, що годинник передавальної станції йде швидше і підлаштовує свій власний таймер відповідно до отриманого значення. Це має довготривалий ефект синхронізації роботи усієї непланової мережі по клієнтові з найшвидшим таймером. У великих розподілених непланових мережах, коли багато клієнтів не можуть зв'язуватися безпосередньо, може знадобитися деякий час для досягнення синхронізації усіх клієнтів.

Базові зони обслуговування (BSS) це група працюючих за стандартом 802.11 станцій, що зв'язуються одна з іншою [4]. Технологія BSS припускає наявність особливої станції, яка називається точка доступу (access point). Точка доступу - це центральний пункт зв'язку для усіх станцій BSS. Клієнтські станції не зв'язуються безпосередньо одна з іншою. Замість цього вони зв'язуються з точкою доступу, а вже вона направляє фрейми станції-адресатові. Точка доступу може мати порт висхідного каналу (uplink port), через який BSS підключається до проводової мережі (наприклад, висхідний канал Ethernet). Тому BSS іноді називають інфраструктурою BSS. На рис. 1.2 представлена типова інфраструктура BSS.

Розширені зони обслуговування (ESS). Декілька інфраструктур BSS можуть бути сполучені через їх інтерфейси висхідного каналу. Там, де діє стандарт 802.11, інтерфейс висхідного каналу сполучає BBS з розподільною системою (distribution system, DS). Декілька BBS, сполучених між собою через розподільну систему, утворюють розширену зону обслуговування (ESS). Висхідний канал до розподільної системи не обов'язково повинен використовувати проводів з'єднання. На рис. 1.3 представлений приклад практичного втілення ESS. Специфікація стандарту 802.11 залишає можливість реалізації цього каналу у вигляді безпроводового. Але частіше висхідні канали до розподільної системи є каналами проводової Ethernet.

## **1.2. Аналіз особливостей поширення радіохвиль в Wi-Fi-мережах**

Як відомо, використовувані у безпроводовому зв'язку радіохвилі погано огинають перешкоди, поширюючись, в основному, по прямій лінії. Вони зазнають численних віддзеркалень від навколишніх об'єктів. Одним з наслідків такого багатопроменевого поширення є інтенсивніше, ніж у вільному просторі, убунання рівня сигналу, що приймається, з відстанню. Інший наслідок - завмирання і спотворення результуючого сигналу (рис. 1.4) [2].

Область істотних віддзеркалень обмежується зазвичай порівняно невеликою ділянкою навколо SRD - близько декількох метрів. При русі рухомих SRD ця область переміщається разом з ними таким чином, що рухливі пристрої увесь час залишаються поблизу центру цієї області. При складанні двох сигналів, що пройшли по різних шляхах і мають в точці прийому в загальному випадку різні фази, результуючий сигнал може бути як дещо вище середнього рівня, так і помітно нижче. При цьому провали або завмирання сигналу, що утворюються при взаємній компенсації сигналів внаслідок несприятливого поєднання їх фаз і амплітуд, можуть бути досить великими. Спотворення результуючого сигналу має місце у тому випадку, коли більш менш синфазні складові сигнали з рівними амплітудами

настільки відрізняються по різниці ходу, що символи одного сигналу зміщаються на сусідні символи іншого.

Типова модель лінії передачі пікомереж SRD, включає антену провідного (передавального) пристрою і відносно коротку ділянку поширення по лінії прямої видимості. Часто є присутніми безліч трас з перевідбиттям, тобто непрямій видимості, і одна або декілька антен, встановлених у ведених (що приймають) SRD. Іноді через природні і штучні перешкоди має місце неповна ділянка поширення радіохвиль в межах прямої видимості між антенами ведучого і ведених пристроїв SRD. За таких умов траса поширення може моделюватися як траса, що змінюється випадковим чином. У багатьох випадках може існувати більше за один шлях поширення радіохвиль, і ця ситуація називається багатопроменим поширенням (рис. 1.14).

Траса поширення змінюється як при переміщеннях SRD, так і при русі навколишніх предметів або довкілля. Навіть щонайменше, найповільніше переміщення призводить до зміни в часі умов багатопроменового поширення і, як наслідок, до зміни параметрів сигналу, що приймається.

Поширення радіохвиль в подібних умовах характеризується трьома, частково самостійними ефектами: завмирання через багатопроменевість розповсюдження, затінювання (чи екранування) і втрати при поширенні. Завмирання через багатопроменевість описуються через завмирання огинаючої (незалежні від частоти зміни амплітуди), доплерівське розсіювання (селективний в часі, випадковий фазовий шум) і часове розсіяння (довжини трас поширення відбитих сигналів, що змінюються в часі, викликають зміни самих сигналів).

Для пікомереж SRD необхідно розрізняти дві моделі поширення. Перша модель - це модель поширення при розміщенні SRD усередині приміщення (рис. 1.15), друга модель - модель поширення при розміщенні SRD на відкритій місцевості або усередині порівняно великих критих приміщень (рис. 1.5).

При розміщенні SRD усередині приміщення типова модель поширення включає відносно коротку ділянку прямої видимості і присутність безлічі близько розташованих перешкод, що обумовлюють наявність різних шляхів поширення

радіохвиль. При цьому ведені пристрої можуть знаходитися як усередині приміщення, так і за його межами. При роботі з провідним пристроєм, що знаходиться усередині приміщення, ведені пристрої поза приміщенням за рахунок стін приймають істотно ослаблений сигнал. При цьому напруженість хвиль залежатиме як від числа стін, через які проходить хвиля, так і від матеріалу, з якого ці стіни виготовлені.

При розміщенні SRD на відкритій місцевості (або усередині порівняно великого приміщення (критих ангарів, виставок, стадіонів, аеропортів, машинних залів теплових, гідро- і атомних електростанцій, і т. д.), типова модель поширення (рис. 1.6) включає ведучий і ведений SRD і відносно довгу ділянку прямої видимості (до 100 м).

За рахунок перевідбиття радіохвиль від перешкод можуть також мати місце траси непрямої видимості. Проте кількість відбитих променів, як правило, значно менше, чим при знаходженні SRD усередині приміщення. Зазвичай вважається, що пристрої пікомереж мало рухливі і умови поширення в процесі зв'язку змінюються не багато, тому зміну частоти за рахунок доплерівського ефекту можна не враховувати [3].

При роботі усередині приміщення на ведені пристрої приходять безліч хвиль з приблизно однаковою потужністю і з незначною різницею в часі затримки. При цьому може з'явитися ефект часового розсіяння, що проявляється в наявності частотно-селективних завмирань.

Для моделі поза приміщенням (офісу), зазвичай приймається, що пряма хвиля домінує по потужності в порівнянні з відбитими хвилями.

В результаті наявності багатьох перешкод на шляху поширення, межі пікомереж мають вигляд неправильних кривих, залежних від умов поширення і загасання радіохвиль. Більше того, ці межі взагалі не є чітко визначеними, оскільки якщо провідний пристрій переміщається, то, залежно від напрямку його руху, переміщуються і межі самої пікомережі. Крім того, положення провідного пристрою лише приблизно співпадає з центром пікомережі, який до того ж не так просто однозначно визначити, якщо вона має неправильну форму.

Таким чином, прогнозування зон упевненого прийому усередині і поза приміщенням (офісу) як основний елемент територіального планування безпроводових пікомереж є однією з найважливіших проблем для мереж SRD.

Як видно з опису моделей поширення радіохвиль в пікомережах, досить складно отримати надійний аналітичний прогноз зони упевненої роботи SRD як усередині, так і поза приміщеннями з інженерною точністю співпадаючий з експериментальними даними.

Як вже було відмічено, технологія SRD може успішно працювати в умовах відсутності прямої видимості між веденим і ведучим пристроями. На основі досліджень експериментальних даних для стільникових мереж була розроблена узагальнена модель оцінки втрат  $L$  при поширенні радіохвиль в умовах відсутності прямої видимості [6]:

$$L \approx L(r_0)(r/r_0)^{-n}, \quad (1.1)$$

де  $r$  - відстань між передавальною і приймальною антенами;  $r_0$  - відстань до першої перешкоди.

Залежно від траси показник степені  $n$  може набувати значень від 2 до 5. Наприклад, за відсутності прямої видимості трас зовні приміщень (офісів) вважають, що коефіцієнт  $3.5 \leq n \leq 5$ , при зв'язку всередині приміщень (офісів)  $2 \leq n \leq 4$ , а  $r_0$  лежить в діапазоні від 1 до 3 м.

Втрати  $L(r_0)$  в дБ при поширенні радіохвиль у вільному просторі до першої перешкоди, розташованої на відстані  $r_0$  можуть бути розраховуються по формулі:

$$L(r_0) = 27.56 - \log f - 20 \log r_0, \quad (1.2)$$

де частота  $f$  в МГц, відстань  $r_0$  в метрах.

Абсолютні втрати  $L(r_0)$  при поширенні на відстань  $r$ , виражені в дБ, визначаються як втрати при поширенні від передавача до перешкоди у вільному просторі  $L(r_0)$  плюс додаткові втрати при поширенні:

$$L(r) = 27.56 - \log f - 20 \log r_0 - 10n \log(r/r_0). \quad (1.3)$$

Як було показано вище, одній з найважливіших проблем для безпроводових пікомереж являється прогнозування зон упевненої роботи як зовні, так і усередині приміщень. Головна причина цього полягає в нерівномірному загасанні сигналу і численних розсіювальних перешкодах, що обумовлено сильною просторовою неоднорідністю середовища поширення радіохвиль (рис. 1.17).

Поширення радіохвиль в подібних умовах, в загальному випадку, характеризується трьома ефектами: завмиранням, викликаним багатократними віддзеркаленнями сигналу від різних перешкод; затінюванням або екрануванням; втратами при поширенні [4].

Затіняюча дія перешкод призводить до того, що поле за перешкодою з'являється в результаті двох процесів: дифракція і проникнення через перешкоди. Слід зазначити, що в діапазоні хвиль 2,4 ГГц дифракція протікає з дуже великими втратами. Проникнення через перешкоди, наприклад, через стіну, також супроводжується великими втратами за рахунок поглинання. Виміри показують, що напруженість поля за цегляною стіною може бути на 20...30 дБ нижче, ніж перед стіною, а за залізобетонною стіною рівень сигналу може впасти на 30...40 дБ.

У приміщенні, в точці прийому, впливають не лише розглянуті чинники, але і багато інших. Зокрема, встановлено, що рівень сигналу істотно залежить від розташування коридорів усередині приміщення, де «розгорнута» пікомережа. Вздовж радіально розташованих коридорів відносно ведучого SRD, рівень сигналу може бути на 10...20 дБ вище, ніж в коридорі, що має перпендикулярний напрям (рис. 1.7).

При поширенні хвиль на відкритому просторі, відбуваються додаткові втрати, пов'язані з різними атмосферними утвореннями у вигляді конденсованої водяної пари - дощу, туману, граду, снігу і т. д., які складаються з окремих часток - крапель, крижинок, що є причиною послаблення напруженості поля радіохвиль. Послаблення викликається, по-перше, нерезонансним поглинанням в частках, по-друге, розсіюванням енергії на частках.

Крім того, при роботі пікомережі на відкритому просторі мають місце віддзеркалення від земної поверхні. Поверхня землі ніколи не буває ідеально глад-

кою. Навіть відносно рівна поверхня покрита великою кількістю хаотично розташованих нерівностей. Залежно від їх розмірів, електричних властивостей, кількості, а так само від довжини хвилі, що поширюється, елементи рельєфу роблять різний вплив на поле в точці прийому.

Розглянемо механізми поширення радіохвиль для двох варіантів розміщення SRD:

- SRD розташовуються на відкритій місцевості або в приміщеннях, у яких висота стель значно більше відстані між пристроями;
- SRD розташовуються усередині звичайних приміщень, висота стель у яких менше або порівнянна з відстанню між пристроями.

Вирішимо ряд дослідницьких завдань пов'язаних з розробкою методики розрахунку зони упевненої роботи SRD, за різних умов поширення радіохвиль, а також розробкою критеріїв і методів оптимізації енергетичних параметрів пікомереж в різних умовах їх «розгортання».

Як було показано вище, у безпроводової пікомережі хвилі від ведучого до веденого SRD і назад, можуть поширюватися різними шляхами. Велику частину шляху хвилі проходять вільний простір, частина шляху - проходять через різні перешкоди, такі як стіни, двері, вікна, пластикові перегородки та ін. При цьому напруженість хвиль залежатиме як від числа перешкод, через які проходить хвиля, так і від матеріалу, з якого ці перешкоди виготовлені (рис. 1.8) [5].

При поширенні радіохвиль у вільному просторі від ведучого до веденого SRD, втрати потужності сигналу  $A_0$  можуть бути розраховані, як  $A_0 = 10 \log G_M + 10 \log G_S + 20 \log (\lambda/4\pi L)$  дБ, де  $G_M$  - коефіцієнт підсилення антени ведучого SRD;  $G_S$  - коефіцієнт підсилення антени веденого SRD,  $L$  - відстань між SRD,  $\lambda$  - довжина хвилі, м.

Як відомо, поширення радіохвиль в якому-небудь середовищі характеризується тангенсом кута втрат  $\text{tg}\delta = 60\gamma\lambda\varepsilon^{-1}$ , де  $\varepsilon$  - діелектрична проникність середовища,  $\gamma$  - провідність середовища.

Для радіохвиль стіни будівель представляють діелектрик з тангенсом втрат набагато менше 1. При поширенні радіохвиль в напівпровідному середовищі амплітуда поля убуває з відстанню за експоненціальним законом з коефіцієнтом загасання  $\alpha_{\text{п}}$ .

Приблизно, при  $\text{tg}\delta \ll 1$ , коефіцієнт загасання  $\alpha_{\text{п}}$  можна визначити по формулі  $\alpha = 60\pi\gamma\epsilon^{-0.5}$ .

Втрати потужності  $A_c$  при поширенні в середовищі на відстань  $r$  будуть рівні:

$$A_c = -8.6\alpha_{\text{п}}r \text{ дБ.} \quad (1.8)$$

Проте для розрахунку напруженості поля в точці прийому веденого або ведучого SRD, в умовах поширення радіохвиль за наявності перешкод, недостатньо знати втрати при поширенні у вільному просторі і в інших середовищах. Як відомо, радіохвилі при падінні з одного середовища в інше випробовують віддзеркалення і проходять в інше середовище з іншим кутом, відмінним від кута падіння.

Якщо радіохвиля падає на плоске середовище (рис. 1.9), наприклад стіну, під кутом  $\Theta_1$ , то хвиля проходить в стіну під кутом  $\Theta_2$ , а відбивається від стіни під кутом  $\Theta_3$ .

Співвідношення між кутами відоме як закон заломлення Снеліуса  $\sin \Theta_1 (\sin \Theta_2)^{-1} = n_2 (n_1)^{-1}$ , де  $n_1$  і  $n_2$  - показники заломлення середовищ. Коли середовища, що граничать, є ідеальними діелектриками, фазові швидкості поширення усіх трьох хвиль уздовж межі розділу рівні і, отже, кут падіння рівний куту віддзеркалення, а  $n_i = \sqrt{\epsilon_i}$ .

Якщо перше середовище є вільним простором (повітрям), а друге середовище є діелектриком з  $\text{tg}\delta \ll 1$ , то  $\sin \Theta_1 (\sin \Theta_2)^{-1} = \sqrt{n_2}$ .

В цьому випадку відстань, яка проходить хвиля в середовищі, можна розрахувати по формулі

$$r = d \left[ 1 - \sin^2 \Theta_1 \epsilon_2^{-1} \right]^{-0.5}, \quad (1.9)$$

де  $d$  - товщина середовища;  $\epsilon_2$  - діелектрична проникність середовища [6].

Згідно з виразами (1.1) і (1.2) втрати потужності при поширенні в стіні за товшки  $d$  можемо записати як  $A_c(\Theta_1, d, \epsilon_2) = -8.6\alpha_{\text{п}}d \left[1 - \sin^2 \Theta_1 \epsilon_2^{-1}\right]^{-0.5}$  дБ.

У загальному випадку, при поширенні від ведучого до веденого пристрою хвиля може проходити ділянки з різними умовами поширення. Це, по-перше, ділянка поширення у вільному просторі  $\Gamma_{\text{п}}$ . По-друге, ділянка при поширенні через перешкоду  $\Gamma_{\text{с}}$ . Число і комбінація цих ділянок може бути різними

$$\Gamma = \sum_{i=0}^s \Gamma_{\text{п},i} + \sum_{j=0}^p \Gamma_{\text{с},j}, \quad (1.10)$$

де  $s$  - число ділянок вільного поширення,  $p$  - число ділянок поширення через перешкоди, що представляє з себе яке-небудь середовище. При цьому хвиля, що поширюється, може бути пряма від провідного пристрою або відбита від перешкоди.

Оскільки загасання радіохвиль в середовищі здійснюється за експоненціальним законом, то різні ділянки з однаковим коефіцієнтом загасання можна

об'єднати в один з еквівалентною відстанню  $\Gamma_{\text{с}} = \sum_{i=0}^p \Gamma_{\text{с},i}$ .

При проходженні радіохвилі перешкод з однакового матеріалу сумарні втрати дорівнюватимуть  $A_c = 8.6\alpha_{\text{с}}\Gamma_{\text{с}}$ .

## 2. МЕТОДИ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ ПРИ ПОБУДОВІ БЕЗПРОВОДОВИХ ТОЧОК ДОСТУПУ

### 2.1. Необхідність застосування сигналів з розширеним спектром

Усі класичні методи вузькосмугової модуляції розроблені з метою досягнення максимальної спектральної ефективності, т. ч. передачі інформації з як можна більшою швидкістю в можливо вужчій смузі частот. Проблема полягає в тому, що зі збільшенням числа користувачів число каналів, виділених для зв'язку, має зростати. В той же час очевидно, що, з одного боку, загальний частотний ресурс є обмеженою величиною, а, з іншого боку, неможливо нескінченно зменшувати смугу частот, в якій здійснюється передача інформації. Отже, істотне збільшення числа каналів в мережі зв'язку може бути досягнуте тільки на основі принципово іншого підходу до проблеми [7].

Іншою фундаментальною проблемою при роботі безпроводових радіомереж в міських умовах являється багатопроменеве поширення радіохвиль, яке є причиною різного виду завмирань сигналу в радіоканалі. В результаті усі ці спотворення ідеального сигналу передавача, що проявляються в процесі поширення радіохвиль в складному нестационарному середовищі і об'єднувані загальною назвою фединг, значно зменшують дальність і якість радіозв'язку.

Ці і ряд інших проблем стимулювали пошук інших методів модуляції, відмінних від вузькосмугової. Одним з методів, що дозволяє кардинально збільшити число користувачів в обмеженому частотному спектрі і значно поліпшити якість прийому в умовах багатопроменевого поширення радіохвиль, є використання модульованих сигналів з розширеним спектром, або сигналами з шумоподібним спектром. Основна ідея застосування сигналів з розширеним спектром полягає в тому, щоб замість вузькосмугового модульованого сигналу, що здійснює передачу інформації у виділеній обмеженій ділянці спектру, використовувати сигнал з розширеним спектром, що займає усю виділену для системи зв'язку ділянку спектру. Але при цьому значна кількість користувачів може одночасно використовувати

вати виділену смугу частот. Для розподілу користувачів, працюючих одночасно в одній і тій же смузі частот, застосовується розширення спектру цифрового модулюючого сигналу (тобто і високочастотного сигналу) за допомогою спеціальної кодової послідовності. Кожному користувачеві призначається персональна кодова послідовність для розширення спектру, яка і дозволяє абонентам виділяти з ефіру тільки призначений їм сигнал. Оскільки загальна кількість кодів може бути дуже велика, то і кількість користувачів у виділеній смузі частот може бути значно більше, чим при розбитті виділеної смуги частот на окремі радіоканали.

Сигнали з розширеним спектром володіють також і більшою в порівнянні з вузькосмуговими сигналами стійкістю до федингу і вузькосмугових завад. Ця стійкість заснована на тому, що при випадкових змінах параметрів середовища поширення, періодично виникаючих завадах або при взаємодії копій сигналу зміні піддається зазвичай невелика ділянка спектру модульованого сигналу. В результаті для розширених сигналів велика частина спектру залишається незмінною, що і дозволяє достовірно відновити інформацію, що приймається.

Ще раз підкреслимо основні відмінності сигналів з розширеним спектром від сигналів з вузькосмуговою модуляцією [7]:

- Смуга частот цифрового модулюючого сигналу для сигналів з розширеним спектром істотно більше, ніж смуга частот інформаційного цифрового сигналу  $w(t)$ .

- Розширення смуги частот робиться незалежним від передаваної інформації розширюючим сигналом (розширюючою цифровою послідовністю), що персонально призначається кожному користувачеві і заздалегідь відомим як в приймачі, так і в передавачі.

Існують різні способи розширення смуги частот передаваного сигналу, основними з яких є безпосереднє розширення спектру цифровою послідовністю (Direct Sequence Spread Spectrum - DSSS) і розширення спектру стрибками частоти (Frequency Hopping Spread Spectrum - FHSS).

Набір стандартів 802.11 визначає цілий ряд технологій реалізації фізичного рівня (PHY), які можуть бути використані підрівнем 802.11 MAC:

- Рівень РНУ стандарту 802.11 використовує технологію FHSS в діапазоні 2,4 ГГц;
- Рівень РНУ стандарту 802.11 використовує технологію DSSS в діапазоні 2,4 ГГц.
- Рівень РНУ стандарту 802.11b з використовує технологію DSSS в діапазоні 2,4 ГГц.
- Рівень РНУ стандарту 802.11a використовує технологію OFDM в діапазоні 5 ГГц.
- Рівень РНУ стандарту 802.11n використовує технологію OFDM в діапазоні 2,4 ГГц або 5 ГГц з застосуванням технології MIMO (технологія передачі даних за допомогою N антен і їх прийому M антенами).

## **2.2. Сигнал з безпосереднім розширенням спектру і широкосмугові сигнали із стрибками частоти**

Сигнал DSSS [8] виходить шляхом безпосередньої модуляції інформаційного сигналу  $w(t)$  цифровою розширюючою послідовністю. При цьому тривалість символу  $T_c$  в розширюючій послідовності набагато менша, ніж тривалість символу  $T_s$  в інформаційній послідовності. Метод формування модулюючого сигналу DSSS проілюстровано на рис. 2.1, а. Два імпульси інформаційного сигналу з нормованими амплітудами 1 і -1 показані жирною лінією, тривалість імпульсу у бінарному інформаційному сигналі  $T_b$ , бітова швидкість рівна  $R=1/T_b$ . Інформаційний сигнал заповнений імпульсами бінарної розширюючої послідовності, символна швидкість яких  $R_c=1/T_c$  в 10 разів перевищує бітову швидкість інформаційного сигналу  $R$ . Результуючий цифровий модулюючий сигнал з розширеним спектром показаний на рис. 2.1, б.

Коефіцієнт розширення спектру сигналу  $G$ , інакше називаємий коефіцієнтом підсилення системи, є її найважливішою характеристикою і визначається як відношення (чи логарифм відношення) символної швидкості розширюючої послідовності  $R_c$  до бітової швидкості інформаційної послідовності  $R$ :

$$G = \frac{R_c}{R} \quad \text{або} \quad G_L = 20 \log G. \quad (0.1)$$

Чим більше коефіцієнт підсилення  $G$ , тим більшою мірою властивості модулюючого і модульованого сигналів DSSS визначаються розширяючою послідовністю і тим більшою мірою проявляються усі переваги сигналів з розширеним спектром.

Модульований сигнал з розширеним спектром, як і вузькосмуговий модульований сигнал, може бути представлений в часовій області через комплексну огинаючу модульованого сигналу  $g(t)$ :

$$s(t) = \text{Re} \left[ g(t) e^{j\omega_c t} \right], \quad (0.2)$$

де  $g(t) = g_m(t) \cdot g_c(t)$  - повна комплексна огинаюча модульованого сигналу;  $g_m(t)$  - часткова комплексна огинаюча, залежна від інформаційного сигналу;  $g_c(t)$  - часткова комплексна огинаюча, залежна від розширяючої послідовності.

В якості розширяючої цифрової послідовності для сигналів DSSS використовується псевдовипадкова бінарна послідовність, яка генерується за допомогою зсовуючого регістра і суматора по модулю 2 в ланцюзі зворотного зв'язку. Послідовності, утворені по цьому алгоритму, називаються послідовностями максимальної довжини або  $M$ -послідовностями. Характеристики  $M$ -послідовностей, які важливі для аналізу модульованого сигналу:

- Кількість нулів і кількість одиниць в послідовності будь-якої довжини відрізняється не більше ніж на одиницю. Це означає, що  $M$ -послідовність є урівноваженою і не містить постійної складової при кодуванні інформаційних нулів і одиниць полярним сигналом.

- Автокореляційна функція періодичної  $M$ -послідовності має вигляд [8]

$$\begin{cases} R_c(k) = 1, & k = lN \\ R_c(k) = -\frac{1}{N}, & k \neq lN \end{cases}, \quad (0.3)$$

де  $l$  - ціле число;  $N$  - довжина послідовності.

Автокореляційна функція  $M$ -послідовності при тривалості імпульсів  $\tau$ , графічно зображена на рис. 2.2, має період повторення, рівний довжині послідовності, і дискретний частотний спектр з кроком, рівним  $1/(NT_c)$ . Очевидно, що при  $N$ , що прагне до нескінченності, періодичність автокореляційної функції (0.3) стає несуттєвою, тільки один пік при  $t=0$  має значення для виділення сигналу, а спектр стає безперервним. Це наближення цілком справедливо для реальних систем зв'язку, в яких довжина розширюючої послідовності може досягати  $2^{32}$ .

Гарні автокореляційні властивості  $M$ -послідовності дозволяють ефективно перетворити початковий цифровий вузькосмуговий модулюючий сигнал в сигнал з шумоподібним розширеним спектром. Проте кореляційні властивості  $M$ -послідовності (т. ч. розрізнюваність послідовностей) не найкращі з можливих. Внаслідок цього для кодового розподілу абонентів в деяких системах зв'язку додатково використовуються ортогональні цифрові послідовності, одним з прикладом яких є послідовності Уолша. Ортогональна послідовність також модулює початковий інформаційний сигнал, як і  $M$ -послідовність. Проте тривалість імпульсів в додатковій ортогональній послідовності зазвичай істотно більше, ніж тривалість імпульсів в розширюючій  $M$ -послідовності і тому її вплив на результуючу ширину спектру сигналу малий.

Спектральна щільність потужності цифрового модулюючого сигналу з розширеним спектром, як і будь-якого псевдовипадкового бінарного цифрового сигналу, визначається по формулі:

$$\text{PSD}(f) = A^2 T_c \frac{\sin^2(\pi T_c f)}{(\pi T_c f)^2}. \quad (0.4)$$

Зі зменшенням тривалості імпульсів  $T_c$  в розширюючій послідовності відстань між нулями спектральної щільності потужності і пікове (амплітудне) значення спектральної щільності потужності зменшуються прямо пропорційно коефіцієнту підсилення системи  $G = T_s / T_c$ . Зосереджений у вузькій смузі частот спектр початкового інформаційного сигналу з великою амплітудою, пропорційній тривало-

сті  $T_b$  імпульсів інформаційного сигналу, «розмазується» на ширшу смугу частот, зменшується за величиною і набуває шумового характеру. Для перенесення спектру модулюючого сигналу на високу частоту використовується, як правило, фазова модуляція типу BPSK або QPSK. Внаслідок лінійності фазової модуляції спектр модульованого високочастотного сигналу співпадає із спектром модулюючого сигналу при заміні частоти  $f$  в робочому діапазоні на відхилення від несучої частоти  $|f - f_c|$ .

Розширений сигнал FHSS виходить шляхом зміни (сканування) несучої частоти передавача, за псевдовипадковим законом відповідно до значень символів кодової послідовності. Розрізняють швидкі і повільні стрибки частоти (відповідно швидке і повільне сканування). Швидке частотне сканування має місце у тому випадку, коли більш ніж одне значення частоти несучої використовується для передачі кожного інформаційного символу. Іншими словами, при швидкому скануванні швидкість стрибків частоти несучої визначається швидкістю розширюючої послідовності, рівна або вище за символну швидкість передачі інформації. При швидкому скануванні форма перемикального частоту імпульсу багато в чому визначає смугу частот, займану модульованим сигналом. Повільне частотне сканування має місце у тому випадку, коли один або більше інформаційних символів передаються на одній несучій частоті; швидкість сканування менше символної швидкості передачі інформації. При повільному скануванні смуга частот, займана сигналом на кожній несучій частоті, визначається тільки видом модулюючого сигналу і способом модуляції.

Метод формування розширеного сигналу FHSS з повільною зміною несучої частоти, проілюстрований на рис. 2.5, де зображений цифровий модулюючий сигнал з бітовою швидкістю  $R$  (рис. 2.5, а) і сигнал зміни частоти передачі (рис. 2.5, б), що відповідає повільним стрибкам частоти із швидкістю  $R_c$ . Проміжок часу між змінами (стрибками) частоти називається періодом сканування  $T_c = 1/R_c$ .

### 2.3. Сигнали з ортогональним частотним мультиплексуванням

Усі класичні вузькосмугові амплітудно-, фазо- і частотно-модульовані сигнали можуть розглядатися як одновимірні. В даному випадку одновимірність означає наявність в модульованому сигналі єдиної несучої частоти, поблизу якої і розташований спектр інформаційного сигналу. Цей спектр має строго певну форму, залежну від формувального фільтру і методу модуляції, а наявність або відсутність несучої частоти, в спектрі сигналу багато в чому визначає метод демодуляції сигналу в приймачі.

З іншого боку, існують сигнали з розширеним спектром, що має шумоподібний характер. При розгляді таких сигналів зазвичай говорять не про частоту несучого сигналу, а про центральну частоту використовуваної смуги частот. Хоча формально в передавачі і робиться модуляція початкової несучої частоти, високошвидкісним цифровим сигналом, спектр модульованого сигналу в робочій смузі частот мало залежить від методу модуляції і є «майже» рівномірним, «майже» шумовим. Конкретний розподіл потужності, наявність або відсутність несучої частоти, в спектрі сигналу ніяк не визначають метод демодуляції в приймачі.

Згадані вище два класи сигналів - вузькосмуговий і з розширеним спектром - можна розглядати як два полярні випадки:

- сигнал з «злегка розмитотою» несучою частотою (вузькосмуговий сигнал), який характеризується певним розподілом спектральної щільності потужності у відносно вузькій смузі частот;
- сигнал в дуже широкій смузі частот, який характеризується як шум з «майже постійною» щільністю потужності в займаній смузі частот.

Окрім згаданих вище сигналів, існують так звані багатовимірні модульовані сигнали, які займають деяке «середнє» положення між вузькосмуговими і широкосмуговими модульованими сигналами.

Основна ідея, що лежить в основі формування багатовимірних сигналів, полягає в розподілі початкового цифрового сигналу, що має символічну швидкість передачі інформації  $D$ , на  $N$  паралельних цифрових сигналів, кожен із швидкістю

передачі  $D/N$  і модуляції цими низькошвидкісними цифровими сигналами  $N$  несучих частот, розташованих максимально близько одна до одної. В результаті при загальній незмінній символній швидкості  $D$  у багатовимірному сигналі тривалість імпульсів в кожній частці низькошвидкісному цифровому сигналі зростає в  $N$  разів, що сприяє підвищенню достовірності прийому таких сигналів.

Розглянемо детальніше загальні характеристики багатовимірних сигналів. Припустимо, що є початковий цифровий інформаційний сигнал з тривалістю імпульсів  $T_s$ , символною швидкістю  $D=1/T_s$  і що займає в основному діапазоні смуги частот  $\Delta F=2/T_s$ . Для передачі цього сигналу використовується вузькосмугова лінійна модуляція (амплітудна або фазова), при якій спектр модулюючого сигналу без змін переноситься з основного діапазону у високочастотну область. В результаті спектр модульованого одновимірного сигналу буде розташований симетрично несучої частоти  $F$ , в тій же самій смузі частот  $\Delta F$  (рис. 2.8, пунктирна лінія).

Розділимо початковий цифровий сигнал на  $N$  окремих цифрових сигналів, в кожному з яких тривалість імпульсів  $NT_s$ , символна швидкість передачі  $1/T_sN$ , а займана смуга частот  $\Delta f=2/T_sN$ . В результаті загальна швидкість передачі даних з урахуванням паралельної роботи усіх  $N$  окремих цифрових сигналів залишиться незмінною і рівною  $D=N \cdot 1/NT_s=1/T_s$ , т. ч. символній швидкості початкового цифрового сигналу.

Загальний високочастотний діапазон  $\Delta F$ , виділений для передачі інформації, ділиться на  $N$  піддіапазонів з однаковою шириною смуги частот  $\Delta f=\Delta F/N$ , і в кожному піддіапазоні генерується окрема частота  $f_n$  (несуча частота). Кожен з  $N$  окремих цифрових сигналів, що займає смугу частот  $\Delta f=2/T_sN$  в основному діапазоні, використовується для лінійної вузькосмугової модуляції однієї з  $N$  піднесучих. В результаті в кожному виділеному піддіапазоні існуватиме вузькосмуговий модульований сигнал з піднесучою частотою  $f_n$  і смугою частот  $\Delta f=2/T_sN$ , симетрично розташованої відносно під несучої частоти (рис. 2.8, суцільні лінії). Сума спектрів в усіх піддіапазонах і є спектром багатовимірного модульованого сигналу. Ширина спектру багатовимірного модульованого сигналу, як це видно з рис. 2.8, повністю співпадає з шириною спектру одновимірного модульованого сигна-

лу. Цього і слід було чекати, оскільки сумарна символна швидкість багатовимірного сигналу дорівнює символній швидкості початкового одновимірного сигналу, а для модуляції несучих частот, в обох випадках використовувалася однакова вузькосмугова лінійна модуляція.

Таким чином, заміна одновимірного вузькосмугового модульованого сигналу, розташованого в смузі частот  $\Delta F$ , багатовимірним модульованим сигналом не призводить ні до збільшення швидкості передачі даних, ні до зменшення займаної смуги частот. Змінюється тільки один параметр - тривалість імпульсів в окремих цифрових модулюючих сигналах, яка в  $N$  разів перевищує тривалість імпульсів початкового цифрового сигналу. Очевидно, що достовірність сигналу, що приймається, зростає зі збільшенням його тривалості. Це виходить хоч би з того, що збільшення тривалості сигналу приводить до росту його енергії, а отже, і до збільшення відношення сигнал/шум, що безпосередньо визначає міру достовірності інформації, що приймається.

Проте важливішим наслідком підвищення тривалості імпульсу є зменшення впливу ефекту багатопробеневого поширення сигналів в міських умовах на достовірність інформації, що приймається. Одночасний прийом поточного імпульсу і затриманої копії попереднього імпульсу призводить до появи міжсимвольних спотворень. Очевидно, що величина міжсимвольних спотворень, що вносяться, залежить від відношення тривалості символу до часу запізнювання приходу копії сигналу. Чим довше імпульс цифрового сигналу по відношенню до часу запізнювання, тим менше відносний час взаємного перекриття поточного імпульсу з копією попереднього і тим міжсимвольні спотворення, що менше вносяться [9].

Застосування багатовимірних сигналів дозволяє також підвищити ефективність використання частотного діапазону, виділеного для мережі зв'язку. Реальна смуга частот, яка виділяється в мережі зв'язку для кожного частотного каналу, складається із смуги частот, мінімально необхідної для передачі інформації із заданою швидкістю, і деякого «захисного» частотного інтервалу, в якому забезпечується загасання бічних пелюсток спектральної щільності потужності модульованого сигналу до рівня, що не впливає на роботу радіостанції в сусідньому час-

тотному каналі.

## 2.4. Формування сигналу OFDM-MIMO

При реалізації технології Wi-Fi стандарт 802.11n передбачає застосування крім технології OFDM в якості модулятора сигналу, ще й технології MIMO. Такий підхід дозволяє, як було сказано вище, збільшити пропускну здатність каналу зв'язку до 300 Мбіт/с, що робить технологію Wi-Fi конкурентоздатною в секторі безпроводового зв'язку [11].

Основна відмінність стандарту IEEE 802.11n від його попередників - поява декількох антенних каналів в приймачі і передавачі. Обов'язковий режим має на увазі підтримку двох антенних каналів обладнанням точок доступу (AP) і одного каналу - призначеного (термінального) для користувача станціями. Всього і у AP, і у термінальної станції може бути до чотирьох антенних каналів прийому-передачі. Також передбачається збільшення смуги займаної системою передачі з 20 МГц до 40 МГц.

Оскільки проектом IEEE 802.11n передбачена технологія MIMO, змінюється структурна схема передавального і приймального пристроїв (рис. 2.15). Дані після скремблювання (шифрування) надходять на згортальний кодер (як і в IEEE 802.11a). Якщо швидкість передачі даних перевищує 300 Мбіт/с, використовуються два згортальні кодери. На відміну від IEEE 802.11a, підтримується швидкість кодування 5/6. Крім того, опціонально замість двійкового згортального кодера передбачено застосування блокового кодера.

Далі відмінності серйозніші. Кодований потік бітів розбивається на так звані просторові (просторово-розділені) потоки. Число таких потоків не може бути менший, ніж число антенних каналів в передавачі.

На рис. 2.16 представлено Wi-Fi PCI-модем з виносним блоком з застосуванням технології MIMO.

Після розбиття на потоки кожен окремий потік бітів надходить на перемі-

шувач. Перемішувач формує з певної кількості бітів матрицю байтів (по 8 біт у байті). Після формування таким чином матриці всі біти, які входять до байті перемішуються таким чином, щоб після перемішування тільки один старий біт залишився в байті, а інші біти були взяті по одному з семи байт.

Отримана таким чином кодова послідовність надходить на QPSK- модулятор. Дані операції виконуються у всіх чотирьох субканалах. Для обробки сигналу в OFDM-модуляторі необхідно перетворення вхідної послідовності символів з послідовного в паралельний потік, так як це описано в п. 2.4.

У антенних каналах 2, 3 і 4 інформація передається з часовою затримкою (відносно першого каналу) в 400, 200 і 600 не відповідно. Таке фазове зрушення потрібне, щоб уникнути мимовільного формування стабільної діаграми спрямованості передавальної антенної системи, а це може статися, наприклад, при синфазному або протифазному випромінюванні.

Додавання захисного інтервалу допомагає уникнути міжсимвольної інтерференції, та додається при передачі кожного інформаційного символу. Додавання контрольних символів призначено для синхронізації.

### **3. АЛГОРИТМИ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ ПРИ ОПТИМІЗАЦІЇ РОЗМІЩЕННЯ БЕЗПРОВОДОВИХ ТОЧОК ДОСТУПУ**

#### **3.1. Основні етапи планування безпроводової мережі в офісі**

Бурхливе поширення і вдосконалення мобільних пристроїв зажадало такого ж стрімкого розвитку безпроводової інфраструктури для їх обслуговування. З появою нових концепцій використання мобільних пристроїв на робочому місці, безпроводові мережі перестали бути приємним доповненням і перейшли в ранг обов'язкового корпоративного інструменту [8 - 21].

Процес розгортання безпроводової мережі можна розбити на декілька етапів. На першому проводиться радіообстеження, на другому - установка і налаштування обладнання, на третьому - підсумкове радіообстеження і внесення необхідних змін для забезпечення повної відповідності первинним вимогам. Четвертий етап припускає підтримку роботи системи з можливим впровадженням рішень по моніторингу.

Радіообстеження. Проведення радіообстеження і подальше проектування безпроводової мережі дозволяють вже на початковому етапі понизити ризик виникнення проблем і тим самим істотно підвищити шанси на успішне впровадження. Здавалося б, встановлюємо якомога більше точок доступу - і завдання вирішене. Навіщо проводити ще і радіообстеження? Але слід пам'ятати, що безпроводова точка доступу завжди робить вплив на роботу інших таких же навіть при використанні різних каналів, не кажучи про ситуації, коли частотні канали співпадають.

При проведенні радіообстеження використовується цілий набір інструментів: програмне забезпечення, безпроводові адаптери, точки доступу, аналізатор спектру і ін. Перед виконанням основної фази радіообстеження необхідно отримати план приміщення або будівлі з обов'язковою вказівкою його масштабу. Спочатку цей план знадобиться для нанесення необхідних зон покриття, а надалі - для формування карти покриття.

Потім замовник повинен сформулювати вимоги до роботи системи, для чого йому пропонується заповнити заздалегідь підготовлений опитний лист. Зазвичай в нього включаються наступні питання: яка зона покриття потрібна, яку мінімальну швидкість потрібно, які сервіси планується використовувати і т. д.

Залежно від призначення безпроводової мережі, об'єм і тип виконуваних робіт при її проектуванні і побудові розрізнятимуться. Наприклад, для доступу до корпоративних ресурсів і Інтернету з приміщення офісу потрібно забезпечити певний мінімальний рівень сигналу (RSSI) і зону покриття. Якщо передбачається підтримувати роботу безпроводового телефонного зв'язку (IP-телефонії) - пред'являтимуться підвищені вимоги до рівня сигналу і достатнього перекриття зон дії точок доступу для забезпечення механізмів швидкого роумінгу і належної якості зв'язку.

На цьому етапі замовник повинен чітко уявляти вимоги до мінімальної пропускної спроможності або хоч би вид/характер додатків, які планується використовувати з кожним типом пристроїв. Дуже часто ця вимога виражена як «чим більше, тим краще». Але такий підхід далекий від оптимального: в гонитві за високою пропускною спроможністю кількість встановленого устаткування може виявитися надмірною, особливо за наявності значної території. При цьому не завжди існує реальна необхідність в підтримці високих швидкостей. Показовий приклад - складські приміщення, де для роботи мобільних сканерів досить мінімальної смуги пропускання, при цьому площа складу вимірюється десятками тисяч квадратних метрів.

Наступний етап - визначення типу безпроводового обладнання. Це важливо зробити заздалегідь, оскільки виміри необхідно виконувати на тому обладнанні, яке буде встановлено. Тип точок доступу визначається виходячи з необхідності використання зовнішніх антен, щільності абонентів, умов експлуатації. Під умовами експлуатації маються на увазі специфічні особливості середовища на об'єкті, де буде розгорнута безпроводова мережа - в офісному приміщенні, у будівлі заводу, на прилеглий території. Для кожного випадку висувуються свої вимоги до точок доступу.

У деяких ситуаціях можуть використовуватися точки доступу різних типів. Наприклад, там, де пред'являються мінімальні вимоги до безпроводової мережі, встановлюються точки доступу з базовим функціоналом. А там, де передбачається, що абонентів буде дуже багато - у відкритих офісних просторах, конференц-залах і інших подібних приміщеннях, - розміщуються потужні пристрої із спрямованими антенами, тобто більше адаптовані до таких умов роботи.

Для визначення місць установки безпроводових точок доступу зазвичай використовується спеціалізоване програмне забезпечення. Це ПЗ дозволяє проводити радіообстеження в двох режимах - пасивному і активному.

У пасивному режимі виконуються моніторинг середовища і реєстрація сигналів, що поступають від усіх точок доступу. Таким чином складається карта покриття для усіх працюючих в приміщенні безпроводових мереж з вказівкою рівня сигналу (RSSI) і співвідношення сигнал/шум (SNR).

У активному режимі задіюється безпроводове обладнання, яке планується використовувати надалі. В цьому випадку ПЗ запускається в режимі клієнт-сервер: виміри проводяться за допомогою ноутбука - фахівець послідовно обходить усі приміщення. Для кожного місця розташування програма визначає фізичну швидкість передачі даних (для різних протоколів передачі: TCP, UDP і ін.) і інші необхідні параметри. Так формується реальна картина поширення радіосигналу в приміщеннях.

На рис. 3.2 представлена карта значень швидкості витікаючого з'єднання TCP при проведенні виміру в активному режимі, де видно яскраво виражені зелені «острівці», в центрі яких розташовувалися точки доступу, що беруть участь в дослідженні.

Проводити радіообстеження в пасивному або активному режимі треба у вже готовому до роботи приміщенні - в офісному приміщенні мають бути розставлені меблі, а склад заповнений товарами. Інакше характеристики поширення сигналу відрізнятимуться від виміряних. Безумовно, намітити місця установки точок доступу і запланувати кабельну інфраструктуру зручніше ще на етапі проектуван-

ня приміщення, але тоді є небезпека отримати невірні дані. Вирішити це завдання можна за допомогою віртуального радіообстеження, мова про яке піде нижче.

Варто відмітити, що деякі програмні продукти, призначені для проведення радіообстеження, підтримують роботу в режимі віртуального обстеження. У цьому режимі після завантаження і калібрування плану приміщення, вказання матеріалу стін і перекриттів точки доступу можна розташувати в передбачуваних місцях установки. Потім програма виконує моделювання і візуалізацію покриття безпроводової мережі, спираючись на відомі параметри поширення сигналу для певної моделі точки доступу і його загасання при проходженні перешкод. Далі, міняючи положення точок доступу, можна знайти оптимальну зону покриття і, таким чином, скласти план розміщення обладнання навіть без виїзду на об'єкт. По нашому досвіду, такий режим радіообстеження досить точний.

Віртуальний режим може використовуватися при обмеженому бюджеті на проведення радіообстеження, коли до безпроводової мережі не пред'являється жорстких вимог. Іноді немає фізичної можливості провести повноцінне радіообстеження на об'єкті (наприклад, не завершено будівництво). Ще одне можливе застосування цього режиму - дослідження перед виїздом на об'єкт. Це дозволяє заздалегідь визначити місця для проведення вимірів, що позитивно позначається на підсумкових результатах, оскільки виміри виконуються максимально близько до передбачуваного розташування точок доступу.

Обов'язковою процедурою є спектральний аналіз середовища, що дозволяє виявити використовувані безпроводові пристрої, а також обладнання, яке може негативно впливати на роботу безпроводової мережі. Для вирішення цього завдання підійдуть такі продукти, як Cisco Spectrum Expert, AirMagnet Spectrum Analyzer і аналогічні ім. Як показує практика, причиною поганої роботи безпроводової мережі може стати велика кількість пристроїв Bluetooth.

Пристрої Bluetooth працюють на тих же частотах, що і безпроводові мережі. В ході реалізації одного з проектів було виявлено істотне падіння швидкості передачі трафіку при невеликому віддаленні від точки доступу. На рис. 3.3 представлена спектрограма для діапазону 2,4 ГГц, на якій видно мозаїчне заповнення усіх

каналів перешкодами від пристроїв Bluetooth. У описуваному прикладі довелося мінімізувати кількість пристроїв Bluetooth в мережі - усі безпроводові миші і клавіатури були замінені на провідні.

Крім того, на роботу безпроводової мережі може робити вплив і інше обладнання, наприклад, приставки XBOX, мікрохвильові печі і ін.

На окрему увагу заслуговують «інші точки доступу». Досить часто доводиться стикатися з ситуацією, коли безпроводові точки доступу приносять і встановлюють самі співробітники. IT-департамент про них нічого не знає. Кожна точка доступу - це перешкода для роботи створюваної мережі. Ситуація погіршується, якщо компанія розташовується у великій офісній будівлі, де знаходяться і інші організації. Завжди є вірогідність, що сусіди, розгорнувши свою безпроводову мережу, перешкоджають роботі вашій. Визначити наявність, близькість і інтенсивність роботи сусідніх точок доступу - важливе завдання радіообстеження.

При складанні підсумкової карти розташування точок доступу необхідно візуально оглянути місця їх установки. Бувають ситуації, коли ці пристрої не вписуються в інтер'єр приміщення або їх просто ніде закріпити. Крім того, дуже важливо дати чіткі вказівки монтажникам, як правильно розташовувати точки доступу і антени, якщо вони є.

Якщо радіообстеження проводиться на вулиці, бажано проводити його в той час, коли дерева покриті листям. Крона дерев виконує роль екрану, і якщо взимку безпроводова мережа на вулиці працює добре, це не означає, що так само буде і влітку. У ряді випадків для побудови вуличної безпроводової мережі вимагається отримати дозвіл в державних регулюючих органах.

При підготовці до радіообстеження рекомендується заздалегідь спланувати усі дії і скласти список необхідних інструментів. Необхідно заздалегідь намітити місця установки тестових точок доступу (спираючись на аналіз планів приміщення або результати віртуального радіообстеження). Різні приміщення мають свою специфіку - наприклад, на складі не скрізь можна встановити вимірювальне обладнання, іноді треба заздалегідь потурбуватися про спецодяг і т. п. Крім того для повноцінного радіообстеження потрібно доступ в усі приміщення, але, наприклад,

в офісі не завжди можна потрапити в кабінет начальника, де безпроводова мережа повинна працювати гарантовано.

Після отримання усіх даних будується підсумкова карта прогнозованого покриття. Характеристики поширення сигналу для діапазонів 2,4 і 5 ГГц розрізняються, тому усі етапи радіообстеження повинні виконуватися для кожного діапазону окремо. На рис. 3.4 представлений план приміщень з нанесеними точками доступу і картою покриття для діапазону 2,4 ГГц. Тут же є присутньою маркіровка діапазону 5 ГГц, оскільки точки доступу, використовувані в мережі, дводіапазонні.

Отже, місця установки і тип безпроводових точок доступу визначені. На черзі - вибір загальної концепції рішення: централізоване управління точками доступу або автономна робота. У першому випадку використовується виділений пристрій або ПЗ - контролер безпроводової мережі, який реєструє усі точки доступу і управляє ними. У другому випадку кожна точка налаштовується і працює в автономному режимі. Безпроводова мережа з централізованою архітектурою має великі переваги, тому рекомендується вибирати саме її, якщо точок доступу більше п'яти.

Після розбиття на потоки кожен окремий потік бітів надходить на перемішувач. Перемішувач формує з певної кількості бітів матрицю байтів (по 8 біт у байті). Після формування таким чином матриці всі біти, які входять до байті перемішуються таким чином, щоб після перемішування тільки один старий біт залишився в байті, а інші біти були взяті по одному з семи байт.

Контролер безпроводової мережі, крім усього іншого, забезпечує управління радіосередовищем - вибирає канали, на яких працюватиме кожна з точок доступу, і регулює потужність випромінювання для мінімізації їх взаємного впливу. Усе це відбувається безперервно, і якщо властивості середовища міняються, контролер намагається під них підлаштуватися (наприклад, відмова однієї точки дос-

тупу може ініціювати ріст потужності сусідніх пристроїв для збільшення їх зони покриття) [25, 26].

Монтаж і налаштування безпроводового обладнання.

Виробники виготовляють спеціалізовані кріплення для своїх точок доступу. Але часто вони не дуже добре підходять для конкретних умов, і кріплення доводиться робити самостійно. Як було відмічено, місця установки точок доступу необхідно вибирати з урахуванням рельєфу місцевості, щоб розмістити їх відповідно до вимог проекту. Хтось розташовує точки доступу поверх навісної стелі, хтось - на стіні. Кожен випадок слід розглядати окремо.

При кріпленні точок доступу і зовнішніх антен (якщо передбачається такий варіант використання) украй бажано не порушувати діаграму спрямованості випромінюючих елементів (схеми поширення сигналу у вертикальній і горизонтальній площинах зазвичай наводяться в супровідній документації). При підключенні до мережевого обладнання рекомендується залишати запас по витій парі, що дозволить переносити точку доступу при виникненні такої необхідності. Найбільш зручний спосіб забезпечення енергоживлення - застосування технології Power over Ethernet (PoE). У більшості випадків досить підтримки стандарту 802.1af (до 15,4 Вт). Для організації живлення по мережі Ethernet можна використовувати комутатори з функцією PoE або інжектори живлення.

Після того, як точки доступу змонтовані, настає черга налаштування обладнання, причому не лише безпроводового. Залежно від вимог до безпеки і функціонала безпроводової мережі, можливо, знадобиться впровадити інфраструктуру відкритих ключів (PKI), провести конфігурацію клієнтських пристроїв, поміняти логіку роботи мережевого обладнання. Найчастіше доводиться налаштовувати наступні типи аутентифікації користувачів: відкрита аутентифікація (вільний доступ), по загальному ключу, з використанням даних Microsoft Active Directory (PEAP - MSCHAP), на основі цифрових сертифікатів (PEAP). В якості центру сертифікатів частенько задіюється Microsoft Windows Server з відповідною роллю. При введенні мережі в експлуатацію рекомендується спочатку впровадити пілот-

ну зону, щоб протестувати сумісність клієнтських адаптерів з безпроводовим обладнанням.

#### Підсумкове радіообстеження.

У деяких ситуаціях після налаштування і запуску безпроводової мережі в роботу проводиться підсумкове радіообстеження, мета якого - визначення реальної зони покриття безпроводового середовища і фіксація досягнутих результатів. Для цього використовується те ж ПЗ в активному режимі, що і на першому етапі. Оскільки безпроводове обладнання скрізь змонтоване і налагоджене, інженерів залишається тільки обійти усі приміщення, щоб побудувати підсумкову карту покриття. Ніякі додаткові точки доступу вже не використовуються. Іноді після закінчення дослідження виникає необхідність додати нову точку доступу або перемістити існуючу. Найчастіше це відбувається з двох причин: через порушення інструкцій по монтажу і якщо необхідно розширити зону покриття на ділянках, де спочатку допускалася можливість мінімального рівня сигналу або його відсутності.

### **3.2. Алгоритм оптимізації розміщення безпроводових точок доступу**

Точки бездротових доступів можуть бути персональним комп'ютером з бездротовою мережевий платою Wi-Fi, портативним комп'ютером, smartphone або будь-яким іншим апаратом, здатним з'єднуватися в бездротової мережі. Точка доступів має спрямовану антену з круглим мотивом і утворює зону служби в плані у вигляді кола. Для кожного пункту доступів, існує межа в максимальній кількості пунктів бездротових доступів  $SAP_{MAX}$ , які можуть до нього бути асоційованими. Це обмеження, так само як відділи покривала мінімум і максимально зони служби ( $R_{min}$ ,  $R_{max}$ ) визначені специфікацією моделі не особливого доступу і залежать від його характеристик і від сили сигналу. Щоб визначати координати абонентів, для яких вимагатися покривало зони служби, метод Footprint може бути використаним, яке визначає місце по сліду єдина радіочастота за допомогою портрета спектрального сигналу [6].

TD можуть бути активними (в даний час використані) і пасив (в резерві).

Відповідно до принципу бездротового локалізації, TD може бути розділеним на 3 типи: точний, мобільний і майже-мобільний. Точні TD поміщені статично на специфічне місце і не можуть змінити відділ зони служби що необхідно відрегулювати потужність передавальної антени. Мобільний телефон - машина, яка може переміститися від одного місця до іншого, динамічно що утворює покривало зони служби в зоні, даної по відношенню до її місця. Майже мобільні TD статично фіксовані, але попри постійні, вони утворюють зворотний площа використовуючи антени, здатні динамічно змінювати діаграми випромінювання.

Для того, щоб знаходити найкраще місце TD, коли ви використовуєте активні місця, необхідно визначити найбільш коротку дорогу до точки оптимального приміщення і / або вважати параметри щоб утворювати оптимальну діаграму антени. Розподіл частот між зонами служби, які схрещуються, має відповідати вимогам IEEE щоб надавати мінімум 25 MHz для поділу центрів каналів, перехресних в смузі 2,4 MHz, в якій пристрої WIFI функціонують. Ці вимоги керують трьома доступні не перехрещеними каналами: 1, 6, 11.

Вибір оптимальної кількості та місця розташування активних точок доступу також визначається на підставі критерію ступеня близькості кожної безпроводових точок доступу до решти з урахуванням максимальної кількості абонентів, яке може бути підключено до однієї точки доступу одночасно. Ступінь близькості безпроводових точок доступу до решти обчислюється за допомогою інтегрального параметра в якості методу узагальненої оцінки віддаленості кожної окремо взятої безпроводових точок доступу щодо інших. Для розрахунку інтегрального параметра безпроводових точок доступу SAP необхідно виконати наступні дії:

Обчислити значення відстаней  $d$  від SAP до інших безпроводових точок доступу. На рис. 3.4 - 3.5 представлена візуалізація методу розрахунку інтегрального параметру бездротової абонентської станції SAP 1, щодо якої розташовані інші так, як показано на рис. 3.4. Нумерація безпроводових точок доступу задана в довільному порядку [1, 4. 16 - 27].

Сортувати відстані, отримані в порядку зростання, застосовувати до плану координат і з'єднуватися одних іншим. Площа під графіком отриманої функції -

вартість єдиного параметра пунктів бездротових доступів. На рис. 3.5 ця вартість для  $SAP$  1 чисельно дорівнює повному виданню функції  $f$  в цей час від 0 до 11 або площа малюнка під графіком функції  $f$ . Цифрове рішення цієї проблеми може бути виконаним будь-яким методом щоб знаходити один повне видання певної, таке як його формулює завдання. Чим більше пункти бездротових доступів видалені по відношенню до особливого пункту, тим більше зона рисунка під графіком велика і, отже, більше своя вартість єдиного параметра, великий.

Алгоритм освіти зон служби повинен покрити, перш за все, найменш компактні зони, де виявляються абоненти, тобто пункти бездротових доступів, у яких є найбільш висока вартість єдиного параметра, прогресивно переміщується до найбільш компактним. На рис. 3.6 показує алгоритм щоб визначати координати місця  $i$  в числі точок доступів.

Структура алгоритму на рис. 3.6 передбачає здійснення перевірки умови обмеження максимальної кількості безпроводових точок доступу  $SAP_{max}$ , яка може бути підключена до однієї точки доступу, а також повнотн покриття.

На рис. 3.7 наведена блок-схема алгоритму подальшої оптимізації покриття, що реалізує балансування безпроводових точок доступу для рівномірного розподілу їх кількості.

Для вирішення проблеми нерівномірності розподілу користувачів між сусідніми ТД необхідно підключити абонентів таким чином, щоб ТД обслуговували приблизно однакову кількість пристроїв. Для  $M$  пересічних зон покриттів, побудованих з максимальним радіусом  $R_{max}$  в центрах розміщення точок доступу, можна записати відношення  $SAP_i \rightarrow \sum_{j=1}^M SAP_j / M$ , де  $SAP_i$  – кількість абонентів, що підключено до  $i$ -й точці доступу ( $i \in [1, M]$ ), а в правій частині (1) – середня кількість абонентів, підключених до  $M$  точок доступу.

Безпроводові точки доступу можуть знаходитися в прикордонних зонах (по краях максимальної зони покриття), якщо відстані від них до центру зони дорівнюють максимальному радіусу  $R_{max}$  зони покриття. У цьому випадку потрібна максимальна потужність передавальної антени. Абоненти в прикордонних зонах

матимуть мінімальну швидкість прийому-передачі даних, безпосередньо впливаючу на якість обслуговування і загальну енергоефективність бездротової мережі.

Таким чином, критерій енергоефективності можна визначити співвідношенням  $\sum_{i=1}^N R_i \rightarrow N \cdot R_{min}$ , де  $R_i$  - радіус покриття зони обслуговування  $i$ -ю точкою доступу,  $N$  - кількість однотипних мобільних точок доступу,  $R_{min}$  - мінімально можливий радіус покриття зони обслуговування.

Напрямок подальших досліджень є уточнення параметрів даного критерію, що дозволить дати більш достовірну оцінку ефективності використання енергії.

### 3.2. Програмне та апаратне забезпечення і методика тестування

Для проведення досліджень направлених на ефективну технічну реалізацію побудови локальної мережі за технологією Wi-Fi застосовано програмне забезпечення AirMagnet Survey. Перевагою даного програмного продукту серед аналогічних є наявність 30-денного випробувального режиму та сукупність переваг які представлено нижче [28].

AirMagnet Survey це найбільш точне в галузі телекомунікацій програмне забезпечення для безпроводового дослідження з метою складання схем, планування і проектування локальних безпроводових мереж 802.11n/a/b/g/ac для оптимальної продуктивності, безпеки і відповідності нормам. Це програмне забезпечення розраховує ідеальну кількість, розміщення і конфігурацію точок доступу для успішного розгортання безпроводової мережі LAN.

Дане програмне забезпечення має наступні можливості:

- проектування і розгортання найточніші безпроводові мережі LAN (802.11n/a/b/g/ac) усередині і поза будівлею відразу правильно і запобігання дорогій корекційній роботі і IT-скаргам;

- збирає дані реального світу, виконуючи унікальні виміри істинного досвід кінцевого користувача (пропускна спроможність безпроводової мережі LAN, швидкості передачі даних, повторна передача даних, втрати)
- мінімізує дію джерел РЧ-перешкод на продуктивність безпроводової мережі LAN 802.11n/a/b/g/ac, виконуючи одночасний аналіз спектру при одному проходженні по ділянці;
- моделює сценарії типу «а що, якщо», щоб запобігти або мінімізувати дороге повторне обстеження безпроводової ділянки;
- перевірка на готовність безпроводові мережі LAN для послуги голосу по WiFi і сервісу визначення місця розташування;
- упевнене сертифікування безпроводної мережі для будь-яких вимог проекту/дodatка, використовуючи звіти за оцінкою «пройдено/не пройдено», готові для перегляду клієнтами;
- налаштування звітів, дозволяючих ефективну передачу результатів, засновану на вимогах проекту/дodatка безпроводової мережі LAN;
- Органічна інтеграція з AirMagnet Planner для валідації передбачуваної моделі безпроводової мережі LAN;
- інтеграція з додатками AirCheck Wi - Fi Tester і AirMapper на смартфонах і планшетах з Android для проектування і перевірки мереж BYOD.

Для побудови мережі вибрано офісне приміщення, в якому було розставлено 60 ноутбуків Dell і дев'ять планшетів iPad і iPad 6. Потім було обрано п'ять точок доступу і відповідні контролери для них (де необхідно) і протестовано їх за різними сценаріями. У звичайних умовах у такому масштабі мало хто проводив тестування на предмет завад у безпроводових мережах.

Метою розрахунків є перевірити продуктивність точки доступу в умовах серйозних завад і з результатів вивести відповідь: яким чином безпроводові технології, попередньо вивчені нами, ведуть себе в реальному світі.

Для розгляду проведені тести в межах прямої видимості, один - в 3-х метрах від точки доступу і клієнта, а інший - в 20 метрах. На схемі показані настільні зони та сектора в межах маршруту в прямої видимості, але, як ви бачите нижче, на-

справді, ми не зіткнулися з такими завадами. Третій тест, в 30 метрах, проводився у великій зоні кімнати відпочинку, що виключало прямий маршрут пересилання даних. Вище на рис. 3.8 зображено схему тестованої мережі.

Була використана проводова мережа, до якої підключили тестовану точку доступу. Для всіх тестів ми застосовували AP (точка доступу) і всю мережеву інфраструктуру, необхідну для роботи. Наприклад, точки доступу Ruckus і Aruba зажадали застосування безпроводових контролерів, а HP і Apple - ні.

Додатково до цього, в кінцевій точці IxChariot (версія 7.1) працював сервер бази даних - програма, що посилає дані в обидві сторони, а також відправляє звіти про результати назад на керуючий комп'ютер, який працював на окремому змонтованому вузлі зв'язку. Ми також задіяли другу кінцеву точку IxChariot на безпроводовому клієнті, підключеному до точки доступу.

Використане апаратне забезпечення.

Випробовувані точки доступу [29].

Apple AirPort Extreme: двохдіапазонна 802.11n (3x3: 2), автономна, версія 7.5.1.

Aruba AP125: двохдіапазонна 802.11n (3x3: 2) з контролером Aruba 3200, працюючим під ArubaOS (вер. 6.0.0.1).

Cisco Aironet 3502i: двохдіапазонна 802.11n (2x3: 2) з контролером Cisco 4402 (вер. 7.0.98.0).

HP E-MSM460: двохдіапазонна 802.11n (3x3: 3) автономна, робоча версія 5.5.0.0-01-9513.

Meraki MR24: двохдіапазонна 802.11n (3x3: 3), що працює з контролером Meraki Enterprise Cloud.

Ruckus ZoneFlex 7363: двохдіапазонна 802.11n (2x2:2) з Ruckus ZoneDirector 1106 (версія 9.1.0.0.38).

З усіх шести точок доступу (ТД) представлених на рис. 3.9 тільки Meraki і HP мають трипотоківі конфігурації з трьома антенами (3x3: 3). По суті справи, це були дві одиниці 3x3: 3 ТД, які ми знайшли на ринку якраз до моменту початку тестів. Aruba AP125 – це досить стандартна модель для даної компанії і вона вже

отримала сяку популярність. Точно так само і 2x2: 2 ZoneFlex 7363 від Ruckus на-вряд чи дотягує до середини рейтингу в списку кращих продуктів компанії. Cisco 3500 – це сучасна високопродуктивна ТД від мережевого гіганта [16].

Більшість розглянутих у цьому розділі точок доступу використовують все-прямовані антени. Ruckus і Meraki, описана тут, є винятком. Для нетренованого ока Meraki і Ruckus здадуться досить схожими по конструкції, у кожного є спрямовані антени в, практично, круговій діаграмі спрямованості. Тим не менш, Meraki використовує плоскі інвертовані F-антени (PIFA). Більшого розміру призначені для 2,4 ГГц, а маленькі – для 5 ГГц, залишаючи при цьому всього три антени на кожен смугу частот. Далі ми дізнаємося, як впливає на продукцію обертання при подібному дизайні.



Рисунок 3.9. Точки доступу

*Для клієнтів.* Для нашого одиночного клієнта ми використовували Dell Latitude E6410 з наступними технічними даними:

- Intel Core i7-620M (2,67 ГГц),
- 4 Гбайт RAM,
- Centrino Ultimate-N 6300 (3x3: 3),
- Windows 7 Professional (64-битна),

Живлення від мережі включено у всіх тестах.

Кожен тест на цьому клієнті проводився по чотири рази, причому ноутбук повертали на 90 градусів для кожного випадку. Значення пропускну́ї здатності являють собою середнє арифметичне цих чотирьох результатів.

Для наших 5 ГГц завод і тестів на навантаження було використано ноутбуки 60 Dell Vostro 3500 з наступними технічними даними:

Intel Core i3 2,27 ГГц,

3 Гбайт RAM,

Адаптер DW1520 Wireless-N WLAN half-mini card (Broadcom, драйвер 5.60.48.35),

Windows XP Professional SP3,

Живлення від мережі включено у всіх тестах.

Також використано п'ять планшетів Apple iPad 6 для кращого вивчення впливу ультрамобільних пристроїв в змішаній безпроводової мережі.

Визначаючись, чи проводити основні тести при 2,4 ГГц або 5,0 ГГц, і в кінцевому рахунку зупинилися на останньому варіанті, керуючись двома причинами. По-перше, тоді як більшість споживчих товарів явно використовують 2,4 ГГц, підприємства переходять на 5 ГГц, тому що це найменш використовувана смуга частот. Тестуючи переважно обладнання для підприємств, ми хотіли використати найкращий на даний момент діапазон для сучасного покоління, і зараз це 5 ГГц. У цій смузі просто набагато менше трафіку, що означає (в загальному) кращу продуктивність клієнта. По-друге, ви бачите всі зростаюче число дводіапазонних маршрутизаторів і точок доступу, що з'являються в широкому продажі, оскільки постачальники намагаються нести високі технології на ринок масового споживання.

Для проведення тестів при 2,4 ГГц ми помістили всі пристрої на канал 1. Для 5 ГГц ми працювали з каналом 36.

*Що являють собою завади*

При проведенні тестів на вплив завод при 5 ГГц, завади і несприятливі умови для конкуренції створювалися за допомогою 60 клієнтів від компанії Dell, кожен з яких був підключений до ТД, закріпленої на стелі приблизно над серединою

групи клієнтів. У кутку нашого офісу, показаному зеленою точкою на попередній схемі розташування обладнання, ми встановили тестовану точку доступу, закріпивши її на стелі. Отже, використали дві окремі безпроводові локальні мережі (БЛС), причому маленька (одиначний клієнт і випробовувана ТД) повинна функціонувати окремо від 61 пристрої Wi-Fi, що вносять завади. Було використано дві окремих безпроводових ЛЗ, щоб виділити завади в якості нашої головної змінної, а не завади і навантаження на клієнта.

Для тестів при 2,4 ГГц було розглянуто сценарій найгіршого розвитку подій, тому об'єднали відстань в 30 метрів від клієнта до ТД, додавши до цього заваду в зоні прямої видимості, а також генератор шуму, що працює в діапазоні Wi-Fi радіочастот, який ми розмістили прямо на точці, де знаходився наш клієнт в ході проведення тестів з відстанню в 20 метрів на частоті 5 ГГц [30].

Використовуючи Metageek's Chanalyzer Pro, було зроблено кілька вимірів поруч з нашою випробовуваною точкою доступу. Отримали що при робочому навантаженні майже 30% доступної смуги частот нашого каналу зникало через шум. Також візьміть до уваги, що амплітуда цього шуму була зареєстрована на рівні десь близько -80 дБм.

Далі ми додали один клієнт, підключений до нашої цільової ТД. Амплітуда не змінилася, але навантаження різко збільшилася до більш ніж 80%.

Додавши сюди ж завади від передачі даних зі всіх 60 клієнтів Vostro, амплітуда підстрибнула на значення вище -60 дБм, а робоче навантаження практично досягла максимального рівня, зупинившись на 95%.

### **3.3. Тестування мережі**

Проведено тестування на прийом з одним клієнтом при 5 ГГц на відстані в 3 метри в зоні прямої видимості. І тут найшвидшим пристроєм, завдяки здатності передавати дані по трьом потокам, виявилось НР. Беручи це до уваги, не дивно, що продукт від Мегакі опинився на другому місці. Ці дві ТД єдині, хто виявився здатний використовувати всі три потенційних потоки клієнта (рис. 3.7).

У тесті 3-х метрового каналу зв'язку на передачу, пристрій Meraki різко збільшив продуктивність, показавши 157 Мбіт/с, від чого наступних чотирьом конкурентам нічого не залишилося, окрім як згрупуватися в діапазоні значень 130 Мбіт/с, а продукт від Cisco виявився останнім із значенням 114 Мбіт/с (рис. 3.8).

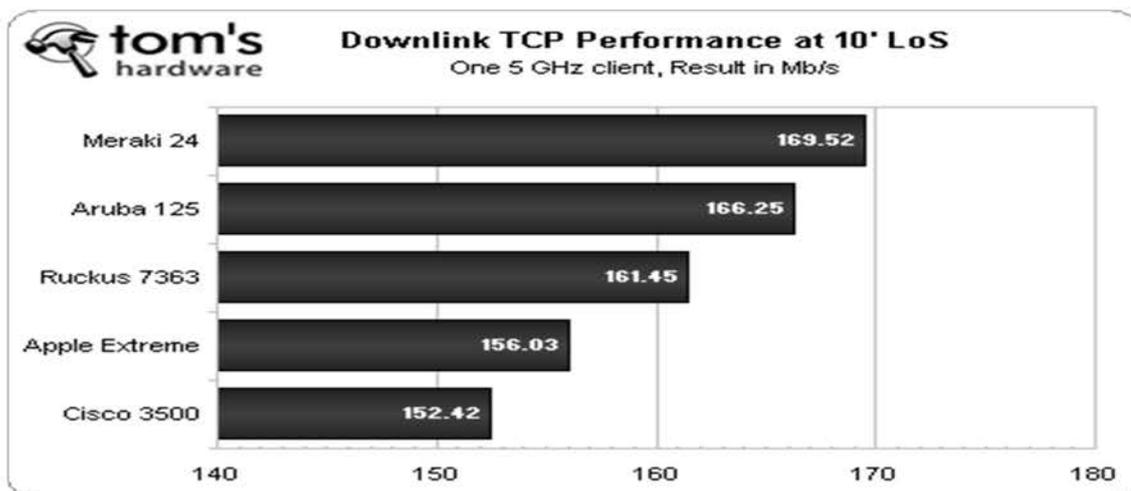


Рисунок 3.7. Результати тестування на ближній відстані, немає завад

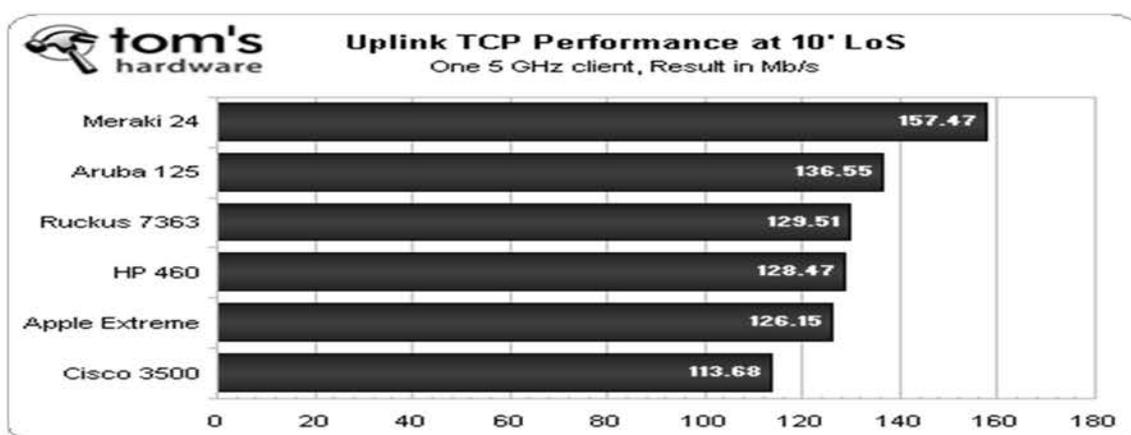


Рисунок 3.8. Результати тестування 3-х метрового каналу

Чи потрібно говорити, що будь-який результат понад 100 Мбіт/с - це дуже пристойний показник для стандарту 802.11n? І все ж, у нас є розбіжність приблизно в 30% з найнижчого (HP) до найвищого значення (Ruckus) в цьому тесті. Продукт від Meraki показав гарні результати, опинившись на другому місці, але тепер

останньої виявилася ТД НР. Це могло виявитися випадком, коли точка доступу нездатна підтримувати всі три потоки одночасно.

Ситуація: стоїте у відкритому полі, намагаючись запустити три потоки в режимі просторового об'єднання. Не вийде, чи не так? Немає нічого, від чого ці вторинні сигнали могли б відбитися. Єдиний доступний потік - це по прямій в зоні прямої видимості між ТД і клієнтом. В деякій мірі, цей принцип міг вплинути на результати. Якщо точка доступу не може ефективно використовувати прилеглі стіни і інші об'єкти, щоб сприяти поширенню трьох потоків з прийнятними показниками, тоді їй доведеться знизити свою продуктивність до двох потоків, або навіть до одного (ми вважаємо, що в даному випадку це все ж два потоки). У той же час різниця між 3-ма і 20 метрами для Ruckus достатня і тепер ця ТД може скористатися своїм арсеналом функції щодо поліпшення прийому / передачі сигналів з тим, щоб впорається з поточною ситуацією. Знову ж таки, зауважте, що тут ми отримали 10%-ний відрив за показниками Cisco від інших конкурентів всього з двома потоками (рис. 3.9).

І це, безумовно, в деякому роді, дивно. В той час, як немає нічого незвичайного в тому, що канали передачі даних у висхідному напрямку прагнуть не відставати від спадних, і у Aruba, і у НР були помічені поліпшення. Ми не виключали ідею про які-небудь випадково виявлених зон кращого прийому, які впливали на обидві ТД, але ймовірність того, що подібне пояснення виявиться вірним, здалася нам дуже маленькою.

Також ми повинні відзначити різницю більш ніж в 45 Мбіт/с між швидкостями в висхідних і спадних лініях зв'язку у Ruckus. Ймовірно, відповідь укладений у способі формування променя. Цей процес має справу з передачею даних, а не з отриманням (рис. 3.10).

А тепер до самої цікавої частини даного огляду. Якщо у когось з вас раніше і було питання, чи можуть що знаходяться поблизу пристрою викликати завади в вашому Wi-Fi з'єднанні, то ці тести повинні стати для вас відповіддю. Порівняйте результати від 102 до 136 Мбіт/с, про яких ви прочитали вище в тестах спадних ліній зв'язку без завад, з цими числами. НР, Cisco і Aruba показали досить непо-

гані результати, поступившись всього 30 або 40 Мбіт/с. Meraki і Apple не впоралися з цим завданням.

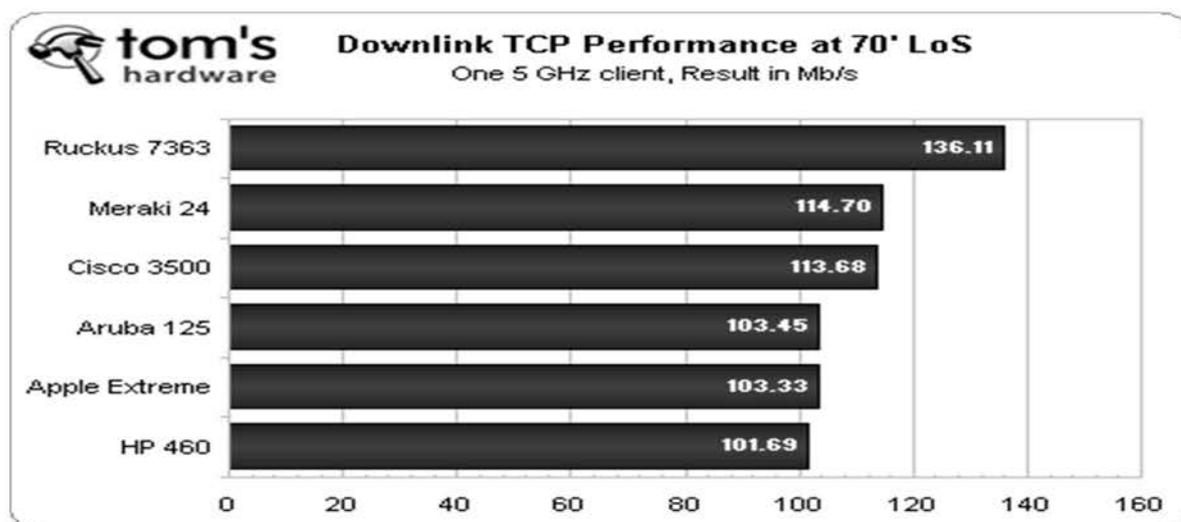


Рисунок 3.9. Середня відстань, немає завад

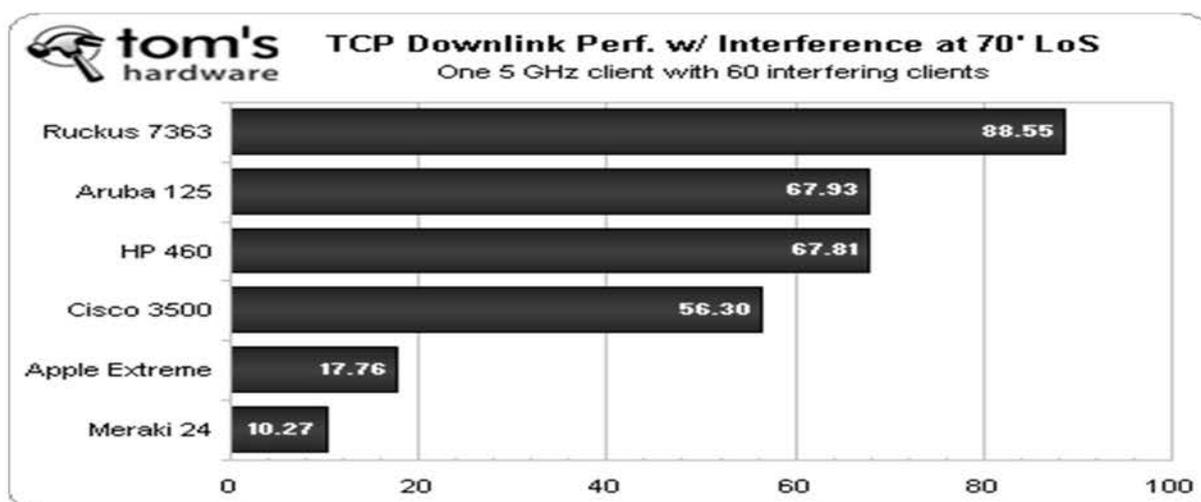


Рисунок 3.10. Середня відстань, 1 точка проти 60 клієнтів

Швидкість передачі при 61 що створює завади пристрої опинилася в такій же ситуації, навіть ще гірше. Точка доступу Apple примудрилася повільно, насилу завершити тест. Пристрій Meraki просто вибуло з цього туру, здавшись на півдорозі.

У таких обставинах здатність до підстроювання у ТД Ruckus може проявити себе повною мірою. Формування променя, просторове об'єднання, поляризація і всі інші прийоми допомагають у випадку з прийомом даних. Принаймні, здатність

фільтрувати завади шляхом використання спрямованих антен ясно показує на перевагу по продуктивності Ruckus при передачі (рис. 3.11).

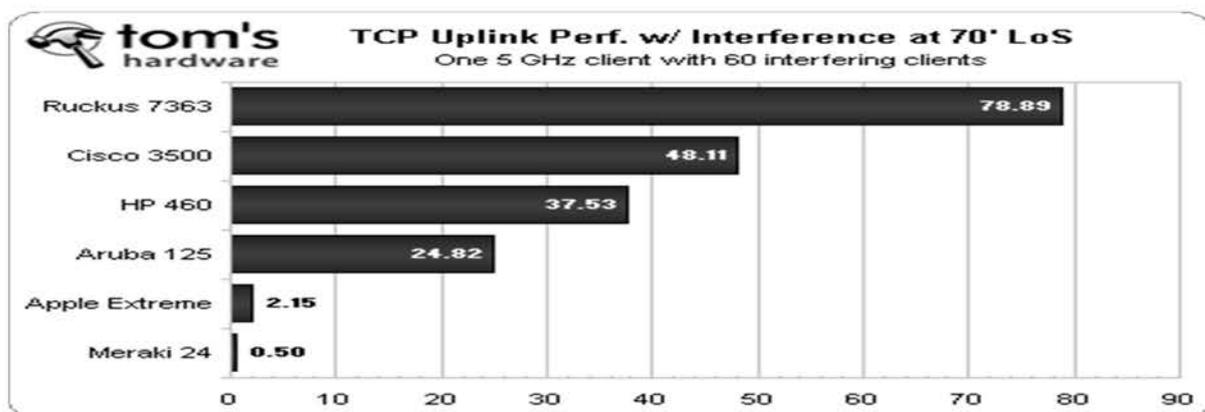


Рисунок 3.11. Середня відстань, 1 точка проти 61 клієнтів

Знову ж таки, точне визначення причин, чому та чи інша точка доступу зазнала невдачі, було б, в значній мірі, гіпотетичним. Ми могли б згадати, що Apple і Meraki є двома найдешевшими ТД в нашій групі пристроїв, і, можливо, принцип "за що купив, то й отримав" в даному випадку серйозно вплинув на результати. Зрештою, що б не говорилося в рекламних компаніях, ви не отримаєте розкішний седан за ціною малолітражки.

Як і Ruckus, Cisco здає позиції в короткому діапазоні, але на більш довгих відстанях показує хорошу продуктивність, навіть незважаючи на неймовірну кількість завад. Безсумнівно, Cisco звертає багато уваги на удосконалення чутливості до прийому сигналів, що пояснює позицію моделі 3502i на другому місці в нашому тесті передачі даних.

Ми вирішили протестувати п'ять наявних у нас точок доступу в найгірших умовах і тут нам у нагоді тест на відстані 30 метрів при знаходженні пристроїв не в зоні прямої видимості. Також ми використовували цей тест для тестування в діапазоні 2,4 ГГц - знову ж таки, для моделювання найгірших умов (рис. 3.12).

У відсутність завад пристрій Meraki знову повернувся в змагання і показав непогану продуктивність, ймовірно, якимось чином він справився з прийомом всіх трьох потоків на великій відстані, з перепонами. Точка доступу HP не змогла

наздогнати суперницю і зазнала невдачі десь в середині тесту. Модель Apple замикає список з результатом 27 Мбіт/с, але це досить пристойний результат для споживчих товарів в таких умовах експлуатації.

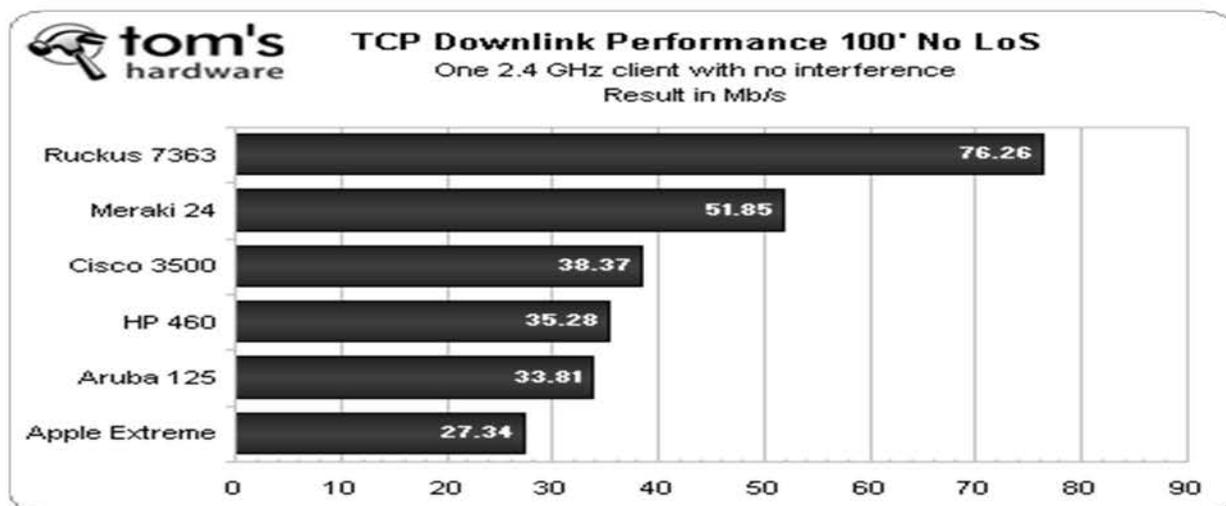


Рисунок 3.12. Дальня відстань, немає завад

Історія повторилася і з передачею даних. Цікаво те, що ТД Aruba виявилася останньою, а модель Apple перемістилася вгору, на четверте місце. Meraki знову показала непогану продуктивність, а ТД Ruckus досить легко впоралася з далекими відстанями (рис. 3.13).

З завадами від наших 60 клієнтів Wi-Fi (і підключеної точки доступу) ми знову побачили передбачуваний і досить жорсткий удар по продуктивності пристроїв. Нас знову вразила модель Apple – тим, що з трудом, але продовжувала виконувати завдання, тоді як бідна Meraki вкотре застрягла на місці, не в змозі завершити тест. І знову ТД Cisco показала переваги своєї конструкції, заробивши майже 19% відрив в продуктивності, в порівнянні з моделлю HP. Для нас це послужило прикладом того, що серйозна якість конструкції набагато перевершує всі маркетингові та рекламні трюки, такі як підтримка трьох потоків. Якщо пристрої HP і Meraki є представниками з найкращою продуктивністю, які можна отримати від "450 Мбіт/с" точок доступу, тоді ми в будь-який момент готові переключитися на більш надійні двухпотоківі рішення.

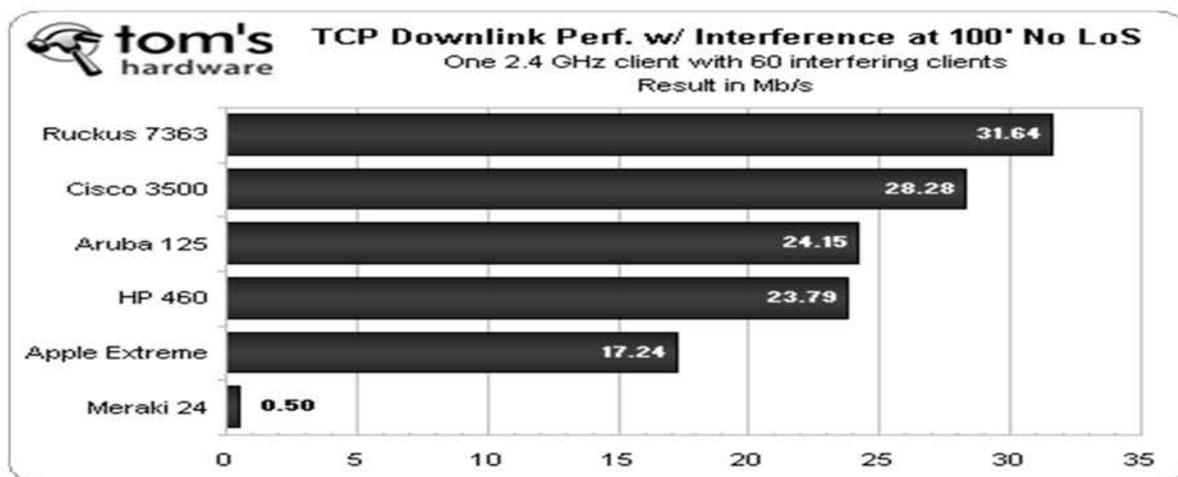


Рисунок 3.13. Далека відстань, 1 точка проти 60 клієнтів, плюс додаткові завади

Відзначимо, що на всіх цих рівнях жодна з перевірених нами точок доступу, ймовірно, не змогла б забезпечити передачу HD-відео. На жаль, показник, який ми вимірювали це середня пропускна здатність в ході двохвилинного тестового прогону. У нас просто не було достатньо часу у графіку проведення тестів, щоб перевірити продукцію ще і на рівні мінімальної усталеною пропускної спроможності. Після того, як показано переважання ТД Ruckus в попередніх тестах, справді хотілося переконатися, чи можуть конкуренти рівня підприємства показати той же результат, що і модель Ruckus, або перевершити її в даному середовищі, особливо у зв'язку з тим, що потокове відео, здається, починає відігравати все більш важливу роль у навчанні школярів. Школам необхідно зрозуміти свої технічні можливості, тобто яким чином і де вони можуть розгорнути безпроводові мережі, особливо коли в них, ймовірно, будуть залучено дуже багато клієнтів. Навіть в домашньому середовищі 70 метрів для відеопотоку не є чимось незвичайним, хоча кількість завад, які з'являються у споживачів, схоже, має бути нижчою, ніж той обсяг, з яким зіткнулися при проведенні тестів (рис. 3.14).

У сучасному будинку у захопленого технікою ентузіаста ми з великою часткою ймовірності зустрінемо дюжину пристроїв Wi-Fi, підключених до однієї-єдиної точки доступу. Якщо порахувати тільки ноутбуки та смартфони, скільки пристроїв, підключених до безпроводової мережі, ви нарахуєте у своєму місцевому кафе? А уявіть, скільки їх виявиться в шкільному гімнастичному залі при про-

веденні якого-небудь загальношкільного заходу або в залі засідань корпорації на загальних зборах управлінського персоналу. Так що умова підключення 60 ноутбуків до однієї точки доступу, коли всі вони передають дані одночасно в двох напрямках, не таке вже й надумане. Те, як вибрана ТД справляється в таких умовах з навантаженням, не тільки визначає задоволеність кінцевого користувача, але також і те, скільки ТД доведеться купувати організації, щоб витримувати очікувану навантаження в заданій зоні.

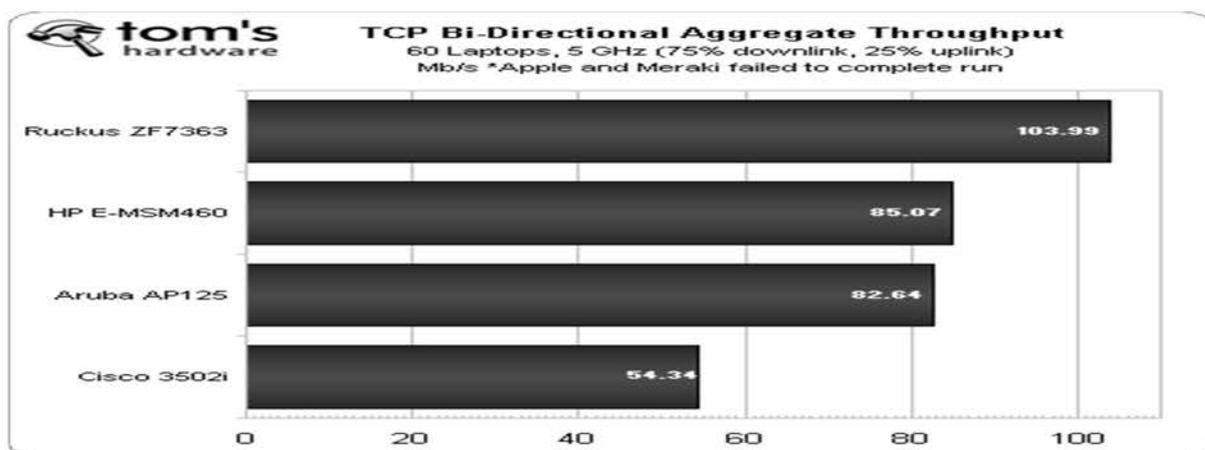


Рисунок 3.14. 60 ноутбуків: сумарна продуктивність

І тут ми в перший раз задумалися про те, яким чином порівнювати наші точки доступу, коли їх "бомбардують" 60 клієнтів-ноутбуків. Намагаючись відобразити реалістичний сценарій використання, ми встановили співвідношення трафіку на рівні 75% для прийому і 25% - для передачі. Тільки чотири точки доступу витримали це випробування.

Беручи до уваги перші отримані результати, отримали, що оптимальна пропускна здатність для одного клієнта знаходиться в діапазоні від 160 до 170 Мбіт/с. З інформації про роботу iPad, яку ви отримаєте далі, ви дізнаєтеся, як збільшується сумарна пропускна спроможність для численних, що діють одночасно клієнтів. Але все ж є й обмеження. Будь задана ТД може переносити тільки такий обсяг трафіку, при якому вона не перевантажиться. Навіть при порівнянні загальної сумарної продуктивності одного ноутбука в порівнянні з десятьма, Ruckus, Aruba і HP показали всього від 10% до 20% приросту загальної пропускної спроможності

для групи ноутбуків. Загальна сумарна продуктивність для моделей Apple і Meraki в дійсності значно впала, причому вже десять клієнтів практично перевантажили дані пристрої.

Шістдесят ноутбуків, безперервно передають тестові файли обсягом 1 Мбайт, - це досить велике навантаження – занадто велике, щоб ТД Apple і Meraki впоралися з ним. Далі було вивчено реальні дані IxChariot, щоб дізнатися, що відбувається насправді.

Одне з якостей, які споживачі шукають у точок доступу або маршрутизаторів, - це стабільність їх з'єднань. З точки зору пропускної спроможності щодо часу, нам не потрібні численні божевільні злети і падіння. Для забезпечення користувачів стабільною швидкістю з'єднання нижня межа діапазону пропускної здатності так само важлива. Тому необхідно відзначити, яким буде вплив на відтворення 10 Мбіт/с відеопотоку, коли середня пропускна здатність 15 Мбіт/с падає на рівень від 3 до 5 Мбіт/с.

І тут стабільність швидкості у ТД Cisco виглядає вражаюче. Проблема лише в тому, що ця швидкість занадто мала. Неймовірно, але моделі Cisco і Apple досягли набагато кращих результатів по продуктивності при передачі, а не при прийомі, без сумніву тому, що передаваного трафіку було набагато менше.

ТД Ruckus показала найбільш однорідні і найвищі результати в обох напрямках передачі даних, а прогонка HP та Aruba також дала вражаючі результати. Таблиця з даними моделі Apple виглядає жалюгідно, немов пристрій зумів витримати тільки одну єдину мить навантаження при прийомі, перш ніж відключитися. Принаймні, точка доступу Meraki, навіть коли для неї все було скінчено, деякий час ще намагалася впоратися із завданням.

П'ять iPad 6: продуктивність одного пристрою і сумарна продуктивність.

Тепер, коли визначено, як ведуть себе ноутбуки в загальній масі, давайте перейдемо до планшетів, які займають все більше місця на ринку, намагаючись замінити собою вищезгадані ноутбуки. Ось де у гру вступає цілий ряд пристроїв iPad і iPad 6 (рис. 3.15).

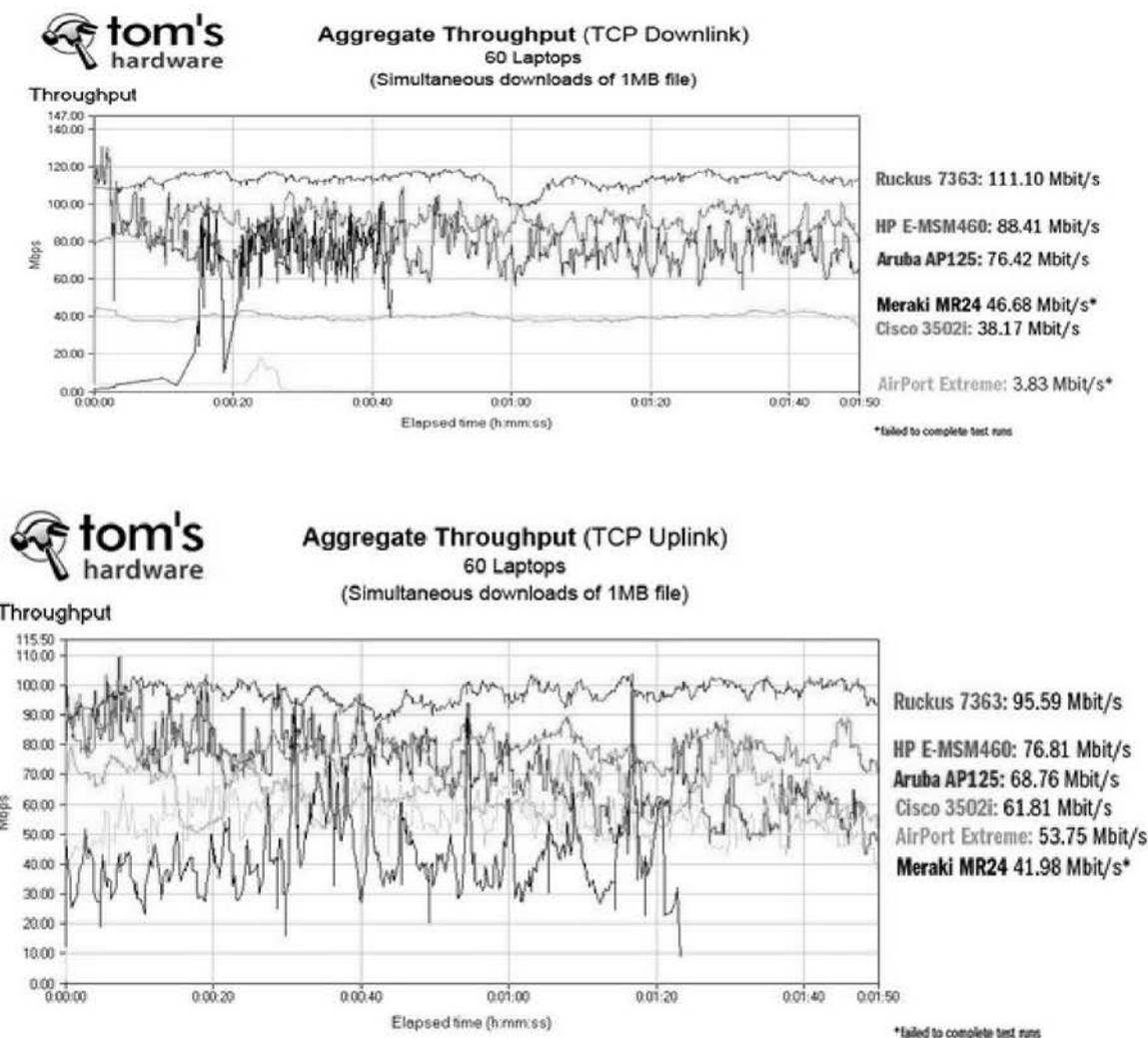


Рисунок 3.15. Шістдесят ноутбуків, безперервно передають тестові файли

Погана новина, що стосується iPad 6, полягає в тому, що це досить повільний клієнт. Хороша - це надійний повільний клієнт навіть у найважчих умовах [16]. Нижчеподані рисунки використовують ту ж схему точок доступу, яку ми використовували на попередній сторінці. Дивно те, що модель Cisco виявилася відстаючою в даній групі приблизно при 10 Мбіт/с, а всі інші потрапили в той самий невеликий проміжок діапазону зі швидкістю передачі даних від 12 до 14 Мбіт/с.

iPad 6 на рівні приблизно 60 Мбіт/с. Натомість дані точки доступу з найкращою продуктивністю в даному тесті змогли подолати позначку всього лише в 40 Мбіт/с. А пристрій Cisco нерішуче зупинився біля позначки 28 Мбіт/с.

Судячи з отриманих нами раніше результатів, навіть ноутбук середнього рівня набагато перевершує iPad 6 по швидкості в безпроводових мережах, частково

завдяки тому, що у нього є три антени замість однієї. Може бути, це і не зовсім чесне порівняння, оскільки очікуване застосування в обох типів пристроїв сильно відрізняється. І все ж, справедливо очікувати, що планшети продовжать підкорювати ринок і працювати з новими, більш ресурсомісткими програмами по мірі їх випуску. Очевидно, здатності до безпроводової передачі даних у планшетів не розвиваються нарівні з поліпшенням процесора і графіки, і це положення необхідно змінити - причому швидко (рис. 3.16).

Повертаючись до теми розділу, відзначимо, що наявність точки доступу, здатної показати найкращий результат при недостатньо продуктивних пристроях, стане ще більш важливим, оскільки ми продовжуємо переходити з більших систем (настільних ПК і ноутбуків) на кишенькові клієнтські пристрої з їх зниженими можливостями передачі даних по безпроводових мережах. Смартфони обладнані навіть меншими одиночними антенами, ніж пристрої iPad. Якщо ви допускаєте ці повільні кишенькові пристрої в свою безпроводову локальну мережу без використання функції рівнодоступності ефірного часу в точці доступу, то ці пристрої "перетягнуть" на себе значну частку пропускної здатності, більш швидких систем.

Середня відстань, пристрої iPad і ноутбуки в сукупності.

Вже відомо, що моделі Apple і Meraki з тріском провалили тест з 60 клієнтами, але, стосовно до решти суперників, що трапиться, коли ви підключите до мережі ще п'ять планшетів iPad 6? Для початку, здається, пристрій HP впоралося із завданням на диво добре. Розчарувавшись в тесті з завадами, точка доступу HP, здається, повернула розташування, коли справа дійшла до здатності витримувати надвисокі навантаження по трафіку чи все ж ні (рис. 3.17)?

Отримавши дані для ноутбуків, у порівнянні з пристроями iPad 6, відкрилася інша картина. Згадайте про порівняння одного ноутбука з пристроєм iPad.

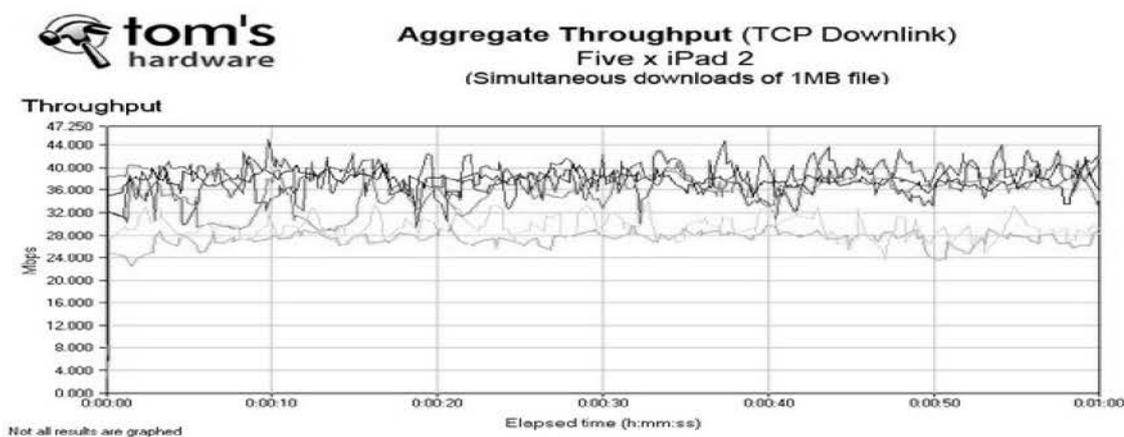
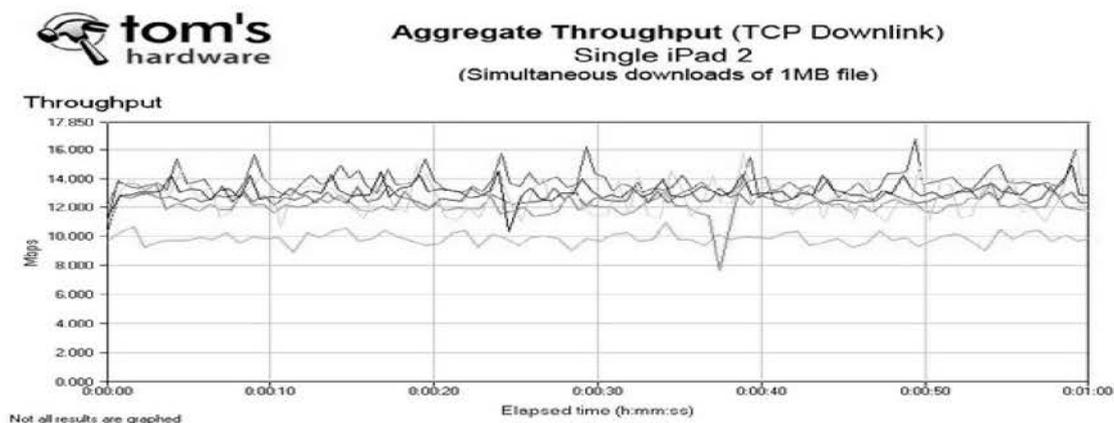


Рисунок 3.16. Результати п'яти iPad 6

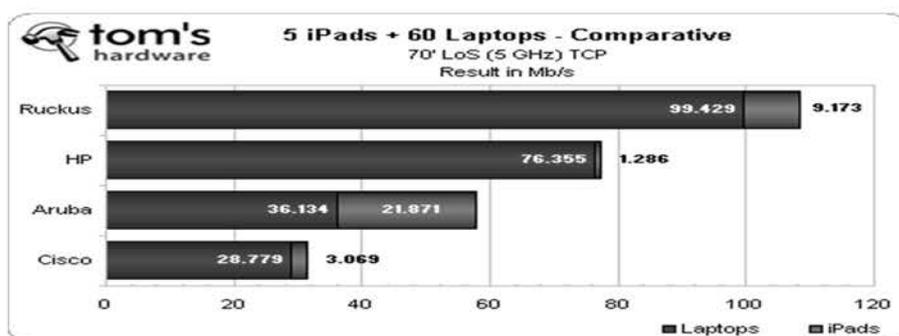


Рисунок 3.17. Середня відстань, пристрої iPad і ноутбуки в сукупності

Було отримано пропускну спроможність ноутбука, приблизно в 7,5 разів перевищила ту ж характеристику у планшета. До того ж, ноутбуків у нас в 12 разів більше, ніж планшетів. Яким має бути вірне співвідношення діапазону частот для ноутбуків і планшетів в даному тесті - 7,5 x, 12x або десь між цими двома значен-

нями? Ідеальною відповіддю може й не бути, але буде безпечніше припустити, що найкращим варіантом буде середина між двома вищезгаданими значеннями. Точки доступу Ruckus і Cisco опинилися якраз в цій зоні, показавши пропускну спроможність ноутбуків на рівні, приблизно в 11 і 9 разів відповідно перевищує результати п'яти підключених планшетів. Однак ТД НР завершила тест з результатом приблизно 60х, залишивши пристроям iPad жалюгідні крихти каналів для роботи. Тут ми не побачили якої не будь рівнодоступності ефірного часу.

Модель Aruba пішла по іншому шляху, надавши пристроям iPad набагато більше часу, ніж вони заслуговували, - понад 1/3 загальної ширини смуги частот. Враховуючи це, ймовірно, нікого не здивує те, що в моделі Aruba за замовчуванням відключена рівнодоступного ефірного часу. Припущено, що це велика помилка з боку компанії Aruba, але мета - використовувати для точки доступу тільки налаштування за замовчуванням, поки результати при запуску не стануть недвозначними. Незважаючи ні на що, це висуває на перший план важливість рівнодоступності ефірного часу в переповненому Wi-Fi-середовищі зі змішаними типами пристроїв.

### **3.4. Результати проведених тестувань**

Докладний аналіз понад 300 тестових прогонів при безлічі змінних має важливе значення для отримання правильного розуміння продуктивності клієнта. Що стосується загальної смуги частот для заданого оточення, ці великі усереднені цифри Мбіт/с, які в більшості оглядів маршрутизаторів і точок доступу, навіть близько не відображають повної картини.

Цей огляд, дозволяє докладніше вивчити продуктивність, сфокусувавшись на двох основних факторах зовнішнього середовища, які мають велике значення для продуктивності Wi-Fi-мереж – завадах і навантаженні на клієнта, – а також численні методи, які можуть застосовувати точки доступу, щоб подолати ці фактори. Частково через те, що завадами в безпроводових мережах так складно управляти, більшість оглядачів ніколи не намагалися зв'язати розглянуті об'єкти з

реальним оточенням. В даних тестах не застосовувалося підстроювання - були просто проведено тестування і записані результати. Тому це має стати сигналом небезпеки для користувача, які розміщують все більше і більше пристроїв Wi-Fi у себе вдома, а також для будь-якого підприємства, що прагне заощадити гроші і купує пристрої для домашнього використання в найближчому комп'ютерному магазині. Рівні конструкції і якості компонентів у продуктів цих двох класів непорівнянні.

У той же час, очевидно, що існують якісні відмінності і серед точок доступу бізнес-класу. Якщо необхідна продуктивність в умовах постійних "нападів" з навколишнього середовища (у вигляді завад), то пристрої Cisco і, в особливості, Ruckus – ось два ваших найкращих варіанти вибору з нашої групи. Те ж твердження застосовне до рівнодоступності ефірного часу та забезпеченню гарантій того, що всі клієнти отримують приблизно рівну частку смуги частот в будь-який заданий час. Що стосується відстаней, то доведеться трохи краще вивчити умови навколишнього середовища і особливі відмітні властивості ваших безпроводових пристроїв.

В оптимальному, найбільш близькому діапазоні, при відсутності або невеликій кількості завад і всього одного клієнта, який прагне досягнути уваги точки доступу, пристрій Meraki MR24 несподівано перетворилося на нашого кращого виконавця, найімовірніше, завдяки своїй конструкції з трьома потоками, добре узгоджується з нашим 3x3: 3 клієнт-адаптером від Intel. Як тільки ми почали збільшувати відстань і кількість завад, ситуація змінилася. Також має значення, чи хочете ви зробити упор на прийом або передачу даних для своєї точки доступу. Моделі Aruba і HP показали себе не те щоб зовсім погано, але і не викликали особливих захоплень, – дальність передачі може змінюватися, згідно з тим, як проведе підстроювання пристроїв.

Гарний Wi-Fi пристрій не той, у якого дуже велика потужність або висока швидкість. Вся справа в розумінні природи радіочастот та прийнятті рішень, які призведуть до збільшення продуктивності. Моделі, які перевершили інших за певними характеристиками в ході даних тестів, не були найбільшими або найдоро-

жчими і навіть не завжди використовували більшу кількість потоків. Пристрій Ruckus зробив все можливе і став лідером в більшості наших тестів, хоча у цієї моделі звичайна схема 2x2:2, однак вона стала лідером саме завдяки своїй схемі і пильній увазі розробників до факторів, необхідним для забезпечення високоякісного безпроводового зв'язку в умовах постійно зростаючих РЧ-завад. Cisco – ще один постачальник з даної групи, який постарався забезпечити ще більший рівень уваги до факторів і управління.

Представник Ruckus зазначав, що його компанія збиралася вести переговори, щонайменше, з одним виробником панелей, зацікавлених ідеєю перенесення технології Ruckus, що стосується антен, на друковані плати, встановлювані за РК-панелі ноутбука, вбудовані прямо в кришку. На жаль, переговори ні до чого не привели, оскільки той виробник відмовився заплатити ціну, у яку компанія Ruckus оцінила свою технологію. Навіть у світі звичайних споживачів, відомо, що був випадок, коли Netgear вивела технологію Ruckus на ринок в одному зі своїх продуктів стандарту 802.11g, але незабаром це починання було забуто по схожих причинах. Люди не розуміють якісну різницю у різних безпроводових рішеннях. Замість цього вони бачать такі величини, як Мбіт/с і час доступу, і це зводить нанівець всі бажання продовжувати дискусію про переваги одних безпроводових пристроїв над іншими.

## ВИСНОВКИ

У магістерській роботі отримані такі теоретичні та практичні результати:

1. В роботі досліджено організацію безпроводових локальних мереж на основі технології WI-FI. Представлено принципи побудови і особливості технології WI-FI. Дається загальний опис, історія її розвитку, класифікація і поточні перспективи розвитку. Розглянуто сімейство протоколів IEEE 802.11x, його фізичний рівень і рівень управління доступом до середовища. Представлено особливості і відмінності різних версій протоколу і доповнень до нього. Приведено основні види топологій мережі - точка-точка, точка-багатоточка та сфери їх застосування.

2. Застосування широкосмугових сигналів DSSS дозволяє:

- збільшити кількість користувачів в системі зв'язку;
- підвищити швидкість передачі інформації по каналах зв'язку;
- поліпшити прийом сигналів в умовах федингу;
- підвищити завадостійку прийому до вузькосмугових перешкод.

3. Застосування широкосмугових сигналів FHSS дозволяє:

■ поліпшити прийом сигналів в умовах багатопроменевого поширення і вузькосмугових перешкод;

■ забезпечити захист передаваної інформації, утрудняючи реєстрацію факту виходу радіостанції в ефір.

3. Багатовимірні сигнали, і зокрема сигнали з модуляцією OFDM, характеризуються низькошвидкісною паралельною передачею цифрових сигналів на декількох несучих, розташованих максимально близько одна до одної, але при цьому виключають виникнення міжсимвольної інтерференції. Така організація радіоканалу забезпечує:

■ високу достовірність інформації, що приймається, в умовах багатопроменевого поширення внаслідок дуже великої тривалості символу в кожному з низькошвидкісних каналів передачі даних;

■ велику спектральну ефективність модуляції через максимально близьке розташування несучих в сигналі;

■ можливість реалізації повністю цифрових високоефективних алгоритмів модуляції-демодуляції, заснованих на перетворенні Фур'є.

4. Бурхливе поширення і вдосконалення мобільних пристроїв зажадало такого ж стрімкого розвитку безпроводової інфраструктури для їх обслуговування. З появою нових концепцій використання мобільних пристроїв на робочому місці, безпроводові мережі перестали бути приємним доповненням і перейшли в ранг обов'язкового корпоративного інструменту.

Процес розгортання безпроводової мережі можна розбити на декілька етапів. На першому проводиться радіообстеження, на другому - установка і налаштування обладнання, на третьому - підсумкове радіообстеження і внесення необхідних змін для забезпечення повної відповідності первинним вимогам. Четвертий етап припускає підтримку роботи системи з можливим впровадженням рішень по моніторингу.

5. В магістерській роботі запропоновано алгоритми розміщення безпроводових точок доступу, що реалізують вдосконалений підхід до оптимізації розміщення безпроводових точок доступу і збільшення ефективності покриття площі компанії сигналом. Результатом є підвищення якості обслуговування в безпроводових мережах.

5. Для проведення досліджень направлених на ефективну технічну реалізацію побудови локальної мережі за технологією Wi-Fi застосовано програмне забезпечення AirMagnet Survey.

6. В даній роботі проведено тестування офісної мережі з використанням ноутбуків Dell і планшетів iPad і iPad 6. Потім було обрано п'ять точок доступу і відповідні контролери для них і протестовано їх за різними сценаріями.

Зроблено висновок про ефективність запропонованих алгоритмів оптимізації розміщення безпроводових точок доступу на етапах проектування.

**ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ**

1. Сайт міжнародного союзу електровз'язку [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.itu.int>. (дата відвідування 28.11.2019)
2. IEEE 802.11n, «Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: Higher-Speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band», 2018.
3. IEEE 802.11ac, «Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: Higher-Speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band», Corrigendum 1, 2018.
7. Князев А.Д., Кечиев Л.П., Петров Б.В. Конструирование радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры с учетом электромагнитной совместимости. М.: Радио и связь, 2016. - 224 с.
8. В.А. Григорьев, О.И. Лагутенко, Ю.А. Распаев, «Сети и системы радиодоступа», М., Эко-Трендз, 2009. - 308 с.
12. IEEE 802.11 Handbook: A Designer's Companion, Second Edition, Softcover, 2005.
13. IEEE Wireless Communication Standards: A Study of 802.11, 802.15, and 802.16, Todor Cooklev, Softcover, 2004.
14. Krishna Sankar, Sri Sundaralingam, Andrew Balinsky, Darrin Miller, «Cisco Wireless LAN Security», Cisco Press, 2004.
15. Jim Geier, «Wireless Networks first-step», Cisco Press, 2004.
16. Jack Unger, «Deploying License-Free Wireless Wide-Area Networks», Cisco Press, 2003.
17. Devin Akin, Jim Geier, «CWAP Certified Wireless Analysis Professional Official Study Guide (Exam PW0-300)», McGraw-Hill/Osborne, 2004.
18. Frank Ohrtman, Konrad Roeder, «Wi-Fi Handbook: Building 802.11b Wireless Networks», McGraw-Hill/Osborne, 2003.
19. Thomas Maufer, «Field Guide to Wireless LANs for Administrators and Power Users», Prentice Hall PTR, 2003.

20. Eric Ouellet, Robert Padjen, Arthur Pfund, Ron Fuller, Tim Blankenship, «Building a Cisco Wireless LAN», Syngress Publishing, Inc., 2002.
21. Christian Barnes, Tony Bautts, Donald Lloyd, Eric Ouellet, Jeffrey Posluns, David M. Zendzian, Neal O'Farrell, «Hack Proofing Your Wireless Network», Syngress Publishing, Inc., 2002.
22. Hata M. Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services // IEEE Trans. Veh. Technol. 1980. - V. 29. - № 3. - P. 317 - 325.
23. Jeffrey Wheat, Randy Hiser, Jackie Tucker, Alicia Neely, Andy McCullough «Designing a Wireless Network», Syngress Publishing, Inc., 2001
24. Брэдли Дапсмор, Тоби Скандьер, «Справочник по телекоммуникационным технологиям», М., Издательский дом «Вильяме», 2004.26. «Руководство по технологиям объединенных сетей», 3-е издание, М., Издательский дом «Вильяме», 2011. - 287 с.
25. И.Шахнович, «Современные технологии беспроводной связи», М., Техносфера, 2014. - 401 с.
26. В.Д.Челышев, «Приемные радиоцентры», М., Связь, 1975. - 198 с.
27. Йоган Шиллер, «Мобильные телекоммуникации», М., Издательский дом «Вильяме», 2012. - 407 с.
28. ПЗ AirMagnet Survey [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.netally.com/products/airmagnet-survey-pro/> (дата відвідування 28.11.2019)
29. Перфилов О.Ю., Тележный Б.Г., Модель оценки вероятностно-временных показателей ЭМС систем подвижной радиосвязи. Электросвязь. 2001. №9. - М.: Радио и связь. С. 41-44.
30. Смирнов Н.И., Сивов В.А., Караваев Ю.А. Методика оценки ЭМС сотовых систем связи с кодовым и временным разделением каналов. Электросвязь. 2001. №4. -М.: Радио и связь. С. 31-33.