

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Факультет електроніки
(повна назва інституту/факультету)

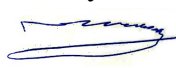
Кафедра акустичних та мультимедійних електронних систем
(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

«На правах рукопису»

УДК 621.39:004.7

Завідувач кафедри

 Сергій НАЙДА
(ініціали, прізвище)

“ 8 ” грудня 2020 р.

Магістерська дисертація

спеціальність 171 «Електроніка»
(код і назва)


на тему: «Особливості функціонування та експлуатаційні
характеристики безпроводових мереж 802.11ах»

Виконав: студент II курсу, групи ДВ-92мп
(шифр групи)

Микитенко Олександр Васильович
(прізвище, ім'я, по батькові) 
(підпис)

Керівник доцент, к.т.н., доцент Лазебний В. С.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) 
(підпис)

Консультант _____
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент доцент кафедри ЕПС, к.т.н., доцент Михайлов С.Р.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ініціали) 
(підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному проекті немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент 
(підпис)

Київ – 2020 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**


Факультет електроніки

Кафедра акустичних та мультимедійних електронних систем

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність
(освітня програма) 171 «Електроніка» («Електронні системи мультимедіа та засоби Інтернету речей»)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

 Сергій.НАЙДА
(ініціали, прізвище)

« 5 » листопада 2020 р.

**ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту**

Микитенку Олександрю Васильовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

- 1 Тема роботи «Особливості функціонування та експлуатаційні характеристики безпроводових мереж IEEE 802.11ax»
- керівник роботи Лазебний Володимир Семенович, к.т.н., доцент.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «05» листопада 2020р. № 3241-с

2 Строк подання студентом дисертації 1 грудня 2020 р.

3. Об'єкт дослідження безпроводові мережі стандарту 802.11ax

4. Предмет дослідження (Вхідні дані – для магістерської дисертації за освітньо-професійною програмою) загальна оцінка стандарту IEEE 802.11ax та його експлуатаційних характеристик на даний момент, принципи роботи пристроїв на його основі.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: розглянути еволюційний процес стандартів лінійки IEEE 802.11, аспекти передавання кадрів та пакетів даних з їх використанням. Порівняння ідеальних характеристик специфікації IEEE 802.11ax з максимально приближеними експлуатаційними характеристиками в реальному житті.


6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу 9-12 слайдів презентації: специфікації IEEE 802.11, методики оцінювання пропускну здатності каналу передавання мережі Wi-Fi, результати моделювання приміщення, висновки.

7. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

8. Дата видачі завдання 16 жовтня 2019 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Пошук інформації за темою дисертації	01.09.2020	виконано
2	Проведення аналітичних досліджень	25.10.2020	виконано
3	Моделювання процесів в мережах IEEE802.11ax.	25.11.2020	виконано
4	Оформлення дисертаційної роботи	01.12.2020	виконано
5	Підготовка та оформлення презентації для доповіді	13.12.2020	виконано 

Студент

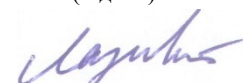


Олександр МИКИТЕНКО

(підпис)

(ініціали, прізвище)

Керівник роботи



Володимир ЛАЗЕБНИЙ

(підпис)

(ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Микитенко О.В. Особливості функціонування та експлуатаційні характеристики безпроводових мереж IEEE 802.11ax : магістерська дис. : 171

Електроніка. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 112 с.

Актуальність роботи. На теперішній час, існує велика кількість стандартів для безпроводових мереж. Головними є так звані стандарти IEEE 802.11. Під час розроблення стандартів IEEE та G, деякі конструкторські очікування не були виконані. Хоча номінальна швидкість передавання даних тільки на 37% вище, ніж в попередньому стандарті IEEE 802.11ac, очікується, що Wi-Fi 6 дозволить в 4 рази збільшити середню пропускну здатність за рахунок більш ефективного використання спектра та поліпшень для щільного розгортання. Тому з дослідженням граничних можливостей стандартів відкривається повний обсяг функцій даного стандарту та ідеї для вдосконалення характеристик безпроводових мережах.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є дослідження специфікації 802.11ax, дослідження методом моделювання досяжних характеристик мережі на даний момент, спираючись на ринок технологічних пристроїв останніх років та виявлення тенденції для прогнозу майбутніх характеристик пристроїв.

Об'єкт дослідження – стандарт IEEE 802.11ax

Предмет дослідження – експлуатаційні характеристики стандарту, які реальному житті можуть сильно відрізнятися від пікових значень.

Методи дослідження – моделювання покриття сигналом приміщення з сильним загасанням сигналу, використовуючи двохдіпазонні точки доступу 2,4 та 5 ГГц.

Ключові слова: безпроводові мережі, експлуатаційні характеристики, електромагнітні завади, моделювання, передавання та приймання даних, IEEE 802.11AX, MU-MIMO, Wi-Fi

SUMMARY

Mikitenko O.V. Features of functioning and operational characteristics of 802.11ax wireless networks: master's dissertation. : 171 Electronics. Kyiv, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2020. 112 p.

Relevance of the work. There are currently a large number of standards for wireless networks. The main ones are the so-called IEEE 802.11 standards. During the development of the standard IEEE and G standards, some design expectations were not met. The expected minimum data rate is only 37% higher than the previous level of IEEE 802.11ac, Wi-Fi 6 is expected to quadruple the average bandwidth for more efficient use of spectrum and improvements for dense deployment. Therefore, the study of the marginal capabilities of standards opens up the full range of functions of this standard and ideas for improving the characteristics of wireless networks.

The purpose and objectives of the study. The aim of the work is to study the 802.11ax specification, to study the method of modeling achievable network characteristics at the moment, based on the market of technological devices of recent years and to identify trends for forecasting future characteristics of devices.

The subject of the study is the performance characteristics of the standard, which in real life can be very different from the peak values.

The object of research is the IEEE 802.11ax standard

The subject of the study - the performance characteristics of the standard, which in real life can be very different from the peak values.

Research methods - simulation of room signal coverage with strong signal attenuation, using dual-band access points 2.4 and 5 GHz.

Keywords: *wireless networks, operational characteristics, electromagnetic plants, modeling, data transmission and reception, IEEE 802.11AX, MU-MIMO, Wi-Fi*

ЗМІСТ

Реферат	4
Summary.....	Помилка! Закладку не визначено.
Перелік скорочень та умовних позначень	8
1 Аналіз технології IEEE 802.11 для передавання.....	12
аудіовізуальної інформації.....	12
1.1 Безпроводові технології передавання аудіовізуальної інформації	12
1.2 Фізичний та канальний рівень стандарту 802.11	13
1.2.1 Підрівень управління доступом до середовища	15
1.2.2 Час передавання пакету на фізичному рівні.....	21
1.3 Технологія Wi-Fi.....	24
1.3.1 Специфікація 802.11b	27
1.3.2 Специфікація 802.11a.....	29
1.3.3 Специфікація 802.11g	31
1.3.4 Специфікація 802.11n	32
1.3.5 Специфікація 802.11ac.....	35
1.3.6 Специфікація 802.11ax.....	38
1.4 Покращення ефективності.....	43
1.5 Особливості передавання аудіовізуальної інформації у форматі високої чіткості.....	45
2 Аналіз методики оцінювання пропускнуої здатності каналу передавання мережі WI-FI	56
2.1 Розрахунок тривалості порожніх часових проміжків, які з’являються під час реалізації віртуального конкурентного вікна	57

2.2	Визначення часу передавання кадру та тривалості колізії	59
2.3	Визначення тривалості передавання кадру даних та квитанції	62
3	Дослідження експлуатаційних характеристик специфікації 802.11ах у різних умовах використання	68
3.1	Вибір методу дослідження характеристик стандарту	68
	IEEE 802.11ах.....	68
3.2	Моделювання розповсюдження Wi-Fi сигналу специфікації 802.11ах у приміщенні з сильним загасанням сигналу	68
3.3	Прогноз можливих характеристик пристроїв специфікації 802.11ах.....	83
4	Рекомендації по розгортанню мережі WI-FI	86
5	Стартап-проект	92
5.1	Основні відомості.....	92
5.2	Технологічний аудит ідеї стартап-проекту.....	93
5.3	Аналіз можливостей ринку для запуску проекту	94
5.4.	Розроблення ринкової стратегії проекту	98
5.5.	Розроблення маркетингової програми стартап-проекту	100
	Висновки	104
	Перелік посилань.....	106

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ACK	– ACKnowledgement
BCC	– Binary Convolutional Coding
CCK	– Complementary Code Keying
CDMA/CA	– Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
CW	– Competition Window
DBPSK	– Binary Phase-Shift Keying
DCF	– Distributed Coordination Function
DIFS	– DCF Interframe Spacing
DQPSK	– Quadrature Phase-Shift Keying
DSSS	– Direct Sequence Spread Spectrum
DVB-T	– Digital Video Broadcasting – Terrestrial
FEC	– Forward Error Correction
FHSS	– Frequency-hopping Spread Spectrum
GI	– Guard Interval
HD	– High Definition
HEW	– High-Efficiency Wireless
HT	– High Throughput
IEEE	– Institute of Electrical and Electronics Engineers
IFS	– Interframe Spacing
ISI	– Inter-Symbol Interference
ISO/OSI	– International Organization for Standardization/Open Systems
Interconnection	
LAN	– Local Area Network
LDPC	– Low-density parity-check code
LLS	– Logical Link Control
MAC	– Media Access Control
MIMO	– Multiple Input Multiple Output
MU-MIMO	– Multiple User Multiple Input Multiple Output

OFDM	– Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
OFDMA	– Orthogonal Frequency-Division Multiple Access
PCF	– Point Coordination Function
PIFS	– PCF Interframe Spacing
PLCP	– Physical Layer Convergence Protocol
PPDU	– Physical Protocol Data Unit
QAM	– Quadrature Amplitude Modulation
RTC/CTC	– Request To Send / Clear To Send
SD	– Standart Definition
SGI	– Short Guard Interval
SIFS	– Short Interframe Spacing
SISO	– Single Input Single Output
TCP	– Transmission Control Protocol
TGax	– Team Group ax
UDP	– User Datagram Protocol
WEP	– Wired Equivalent Privacy
WI-FI	– Wireless Fidelity

ВСТУП

На теперішній час, існує велика кількість стандартів для безпроводових мереж. Головними є так звані стандарти IEEE 802.11. Під час розроблення стандартів IEEE та G, деякі конструкторські очікування не були виконані. Хоча номінальна швидкість передавання даних тільки на 37% вище, ніж в попередньому стандарті IEEE 802.11ac, очікується, що Wi-Fi 6 дозволить в 4 рази збільшити середню пропускну здатність за рахунок більш ефективного використання спектра та поліпшень для щільного розгортання. Тому дослідження граничних можливостей стандартів відкриває повний обсяг функцій даного стандарту та ідеї для вдосконалення характеристик безпроводових мережах є **актуальним завданням**.

Мета і завдання дослідження. *Метою* роботи є дослідження специфікації 802.11ax, дослідження методом моделювання досяжних характеристик мережі на даний момент, спираючись на ринок технологічних пристроїв останніх років та виявлення тенденції для прогнозу майбутніх характеристик пристроїв.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі *завдання*:

- проаналізувати ринок девайсів, які підтримують технологію 802.11ax;
- дослідити розповсюдження сигналу точки доступу на різних діапазонах частот та залежність інших характеристик на результуючу швидкість передавання даних;
- переглянути особливості кожної характеристики специфікації 802.11ax на урізання пікової фізичної швидкості;
- спрогнозувати максимально можливі характеристики мережі на основі раніше проведеного дослідження.

Об'єкт дослідження – стандарт IEEE 802.11ax

Предмет дослідження – експлуатаційні характеристики стандарту, які реальному житті можуть сильно відрізнятися від пікових значень.

Методи дослідження – моделювання покриття сигналом приміщення з сильним загасанням сигналу, використовуючи двохдіапазонні точки доступу 2,4 та 5 ГГц.

Результатом дипломної роботи є визначення граничних характеристик стандарту IEEE 802.11ax для визначення ефективності використання ресурсів та наскільки близько можливо підібратись до задекларованих раніше параметрів.

Практичне значення результатів. Результати проведеної роботи можна використати для покращення характеристик приладів, які підтримують 802.11ax на даний момент та можливого майбутнього підвищення швидкості передавання даних.

1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЇ IEEE 802.11 ДЛЯ ПЕРЕДАВАННЯ АУДІОВІЗУАЛЬНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

1.1 Безпроводові технології передавання аудіовізуальної інформації

Стрімкий розвиток телекомунікаційних технологій сприяв передаванню великої кількості інформації без затримки у реальному часі. Приблизна швидкість передавання даних у проводових мережах досягає 1 терабіта/с [1]. В свою чергу, це допомагає здійснювати обмін великим обсягом даних без затримки.

До Інтернет мережі кожного дня підключають нові пристрої: мобільні телефони, комп'ютери, побутову техніку, пристрої АСК ТП (автоматичних систем керування технологічними процесами) і багато інших. Їх використовують в різних галузях: сільському господарстві, промисловості, у військовій сфері, що викликає необхідність у організації надійних систем управління розподіленими об'єктами та об'єднанням їх в глобальну мережу. Такі тенденції спостерігаються у всьому світі та ведуть до розвитку безпроводових технологій зв'язку. Тому, в результаті цієї тенденції збільшується кількість пристроїв, які мають потребу в доступі до мережі Інтернет завжди і може бути забезпечений безпроводовими мережами.

Межі мереж розширюються безпроводовими технологіями. Це не властиво кабельним з'єднанням, за допомогою яких зручно та швидко встановлювати мережеві з'єднання для багатьох користувачів, кількість яких зростає щодня.

На даний момент, висока пропускна здатність каналу є головною вимогою для передавання аудіовізуальної інформації в реальному часі. Саме тому, мінімальна швидкість передавання даних високочіткісного відеоконтенту без спотворення має бути 8 Мбіт/с і більше. Технології, що забезпечують сприятливу пропускну здатність це:

- технологія Wi-Fi (Wireless Fidelity);
- мережа 3G (third generation);
- мережа 4G (fourth generation);
- технологія DVB-T (Digital Video Broadcasting – Terrestrial).

Найрозповсюдженішим стандартом безпроводової локальної мережі є стандарт IEEE 802.11, так званий Wi-Fi.

1.2 Фізичний та канальний рівень стандарту 802.11

Саме на двох нижніх рівнях моделі ISO/OSI (Open Systems Interconnection Basic Reference Model) працює стандарт IEEE 802.11[2], фізичному та канальному рівнях (рис. 1.1).

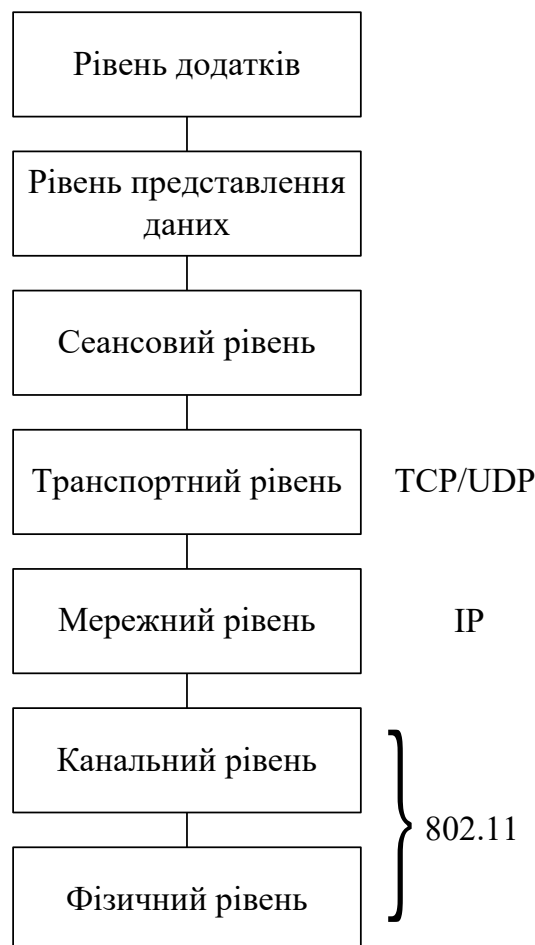


Рисунок 1.1 – Модель ISO/OSI

В свою чергу стек протоколів стандарту IEEE 802.11 відповідають структурі стандартів комітету 802, а саме вони формують фізичний і каналний рівень із підрівнями управління доступом до середовища MAC(Media Access Control) та логічного передавання інформації LLC (Logical Link Control). Стандарт 802.11 визначають двома рівнями моделі ISO/OSI (фізичним рівнем та рівнем MAC), а рівень LLC виконує загальні функції для усіх технологій LAN (рис. 1.2).

Канальний рівень	LLC					
	MAC	PCF				
		DCF				
Фізичний рівень	802.11b	802.11a	802.11g	802.11n	802.11ac	802.11ax
	2,4 ГГц DSSS з CCK до 11 Мбіт/с	5 ГГц 64-QAM до 54 Мбіт/с	2,4 ГГц 64-QAM до 54 Мбіт/с	2,4 та 5 ГГц 64-QAM до 600 Мбіт/с	5 ГГц 256-QAM до 6933 Мбіт/с	2,4 та 5 ГГц 1024-QAM до 9608 Мбіт/с

Рисунок 1.2 – Структура фізичного і каналного рівня моделі ISO/OSI з використанням стеку протоколів IEEE 802.11

В залежності від типу специфікації стандарту 802.11, які існують на фізичному рівні, їх характеристики, такі як метод кодування та частотний діапазон впливають на швидкість передавання даних. Хоча всі варіанти фізичного рівня функціонують по однаковому сценарію рівня MAC, однак кілька часових параметрів рівня MAC залежать від типу використаного фізичного рівня.

1.2.1 Підрівень управління доступом до середовища

Забезпечення рівня MAC у мережах 802.11 рівень MAC здійснюється двома режимами доступу до середовища [2] (рис. 1.2), а саме:

- розподілений DCF (Distributed Coordination Function);
- централізований режим доступу PCF (Point Coordination Function).

Для розподіленого режиму DCF зроблено метод доступу, що застосує технології множинного доступу із прослуховуванням носійної і запобіганням колізій CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance). Завдяки цій технології кожен переданий кадр має підтверджуватися позитивним звітом про доставку, який надсилається станцією призначення. Якщо квитанція не надходить після закінчення тайм-ауту, то станція-відправник вважає це колізією.

Режим доступу DCF вимагає синхронізації станцій. В стандарті 802.11 тільки після моменту закінчення передавання чергового кадру починають відраховуватись часові інтервали. Така процедура не вимагає передавання синхронізуючих сигналів та не обмежує розмір пакета розміром слота.

Передавальна станція має попередньо прослухати середовище. Існує два механізми контролю активності в каналі для стандарту IEEE 802.11 (виявлення носійної) - це фізичний і віртуальний[2]. Перший механізм розроблений на фізичному рівні та визначає рівень сигналу у антені і порівнює його з пороговим значенням. Віртуальний, в свою чергу, також виявляє носійну і цим самим передбачає, що в кадрах даних та в керуючих кадрах АСК та RTS/CTS (Request To Send / Clear To Send) присутня інформація про час, який потрібен для передавання пакета або їх групи та отримання верифікації. Усі мережеві пристрої отримують інформацію про передавання та можуть визначити час резервування каналу, або іншими словами, під час встановлення зв'язку, прилад повідомляє час, який відведений для передавання даних по каналу. Коли станція фіксує, що кадр було передано, вона відраховує інтервал часу, який дорівнює міжкадровому інтервалу (IFS, Inter Frame Space). Якщо канал

залишається вільним після IFS, розпочинається відлік часових слотів (Slot Time), що мають фіксовану тривалість. Для передавання наступних кадрів має виконуватись дві умови: передавати кадри на початку будь-якого зі слотів та вільне для цього середовище. Станція вибирає номер слота, як випадкове ціле число, розподілене в інтервалі $[0, CW]$, де "CW" розшифровується, як "Competition Window" (конкурентне вікно).

Час реалізації конкурентного вікна – це лічильник зворотного відліку, який визначає кількість часових слотів, за яких станція знаходиться у режимі очікування перед відправленням повідомлення.

Мінімальний розмір вікна визначається в 31 тайм-слот. Максимальний розмір вікна визначається в 1023 тайм-слота.

Після кожного успішного прийому кадру, приймач по закінченню SIFS (Short Interframe Space) підтверджує успішний прийом, відправляючи кадр ACK (ACKnowledgement) [3]. Якщо під час передавання даних відбулась колізія, то передавач не отримує кадр ACK і розмір вікна збільшується вдвічі. Для першого передавання розмір вікна дорівнює 31 слоту, для другої спроби - він становить 63, для третьої – 127, для четвертої – 255, для п'ятої – 511, а для всіх інших – 1023 слота. З цього слідує, що збільшення розміру вікна - це динамічний, по міру зростання числа колізій, процес, який використовується для зменшення часових затримок та зниження ймовірності виникнення колізій.

Станція, яка передає кадр, вибирає розмір часового слота із усіченому експоненціального двійкового алгоритму та присвоює це значення таймеру відстрочки. Далі передавач перевіряє, чи середовище вільне. У разі позитивної відповіді таймер відстрочки зменшується на одиницю. У час досягнення таймером нульової позначки починається передавання кадру. Даний механізм забезпечує умови незайнятості всіх слотів.

У разі, коли середовище на початку будь-якого слоту зайняте - таймер зупиняється та станція починає нову процедуру доступу до середовища, змінюючи значення часового слота.

Час поширення сигналу між двома станціями та час передавання

інформації про зайнятість середовища має бути меншим, ніж розмір самого слота. Якщо ця умова виконується, то розподіл станціями часу передавання кожного кадру можливо встановити в момент прослуховування слотів. На розмір слота впливає спосіб кодування сигналу. Наприклад, для методу DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum, розширення спектру методом прямої послідовності) – це 1 мкс, а для методу FHSS (Frequency-hopping Spread Spectrum, псевдовипадкового перелаштування робочої частоти) розмір слота складає 28 мкс [2].

Кількість невдалих спроб відправлення одного кадру обмежена, однак стандарт 802.11 не вказує значення верхньої межі [2]. Досягаючи верхньої межі, кадр відкидається і лічильник колізій повертається в нульову позицію. Також ця процедура відбувається у випадку успішного передавання кадру після кількох невдалих спроб.

У безпроводових мережах ймовірно виникнення ситуація, коли два пристрої не помічають один одного, і в той же самий момент охоплюються третім пристроєм. Цей ефект називають "проблемою прихованого терміналу". Якщо пристрої почнуть передавати кадри одночасно - це може викликати конфліктну ситуацію, в якій кадри не можуть бути відправлені.

Саме для усунення цього ефекту застосовують заходи у режимі доступу DCF. Якщо станція-відправник хоче отримати доступ до середовища, вона повинна надіслати станції призначення короткий службовий кадр RTS (Request To Send, запит на передавання). На даний запит станція призначення зобов'язана відповісти службовим кадром CTS (Clear To Send, вільна для передавання), що слугує дозволом для передавання кадру даних станції-відправника. Також у кадра CTS є обов'язок оповістити станцію, яка знаходиться поза зоною сигналу станції-відправника і зоні досяжності станції-одержувача про зайнятість каналу.

В стандарті 802.11, максимальна довжина кадру даних - 2346 байт, довжина CTS-кадру – 14 байт, а RTS-кадру – 20 байт [2]. Через те, що кадр даних набагато довший за RTS- та CTS-кадри, втрати даних під час колізії RTS-

або CTS-кадрів менші, ніж під час колізії кадрів даних. Обмін RTS- та CTS-кадрами не обов'язковий, якщо навантаженість мережі мала, тому і ймовірність колізії невелика.

Через те, що ми живемо не в ідеальному для передавання пакетів середовищі, існують перешкоди, які можуть вплинути на цілісність великих кадрів даних. Ось чому їх довжину зменшують методом фрагментації. Фрагментація фрейму – функція, яка застосовується на MAC рівні і призначена для підвищення надійності передавання кадрів через безпроводове середовище шляхом поділу кадру на менші фрагменти та передавання кожного із них окремо (рис. 1.3).

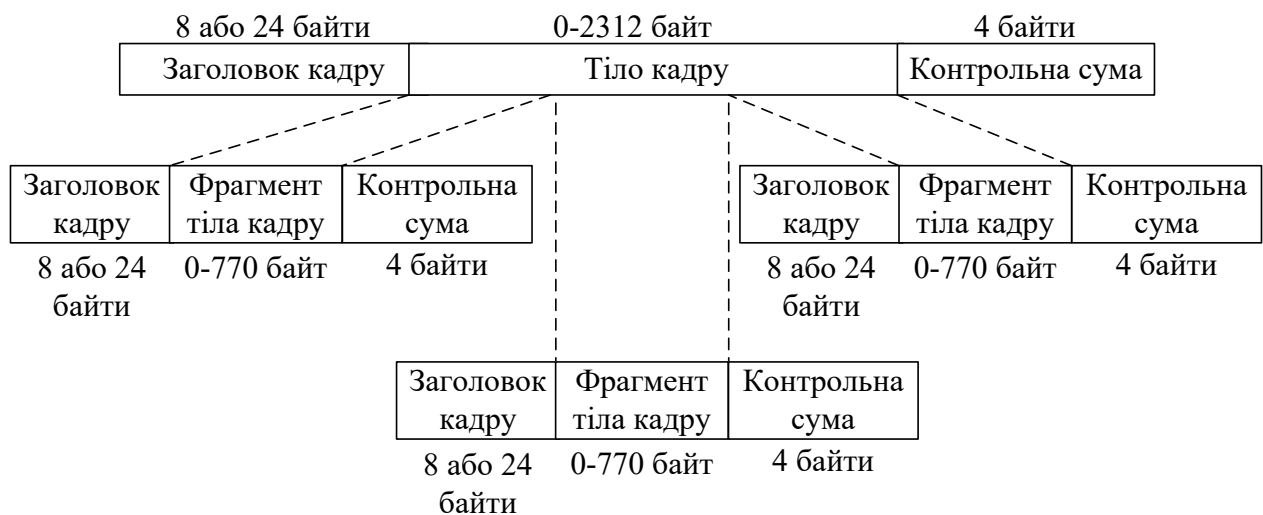


Рисунок 1.3 – Схема фрагментації кадру

Великий кадр даних розділений на декілька менших фрагментів з більшою ймовірністю успішно відправиться через безпроводове середовище з великою кількістю завад. Кожний фрагмент кадру відправляється попередньо отримавши підтвердження, а тому, якщо виникне колізія або фрагмент кадру буде переданий з помилкою, то час на повторне його передавання буде менше, ніж час передавання всього кадру одразу. Це збільшує пропускну здатність середовища.

Адміністратор мережі може задавати розмір фрагмента. Фрагментація використовується у випадку передавання кадру на одну станцію-приймача, в

той час як, широкомовні і мультикаст кадри передаються лише в повному форматі. Фрагменти кадру передаються пакетом, з повторенням механізму доступу до середовища DCF.

З використанням фрагментації, можливо підвищити надійність надсилання кадрів у безпроводових локальних мережах, але це призводить до того, що збільшується "накладних витрат" MAC-протоколу стандарту 802.11. Усі фрагменти кадру містять інформацію заголовку 802.11 MAC, а також вимагають передавання особливого кадру підтвердження. Така процедура знижує продуктивність безпроводової станції та збільшує число службових сигналів MAC-протоколу.

Наявність станції в мережі, котра виконує роль точки доступу, розставляє пріоритет обслуговування трафіку та може У тому випадку, коли в мережі є станція, що виконує функції точки доступу, може застосовуватися централізований режим доступу PCF.

Як і в режимі DCF, централізований режим PCF використовує механізм RTS/CTS.

В мережах 802.11, режим доступу PCF співіснує з режимом DCF. Обидва режими використовують три типи міжкадрових інтервалів (рис. 1.4). Розподіл часових інтервалів в процесі доступу до передавального каналу, коли середовище зайнято зображено на рис. 1.4. Якщо середовище вільне після інтервалу DIFS, то станція отримує доступ до середовища передавання.

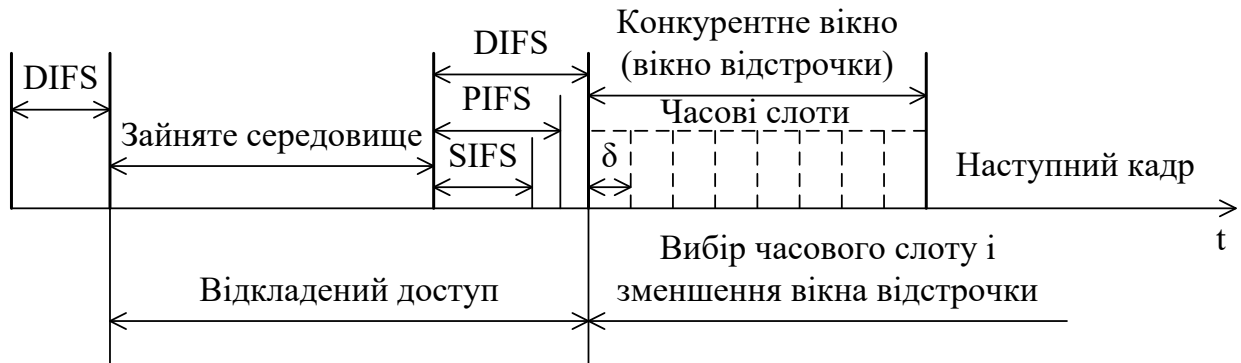


Рисунок 1.4 – Розподіл часових інтервалів у процесі доступу до каналу за стандартом 802.11 у випадку зайнятого середовища

Після звільнення середовища станція відраховує часові проміжки, зрівнюючи їх з трьома значеннями[2]:

- короткий міжкадровий інтервал (Short IFS, SIFS);
- міжкадровий інтервал режиму PCF (PIFS);
- міжкадровий інтервал режиму DCF (DIFS).

Інтервал DIFS в режимі DCF виступає в якості міжкадрового інтервалу IFS. Він має найнижчий пріоритет за свою найдовшу тривалість з трьох можливих. Якщо середовище вільне після інтервалу DIFS, то станція отримує доступ до середовища передавання.

Самий короткий міжкадровий інтервал SIFS виконує функцію для першочергової перевірки квитанцій або кадрів CTS, які продовжують чи завершують передавання кадру.

Міжкадровий інтервал PIFS довший, ніж SIFS, але коротший, ніж DIFS. Проміжок PIFS призначений для передавання спеціального кадру, який оголошує станціям про початок контрольованого періоду. Після отримання цього кадру, станції, які використовують алгоритм DCF для захоплення середовища зобов'язані чекати закінчення контрольованого періоду. Тривалість даного періоду оголошується в самому кадрі. Однак, період може закінчитися швидше у зв'язку з відсутністю трафіку, чутливого до затримок. За такої розв'язки станція надсилає службовий кадр, після обробки якого починається інтервал DIFS та передавання продовжується за алгоритмом режиму DCF.

1.2.2 Час передавання пакету на фізичному рівні

Послідовність OFDM-символів (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) у вигляді преамбули на фізичному рівні формує пакет, заголовок (PLCP-заголовок, Physical Layer Convergence Protocol) та поля даних. Блок даних має певну довжину, котрий завершується контрольними бітами та бітами заповнення (Pad), які призначені для вирівнювання довжини пакета. Всі поля, крім поля SERVICE, можна передати одним OFDM-символом з найменшою можливою швидкістю. Наприклад, номінальне значення швидкості для модуляції BPSK дорівнює 6 Мбіт/с. Інша частина заголовка та поле даних передається зі швидкістю, яка вказана в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Залежність швидкості передавання даних від методу модуляції

Індекс MCS	Кількість просторових потоків	Метод модуляції	Швидкість кодування	Швидкість передавання даних, МБіт/с							
				20 МГц		40 МГц		80 МГц		160 МГц	
				800 нс	400 нс	800 нс	400 нс	800 нс	400 нс	800 нс	400 нс
0	1	BPSK	1/2	6,5	7,2	13,5	15	29,3	32,5	58,5	65
1	1	QPSK	1/2	13	14,4	27	30	58,5	65	117	130
2	1	QPSK	3/4	19,5	21,7	40,5	45	87,8	97,5	175,5	195
3	1	16-QAM	1/2	26	28,9	54	60	117	130	234	260
4	1	16-QAM	3/4	39	43,3	81	90	175,5	195	351	390
5	1	64-QAM	2/3	52	57,8	108	120	234	260	468	520
6	1	64-QAM	3/4	58,5	65	121,5	135	263,3	295,5	526,5	585
7	1	64-QAM	5/6	65	72,2	135	150	292,5	325	585	650
8	1	256-QAM	3/4	78	86,7	162	180	351	390	702	780
9	1	256-QAM	5/6	N/A	N/A	180	200	390	433,3	780	866,7
10	1	1024-QAM	3/4	122	129	244	258	510	540	1021	1081
11	1	1024-QAM	5/6	135	143	271	287	567	600	1134	1201
0	2	BPSK	1/2	13	14,4	27	30	58,5	65	117	130
1	2	QPSK	1/2	26	28,9	54	60	117	130	234	260
2	2	QPSK	3/4	39	43,3	81	90	175,5	195	351	390
3	2	16-QAM	1/2	52	57,8	108	120	234	260	468	520
4	2	16-QAM	3/4	78	86,7	162	180	351	390	702	780
5	2	64-QAM	2/3	104	115,6	216	240	468	520	936	1040
6	2	64-QAM	3/4	117	130,6	243	270	526,5	585	1053	1170
7	2	64-QAM	5/6	130	144,4	270	300	585	650	1170	1300
8	2	256-QAM	3/4	156	173,3	324	360	702	780	1404	1560
9	2	256-QAM	5/6	N/A	N/A	360	400	780	866,7	1560	1733,4
10	2	1024-QAM	5/6	N/A	N/A	396	450	812	935	1638	1985

Продовження таблиці 1.1 – Залежність швидкості передавання даних від методу модуляції

Індекс MCS	Кількість просторових потоків	Метод модуляції	Швидкість кодування	Швидкість передавання даних, МБіт/с							
				20 МГц		40 МГц		80 МГц		160 МГц	
				800 нс	400 нс	800 нс	400 нс	800 нс	400 нс	800 нс	400 нс
0	3	BPSK	1/2	19,5	21,7	40,5	45	87,8	97,5	175,5	195
1	3	QPSK	1/2	39	43,3	81	90	175,5	195	351	390
2	3	QPSK	3/4	58,5	65	121,5	135	263,3	292,5	526,5	585
3	3	16-QAM	1/2	78	86,7	162	180	351	390	702	780
4	3	16-QAM	3/4	117	130	243	270	526,5	585	1053	1170
5	3	64-QAM	2/3	156	173,3	324	360	702	780	1404	1560
6	3	64-QAM	3/4	175,5	195	364,5	405	N/A	N/A	1579,5	1755
7	3	64-QAM	5/6	195	216,7	405	450	877,5	975	1755	1950
8	3	256-QAM	3/4	234	260	486	540	1053	1170	2106	2340
9	3	256-QAM	5/6	260	288,9	540	600	1170	1300	2340	2600
10	3	1024-QAM	5/6	280	336	593	744	1400	1450	2506	2870
0	4	BPSK	1/2	26	28,8	54	60	117,2	130	234	260
1	4	QPSK	1/2	52	57,6	108	120	234	260	468	520
2	4	QPSK	3/4	78	86,8	162	180	351,2	390	702	780
3	4	16-QAM	1/2	104	115,6	216	240	468	520	936	1040
4	4	16-QAM	3/4	156	173,2	324	360	702	780	1404	1560
5	4	64-QAM	2/3	208	231,2	432	480	936	1040	1872	2080
6	4	64-QAM	3/4	234	260	486	540	1053,2	1170	2106	2340
7	4	64-QAM	5/6	260	288,8	540	600	1170	1300	2340	2600
8	4	256-QAM	3/4	312	346,8	648	720	1404	1560	2808	3120
9	4	256-QAM	5/6	N/A	N/A	720	800	1560	1733,2	3120	3466,8
10	4	1024-QAM	5/6	N/A	N/A	746	890	1630	1950	3470	3986

1.3 Технологія Wi-Fi

Wi-Fi (Wireless Fidelity) – це загальноживана назва для стандарту IEEE 802.11, торговельна марка Wi-Fi Alliance і передавання цифрових потоків даних з використанням радіоканалів. Технологія стандарту IEEE 802.11n є найпоширенішою специфікацією [5].

Існує два основних типи з'єднання Ad-Hoc (рис.1.5) та Infrastructure (рис.1.6).

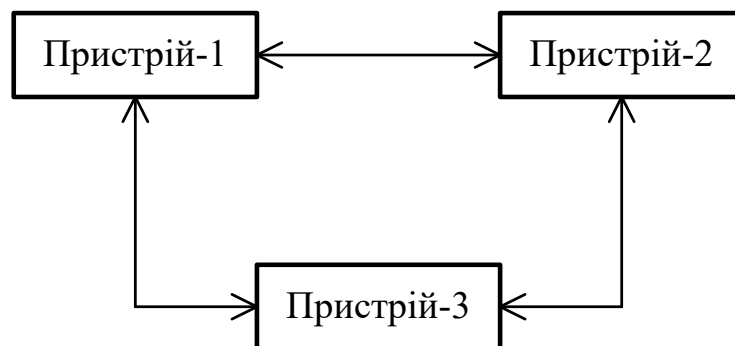


Рисунок 1.5 – Схема з'єднання Ad-Hoc в мережі Wi-Fi

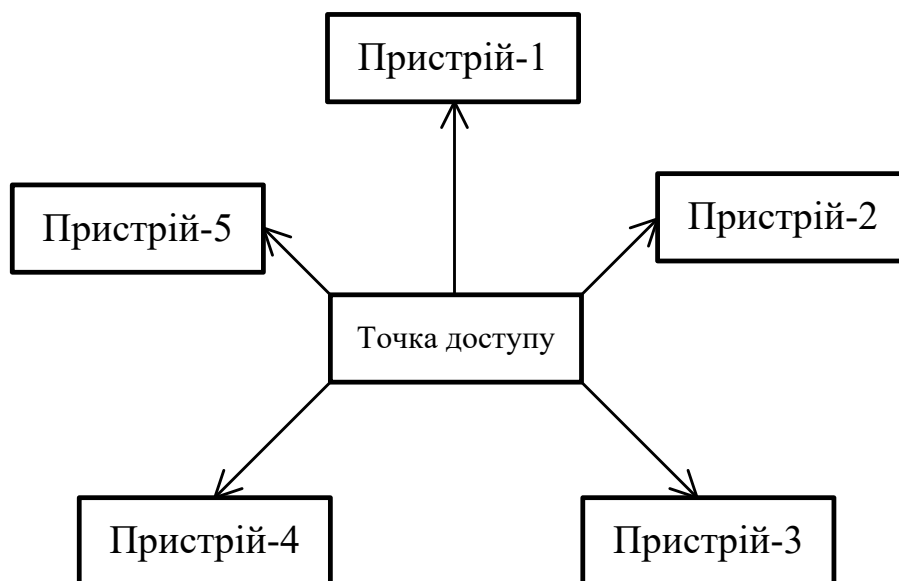


Рисунок 1.6 – Схема з'єднання Infrastructure в мережі Wi-Fi

З'єднання Ad-Hoc використовують для простого з'єднання комп'ютерів за методом "точка-точка". Також, воно ідеальне для організації бюджетної мережі через мінімальну кількість обладнання. Мережа Ad-Hoc характеризується такими якостями, як гнучкість структури, швидкість розгортання, живучість та мобільність. Реальна швидкість обміну даними дорівнює $11/N$ Мбіт/с, де N – число пристроїв у мережі [6] та при збільшенні відстані між пристроями виникає стрімке падіння швидкість передавання (максимальна дальність – 100 метрів).

Мінімальна швидкість, яка потрібна для передавання відеоконтенту в реальному часі з використанням режиму Ad-Hoc за умови, коли в радіусі 100 м підключилось максимум 3 користувачі.

На відмінну від режиму Ad-Hoc, Infrastructure потребує додаткового обладнання, а саме точки доступу, яка може функціонувати, як комутатор або як маршрутизатор для налагодження постійного з'єднання мереж між користувачами та розподілом доступу до Інтернету.

З можливістю підключення проводу Ethernet, точка доступу підключається до проводової чи змішаної мережі – до мережної інфраструктури. Швидкість обміну даних досягає 54 Мбіт/с [5], однак сигнал Wi-Fi, який має слабку завадостійкість знижується через проходження через фізичні перешкоди. Використовуючи потужні вузьконаправлені антени або просте збільшення потужності точки доступу можливо нівелювати проблему з загасаючим сигналом.

Основні параметри стандартів сімейства IEEE 802.11, існуючі на даний момент подано в табл. 1.2 [7].

Таблиця 1.2 – Порівняння основних характеристик специфікацій стандарту IEEE 802.11

Версія стандарту	802.11	802.11b	802.11a	802.11g	802.11n	802.11ac	802.11ax
Рік ратифікації	1997	1999	1999	2003	2009	2014	2017-2019
Робоча частота, ГГц	2,4/IR	2,4	5	2,4	2,4/5	5	2,4/5
Ширина смуги каналу зв'язку, МГц	20	20	20	20	20/40	20/40/80/160	20/40/80/160
Пікова фізична швидкість (PHY), Мбіт/с	2	11	54	54	600	6933	9608
Макс. кількість SU-потоків (SU-Streams)	1	1	1	1	4	8	8
Макс. кількість MU-потоків (MU-Streams)	–	–	–	–	–	4	8
Технологія передавання даних	DSSS, FHSS	DSSS, CCK	OFDM	OFDM	OFDM	OFDM	OFDM, OFDMA
Тип модуляції, швидкість кодування	DQPSKD	CCK	64-QAM, 3/4	64-QAM, 3/4	64-QAM, 5/6	256-QAM, 5/6	1024- QAM, 5/6
Макс. кількість підносійних OFDM	–	–	64	64	128	512	2048
Рознесення носійних, кГц	–	–	312,5	312,5	312,5	312,5	78,125

1.3.1 Специфікація 802.11b

Згідно табл. 1.2, робоча центральна частота стандарту 802.11b становить 2,4 ГГц та максимальною швидкістю передавання даних до 22 Мбіт/с. Застосований метод розширення спектру в даній специфікації – DSSS [8], що застосовує пряму послідовність.

Основні параметри специфікації 802.11b наведені у табл. 1.3 [9].

Таблиця 1.3 – Основні параметри стандарту IEEE 802.11b

Параметр	Значення параметру	Метод модуляції
Діапазон частот, МГц	2400...2483,5	
Метод розширення спектру	DSSS	
Швидкість передавання даних в радіоканалі, Мбіт/с	1	DBPSK
	2	DQPSK
	5,5	ССК
	11	ССК
	22	PBCC
Максимальна потужність передавача, дБм	до 20 (100 мВт)	

Із використанням різних видів модуляції і технологій досягли підтримки різних режимів швидкостей для передавання даних. Швидкість 1 Мбіт/с підтримується з використанням методу DBPSK (Differential Binary Phase Shift Keying, диференційна двійкова фазова маніпуляція) [10], швидкість 2 Мбіт/с – методом DQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying, диференційна квадратурна фазова маніпуляція) [10].

Для швидкостей 5,5 і 11 Мбіт/с використовують схему модуляції ССК (Complementary Code Keying, метод кодування, що використовує комплементарні коди). Це дозволяє кодувати 8 біт у вигляді одного символу. Характеристика символної швидкості, яка відповідає швидкості 11 Мбіт/с дорівнює 1,385 мегасимвол в секунду ($11/8 = 1,385$). Для швидкості 5,5 Мбіт/с в одному символі кодують 4 біти. Також вдаються до корекції помилок методом FEC (Forward Error Correction, упереджувальна корекція помилок).

Точка доступу, яка працює за специфікацією 802.11b з сильними завадами та слабким сигналом використовує динамічний зсув швидкості, котрий в залежності від рівня сигналу та наявності завад допомагає змінювати швидкість передавання даних. Під час зменшення значення відношення сигнал/шум швидкість передавання даних автоматично знижується до 5,5, 2 чи 1 Мбіт/с [11]. У випадку нормалізації відношення сигнал/шум пристрій працює у нормального режиму роботи з більшою швидкістю.

Контроль доступу розроблено на MAC-рівні і з використанням шифрування даних через WEP (Wired Equivalent Privacy, алгоритм для забезпечення контролю доступу мереж Wi-Fi) [11]. Ця технологія безпечно передає пакет даних, однак не забезпечує конфіденційність заголовків фізичного рівня. Через це інші станції у мережі можуть маніпулювати даними, необхідними для управління мережею.

У всьому світі різко зросла кількість безпроводових пристроїв з розвитком технологій LAN [12]. Дана тенденція спричинила проблему взаємних завад та перевантаженості частотного діапазону 2,4 ГГц. Робота різноманітних пристроїв викликає звади у функціонуванні обладнання Wi-Fi.

Для стандарту 802.11, максимальна швидкість передавання даних дорівнює сумі бітових швидкостей всіх каналів, через що теоретична швидкість не сходиться з реальною швидкістю передавання даних. пропускна здатність каналу може знижуватись, коли різні пристрої

стандарту 802.11 користуються одними каналами або функціонують в зоні потужних радіозавод.

1.3.2 Специфікація 802.11a

Стандарт 802.11b, який було описано вище, забезпечував максимальну швидкість передавання даних до 11 Мбіт/с у діапазоні 2,4...2,4835 ГГц. Він не потребує зарезервованій і ліцензування для використання в медицині, промисловості або науці, але використання технології DSSS на частотах близьких до 2,4 ГГц може викликати проблеми через завади, які створюють інші пристрої [13].

У сучасних реаліях великі обсяги переданих даних, які передають по мережі вимагають більшої пропускної здатності, ніж показники стандарту 802.11b. Тому в специфікації 802.11a передавання даних досягає швидкості до 54 Мбіт/сек в діапазонах 5,15...5,350 ГГц та 5,725...5,825 ГГц [14].

Список характеристик специфікації 802.11a [15]:

- в порівнянні з 802.11b має вищу швидкість передавання даних (transfer);
- використовує частотні канали в спектрі 5 ГГц, що не є несумісним з 802.11b;
- використовує радіочастотну технологію OFDM;
- методи модуляції: BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM;
- метод кодування: Convolution Coding;
- швидкості передачі даних в каналі: 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54 Мбіт/с.

Завдяки ширині каналу 20 МГц, який передбачений специфікацією 802.11a організовується високошвидкісне передавання даних. Однак, можуть викликати ряд проблем в організації високошвидкісного передавання даних на частоті понад 5 ГГц та обмеженню потужності передавання.

Протокол 802.11a використовує зворотне перетворення Фур'є з вікном в 64 частотних підканалів. Якщо ширина кожного з 12 каналів в стандарті 802.11a складає 20 МГц, тоді кожен підканал має ширину 312,5 кГц [10]. Із загальної кількості ортогональних частотних підканалів використовуються лише 48 або 52 підканали для передавання даних (Data Tones). Решта ж каналів використовується для обміну службовою інформацією (Pilot Tones).

Поєднання високої швидкості та ефекту протиставлення багатопробеневого розповсюдження – одина з головних переваг методу OFDM. Ця технологія не нівелює багатопробеневе поширення, однак створює передумови, щоб усунути ефект міжсимвольної інтерференції. Негативною особливістю технології OFDM є захисний інтервалу (Guard Interval, GI) – він має циклічний характер для закінчення символу, який відраховують на початку передавання символу. Тому він зменшую корисну швидкість передавання через збільшення часу для передавання символу. Однак, використання захисного інтервалу робить тимчасові паузи між окремими символами, що запобігає міжсимвольну інтерференцію.

Символ OFDM в специфікації 802.11a має тривалість 3,2 мкс, а захисний інтервал складає четверту частину тривалості самого символу – тобто 0,8 мкс. Отже, тривалість символу із захисним інтервалом дорівнює 4 мкс [14].

Для протокола 802.11a використовується двійковий метод (BDPSK) або квадратурна (QDPSK) відносна фазова модуляція.

Квадратурна амплітудна модуляція QAM (Called Quadrature Amplitude Modulation) використовується для передавання даних на вищих швидкостях. Для даного типу модуляції інформація кодується зміною фази та амплітуди сигналу. Також використовують модуляцію порядку 16-QAM та 64-QAM. Перший має 4 біта в одному символі – це означає, що існує 16 різних станів сигналу. Другий має вже 64 стани сигналу, які можна закодувати послідовність в 6 бітів для одного символу. Модуляція модуляція 64-QAM

застосовується на швидкостях 48 та 54 Мбіт/с, а 16-QAM – на швидкостях 24 та 36 Мбіт/с.

Основними ж швидкостями для специфікації 802.11a є 6, 12 і 24 Мбіт/с, а усі інші є опціональними.

1.3.3 Специфікація 802.11g

Саме на фізичному рівні стандарту 802.11 визначають основні можливі швидкості з'єднання, методи модуляції і фізичного кодування в процесі передавання даних.

В стандарта IEEE 802.11g закладена велика, в порівнянні з попередніми стандартами, кількість швидкостей з'єднання: 1; 2; 5,5; 6; 9; 11; 12; 18; 22; 24; 33; 36; 48 та 54 Мбіт/с [16]. Тому різні швидкості з'єднання використовують різні методи модуляції сигналу.

Характеристики специфікації 802.11g [15]:

- використання радіочастотних технологій: DSSS і OFDM;
- використання частотних каналів в діапазоні 2,4 ГГц. Протокол сумісний з 802.11b;
- застосування кодування: Barker 11 і ССК.
- максимальні швидкості передавання даних в каналі: 1, 2, 5.5, 11 Мбіт/с у випадку використання DSSS та 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54 Мбіт/с з застосуванням OFDM;
- використання типів модуляції: DBPSK і DQPSK.

Беручи приклад зі стандартів 802.11a та 802.11b, в 802.11g використовують технології ССК та OFDM відповідно. Також додатково застосовують технологію згорткового кодування PBCC (Packet Binary Convolutional Coding, двійкове пакетне згорткове кодування) [17].

За для конкурування з проводовими мережами, швидкість передавання даних у безпроводових мережах повинна бути високою для передавання

великих обсягів інформації без затримки у часі та задовольняти потреби користувачів. Оскільки частотний діапазон передавання обмежений через збільшення ширини спектру – це є негативним наслідком під час зростання швидкості передавання даних.

В ідеальних умовах за відсутності перешкод та радіочастотних завад, покриття мережі 802.11g є більш швидкісними та здатні передавати інформацію на більші відстані. Якщо порівнювати три специфікації, які ми вже розглянули, то можна зробити висновок, що технологія 802.11g взяла від своїх попередників найкраще, а саме: швидкісні характеристики від стандарту IEEE 802.11a та зону покриття від стандарту IEEE 802.11b. Якщо середній радіус дії мережі специфікації 802.11a приблизно дорівнює 50 м, то для специфікацій 802.11b та 802.11g – близько 100 м [17].

1.3.4 Специфікація 802.11n

Організацією IEEE специфікація 802.11n для мереж Wi-Fi було прийнято 11 вересня 2009 року [18].

Характеристики специфікації 802.11n [19]:

- збільшилась швидкості передавання даних в порівнянні з попередніми специфікаціями;
- розширилась зона покриття мережі;
- збільшилась надійності передавання кадрів даних;
- збільшення пропускної здатності каналу передавання.

Зрівнюючи зі стандартом 802.11g, стандарт 802.11n було значно вдосконалено.

Специфікація 802.11n працює на одному із двох частотних діапазонів 2,4 чи 5 ГГц [20].

Зробивши вдосконалену обробку сигналу та модуляції на фізичному рівні (PHY) та реалізувавши більш ефективне використання доступної

пропускної здатності на каналному підрівні управління доступом до середовища (MAC), дозволило збільшити теоретичну максимальну швидкість передавання даних до 600 Мбіт/с, що в 10 разів більше, ніж 54 Мбіт/с стандартів 802.11a та 802.11g.

Однією з багатьох переваг стандарту 802.11n – це підтримка технології MIMO (Multiple-Input Multiple-Output, Багатоканальний вхід/вихід).

З використанням технології MIMO можливо одночасно приймати та передавати декілька потоків даних за допомогою кількох антен одночасно.

Специфікація 802.11n підтримує багато антенних конфігурацій "M×N" (де M – це кількість передавальних антен (T) та N – це кількість приймальних антен (R)). Вони мають діапазон від "1×1" до "4×4". Самими поширеними на сьогодні є конфігурації "3×3" або "2×3" [21].

Максимальна швидкість передавання даних збільшується зі збільшенням кількості антен, які використовують пристрій 802.11n для передавання та приймання даних одночасно.

Для різних антенних конфігурацій швидкість передавання буде різною. Наприклад, конфігурації "2×3" та "1×2" забезпечують швидкість до 300 Мбіт/с, що є найнижчим показником для цієї специфікації, конфігурація "3×3", яка використовує модуляцію 64-QAM досягає швидкості до 450 Мбіт/с, і на кінець конфігурація "4×4" з використанням модуляції 64-QAM забезпечує максимальну швидкість до 600 Мбіт/с.

Також особливістю специфікації 802.11n - це більша, в порівнянні з іншими стандартами, ширини каналу – 40 МГц.

Уникання перекриття каналів для забезпечення якості мережі є головним завданням безпроводових точок доступу, які працюють в смузі частот 2,4 ГГц.

Основна кількість безпроводових локальних мереж специфікації 802.11n користується каналами смуги пропускання 40 МГц тільки у діапазоні частот 5 ГГц. Тому мережі, які користуються смугою частот 2,4 ГГц, а саме 802.11n, не мають проблем пересічних каналів.

Пристрої специфікації 802.11n можуть використовувати ширину каналу 20 чи 40 МГц у будь-якому частотному діапазоні – 2,4 або 5 ГГц. Під час використання ширини каналу 40 МГц виникає подвійне збільшення пропускної здатності у порівнянні з 20 МГц.

Для смуги частот 5 ГГц існує 19 каналів, які не пересікаються один з одним та більш придатні для застосування у приладах стандарту IEEE 802.11n, які розвивають максимальну швидкість передавання даних. Сигнали розподіляються не перекриваючи канали одне одного із шириною смуги 40 МГц.

Але для використання смуги 40 МГц пристроями 802.11n, можливі завади з боку існуючих точок доступу 802.11b/g. Це призводить до зниження продуктивності усієї мережі.

У специфікації 802.11n існує три режими роботи: HT (High Throughput, режим з високою пропускною здатністю), Non-HT та HT Mixed.

Тип модуляції та швидкість кодування показують, як дані будуть передаватися у радіоефір. Для прикладу, модуляція BPSK була використана в першому стандарті 802.11, а модуляцію QAM запровадили в специфікації 802.11a. Тому, не зважаючи на більш продвинуті методи модуляції та кодування, які є ефективнішими та підтримують більш високі швидкості передавання даних, сумісність з застарілими пристроями на основі їх специфікацій зберігається.

Точка доступу та безпроводовий адаптер мають підтримувати два просторових потоки (Spatial Streams) та подвоєну ширину каналу 40 МГц, щоб досягти максимальної швидкості з'єднання 300 Мбіт/с.

Інтервал часу між переданими символами визначає короткий захисний інтервал SGI (Short Guard Interval). Він допомагає у процесі приймання даних нівелювати затримки через міжсимвольні завади (ISI, Inter-Symbol Interference) та уникнути відбиття (відображення звукових хвиль) [20]. В порівнянні з пристроями стандарту 802.11b/g, які мають захисний інтервал 800 нс, для пристроїв 802.11n ця пауза складає всього 400 нс. Такий короткий

захисний інтервал може підвищити швидкість передавання даних до 11 відсотків.

Тип модуляції та схеми кодування, котрі будуть використовуватися для всіх потоків визначаються значенням MCS від 0 до 31, а змішані комбінації, що можуть бути використані під час модуляції від двох до чотирьох просторових потоків визначаються значення MCS від 32 до 77.

1.3.5 Специфікація 802.11ac

Через 4 роки після затвердження стандарту 802.11n, було впроваджено нову специфікацію стандарту Wi-Fi – 802.11ac. Теоретично, швидкість передавання даних мережі може досягати 866 МБіт/с у каналі 160 МГц. Було виконано наступні зміни у специфікації [23]:

- збільшено швидкість та продуктивність безпроводової мережі передавання даних;
- безпроводовий канал зв'язку функціонує в діапазоні частот 5 ГГц;
- збільшено ширину каналу;
- використано ефективніші види модуляції сигналу;
- підтримка технології формування спрямованого сигналу Beamforming;
- застосовано технологія множинного доступу MU-MIMO (Multi-User Multiple-Input Multiple-Output).

Реалізоване одночасне передавання декількох незалежних потоків даних через впровадження, які було зроблено для стандарту 802.11ac [24].

Також, це забезпечує вільний радіоефір, стабільніше та швидше з'єднання, тому що специфікація 802.11ac працює тільки в діапазоні 5 ГГц.

Швидкість передавання даних збільшилась за рахунок більшої ширини каналу, що у стандарті 802.11ac складає 80 МГц, а також числа просторових потоків і підтримку вищого порядку модуляції 256-QAM [25].

У порівнянні з попередньою специфікацією 802.11n, ширина каналу передавання збільшилась в 2 рази, що покращила пропускну спроможність мережі.

В стандарті 802.11ac також збільшено кількість просторових потоків з 4 до 8, порівнюючи зі специфікацією 802.11n. Використовуючи роздільні просторові потоки Spatial Streams, можна уникнути колізії під час одночасного передавання радіосигналів з різних антен [26].

Технологія MIMO виконує одночасне приймання та передавання кількох потоків даних для кількох антен. Чим більше просторових потоків, тим більше число антен для їх передавання і приймання [26]. Та чим більша кількість антен, тим більша максимальна швидкість передавання даних.

Модуляція 256-QAM збільшує швидкість передавання даних приблизно на 25% в порівнянні зі стандартом 802.11n.

В порівнянні з технологією MIMO, яка в деяких випадках має обмеження на передавання та приймання даних лише від одного пристрою, поки інші мали чекати своєї черги, у стандарті 802.11ac зарегламентована технологія MU-MIMO реалізовано багатокористувацький доступ. Вона забезпечує швидкісне передавання даних для інших пристроїв одразу.

MU-MIMO пристрої одночасно можуть передавати та приймати до чотирьох потоків даних. З використанням цієї технології, стали ефективніше використовувати безпроводової мережі та скоротити затримки на обслуговування, що виникають під час значного збільшення числа клієнтів у мережі.

Пристрої специфікації 802.11ac є більш енергоефективними завдяки спеціальним чіпам, які розподіляють енергію в процесі передавання даних.

Опціональною для стандарту 802.11ac є підтримка технології формування спрямованого сигналу Beamforming (технології адаптивного

формування діаграми спрямованості, Transmit Beamforming або Tx Beamforming). Це означає, що не для всіх пристроїв технологія Beamforming повинна бути застосована. Вона також вирішує проблему пов'язану з падінням сигналу, яка є результатом відбиття від різних предметів та поверхонь.

Хоч дана технологія і була доступна для пристроїв стандарту 802.11n, вона не мала сумісності з пристроями різних виробників та працювала не коректно.

Прийняття від клієнта радіосигналів допомагає точкам доступу визначити їх місце розташування, що в подальшому використовується для розрахунку та формування вузьконаправленого сигналу – це і є призначення технології Beamforming.

Користуючись технологією Beamforming можна ефективніше використовувати смугу пропускання. Це дозволить покращити процес передавання поточкових музичних і відеофайлів, додатків та ігор, які дуже різко реагують на наявність затримок в мережі.

Для стандарту 802.11ac реалізовано сумісність пристроїв з підтримкою даної технології. Це допомагає пристроям з та без підтримки Beamforming працювати за відповідним алгоритмом. Така сумісність була неможливою для попередніх специфікацій.

Також стандарт 802.11ac підтримує сумісність зі стандартами попередніх безпроводових мереж. Всі пристрої різних стандартів 802.11 a/b/g/n у змішаних мережах будуть працювати незалежно від версії стандартів.

В залежності від вибраного частотного діапазону, дальність розповсюдження сигналу різна і для діапазону 5 ГГц вона менша, ніж у випадку використання частотного діапазону 2,4 ГГц. Тому, якщо ви плануєте перевести існуючу у діапазоні 2,4 ГГц безпроводову мережу діапазон 5 ГГц без зменшення зони покриття, потрібна більша кількість точок доступу.

1.3.6 Специфікація 802.11ax

На відміну від попередніх специфікацій, новий стандарт 802.11ax, відомий, як Wi-Fi 6 та 5G, створений з нуля. Незважаючи на те, що IEEE 802.11ax є нащадком стандарту IEEE 802.11ac, він спрямований на впровадження нових технологій, маючи при цьому зворотну сумісність. Наприклад, IEEE 802.11ax PPDU(Physical Protocol Data Unit) має намір включити застарілу преамбулу, продубльовану на кожному підканалі довжиною 20МГц, щоб вирішити проблему зворотної сумісності та співіснування.

Крім того, TGax або Task Group 802.11ax, яка розглядає різні методи покращення продуктивності мережі, також планує розробити нові типи преамбули, необхідні для підтримки нових характеристик. Помітні поправки, запропоновані на фізичному рівні для IEEE 802.11ax, пояснюються наступним чином.

1) Рішення щодо фізичного кодування (LDPC та BCC): Схема виправлення помилок Forward Error (FEC) за замовчуванням, запропонована для IEEE802.11n та IEEE 802.11ac, базується на BCC(Binary Convolutional Coding) з частотним чергуванням за символом ортогонального частотного поділу (OFDM). Використання перевірки парності низької щільності (LDPC) є не обов'язковим і ще не має великої привабливості з боку WLAN через високі обчислювальні витрати. Однак коди LDPC, як показали, забезпечують значний виграш (у розрізі ємності) порівняно з BCC [3]. IEEE 802.11ax пропонує використовувати LDPC при використанні ширококутної ширини (тобто зв'язок каналу) і використовувати BCC в більш вузькій смузі.

2) 1024-QAM: Одне із рішень, запропонованих TGax для досягнення чотирикратного збільшення середньої пропускної здатності, полягає в включенні дуже високої додаткової схеми модуляції (тобто 1024-QAM), де кожен символ кодує більшу кількість бітів даних.

Стандарт IEEE 802.11ax спрямований на підвищення швидкості передавання даних в насиченому режимі точки доступу. З використанням декількох механізмів стандарту для доступу до каналу передавання більшої кількості користувачів і для надійності обміну інформацією безпроводовою мережею.

Мережа із специфікацією 802.11ax працює в обох частотних діапазонах 2,4 та 5 ГГц, використовує базові частотні смуги 20/40/80/160 МГц [27], підтримує технологією MIMO 8×8 , яка забезпечує одночасне передавання цілих 8 просторових потоків у двох напрямках (низхідному і висхідному каналах, DL та UL) [7]. Підтримка модуляції 512-, 1024-QAM і змінення алгоритму передавання преамбули для повторного відправлення втраченого кадру – є прогресивним доповненням для стандарту IEEE 802.11 в цілому.

Зі всіма покращеннями, які були введені для специфікації 802.11ax, теоретична швидкість передавання даних може сягати недосяжних, для попередніх специфікацій 802.11 a/b/g/n/ac, 10 Гбіт/с [28].

Ефективне використання частотного діапазону, яке усуває частотно-селективні завмирання та інтерференцію є можливим через те, що технологія 802.11ax застосовує множинний доступ з ортогональним частотним розподілом (Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA)[29].

На фізичному рівні стандарти IEEE 802.11ax та IEEE 802.11ac працюють однаково. Обидві специфікації використовують технологію OFDM і підтримують роботу частотних діапазонів: 20, 40, 80, 80 + 80 та 160 МГц.

В порівнянні з інтервалами між підносійними в попередніх версіях 802.11, в даному випадку такого типу модуляції, інтервал значно скоротився. (рис. 1.7).

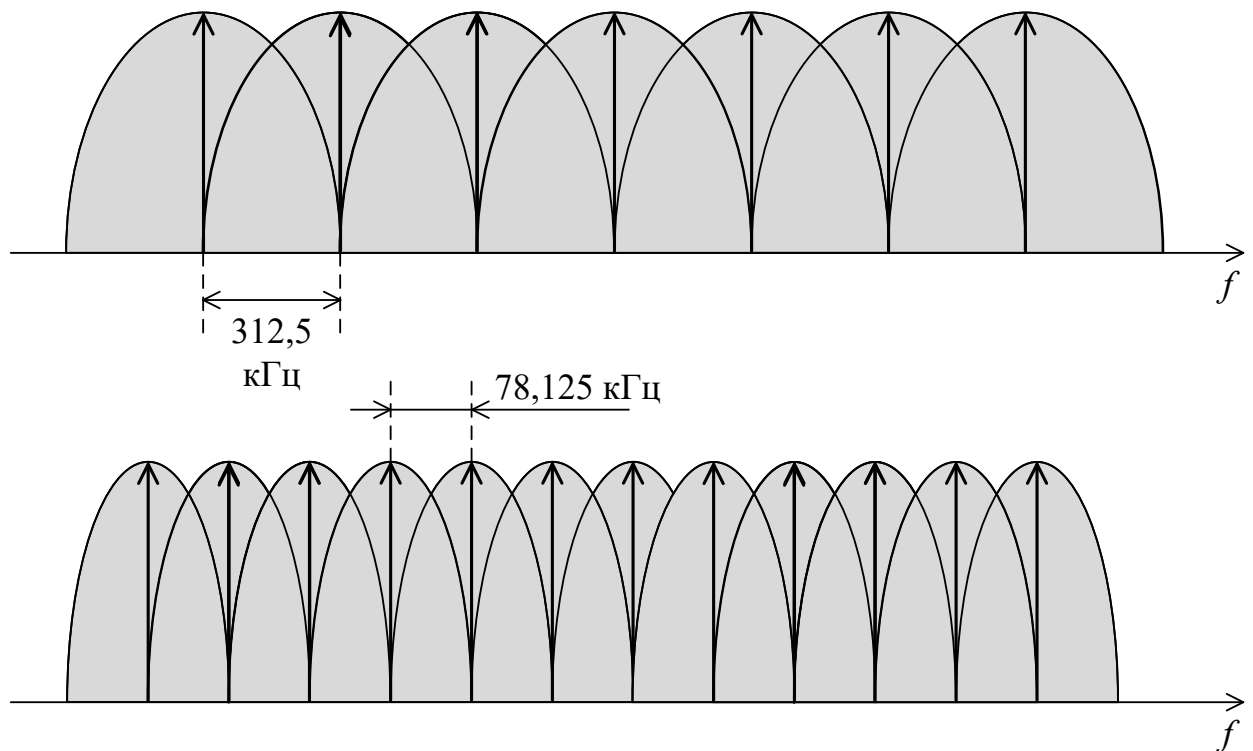


Рисунок 1.7 – Зменшення інтервалу між носійними OFDM-сигналу у стандарті 802.11ax

OFDMA ділить спектр на ресурсні одиниці (РО) і розподіляє їх відразу декільком користувачам. Підносійні формують РО. Якщо в Wi-Fi 5 було 64 підносійних по 312,5 кГц, то в Wi-Fi 6 інтервал зменшено з 312,5 кГц до 78,125 кГц, а кількість підносійних збільшено до 256. Використання OFDMA дозволяє точці доступу випромінювати сигнал більш ефективно - швидше і з меншими витратами енергії, що особливо важливо в сильно перевантажених областях, таких як вокзали, стадіони, торгові центри та інші громадські місця.

В специфікації 802.11ax буде використано технологію множинного доступу з ортогональним частотним розподілом (OFDMA). Ця технологія має в чотири рази більшу тривалість OFDM-символів (12,8 мкс замість 3,2 мкс), яка збільшує кількість підносійних і забезпечує високу вибірковість мережі [29]. Так надійність багатокористувацького передавання у висхідному каналі зростатиме через збільшення тривалості символу та ймовірність помилок буде зменшуватись.

Зменшення інтерференції між OFDM-символами передбачено збільшенням захисного інтервалу (Guard Interval, GI). Існує три варіанти тривалості захисного інтервалу. Стандартним є інтервал 0,8мкс та збільшені – по 1,6 мкс та 3,2 мкс відповідно[30].

Формат кадрів у специфікації потерпів змін. У випадку використання каналу 20МГц та більше преамбула кадрів в кожному підканалі буде дублюватись (рис. 1.8).

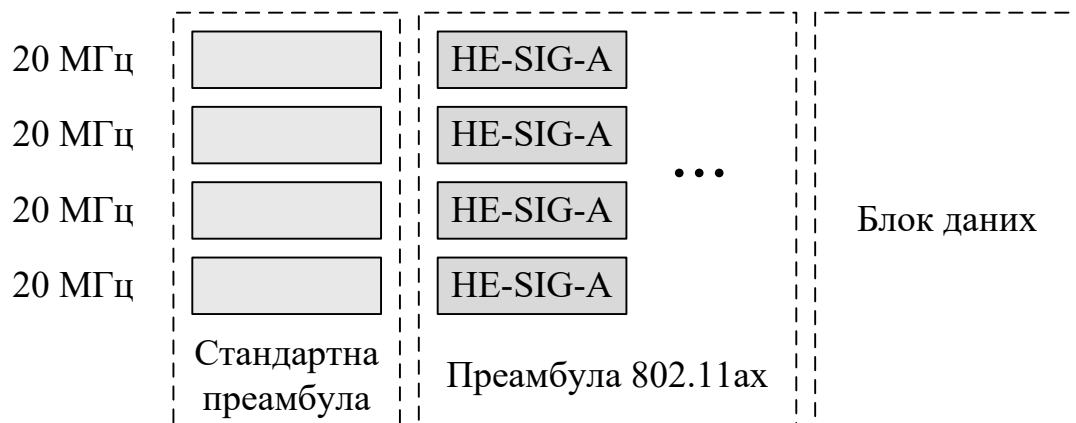


Рисунок 1.8 – Дублювання преамбули та поля HE-SIG-A у преамбулі 802.11ax у кожному підканалі шириною 20МГц

Преамбулу кадру складають: стандартна частина, преамбули специфікації 802.11ax та блок даних. Станції Wi-Fi попередніх специфікацій можуть декодувати стандартну частину преамбули, яка виконує функцію сумісності між різними стандартами 802.11. Нова преамбула містить поле HE-SIG-A, яке є обов'язковим, поле опцій HE-SIG-B і спеціальні послідовності для налаштування MIMO [7].

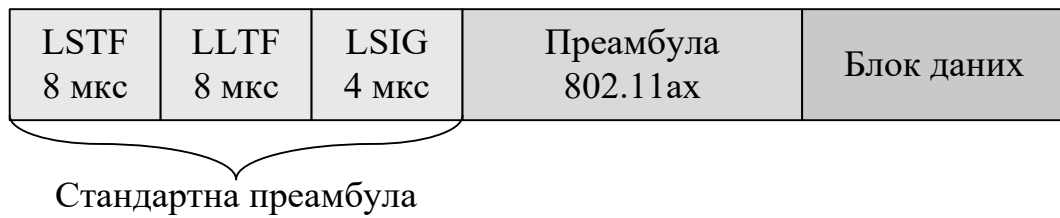


Рисунок 1.9 – Структура кадру 802.11ах

Тривалість поля HE-SIG-A дорівнює два OFDM-символа. Коли використовують канали 20МГц та більше, тривалість дублюється для кожного підканалу 20 МГц та містять дані, потрібні для приймання та обробки пакета:

- тип сигнально-кодової конструкції (СКК);
- ширину каналу і кількість просторових потоків (Number of Spatial Streams).

Не унікальний ідентифікатор мережі (BSS color), прапор, що вказує на тип каналу передавання (висхідний або низхідний), тривалість планованих передач (Transmission opportunity, TXOP) та інша інформація міститься у полі HE-SIG-A [7]. Не вимагаючи декодування всього пакету, ці поля надають інформацію готову для зчитування.

Для каналу передавання шириною 40 МГц та більше, різні частини поля HE-SIG-B знаходяться у двох сусідніх підканалах шириною 20 МГц (рис. 1.10). Це підвищує ефективність використання каналного ресурсу.

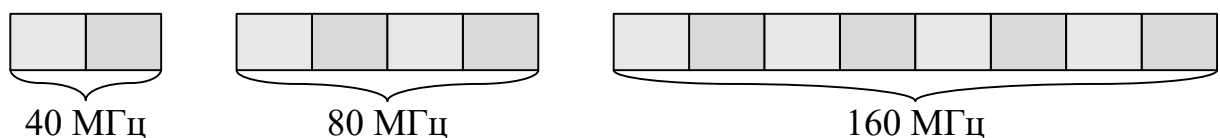


Рисунок 1.10 – Вміст підканалів шириною 20 МГц у випадку передавання поля HE-SIG-B в каналі шириною 40 МГц

У стандарті IEEE 802.11ax має місце використання квадратурної модуляції 1024-QAM, однак такий високий порядок модуляції вимагає високого відношення сигнал/шум, щоб зменшити ймовірність виникнення помилок. Модуляція 1024-QAM отримує на 20% більшу пропускну здатність каналу передавання, однак має застосовуватись на невеликих відстанях між передавачем та приймачем, виключно в приміщеннях.

Надсилання службових кадрів займає значну частину каналного ресурсу і зменшує пропускну здатність. Для повернення продуктивності мережі через велику кількість службового трафіку у специфікації 802.11ax забороняється передавати кадр, який містить ідентифікатор мережі WLAN: часові мітки (timestamp), SSID, та інші дані про точку доступу на швидкості передавання даних менших 5,5 Мбіт/с у діапазоні частот 2,4 ГГц [29,31].

Завдяки стандарту 802.11ax мережі стають більш гнучкими та масштабованими. В перспективі найближчого десятиліття саме він забезпечить користувачам більш швидкий та стабільний доступ в Інтернет.

1.4 Покращення ефективності

Поточне визначення IEEE 802.11ax або Wi-Fi 6 включає вісім головних елементів, які призначені для створення фізичного рівня (PHY) безпроводової передачі з високою ефективністю (high-efficiency wireless, HEW). Розглянемо, як схеми передавання впливають на ефективність Wi-Fi 6. Метод доступу OFDMA забезпечує набагато високу ефективність за рахунок застосування тимчасового та частотного ресурсів, потужності та синхронізації між станціями та користувачами.

Хоча максимальна швидкість передавання не збільшується в межах фізичного рівня, така схема допомагає чергувати одночасні передавання від великої кількості користувачів, скорочуючи затримку.

Завдяки збільшенню щільності підносійних мережі Wi-Fi 6 здатні знизити навантаження з 20 до 6%, викликане захисними інтервалами (GI).

Використання декількох довших символів та захисних інтервалів дає змогу динамічно адаптувати мережу для експлуатації всередині або за межами приміщення за умов всенаправленого поширення сигналу, а також під час його ослаблення.

Модуляція 1024QAM підвищує пропускну здатність на 25%, але досягнення цього рівня необхідно забезпечити стабільні умови в каналі та виняткову точність модуляції, величину вектора помилки порядку -35 дБм в передавачі. Випадок багатокористувацької передачі - найскладніший. MU-MIMO у поєднанні з OFDMA дає змогу ефективно керувати передаванням в обох напрямках за допомогою ресурсних блоків (RU). Основна концепція, запозичена з 4G LTE, надає можливість, не тільки збагнути принцип роботи Wi-Fi 6, але і методи тестування та валідації нових пристроїв, які підтримують цей стандарт.

У табл.1.4 наведені можливі способи управління ресурсними блоками. Наприклад, прості схеми зв'язку потребують смугу 1,9 МГц, 26 підносійних та два пілотних сигналу. Високошвидкісне передавання може займати смугу 153,2 МГц, використовуючи 996 тонів і 32 пілотних сигналу. У Wi-Fi 6 ресурсні блоки функціонують для призначення підносійних. Точка доступу призначає ресурсні блоки фіксованим частоті у каналі (наприклад, 20, 40, 80, 80 +80 або 160 МГц). Кожен ресурсний блок має використовувати свою швидкість кодування, схему модуляції та рівень потужності [57].

Таблиця 1.4 – Можливі способи управління ресурсними блоками [57]

Носійні	Пілот.	Смуга пропускання, МГц	20 МГц	40 МГц	80 МГц	160 МГц	80+80 МГц
26	2	1.9	9	18	37	74	74
52	4	3.8	4	8	16	32	32
106	4	8.0	2	4	8	16	16
242	8	18.3	1	2	4	8	8
484	16	36.6	-	1	2	4	4
996	16	76.6	-	-	1	2	2
996	32	153.2	-	-	-	1	1

1.5 Особливості передавання аудіовізуальної інформації у форматі високої чіткості

Для передавання аудіовізуальної інформації за допомогою необмежених безпроводових мультимедійних послуг є невід’ємною частиною розвитку мережних технологій. Аудіовізуальна інформація – сигнали, які сприймаються зоровими та слуховими рецепторами людини і показується, як повідомлення про явища, факти, події, відомості про осіб, процеси та коментарі про них, які передаються з використанням зображень і звуків – мультимедійних даних [32].

Мультимедійний потік має різні види повідомлень, які сприймаються органами чуття людини. До мультимедійних даних входять: текст, звук, анімацію, інтерактивні можливості (використання гіперпосилань), зображення, відео тощо.

З метою присвоєння віддалених інтерактивних послуг, мультимедійні потоки даних надсилають телекомунікаційними мережами. Найпоширенішими мультимедійними послугами, до яких користувачі можуть отримати доступ інформаційних мереж є: IP-телефонія, цифрове

телевізійне мовлення, дистанційний моніторинг приміщень та територій, високошвидкісне передавання мультимедійних даних, відеотелефонія, мобільний відеозв'язок, цифрове відео за запитом.

Виділяють дві категорії мультимедійного трафіку за типом сервісу:

1. Трафік реального часу, який курує мультимедійними послугами пов'язаними з передаванням інформації між кількома користувачами в реальному часі.

2. Трафік звичайних даних, що формується традиційними розподіленими послугами нинішньої телекомунікаційної мережі. Серед них: передавання файлів, електронна пошта, віддалений доступ до баз даних, віртуальний термінал тощо.

Деталізація зображення – це основна відмінність між відео високої чіткості та стандартного. Забезпечення деталізації засновано багаторазовому збільшені кількості точок, з яких складається кадр. Стандартними форматами для відео високої чіткості (HD) – це 1280x720 та 1920x1080. Співвідношення сторін для них дорівнює 16:9, а у відео стандартної чіткості (SD) фігурує співвідношення 4:3. У співвідношенні сторін 4:3 та 576 рядків розкладання кадру, характерні відео високої чіткості, для квадратного пікселя, ряд має складати 768 точок [33].

Кадр стандартної чіткості складається із $720 \times 576 = 414720$ окремих точок, для формату HD720 кількість точок збільшиться до $1280 \times 720 = 921600$ (в 2,2 рази більше стандартної чіткості) [34], і для HD1080 кількість точок дорівнює $1920 \times 1080 = 2073600$ або два мегапікселі (в 5 раз більше стандартної чіткості).

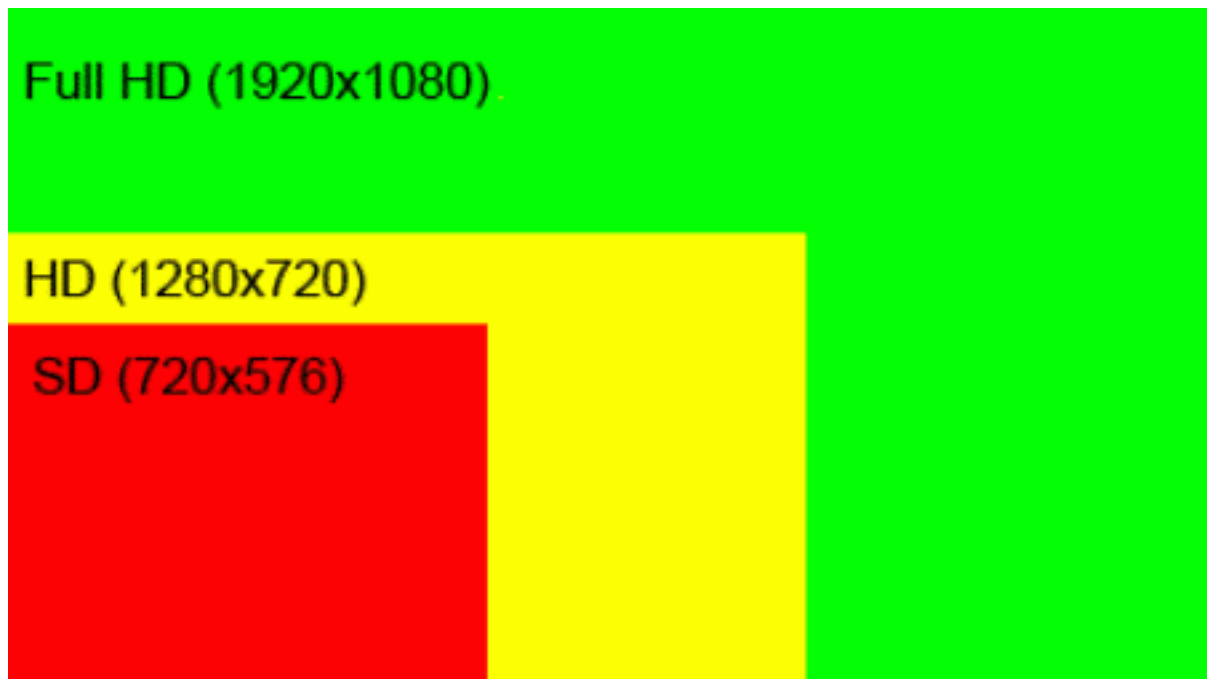


Рисунок 1.11 – Роздільна здатність зображення стандартної чіткості SD та високої чіткості HD і Full HD

Залежності необхідної швидкості передавання інформації деяких форматів відеосигналів, для кращого розуміння наведені табл. 1.5.

Таблиця 1.5 – Залежність швидкості передавання відеосигналу від характеристик потоку [7]

Тип відеосигналу	Опис	Швидкість потоку
Без компресії	720p (RGB) 1280×720 пікселів; 24 Біт/піксель, 60 кадрів/с	1,3 ГБіт/с
	1080i (RGB) 1920×1080 пікселів; 24 Біт/піксель, 60 кадрів/с	1,5 ГБіт/с
	1080p (YCrCb) 1920×720 пікселів; 24 Біт/піксель, 60 кадрів/с	3 ГБіт/с
	1080p (RGB) 1920×720 пікселів; 24 Біт/піксель, 60 кадрів/с	3 ГБіт/с
Слабке стиснення	MotionJPEG2000	150 МБіт/с
	H.264	70...200 МБіт/с
Стиснений	Blu-ray™	50 МБіт/с
	HD MPEG2	20 МБіт/с
	UltraHD або 4K (3840×2160 пікселів)	100...300 Мбіт/с

1.6 Зміни умов функціонування мереж у діапазоні 5 ГГц

З переходом Wi-Fi-комунікацій із частоти 2,4 ГГц в діапазон 5 ГГц рішила проблема з надмірним навантаженням каналів, однак від цього постраждала площа покриття мережі. Ось чому, багато споживачів почали використовувати прості рішення для збільшення зони передавання за допомогою різних підсилювачів та ретрансляторів. MESH-мережі також

стали популярні через їх можливість забезпечення рівномірного Wi-Fi покриття в усіх частинах будівлі.

Ситуація ускладнилась тим, що мобільні оператори зв'язку витратили частину свого спектру частот та будуть наступні три роки передавати 60% мобільних даних по неліцензійному спектрі, який використовують для Wi-Fi мереж. Цю технологію називають LTE-Unlicensed (LTE-U). За допомогою неї 4G LTE-базові станції, які відправляють та приймають дані, будуть робити це через частотний діапазон 5 ГГц, як і Wi-Fi. Деякі організації, такі як Google, Cable Television Laboratories та Microsoft, кажуть, що LTE-U буде погіршувати роботу Wi-Fi мереж у цілому. Компанії Verizon та T-Mobile вже почали пробні розгортання LTE-U для визначення впливу на Wi-Fi. Євразійські оператори також планують подібні випробування [35].

Забезпечення високої пропускної здатності безпроводового каналу, теоретично може реалізувати специфікація IEEE 802.11ac, яка дозволяє передавати відео високої якості. Вона забезпечує гігабітні швидкості з'єднання, однак для передавання даних на таких швидкостях, у IEEE 802.11ac передбачено об'єднання каналів. Для реалізації самої високопродуктивної конфігурації IEEE 802.11ac Wave 3 потрібно об'єднати весь доступний спектр Wi-Fi в два канали шириною по 160 МГц. Це злиття буде означати, що одночасно без взаємних завад зможуть взаємодіяти тільки дві пари пристроїв із застосуванням найширшого каналу. Поява третьої призведе до сильного зменшення швидкості надсилання даних для всіх користувачів. На думку фахівців, в результаті ситуації, яка склалася, усі додаткові переваги надані діапазоном 5 ГГц у порівнянні з 2,4 ГГц, зникли.

Застосування технології динамічного вибору частоти або DFS (Dynamic Frequency Selection) може поліпшити ситуацію, методом використання частотних каналів діапазону 5 ГГц, які виділені для метеорологічних і військових радарів, коли вони не функціонують або там де їх немає [35].

1.7 MESH-мережі

Щоденними проблемами експлуатації безпроводових мереж є:

1) Недостатнє покриття та нестабільна швидкість доступу до безпроводової мережі

Безпроводова система IP-COM MESH забезпечують підключення користувачів у діапазонах частот 2,4 та 5 ГГц. Крім використання можливостей стандарту Wave 5, MU-MIMO, Beamforming +, Airtime Fairness, Band Steering, які спрямовані на збільшення продуктивності окремих пристроїв, просте розширення мережі за допомогою додавання додаткових MESH пристроїв дає змогу досягти рівномірного рівня передавання сигналу та розподілити користувачів уникаючи перевантаження вузлів мережі.

2) Різні схеми авторизації та контролю доступу

Безпроводові технології, в розумінні IP-COM, повинні забезпечувати гнучкість та безпеку підключення за різних умов використання. Крім промислових стандартів аутентифікації IP-COM MESH допомагає застосовувати такі методи: портал ідентифікації, SMS авторизація, авторизація через зворотній дзвінок, авторизація через соціальні мережі.

3) Дорогі монтажні роботи

Традиційне побудова безпроводових мереж вимагає об'єднання точок доступу у локальну мережу. Прокладка кабельних каналів вимагає додаткових витрат та навичок. В мережі MESH для зв'язку точок використовується окрема опорна мережа, яка не потребує кабельного підключення, що дозволяє забезпечити зв'язок у приміщенні за складною конфігурацією.

4) Необхідність радіо обстеження

Використання MESH технології дає змогу уникати витрат на радіообстеження та планування Wi-Fi мережі. У разі недостатнього радіопокриття потрібно додати новий пристрій та підключити його до мережі електроживлення.

5) Кваліфіковане обслуговування

Первинне налаштування ведучого пристрою доступне користувачам будь-якої кваліфікації. Використання мобільного застосування для управління та моніторингу додатково полегшує це завдання. Підключення додаткових пристроїв до мережі, налаштування та узгодження параметрів відбувається автоматично.

6) Забезпечення стійкості мережі

MESH технологія забезпечує динамічну маршрутизацію пакетів всередині безпроводової мережі. Під час відключення точки доступу, маршрути будуть перелаштовані без шкоди для працездатності мережі. Multi-WAN підключення провідного роутера забезпечує приєднання до двох незалежних операторів зв'язку та гарантує безперебійну роботу мережі.

7) Вибір місця установки обладнання

Дизайн пристрою в цілому з всеспрямованими круговими антенами, у яких присутній високий коефіцієнт посилення дозволяють не замислюватися про те, куди встановити обладнання: на стіну, на стелю чи поставити на стіл [55].

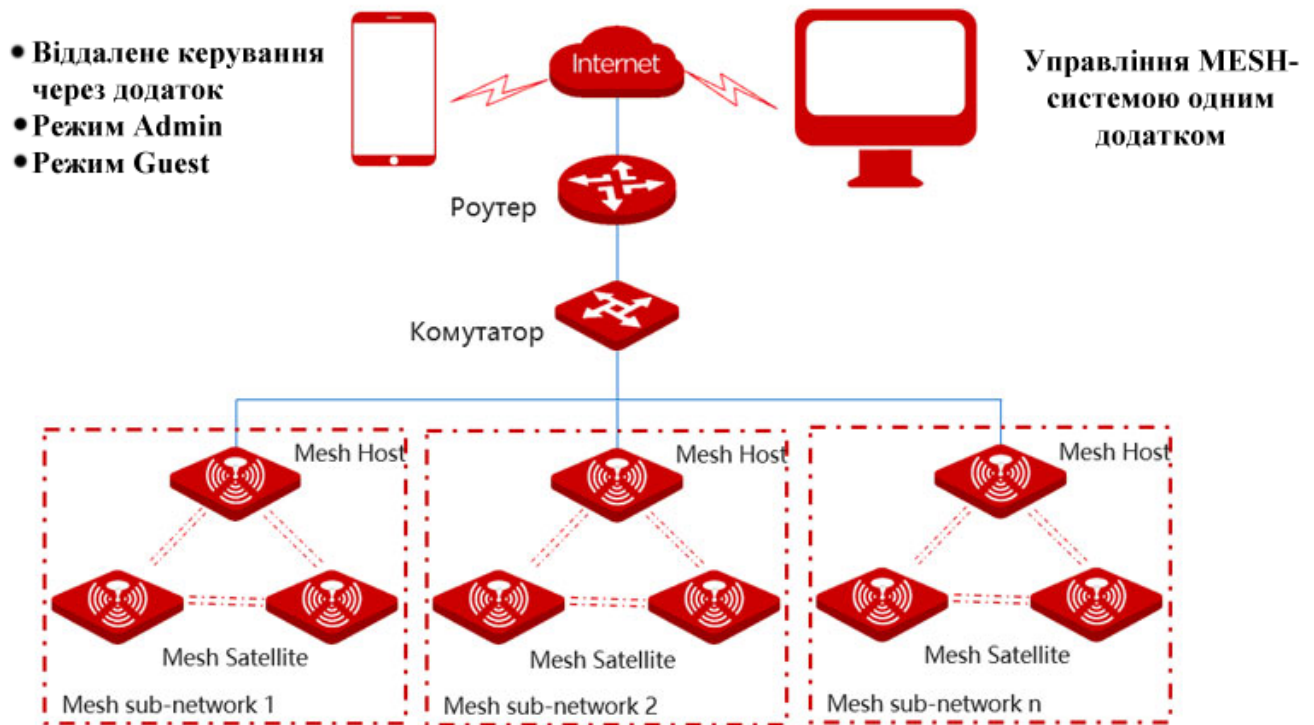


Рисунок 1.12 – Принцип роботи MESH-системи

Звичайні роутери працюють за простим принципом. Клієнти підключаються до роутера, підключеного до Інтернету, використовують його для передачі даних між собою та доступу до глобальної мережі. Швидкість в такому випадку визначається технічними характеристиками пристроїв та залежить від відстані між ними, наявності перешкод та інших чинників. В будь-якому приміщенні знайдеться місце, де рівень сигналу падає настільки, що загальної швидкості стає недостатньо.

Wi-Fi-ретрансляція або прокладка кабелю для підключення клієнтів чи установки окремої точки доступу можуть вирішити проблему, однак лише частково. Кабель - це не завжди зручний варіант, а ретрансляція створює окрему Wi-Fi-мережу, ретранслює сигнал основної - підключатися до неї потрібно вручну або чекати на переключення пристрою. Більш того, швидкість доступу при підключенні через репітер майже завжди нижча, ніж в основній мережі під час хорошого сигналу.

Розробники комерційних рішень стикаються з тими ж проблемами,

просто в більшому масштабі і вже давно використовують пористі (MESH) мережі. Більш того, на самому ділі кожен з нас построянно користується найбільшою MESH-мережею, тобто Інтернетом.

Але перш ніж переходити до подібних аналогій, зупинимося на відмінностях в порівнянні зі звичайними роутерами. MESH-мережа складається з окремих пристроїв, кожне з яких відповідає за підключення клієнтів і передачу даних усередині мережі. До інтернету підключено лише перший модуль (node), але всі вони пов'язані один з одним і кожен створює свою Wi-Fi-мережу, за рахунок чого вирішується проблема якості покриття.

В MESH-мережі враховуються всі зв'язки між модулями, пристрої обмінюються інформацією про підключених клієнтів, тому мережа сама може вирішити, до якого «ноду» найкраще підключити клієнта. Більш того, передача даних між пристроями всередині мережі не обов'язково повинна йти через головний модуль, а збереження високої швидкості доступу до інтернету досягається за рахунок того, що багато MESH-рішення мають окремий канал для обміну даними між собою і дані передаються по найкоротшому шляху. Фактично така мережа складається з декількох пов'язаних роутерів - їх можна було б назвати і репітерами, але це вже занадто грубе спрощення.

Переваги Wi-Fi MESH-мережі - для користувача це один з найпростіших способів створити швидку вентерь з відмінному Wi-Fi-покриття на великій площі, без прокладки і не внікаючи в суть процесу. Найчастіше вам знадобляться тільки електричної розетки для живлення модулів і смартфон з мобільним додатком для первинної настройки.

Рішення для дому дозволяють з'єднувати в одну мережу порядку десятка модулів, так що вийде створити мережу і у великому будинку, і на території навколо. Все інше працює само-собою. Наприклад, при додаванні або видаленні модулів мережа сама змінить свою конфігурацію - зручно, якщо ви виявите, що вам потрібно додати ще модуль для розширення мережі.

Покриття, продуктивність і простота настройки - головні переваги

MESH-рішень, але не можна згадати і їх дизайн. Кожен MESH-модуль по суті є роутером, але часто менше і красивіше класичних пристроїв з аналогічними характеристиками.

Недоліки теж є. Створені з прицілом на простоту використання, Mesh-системи не можуть похвалитися всіма доступними для звичайних роутерів настройками, що може стати обмеженням для просунутих користувачів.

Аналогічно з проводовим підключенням пристроїв. Хоча кожен модуль і є аналогом роутера, він не може похвалитися великою кількістю LAN-портів, а USB-порти зазвичай просто відсутні - якщо вирішите купити принтер, то доведеться дивитися на моделі з Wi-Fi-модулем або використовувати його тільки з одним комп'ютером [55].

На даний момент, найактивніше розробляється набір протоколів cjdns, на таблиці вище видно чого він може робити вже зараз.

Так само зараз йде розробка DNS системи для cjdns, що дозволить зробити доменну систему розподіленої, ще немає остаточного стандарту, але, судячи з усього, буде обраний Bitcoin як засіб для фіксації реєстрації доменів, як тільки буде затверджено стандарт DNS в cjdns - я неодмінно розповім про це.

Але на DNS все не закінчується, зараз відбувається тестування і розробка повноцінного движка MESH мережі (частини яка відповідає за автоматичні знаходження бенкетів поруч і підключення до них).

Як тільки ці дві частини будуть реалізовані, то можна буде сказати, що у нас є готова реалізація набору протоколів для організації повноцінної Mesh мережі.

На даний момент, на жаль, жодна з доступних реалізацій не може вважатися повноцінною MESH мережею через відсутність тих чи інших функцій [56].

Висновки до розділу

1. Швидке та зручне встановлення мережевих з'єднань для користувачів, кількість яких постійно зростає – це все можливо завдяки розширенню меж мереж безпроводових технологій.

2. Для передавання аудіовізуального контенту у реальному часі потрібна висока пропускна здатність каналу. Для передавання відеоконтенту високої чіткості без спотворень потрібно забезпечити швидкість передавання даних більше 8 Мбіт/с.

3. IEEE 802.11 або Wi-Fi – це найпоширеніший стандарт безпроводової локальної мережі.

4. На двох нижніх рівнях моделі ISO/OSI і працює стандарт IEEE 802.11: на фізичному та каналному рівнях.

5. Рівень MAC у мережах 802.11 забезпечує два режими доступу до середовища: централізований режим доступу PCF та розподілений DCF.

6. Самими вживаними стандартами сімейства IEEE 802.11 є специфікації 802.11a/b/g/n/ac. Що стосується специфікацій 802.11ax, вона абсолютно новою і найменшвживаною технологією, однак при цьому досягає найбільшої швидкості передавання інформації з усіх стандартів 802.11.

7. З розвитком мережевих технологій негативною частиною є подача необмежених мультимедійних послуг для надсилання аудіовізуальної інформації.

2 АНАЛІЗ МЕТОДИКИ ОЦІНЮВАННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ КАНАЛУ ПЕРЕДАВАННЯ МЕРЕЖІ WI-FI

Розрахунок реальної бітової швидкості безпроводових мереж стандарту IEEE 802.11 для передавання потокового відеоконтенту у насиченому режимі використовується методика розрахунку, яку запропонував Джузеппе Біанкі [36, 37]. За його методикою, швидкість передавання даних для насиченої пропускної здатності розраховують так [38]:

$$S = \frac{E[PL]}{T_{VCW}}, \quad (2.1)$$

де $E[PL]$ – середнє значення корисного навантаження для одного пакету даних, що визначається як добуток кількості пакетів і корисного навантаження одного пакету $E[PL1]$;

T_{VCW} – інтервал часу, який потрібен на реалізацію віртуального вікна. Він складає час колізії, час на передавання кадру, час інкапсуляції даних транспортного рівня (TCP чи UDP), тип модуляції і часові проміжки технології передавання даних, часові параметри режиму доступу (DCF або PCF), числове значення віртуального вікна та значення ймовірності успішного передавання й колізії [39].

Час реалізації віртуального вікна, за який станція знаходилась у режимі очікування до відправлення даних, визначають за виразом:

$$T_{VCW} = N \cdot T_S + N_C \cdot T_C + T_{idle}, \quad (2.2)$$

де N – кількість абонентів, які здійснюють обмін даними по одному радіоканалу;

T_S – тривалість часу передавання кадру даних;

N_C – кількість можливих колізій (математичне сподівання);

T_C – тривалість колізії;

T_{idle} – тривалість порожніх часових інтервалів.

2.1 Розрахунок тривалості порожніх часових проміжків, які з'являються під час реалізації віртуального конкурентного вікна

Під час реалізації конкурентного віртуального вікна виникають порожні часові інтервали. Визначити математично середнє значення таких інтервалів можливо, у вигляді добутку величини часового слоту (Slot Time) σ і різниці між величиною конкурентного віртуального вікна та кількості слотів N_{SL} , які виникли під час надсилання даних у конкурентному режимі. Тому, тривалість порожніх часових проміжків можна визначити:

$$T_{idle} = \sigma \cdot [VCW - N_{SL}], \quad (2.3)$$

де σ – величини часового слоту;

N_{SL} – кількість слотів;

VCW – величина віртуального вікна.

У стандарті прописана величина часового слоту, яку визначають за усіченим експоненціальним двійковим алгоритмом.

Значення N_{SL} - це сума успішно переданих кадрів і кадрів, які потерпіли колізію:

$$N_{SL} = N \cdot (1 - p_c^{m+1}) - N_C, \quad (2.4)$$

де N – кількість абонентів, які здійснюють обмін даними за допомогою одного радіоканалу;

N_C – математичне сподівання числа колізій;

p_c – шанс виникнення колізії;

m – кількість спроб передавання кадру.

Кожен абонент мережі в змозі передати один кадр за момент часу зважаючи на концепцію віртуального конкурентного вікна. Припустимо, що колізія розгортається тільки між двома сусідніми станціями мережі та кількість пар буде парною $(N/2)$ [38], де N – це активні станції. Визначення кількості колізій N_c можна визначити:

$$N_c = \frac{N}{2} p_c + \frac{N}{2} p_c^2 + \frac{N}{2} p_c^3 + \dots + \frac{N}{2} p_c^m = p_c \cdot \frac{N}{2} \cdot \frac{1 - p_c^{m+1}}{1 - p_c}, \quad (2.5)$$

де N – кількість абонентів, які здійснюють обмін даними за допомогою одного радіоканалу;

m – кількість спроб передати кадр;

p_c – шанс виникнення колізії.

Якщо у колізії бере участь дві станції, то ймовірність колізії з першою станцією дорівнює p_{c1} , з другою станцією – $(1-p_{c1}) \cdot p_{c2}$, де p_{c2} – ймовірність колізії двох станцій одночасно не враховуючи інших [38]. Частина $(1-p_{c1})$ показує ймовірність не виникнення колізії із першою станцією. Загальна ймовірність виникнення колізії подається виразом:

$$\begin{aligned} p_c &\approx p_{c1} + p_{c1}(1 - p_{c1}) + p_{c1}(1 - p_{c1})^2 + \dots + p_{c1}(1 - p_{c1})^{N-2} = \\ &= p_{c1} \sum_{i=1}^{N-2} (1 - p_{c1})^{i-1} = 1 - (1 - p_{c1})^{N-1}. \end{aligned} \quad (2.6)$$

Ймовірності виникнення колізії для будь-якою іншої активної станції мережі визначається:

$$p_{ci} = \frac{1}{CW_{\min}}, \quad (2.7)$$

де CW_{\min} – це мінімальна величина конкурентного вікна, яка прописана у стандарті 802.11 та залежить від специфікації;

i – номер станції мережі.

Використовуючи двійковий показниковий закон, збільшення конкурентного вікна CW показує величину віртуального конкурентного вікна VCW [38]. В свою чергу, значення VCW розраховують, як математичне сподівання під час виникнення колізії, прописаних в стандарті 802.11.

$$VCW = \frac{CW_{\min}}{2}(1-p_c) + \frac{2CW_{\min}}{2}(1-p_c)p_c + \frac{4CW_{\min}}{2}(1-p_c)p_c^2 + \dots \quad (2.8)$$

$$\dots + \frac{2^m CW_{\min}}{2}(1-p_c)p_c^m = \frac{CW_{\min} \cdot (1-p_c)(1-2p_c^2)}{2(1-2p_c)}.$$

2.2 Визначення часу передавання кадру та тривалості колізії

Час передавання кадру та тривалість колізії – є складовими частинами тривалості часу реалізації віртуального конкурентного вікна. Вони залежать від режиму доступу до МАС середовища у стандарті 802.11 [36]: централізований режим доступу PCF і розподілений DCF.

Для розподіленого режиму DCF розроблено метод доступу з використанням технології множинного доступу та прослуховуванням носійної і запобіганням колізій CSMA/CA [40]. Тому до передавання кадру повинно пройти підтвердження позитивним звітом про доставку АСК, який надіслала станція призначення.

Розподіл часових інтервалів для розподіленого режиму DCF на рис. 2.1 показано.

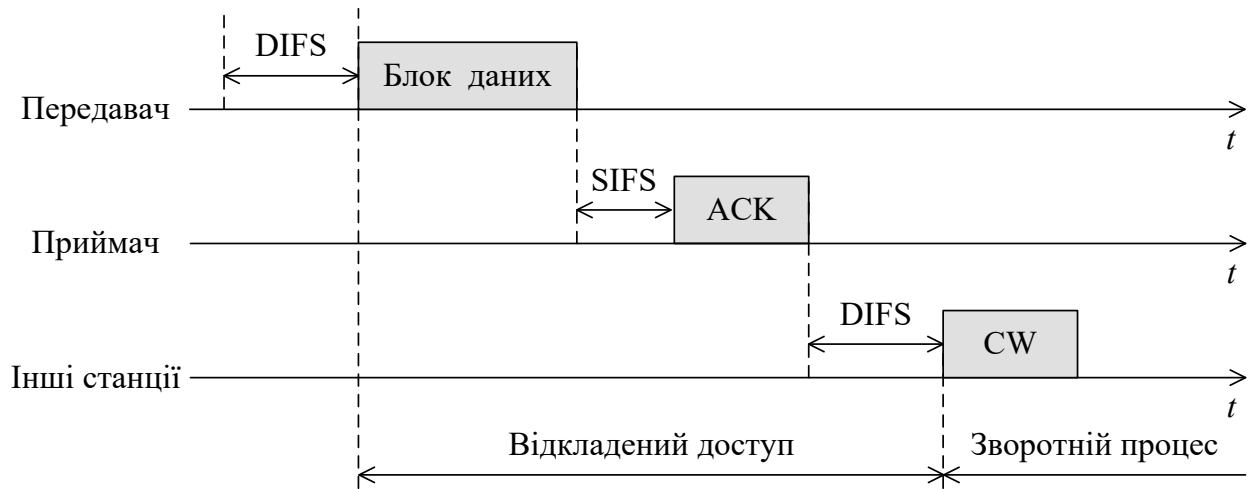


Рисунок 2.1 – Розподіл часових інтервалів в процесі доступу до каналу передавання в режимі DCF

На рис. 2.1 продемонстровано наступні позначення [41]:

- DIFS – міжкадровий інтервал режиму DCF;
- SIFS – короткий міжкадровий інтервал;
- ACK – кадр-квитанція;
- CW – конкурентне вікно.

Час, за який успішно здійснено передавання кадру T_s , з урахуванням аналізу процесу передавання кадрів, його можна записати у вигляді співвідношення:

$$T_s = T_{MPDU} + SIFS + T_{ACK} + DIFS, \quad (2.9)$$

де T_{MPDU} – це інтервал часу, за який передається один кадр даних;

T_{ACK} – це інтервалу часу, за який передається кадр підтвердження ACK.

Тривалість часу колізії для режиму DCF - це сума часу на передавання одного кадру даних та міжкадрового інтервалу DCF:

$$T_C = T_{MPDU} + DIFS. \quad (2.10)$$

У централізованому режимі PCF регламентовано механізм "питання-відповідь" RTS/CTS.

Централізований метод доступу PCF реалізується на керованому інтервалі. Для використання цього методу, станція, що хоче отримати доступ до середовища, спочатку передає станції-призначення короткий службовий кадр RTS замість кадру даних. На нього зобов'язана відповісти станція-призначення службовим кадром CTS і тільки тоді станція-відправник надсилає кадр даних. Кадр CTS оповіщає станції-відправників про зайнятість каналу станції-одержувача, які не знаходяться в зоні досяжності між собою, але мають з'єднання зі станцією-одержувача(феномен прихованого терміналу).

Розподіл часових інтервалів для режиму PCF проілюстровано на рис. 2.2.

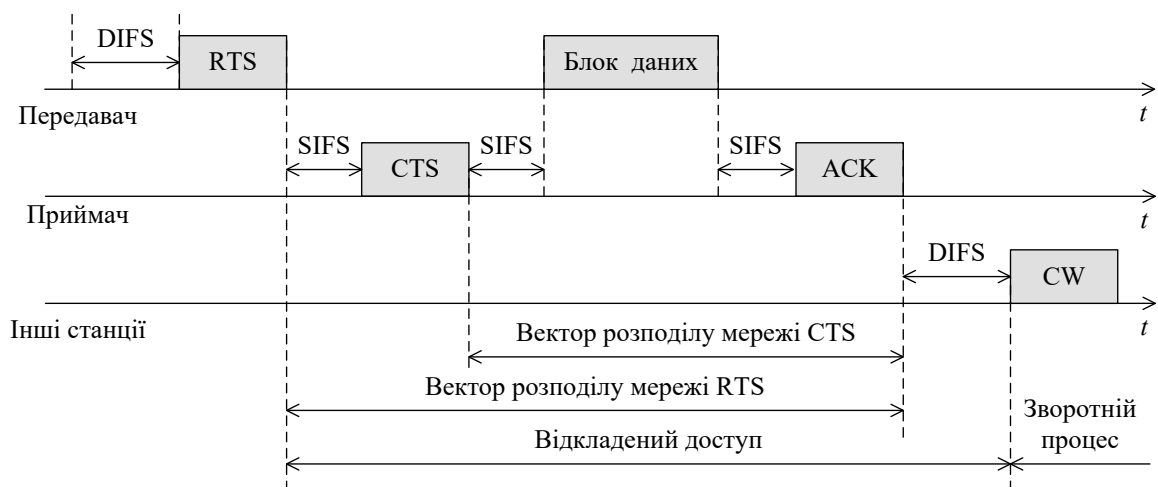


Рисунок 2.2 – Розподілення часових інтервалів у процесі доступу до каналу передавання в режимі PCF

На рис. 2.2 використано наступні позначення [41]:

- DIFS – міжкадровий інтервал режиму DCF;
- RTS – підтверджувальний запит;

- SIFS – короткий міжкадровий інтервал;
- CTS – кадр-відповідь провільний канал для передавання;
- ACK – кадр-квитанція;
- CW – конкурентне вікно.

Зробивши попередній аналіз рис. 2.2, час передавання кадру даних у режимі RTS/CTS можна визначити:

$$T_S = T_{RST} + SIFS + T_{CST} + SIFS + T_{MPDU} + SIFS + T_{ASK} + DIFS, \quad (2.11)$$

де T_{RTS} – тривалість часу надсилання запиту на передавання кадру, RTS;
 T_{CTS} – час, відведений на передавання відповіді про стан зайнятості каналу, CTS.

Тривалість колізії для режиму доступу PCF можна подати сумою інтервалів часу на надсилання запиту на передавання кадру RTS та міжкадрового інтервалу DCF:

$$T_C = T_{RST} + DIFS. \quad (2.12)$$

2.3 Визначення тривалості передавання кадру даних та квитанції

Щоб визначити інтервал часу, протягом якого передається саме кадр даних і час колізії, для початку потрібно визначитись з методом модуляції.

Наприклад, для специфікації 802.11b мережі Wi-Fi притаманний метод модуляції ССК (Complementary Code Keying). Метод ССК є досить складним з математичної точки зору, однак загальний принцип роботи наступний: через кодування кожного біту даних у восьмибітну послідовності викликає появу додаткових біт інформації.

Фізичний рівень специфікації 802.11b [42] забезпечує такі швидкості передавання даних: 1, 2, 5,5 та 11 Мбіт/с.

Метод ССК використовує послідовність кодів, так звані додаткові (Complementary Sequences). Вони складаються з 64 восьмибітових кодових слів, за допомогою яких кодують одним словом до шести біт інформації. За допомогою схеми квадратурного-фазової модуляції QPSK код ССК модулюється. Застосовуючи таку модуляцію, символ збільшується на два біти. Вони передаються зі швидкістю 1,375 Мбіт/с, якої достатньо, щоб досягти пропускну здатності 11 Мбіт/с [43].

Час на передавання саме інформаційних біт T_{MPDU} визначають за виразом:

$$T_{MPDU} = T_{PLCP} + 8 \cdot \frac{B_{SL} + PL}{R_{MPDU}}, \quad (2.13)$$

де T_{PLCP} – інтервал часу на повідомлення, який супроводжує операцію передавання у фізичному рівні;

B_{SL} – кількість байт службових даних;

PL – величина блоку даних;

R_{MPDU} – сигнальна швидкість передавання.

Для розрахунку часу передавання кадру АСК, довжина кадру якого дорівнює 14 байт та швидкість передавання R_{ACK} , потрібно скористатись виразом:

$$T_{ACK} = T_{PLCP} + 8 \cdot \frac{14}{R_{ACK}}. \quad (2.14)$$

Для централізованого доступу до каналу мережі, інтервал час для передавання службових пакетів RTS , які мають розмір 20 байт (2.15), а для CTS – 14 байт (2.16) та з відповідною бітовою швидкістю можуть бути подані виразами:

$$T_{RST} = T_{PLCP} + 8 \cdot \frac{20}{R_{RST}}; \quad (2.15)$$

$$T_{CST} = T_{PLCP} + 8 \cdot \frac{14}{R_{CST}}. \quad (2.16)$$

В специфікаціях 802.11a, g, n, ac та ah регламентовано використання модуляції QAM (Quadrature Amplitude Modulation) [44], яка характеризується передаванням цифрового інформаційного потоку, як аналоговий сигнал.

Сигнал OFDM – це сума кількох ортогональних підносійних, по кожній з яких надсилають дані на основній частоті і модулюються з використанням модуляції QAM.

Частотні фільтри використовують для поділу смуги пропускання. Через це метод називають частотним поділом ущільнення каналів (FDM, Frequency Division Multiplexing). Додавання частотних фільтрів в конструкцію, на жаль, не запобігає виникненню інтерференції. Для поділу частотного діапазону використовують метод перетворення Фур'є. В результаті чого виникають носійні, спектри яких можуть перекриватися, однак на момент передавання символу утворюється ціле визначене число таких носійних [43].

Кількість символів OFDM і основні характеристики типу модуляції, що використовується у мережі – це дані, які потрібні для визначення тривалості передавання кадру даних і квитанції. Час передавання безпосередньо кадру даних знаходять за виразом:

$$T_{MPDU} = T_{SMAC} + N_{OFDM} \cdot T_{1OFDM}, \quad (2.17)$$

де T_{SMAC} – інтервал часу синхронізації у середовищі MAC на підрівні управління доступом;

N_{OFDM} – кількість символів OFDM для одного кадру;

T_{1OFDM} – час передавання одного символу OFDM.

Пакет даних має додатковий заголовок синхронізації приймача та службову інформацію тривалістю 20 мкс для специфікації 802.11a на фізичному рівні.

Таким же способом можна визначити час передавання кадру підтвердження, якщо в кадрі квитанції один символ OFDM:

$$T_{ASK} = T_{SMAC} + 1 \cdot T_{1OFDM}, \quad (2.18)$$

В залежності від методу модуляції, кількість символів OFDM (N_{OFDM}) може мати різні значення, які вказуються у специфікації. Також, на N_{OFDM} впливає кількість біт на один символ B_{QAM} , швидкість кодування R_{QAM} і загальна сума біт у пакеті B_{SUM} . Щоб знайти кількості символів OFDM користуються виразом:

$$N_{1OFDM} = \frac{B_{SUM}}{B_{QAM} \cdot R_{QAM}}. \quad (2.19)$$

Загальна сума біт у пакеті даних складається з інформаційної частини кадру PL, біт поля даних кадру Ethernet SNAP B_{SNAP} , контрольної суми B_{KS} , та заголовку кадру B_{ZAG} .

$$B_{SUM} = 8 \cdot (B_{SNAP} + B_{ZAG} + PL + B_{KS}). \quad (2.20)$$

Для усунення розбіжностей у кодуванні типів протоколів, комітет 802.2 впровадив поле кадру Ethernet SNAP (SubNetwork Access Protocol, протоколу доступу до підмережі) [46]. Доповненням до заголовка LLC є заголовок SNAP. Він є складовою частиною не лише у кадрах Ethernet, а і у кадрах протоколів інших технологій комітету 802. У випадку інкапсуляції у кадри всіх протоколів локальних мереж таких, як Ethernet, Gigabit Ethernet, Fast

Ethernet, IOVG-AnyLAN, Token Ring та FDDI - протокол IP завжди використовує структуру заголовків LLC/SNAP [47].

За стандартами Ethernet II та IEEE 802.3, мінімальний розмір кадру PL складає 64 байта, а максимальний – 1518 байт.

Кадр, довжиною меншою за 64 байт розглядається станцією, як "фрагментом колізії" та автоматично відхиляється.

В 1998 році, розроблений стандарт IEEE 802.3ac дозволив збільшити максимальний розмір кадру до 1522 байт [48], для використання технології віртуальних локальних мереж (VLAN), однак розмір кадру такої величини не був стандартизованим.

Для розмірів кадрів менших, ніж мінімальне значення та більших, ніж максимальне значення розміру кадру станція-отримувач взагалі не приймає. Вони вважаються недійсними, як результати колізії або інших небажаних сигналів.

Контрольної суми B_{KS} в стандартах 802 дорівнює 4 біт. Контрольна сума – це деяке значення, розраховане по набору даних під час застосування певного алгоритму, щоб перевіряти цілісність даних у процесі їх передавання блоку даних.

Величина заголовку кадру B_{ZAG} , на відмінну від контрольної суми B_{KS} , залежать від протоколу транспортного рівня, який використовували у процесі передавання кадру. Якщо застосовують протоколу TCP, то користуються великим заголовком та передавання пакетів підтвердження передавання [4]. Це збільшує частку каналного ресурсу, яка необхідна для передавання лише пакетів інформаційних даних. У випадку використання протоколу UDP, каналний ресурс стає меншим через використання маленьких заголовків та відмовою від користування підтвердження про доставку.

Висновки до розділу

1. Розрахунок реальної бітової швидкості безпроводових мереж стандарту IEEE 802.11 для передавання потокового відеоконтенту у насиченому режимі використовується методика розрахунку, яку запропонував Джузеппе Біанкі.

2. Пропускна здатність каналу залежить від часу реалізації віртуального конкурентного вікна.

3. Час реалізації віртуального конкурентного вікна збільшується зі збільшенням кількості абонентів, які здійснюють одночасне передавання.

4. Час віртуального вікна залежить від математичного сподівання числа колізій, тривалості колізії, тривалості часу передавання кадру даних і порожніх часових інтервалів.

5. Щоб знайти тривалість часу реалізації віртуального конкурентного вікна треба визначити час передавання кадру і тривалість колізії, які залежать від режиму доступу до середовища MAC у стандарті IEEE 802.11: централізованого режим доступу PCF та розподіленого DCF.

6. Щоб визначити інтервал часу, протягом якого передається саме кадр даних і час колізії, для початку потрібно визначитись з методом модуляції.

7. Величина кадру із системними бітами інформації може змінюватись у залежності від протоколу транспортного рівня, який використовується у процесі передавання.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СПЕЦИФІКАЦІЇ 802.11АХ У РІЗНИХ УМОВАХ ВИКОРИСТАННЯ

3.1 Вибір методу дослідження характеристик стандарту IEEE 802.11ах

Існує велика кількість методів дослідження стандартів IEEE 802.11. Для даної роботи вибраний спосіб моделювання в сторонній програмі.

Моделювання обстановки у приміщенні з використанням точок доступу, які підтримують специфікацію 802.11ах, зроблено в програмі TamoGragh Site Survey [49].

3.2 Моделювання розповсюдження Wi-Fi сигналу специфікації 802.11ах у приміщенні з сильним загасанням сигналу

Для початку треба визначити середовище для розповсюдження сигналу. Так як, програмне забезпечення TamoGragh Site Survey має широкі можливості у моделюванні сигналу в різних умовах, на початку створення проекту, в спадному списку *Вибір типу середовища* вікна *Майстра проектів* виберемо приміщення з сильним загасанням сигналу (закритий офіс, квартира) (рис. 3.1).

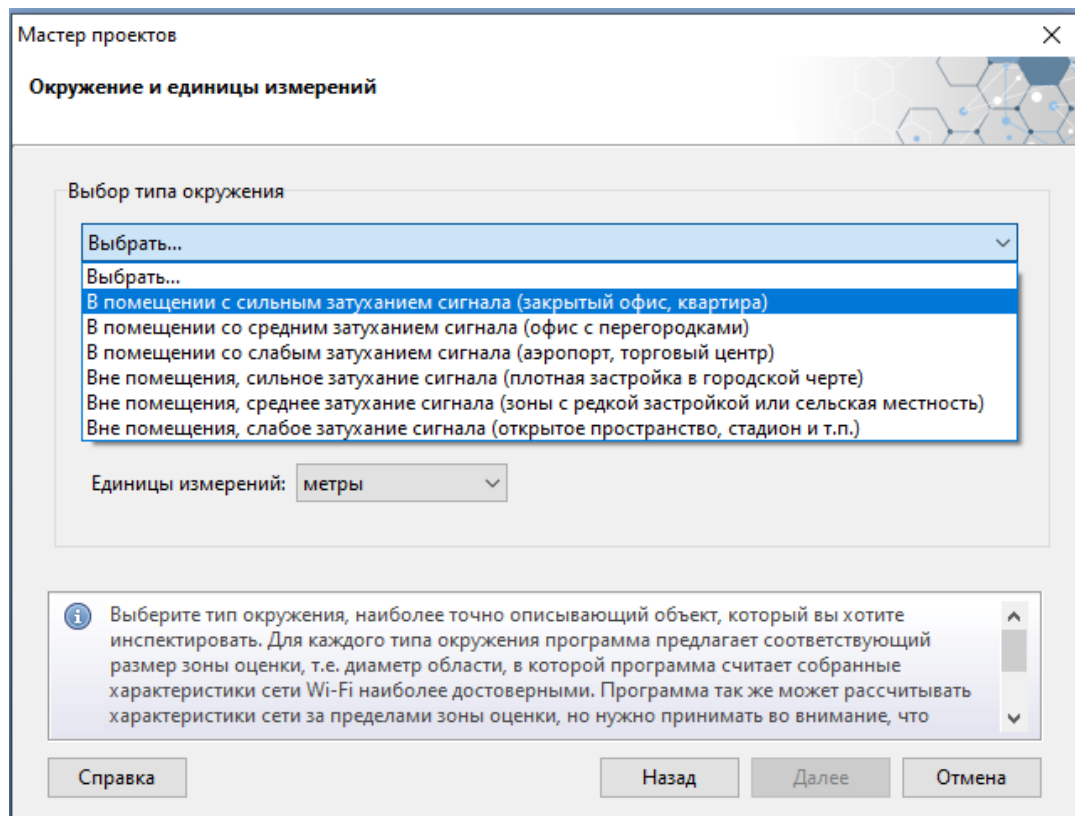


Рис. 3.1 – Вибір типу середовища

Далі потрібно знайти відповідний для типу середовища план будівлі. Для цієї роботи вибрано план просторої двохкімнатної квартири з достатньо великою кількістю перешкод у вигляді дев'ятисантиметрових перегородок, які виконують функцію стін. (рис. 3.2)

Наступним важливим кроком в підготовці до моделювання є правильне входження в масштаб. З використанням функції *Калібрування поточної карти* вибирається елемент плану будівлі (рис. 3.3) та присвоюється відповідний розмір. Наприклад, в цьому випадку найпростішим елементом для масштабування є дверний отвір. Припустивши, що стандартна ширина дверей дорівнює 75 сантиметрів, вводимо це значення у відповідне вікно та натискаємо кнопку *Прийняти*. В результаті масштабування отримано площу приміщення, яка складає близько 62 м².

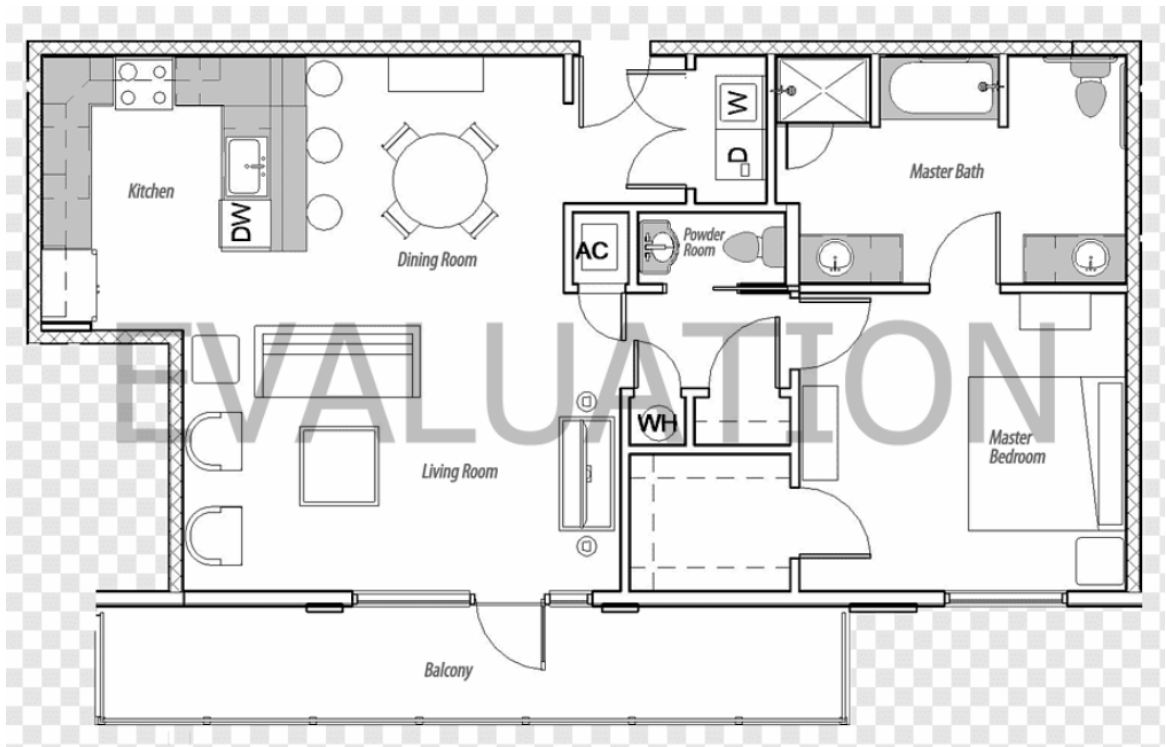


Рис. 3.2 – План квартири

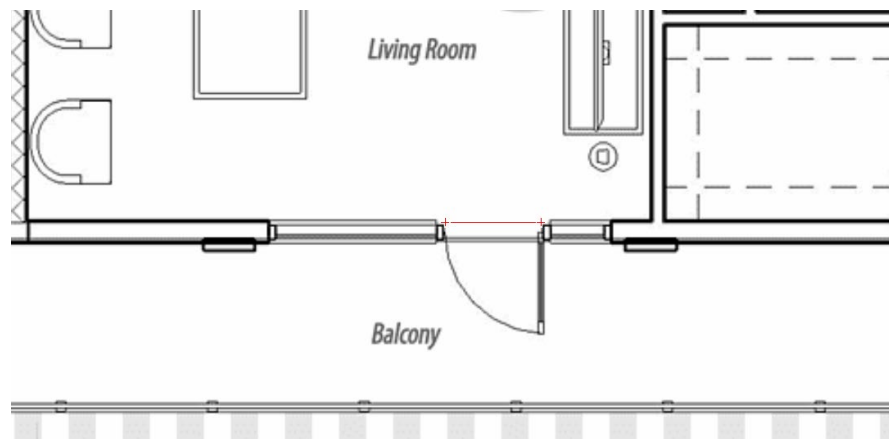


Рис. 3.3 – Вибір масштабу для дверного отвору та квартири в цілому

Для моделювання коректного зображення розповсюдження сигналу в квартирі, потрібно змоделювати перешкоди, які можуть спричинити завади для сигналу. Програма TamoGraph Site Survey має велику кількість варіантів

матеріалів та товщини для стін, вікон та дверей, які мають свої показники поглинання сигналу (рис. 3.4).

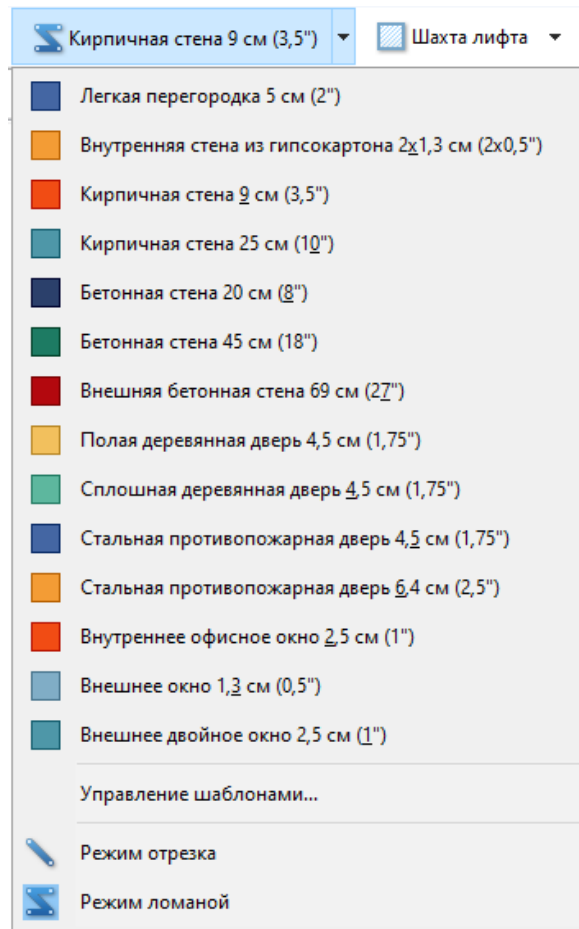


Рис. 3.4 – Меню вибору матеріалу

Так, як з внутрішніми цегляними стінами товщиною 9 см (помаранчевий колір) було вирішено, стандартними зовнішніми станами будуть цегляні стіни 25 см (синій колір). Також, вибір пав на подвійне вікно 2,5 см та дерев'яні двері 4,5 см(жовтий колір).

Предметом розповсюдження Wi-Fi сигналу буде точка доступу з підтримкою специфікації 802.11ax, які працюють в діапазонах 2.4 ГГц та 5 ГГц. Для комфортного користування Wi-Fi, встановимо 2 точки доступу у вітальні та спальні(рис. 3.5). Результат побудови завод у квартирі встановлення точок доступу проілюстровано на рис. 3.5.

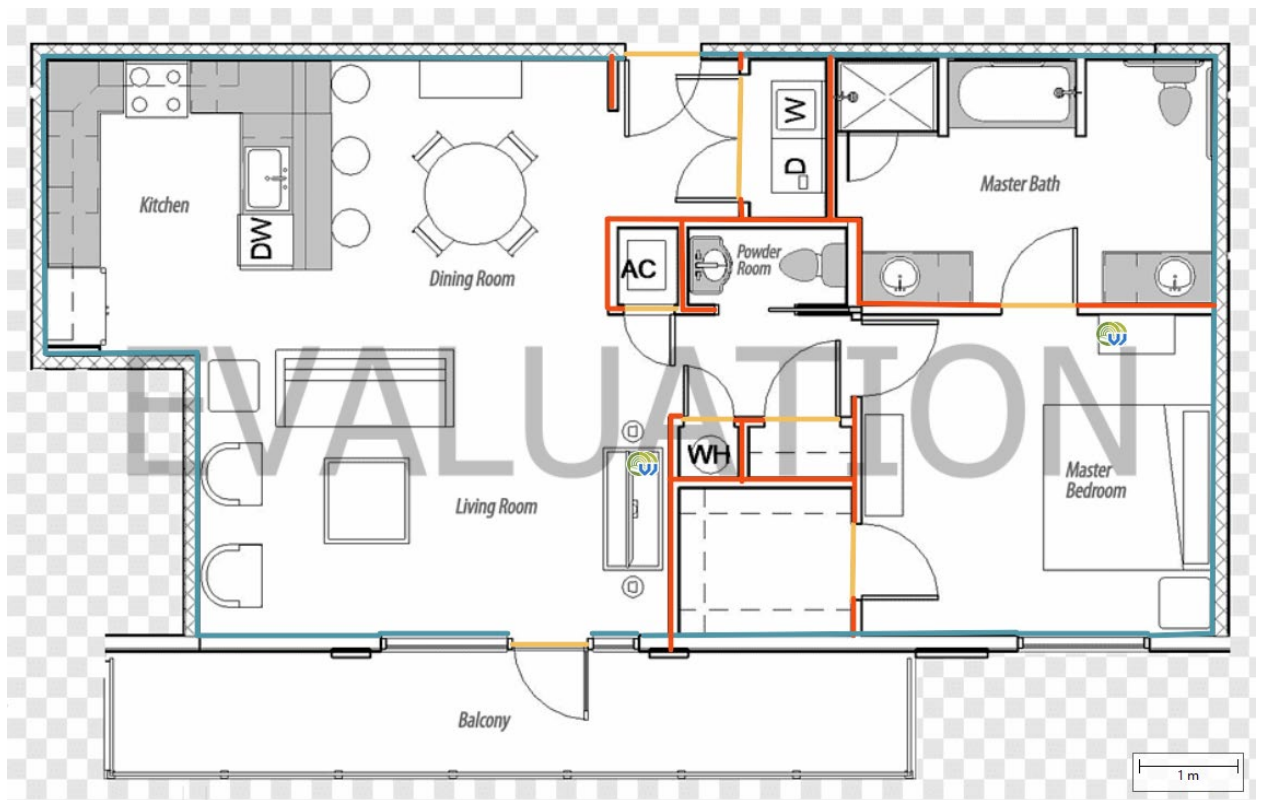


Рис. 3.5 – Побудова завад у квартирі та встановлення точок доступу

В даній роботі для кожного діапазону частот буде проаналізовано три ситуації для трьох показників станцій: рівень сигналу, відношення сигнал/шум та прогнозована фізична швидкість. Під ситуаціями розуміється робота точок доступу поодиночі та разом.

Спочатку розглянемо ситуацію роботи роутерів на частотному діапазоні 5 ГГц. Для зручності опису назвемо першим роутер встановлений у вітальні(Living Room), а другим – у спальні(Master Bedroom).

На рис. 3.6 - 3.8 можна спостерігати зони та рівень сигналу точок доступу в частотному діапазоні 5 ГГц.

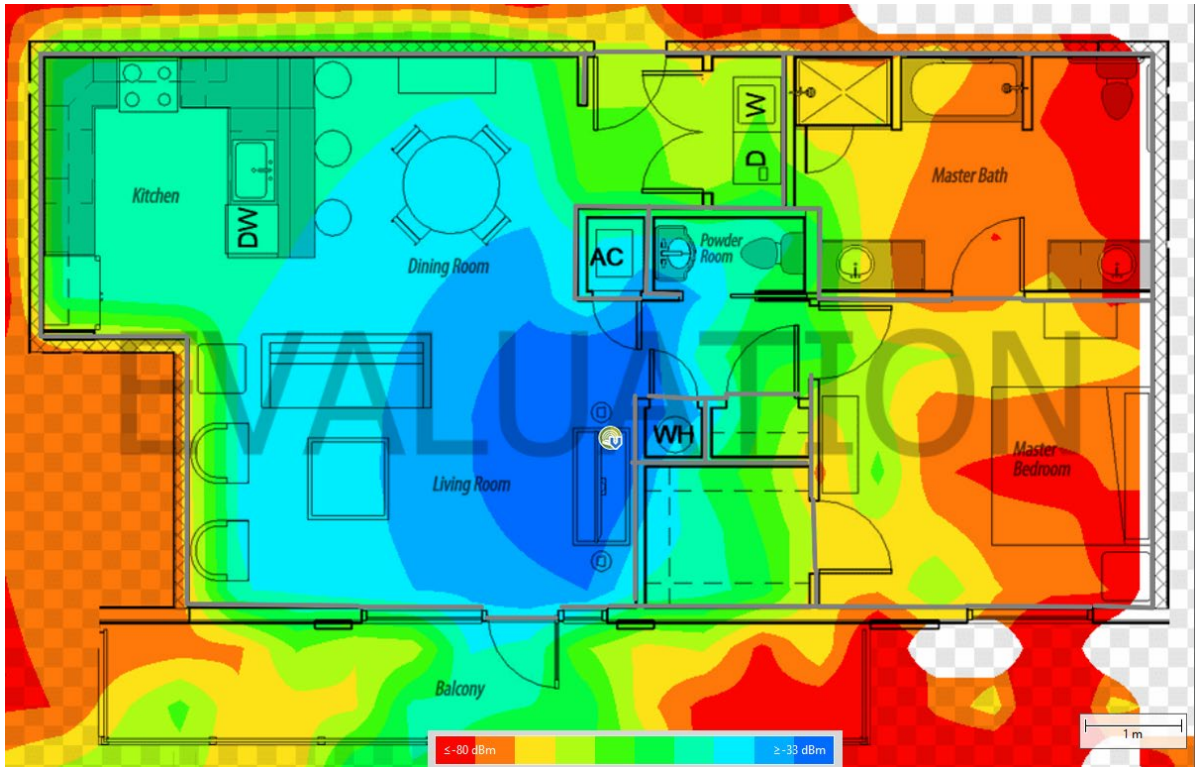


Рис. 3.6 – Рівень сигналу першого роутер в діапазоні 5 ГГц

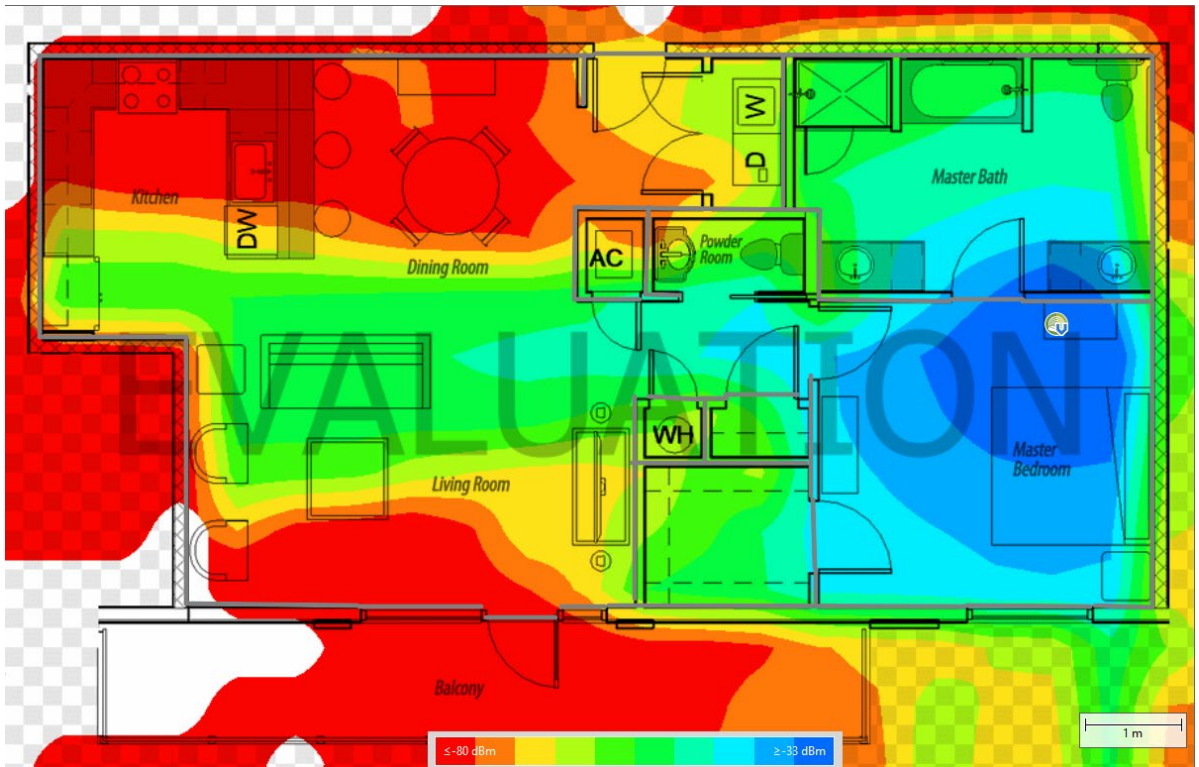


Рис. 3.7 – Рівень сигналу другого роутер в діапазоні 5 ГГц

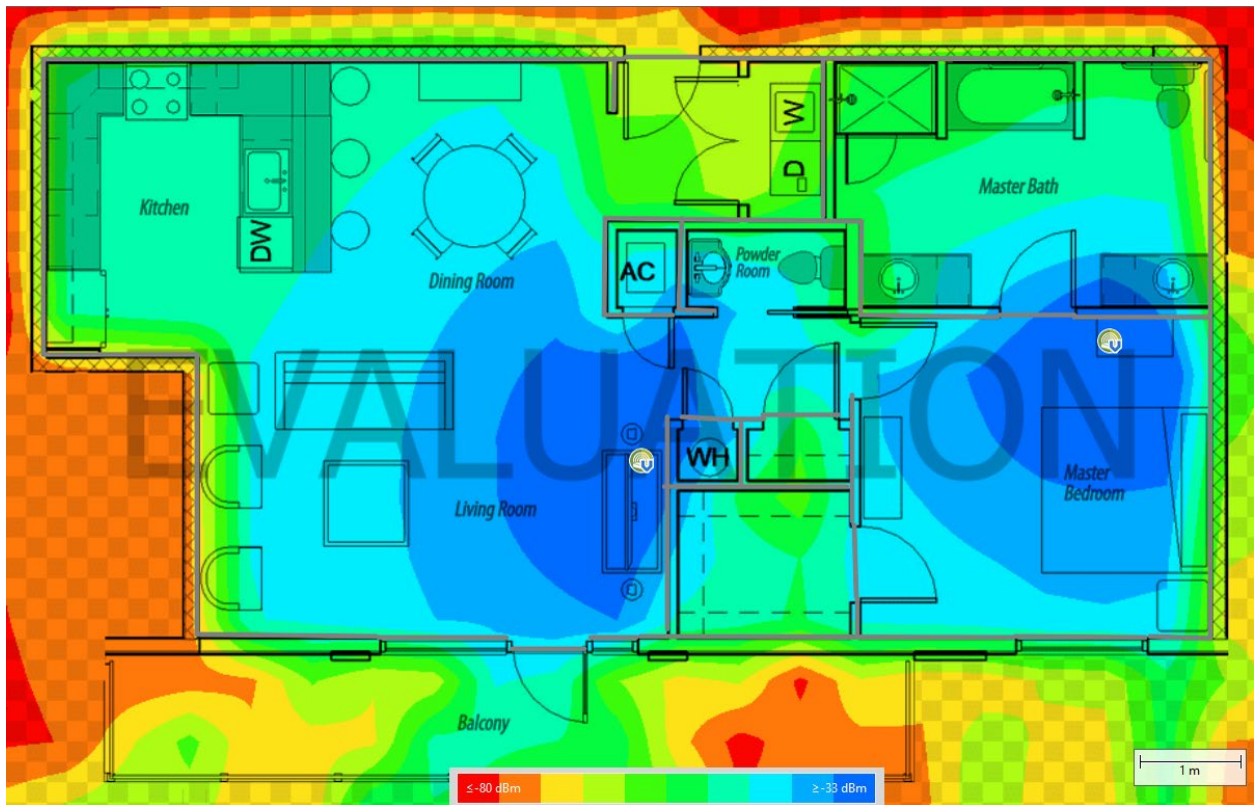


Рис. 3.8 – Рівень сигналу роботи двох роутерів в діапазоні 5 ГГц

З даних зображень, можна зробити висновок, що одна точка доступу, яка працює в діапазоні частот 5 ГГц не в змозі забезпечити якісним сигналом всю квартиру одразу. Тому використання двох точок доступу одночасно оправдана в цьому частотному діапазоні.

На рис. 3.9 – 3.11 зображено відношення сигнал/шум для даних точок доступу.

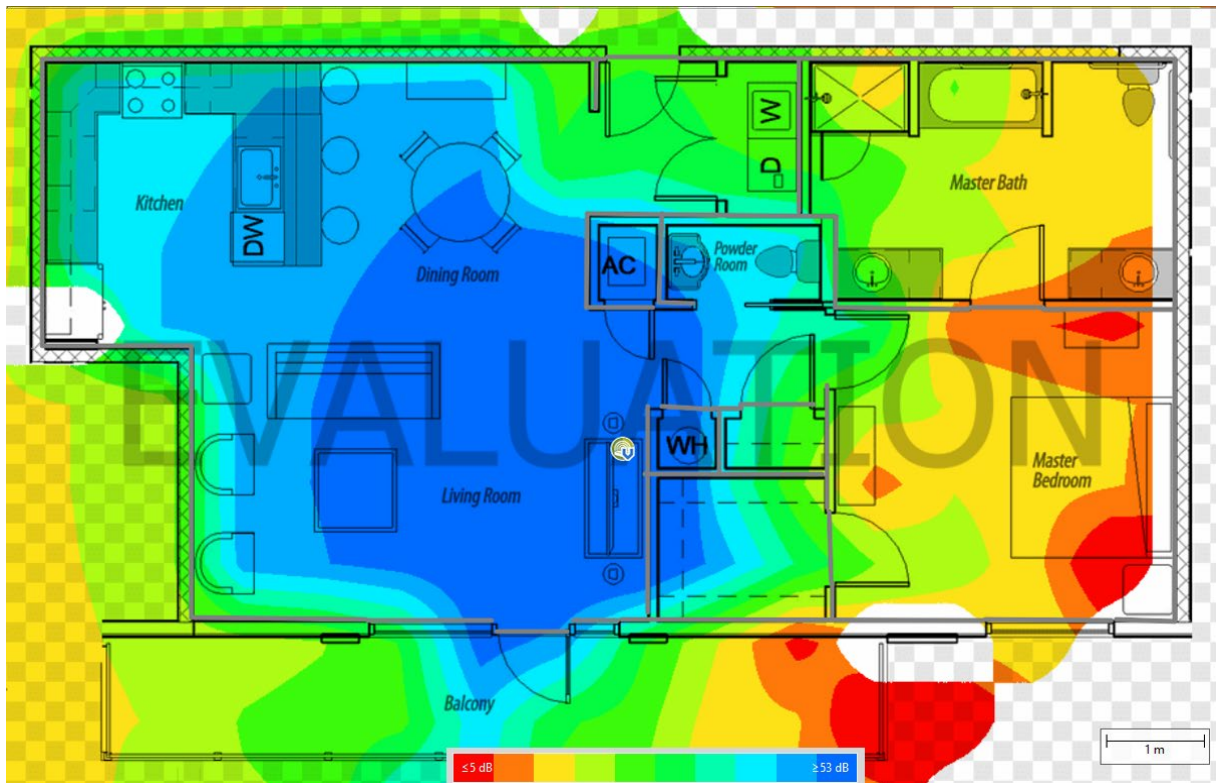


Рис. 3.9 – Відношення сигнал/шум для першого роутер в діапазоні 5 ГГц

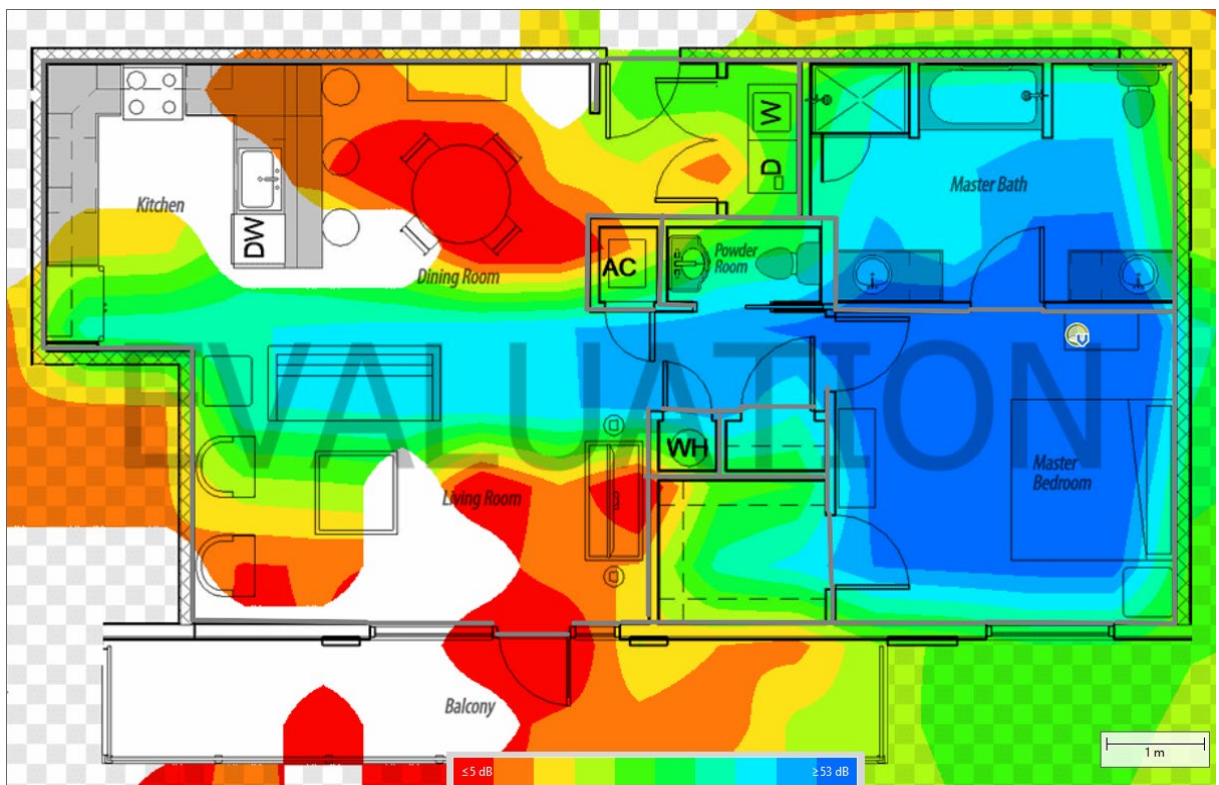


Рис. 3.10 – Відношення сигнал/шум для другого роутер в діапазоні 5 ГГц

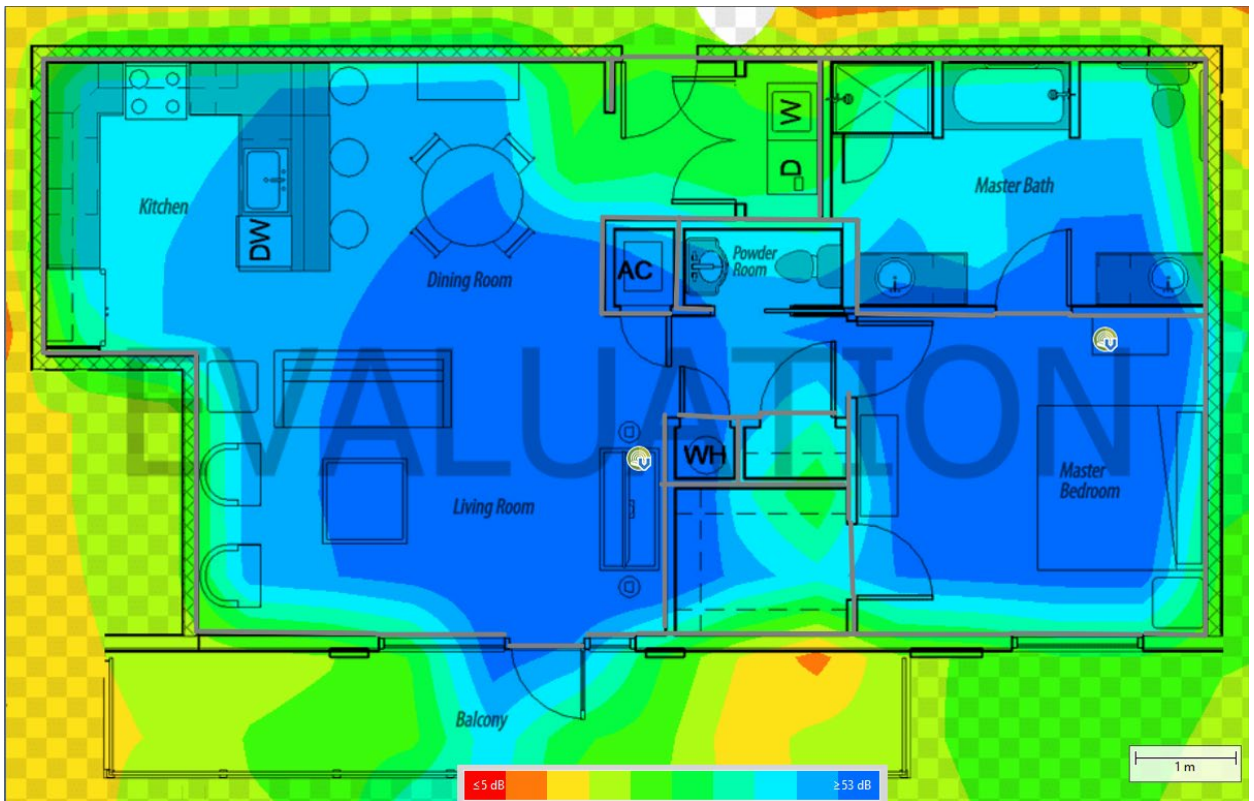


Рис. 3.11 – Відношення сигнал/шум для двох роутерів в діапазоні 5 ГГц

На рис. 3.12 – 3.14 позовово зображено прогнозовану фізичну швидкість для даних точок доступу. Зважаючи на велику кількість перешкод в квартирі, можна побачити, що використання однієї точки доступу недостатньо для забезпечення усієї площі приміщення хорошою швидкістю передавання.

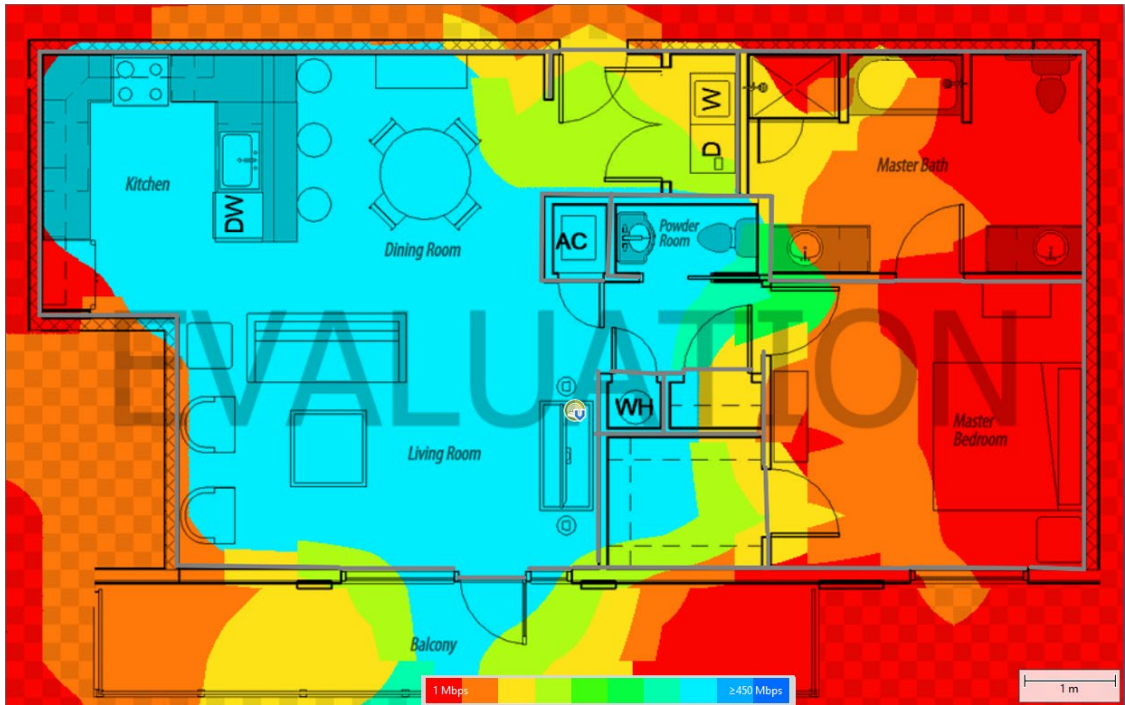


Рис. 3.12 – Прогнозована швидкість для роботи першого роутера в діапазоні 5 ГГц

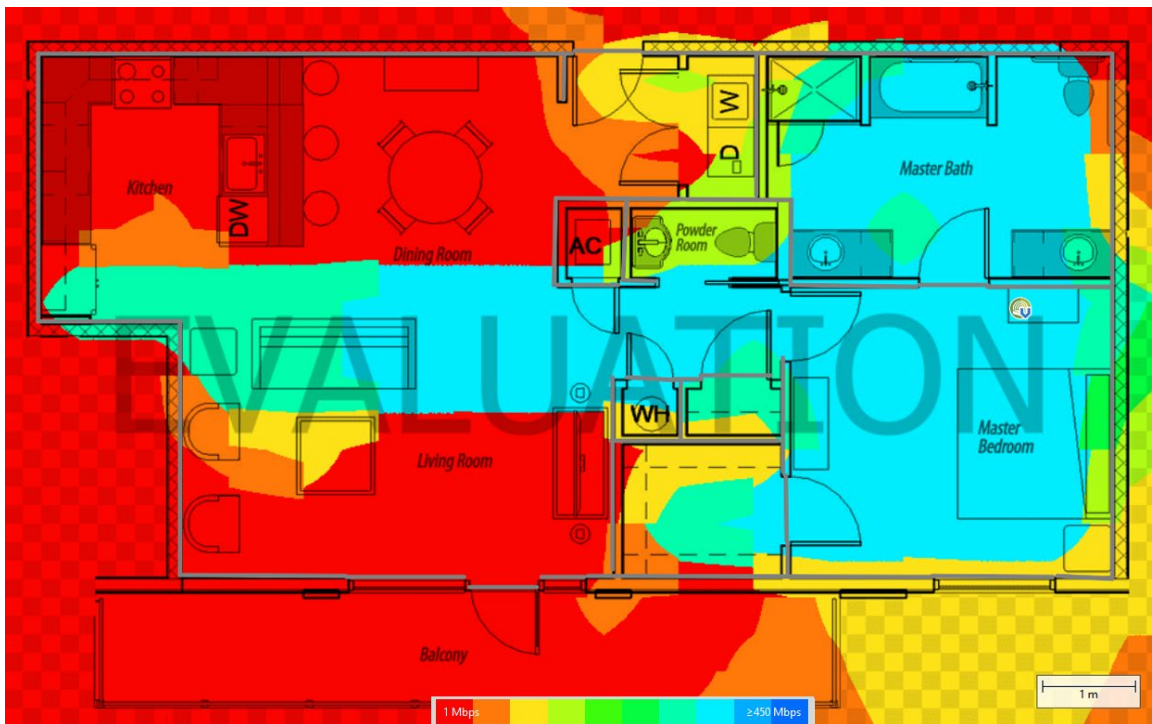


Рис. 3.13 – Прогнозована швидкість для роботи двох роутерів в діапазоні 5 ГГц

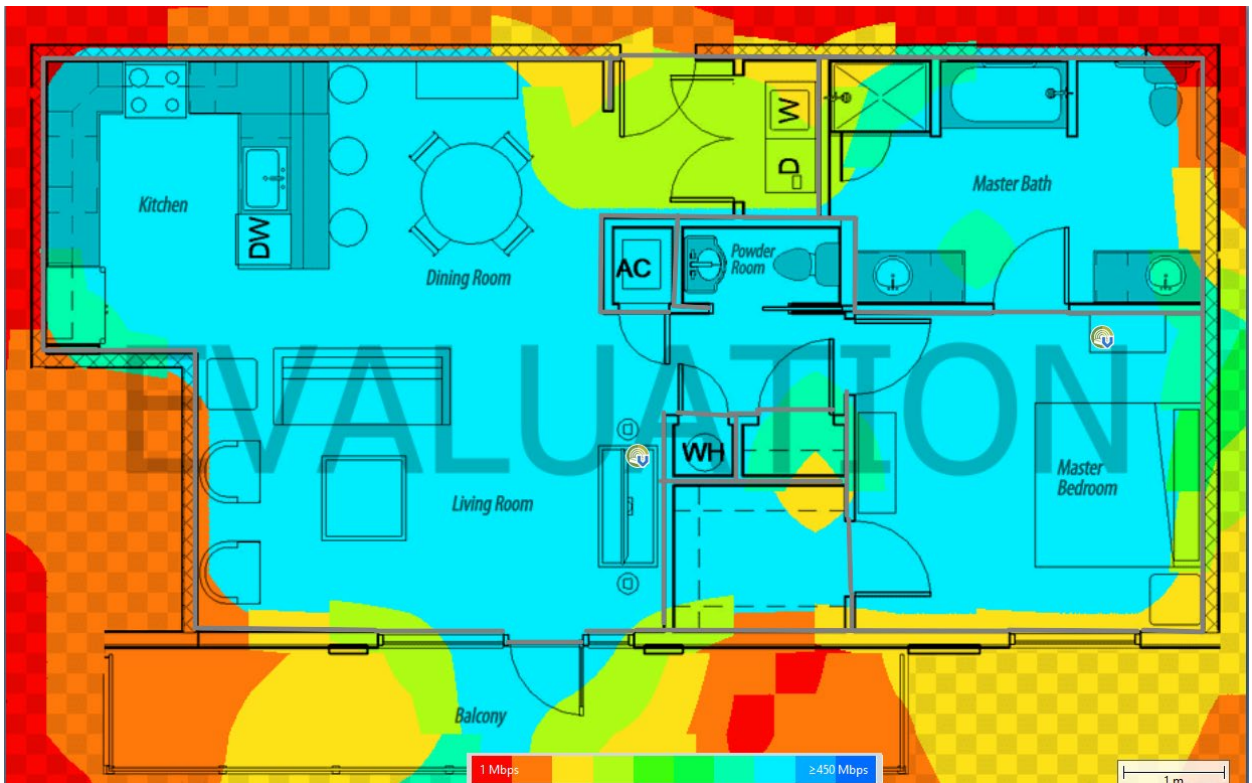


Рис. 3.14 – Прогнозована швидкість для роботи двох роутерів
в діапазоні 5 ГГц

Зараз розглянемо ситуацію роботи точок доступу на частотному діапазоні 2,4 ГГц. Цей діапазон є самим вживаним на даний момент. І кількість пристроїв, яка працює на даному частотному діапазоні по справжньому колосальна. Тому, досить часто прослідковується затухання сигналу у густонаселених будинках з кількома десятками точок доступу. Зазвичай це зв'язано з використанням одного і того самого каналу зв'язку. В порівнянні з діапазоном частот 5 ГГц, у якого 17 каналів та доволі низька ступінь використання, діапазон 2,4 ГГц має тільки 13 каналів та велику кількість користувачів [50]. На рис. 3.14 проілюстровано відношення сигнал/інтерференція двох точок доступу. Цей рисунок добре показує вплив роботи роутерів на одному каналі.

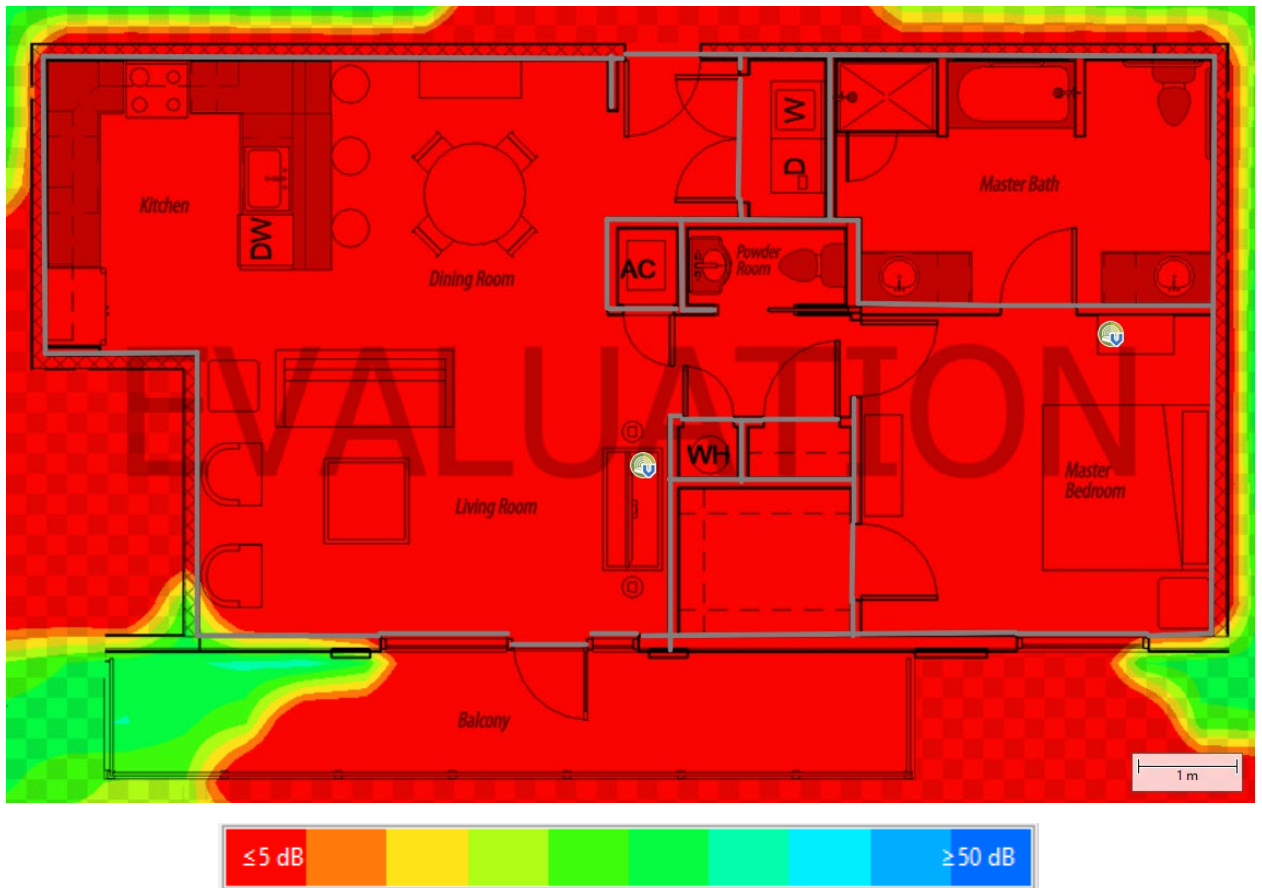


Рис. 3.14 – Відношення сигнал/інтерференція двох точок доступу на одному каналі

Цей рисунок добре показує вплив роботи роутерів на одному каналі та перенасичення ефіру такими точками доступу не сприяє комфортному та швидкому користуванню мережею. Тому, буде доречніше використовувати одну точку доступу, яка розташована у вітальні.

На рис. 3.15 зображено рівень сигналу роутера в діапазоні 2,4 ГГц. В разі використання однієї точки доступу, прослідковується невелика просадка по рівню сигналу в спальній кімнаті, але цей показник все ще знаходиться вище середнього значення.

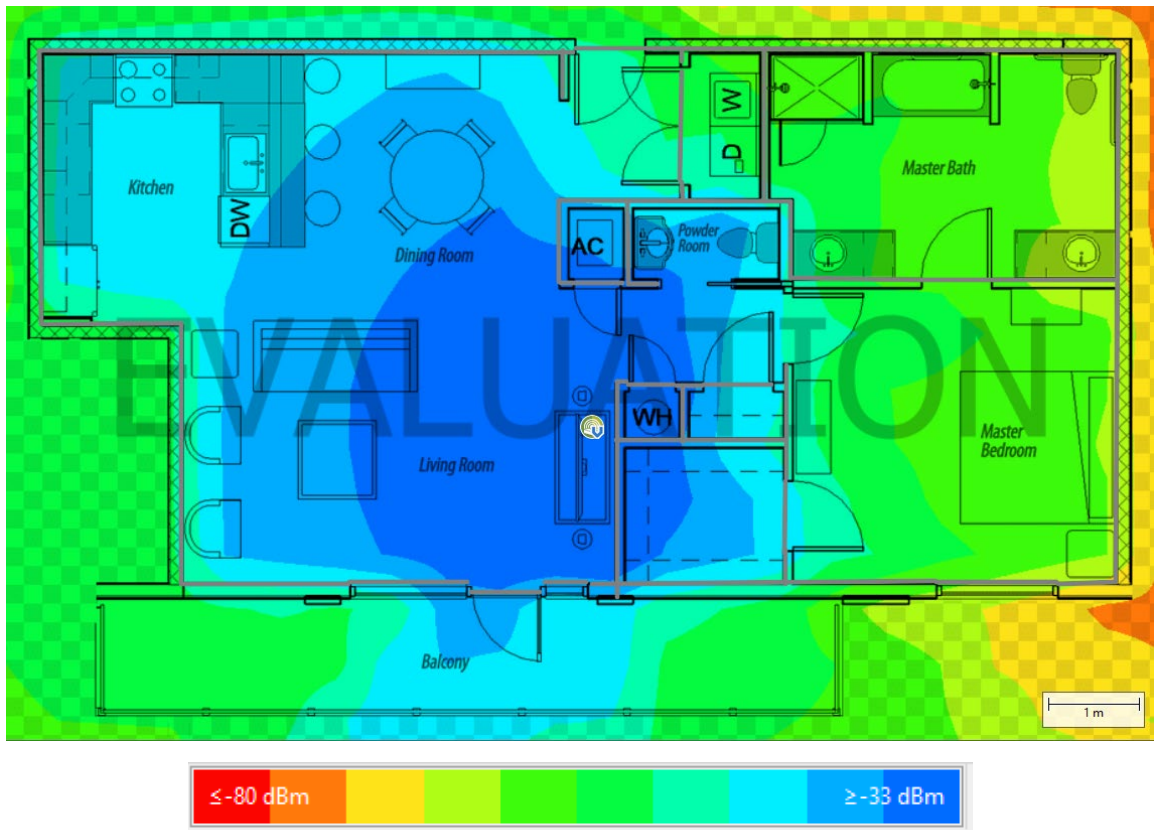


Рис. 3.15 – Рівень сигналу роутера в діапазоні 2,4 ГГц

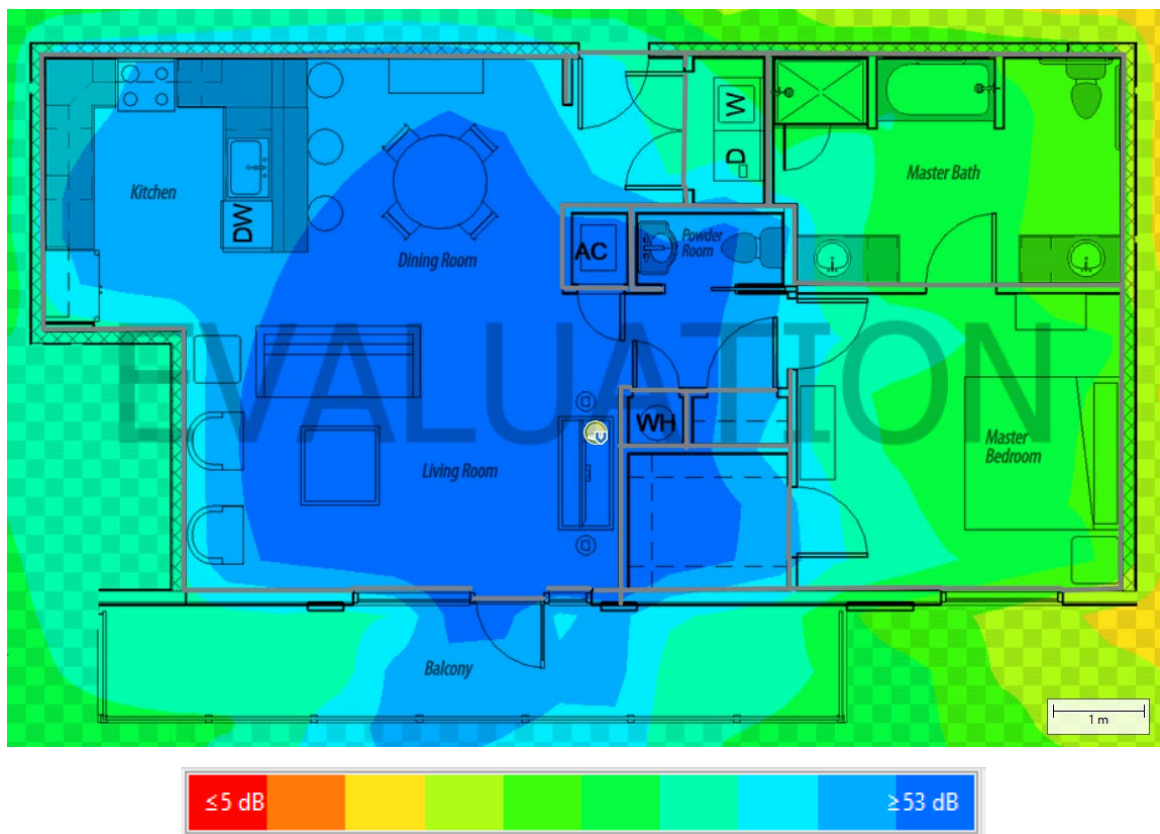


Рис. 3.16 – Відношення сигнал/шум для роутера в діапазоні 2,4 ГГц

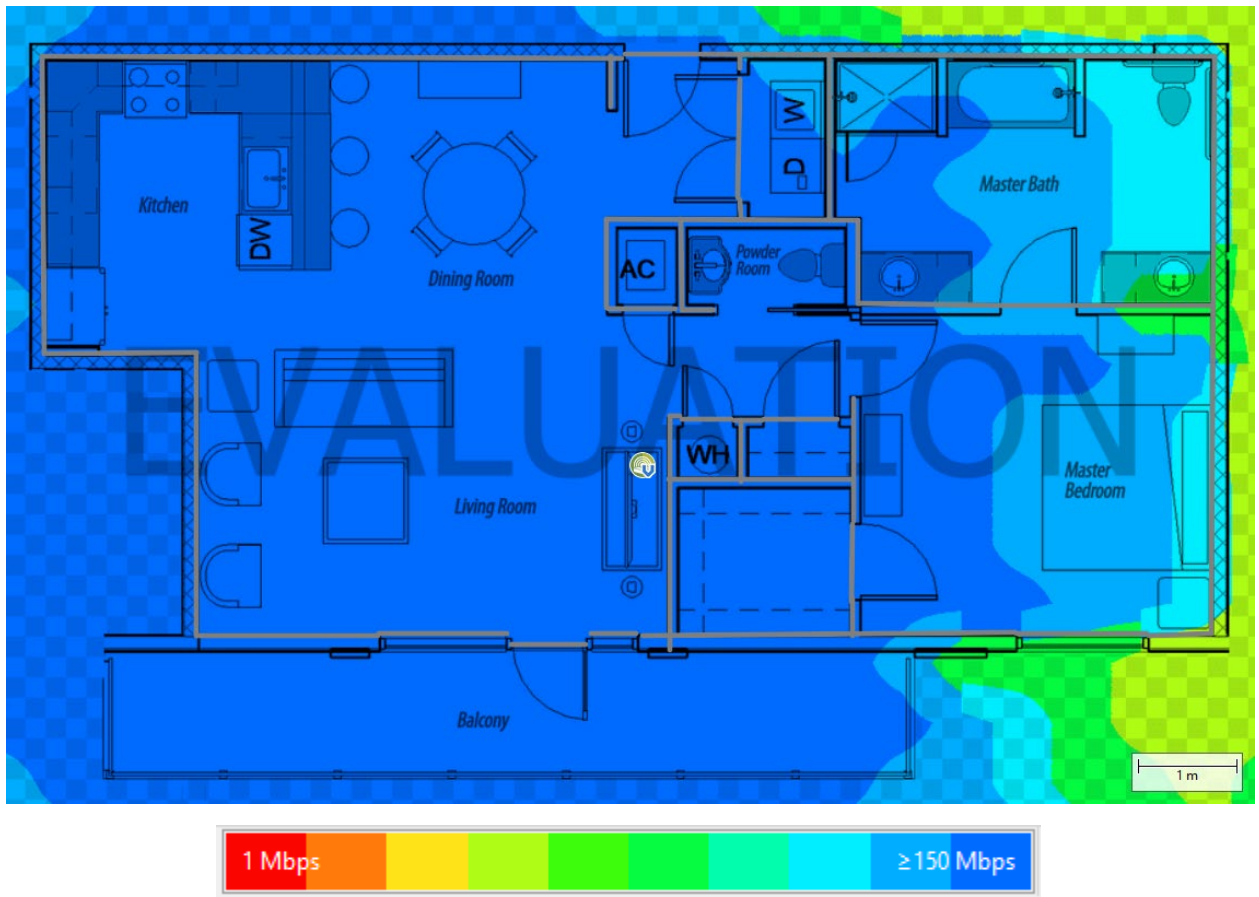


Рис. 3.17 – Прогнозована швидкість для роутера в діапазоні 2,4 ГГц

Що стосується прогнозованих специфікацією 802.11ax та приблизно змодельованих характеристик точок доступу, вони дуже сильно відрізняються. Якщо брати максимальну можливу фізичну швидкість передавання 9608 Мбіт/с та приблизну фізичну швидкість моделі 350 Мбіт/с, це різниця в 27 разів. Чому так вийшло? Для цього потрібно враховувати, що пікову фізичну швидкість точка доступу набирає за наступних характеристик: діапазон частот 5 ГГц, 8 просторових потоків (MIMO 8x8), ширина каналу 160МГц та модуляція порядку 1024QAM.

Тепер привнесемо ці характеристики у справжнє життя. Швидкість передавання зменшується із-за багатьох факторів, але як не дивно саме пристрої користувача вносять найбільшу проблему, однак все по порядку.

Діапазон частот 5 ГГц ввели в експлуатацію ще в 1999 році специфікацією 802.11a та розвивали впродовж всього цього часу. Тому, пристрій з підтримкою 5 ГГц діапазону не новинка.

Технологія MIMO – здатність одночасно передавати кілька потоків даних у єдиному частотному каналі з'явилася ще в 802.11n. Однак, є кілька нюансів [51]:

- MIMO 8x8 – пристрої клієнтів абсолютно не підтримують;
- MIMO 4x4 – підтримується невеликим списком приладів;
- MIMO 3x3 – підтримується топовими ноутбуками;
- MIMO 2x2 - підтримується топовими планшетами та смартфонами;
- SISO 1x1 – підтримується абсолютною більшістю пристроїв.

Для середнього значення візьмемо пристрій, який підтримує MIMO 2x2, тобто методом підрахунку можна визначити початкову, після першого відсіювання, фізичну швидкість: $9608:8 = 1201$ Мбіт/с (базова швидкість для SISO) та множимо її на 2 просторових потоки і отримуємо $1201 \times 2 = 2402$ Мбіт/с.

З шириною каналу, також, все не так просто. Специфікація 802.11ax насправді дозволяє використовувати ширину каналу 160 МГц, однак навіть ширину каналу 80 МГц рідко використовують через інтерференції, яка пошкоджує ефір всім сусіднім мережам та самому користувачу. 40 МГц допускається тільки для діапазону частот 5 ГГц у випадку сприятливих умов в мережі та невеликої кількості сусідніх мереж. І самим розповсюдженим варіантом є використання каналу шириною 20 МГц. В моделюванні було використано канал шириною 40 МГц, тому фізична швидкість буде розрахована наступним чином: коефіцієнти для каналів шириною 40, 80 та 160 МГц відповідно 2.1, 4.5 та 9.0. Ділимо залишок фізичної швидкості після MIMO на коефіцієнт для 160 МГц, для знаходження одиничного значення: $2402:9 = 266,8$ МГц та множимо на коефіцієнт для ширини каналу 40 МГц ($266,8 \times 2.1 = 560$ Мбіт/с).

Щодо модуляції, в специфікації 802.11ах передбачена 1024QAM – на даний момент, модуляція найвищого порядку. Вона висуває дуже високі вимоги до якості сигналу, тому для повсякденного використання буде застосовуватися модуляція нижчого порядку – 64QAM. Скориставшись таблицею залежності швидкості передавання даних від методу модуляції для специфікації 802.11ах [52] та модуляції 64QAM 5/6 отримаємо середнє значення швидкості передавання 325 Мбіт/с. І це реальне значення є дуже близьким до змодельованого.

І вже ця розрахована швидкість в 325 Мбіт/с буде ділитись порівну для другого і більше пристрою в мережі [51].

3.3 Прогноз можливих характеристик пристроїв специфікації 802.11ах

Якщо робити прогноз реально досяжної фізичної швидкості для пристроїв 802.11ах в близькому майбутньому, треба знову таки проаналізувати характеристики для пікової досягнення пікової швидкості передавання даних. Список пристроїв, які підтримують 802.11ах та MU-MIMO одночасно не великий. При цьому, максимальна кількість просторових потоків для смартфонів – це 2 [53], для ноутбуків – 3 - 4. Можна припустити, що в майбутньому кількість потоків для нових девайсів збільшиться до 4 - 5. Ширина каналу прогнозовано так і залишиться 40 МГц для діапазону 5 ГГц через проблеми з інтерференцією. У разі вибору модуляції максимально можливим є використання 256QAM. Однак навіть з цим порядком модуляції, вона дуже вимоглива до якості сигналу RSSI та RNS. RNS напряму залежить від клієнтських пристроїв з всеспрямованими антенами та не тільки від них. А RSSI – ніде не зарегламентований, тому кожного виробника він має різні значення [51].

Використавши таблицю [52] з попереднього дослідження, можна побачити, що прогнозована досяжна швидкості передавання для одного

пристрою в ідеальному для цього середовищі буде коливатись від 866 до 1083 Мбіт/с (в залежності від досягнутої кількості просторових потоків). Тобто, зрівнюючи з теперішніми показниками – це приріст у швидкості в 2 - 3 рази та зрівнюючи з ідеальними показниками – різниця в 8 - 11 разів.

Висновки до розділу

1. Важливим кроком в підготовці до моделювання є правильне входження в масштаб.

2. Програмне забезпечення TamoGragh Site Survey дуже добре підходить для попереднього моделювання майбутньої мережі Wi-Fi. Для цього в програмі є все необхідне, починаючи від використання плану своєї будівлі до отримання приблизної фізичної швидкості готової системи.

3. Діапазони 2,4 та 5 ГГц мають різні експлуатаційні призначення. Точка доступу на діапазоні частот 2,4 ГГц має велику площу покриття і порівняно невелику (з 5 ГГц діапазоном) швидкість передавання даних. Також, завади в виді тонких стін мало впливають на швидкість передавання та рівень сигналу. Цей варіант підійде для великих офісів або будинків з малою кількістю точок доступу.

Точка доступу на діапазоні частот 5 ГГц, з іншої сторони, має невелику площу покриття та дуже високу швидкість передавання. Є дуже чутливою навіть до стін з невеликою товщиною, що призводить до погіршення рівня сигналу і зменшення швидкості. Даний тип мережі підійде для людей, яким потрібна стабільна робота з передавання відео контенту у високій якості(стрімінгові компанії) або для особистого користування в густонаселеному районі/ будинку.

4. Часто прослідковується затухання сигналу у густонаселених будинках з кількома десятками точок доступу. А саме через перенавантаження конкретного каналу передавання.

5. Модуляція 256QAM дуже вимоглива до якості сигналу RSSI та RNS. RNS на пряму залежить від клієнтських пристроїв з всепрямованими антенами та не тільки від них. А RSSI – ніде не зарегламентований, тому у кожного виробника пристроїв він має різні значення.

4 РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО РОЗГОРТАННЯ МЕРЕЖІ WI-FI

Інтернет-центр (роутер або маршрутизатор) із безпроводовою точкою доступу Wi-Fi дозволяє організувати високошвидкісну безпроводову мережу для роботи в Інтернеті й домашньої мережі з ноутбуків, планшетів, смартфонів та інших пристроїв. Доступ до Інтернету по безпроводовій мережі можна забезпечити будь-які пристрої, які оснащено модулями та адаптерами Wi-Fi: телевізори з функцією Smart TV, ігрові приставки, розумні годиники та інші.

Більшість користувачів встановлюють точки доступу в кімнаті біля свого робочого столу, на якому знаходиться комп'ютер. Це і не дивно: підключення електроживлення недалеко, забезпечується вільний доступ до пристрою для вмикання/вимикання, можливість підключення мережевим кабелем пристроїв домашньої мережі. Якщо робота домашньої безпроводової мережі Wi-Fi вас влаштовує (забезпечується впевнений сигнал в потрібних кімнатах квартири), нічого міняти не потрібно. Залиште роутер в тому ж місці, де він був вами встановлений.

Однак, якщо у вас в квартирі багато кімнат, або квартира має нестандартне планування, а вам необхідно забезпечити впевнений сигнал Wi-Fi і максимальний радіус дії безпроводової мережі по всій квартирі, в цьому випадку до вибору місця розташування точки доступу Wi-Fi потрібно підійти з розумом.

Можуть спостерігатися періодичні розриви з'єднання, слабкий та нестабільний сигнал, низька швидкість підключення для неправильно розміщеної точки доступу Wi-Fi.

Сучасні пристрої, оснащені антенами та передавачами з хорошим коефіцієнтом посилення та потужністю сигналу, які допомагають забезпечити стабільну та якісну роботу безпроводової мережі [54].

У відкритому просторі сигнал практично не піддається негативному впливу, але слабшає або відбивається, проходячи через різні перешкоди (це

можуть бути стіни, двері, меблі). Кожна перешкода, яка була в зоні поширення сигналу, знижує його потужність або відображає. Чим більше перешкод, тим гірше стає сигнал.

Сигнал Wi-Fi не тільки обминає перешкоди, але й проходить крізь них, що може призвести до значного погіршення вихідного сигналу.

Деякі перешкоди поглинають сигнал сильніше інших, так як зроблені з рихлих матеріалів та мають різну товщину, особливо бетонні стіни та стелі, а також як дзеркала та залізні двері сильно відбивають сигнал.

На якість сигналу впливає не тільки кількість стін, розташованих на шляху поширення сигналу, а також їх товщина та будівельний матеріал, з якого вони зроблені.

Тоноване скло, штукатурка, вода, мармур, цегла - це матеріали, що впливають на сигнал, послаблюючи його. А, в свою чергу, бетон, метал, кераміка та дзеркала значно впливають на проходження сигналу (рис. 4.1) [54].

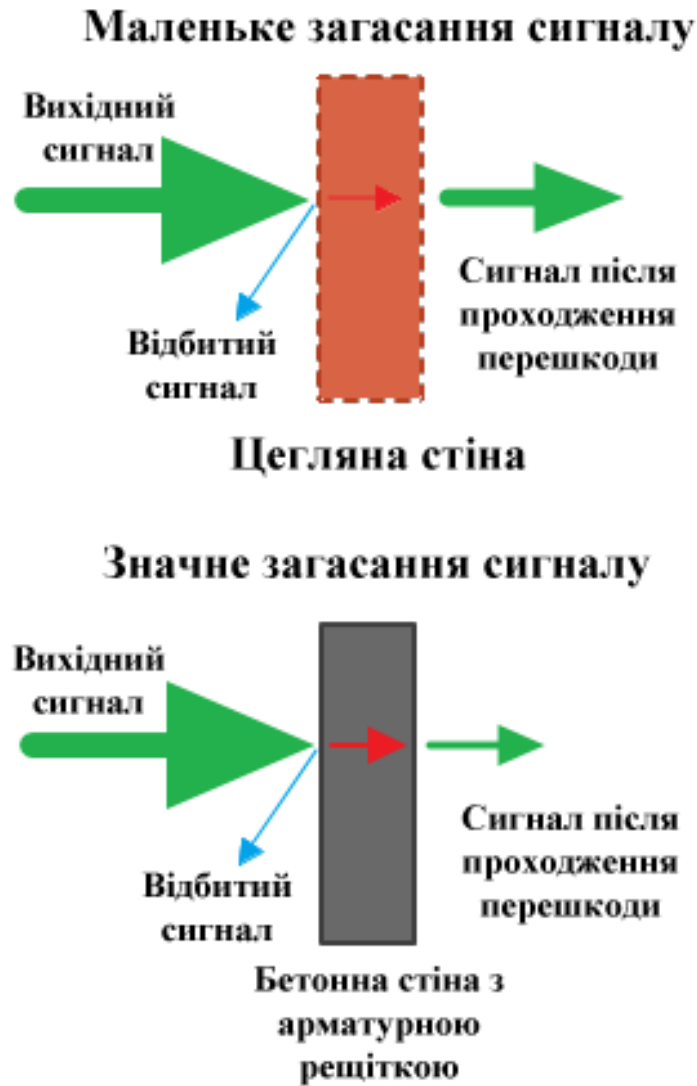


Рис. 4.1 – Залежність рівня сигналу після проходження крізь стіни із різних матеріалів

В даний час більшість пристроїв працюють в діапазоні частот 2,4 ГГц. На цій же частоті працюють різні побутові прилади - мікрохвильові печі, Bluetooth, Smart TV телевізори, безпроводові радіотелефони, клавіатури, мишки та інші пристрої, що створюють великі електромагнітні перешкоди.

Також на безпроводову мережу можуть чинити негативний вплив пристрої Wi-Fi ваших сусідів (роутери, точки доступу). Це може призвести до зниження мережі, а в деяких випадках і до повного загасання сигналу Wi-Fi [54].

Припустимо, що необхідно знайти місце в квартирі для точки доступу, яке стріяло роботі мережі Wi-Fi у всіх кімнатах квартири (рис. 4.2) [54].

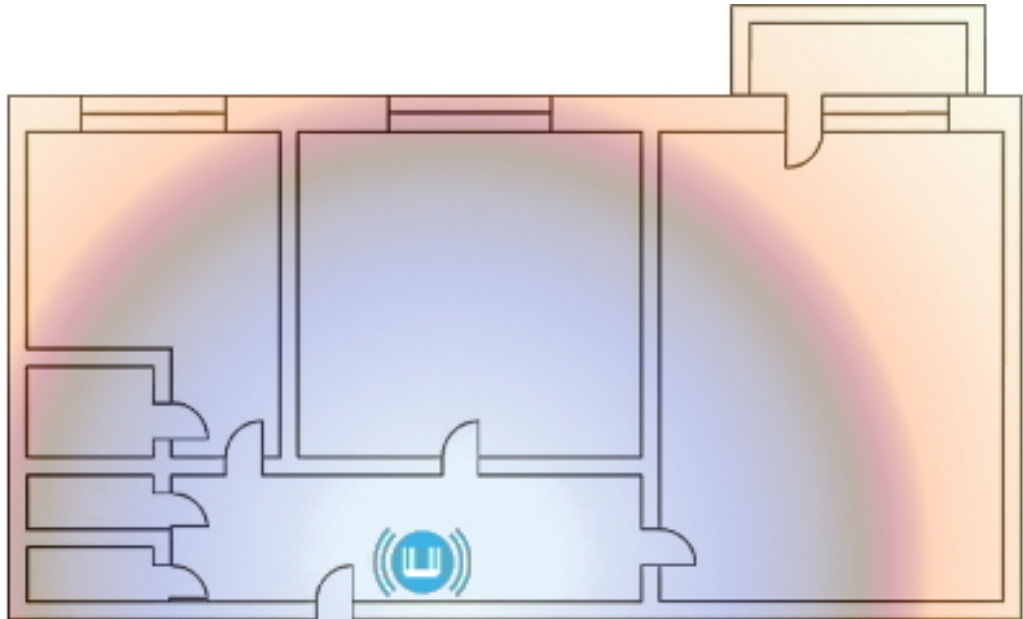


Рис. 4.2 – Розміщення точки доступу задля охопту більшої площі сигналом мережі

Тому, сигнал Wi-Fi має долати менше перешкод між пристроями безпроводової мережі, або і взагалі вільно проходити через всю площу покриття. У цьому випадку сигнал буде сильніше та швидкість передавання даних вища.

Розміщування роутера повинно бути таким, щоб кількість стін була мінімальною. Чим більше стін або інших перешкод, тим слабше буде сигнал. Оптимальною точкою розміщення роутера буде приблизний центр квартири.

Один з оптимальних варіантів розміщення - це коридор чи хол. З них зазвичай існує майже повна видимість у кожную кімнату. Для такого випадку розміщення, точка доступу буде оточена всіма пристроями домашньої

мережі, що будуть підключатися до неї та зможуть впевнено приймати сигнал.

Часто саме біля вхідних дверей заходить кабель від вашого провайдера у квартиру. Встановивши роутер біля вхідних дверей не потрібно буде здійснювати протяжку мережевого кабелю Ethernet по квартирі.

Рекомендується розмістити роутер вище, наприклад, покласти на шафу або повісити на стіну на висоті не менше 2 метрів. Таке розташування обладнання дозволить забезпечити краще покриття сигналом Wi-Fi.

З передпокою можна отримати найкраще поширення сигналу по всій квартирі. При стандартному плануванні квартири передпокіїв знаходиться практично посередині житлового приміщення, так що саме з неї сигнал Wi-Fi буде рівномірно поширюватися по всій квартирі.

Припустимо, ви визначилися з місцем розміщення роутера. Тимчасово встановіть його і перевірте якість прийому сигналу Wi-Fi в різних кімнатах. Якщо в якійсь кімнаті сигнал дуже слабкий, можна пересунути роутер ближче до тій кімнаті, і знову перевірити рівень сигналу спочатку в ній, а потім в інших кімнатах.

Не можна визначити якийсь шаблонне і оптимальне для всіх приміщень місце розміщення роутера в квартирі. У будь-якому випадку, вам доведеться самостійно вибирати найбільш оптимальне місце [54].

Використовуючи сучасні мобільні пристрої, можна легко визначити рівень сигналу Wi-Fi від точки доступу в різних місцях квартири.

Також, рекомендується не розміщувати точку доступу:

1) У нішах (заглибленнях) стіни, за виступами або іншими різними перекриттями та перешкодами, тобто в місцях з обмеженим простором.

2) У найнижчій точці розміщення. При такому розміщенні сигнал буде більше «заглушений» меблями та іншими перешкодами.

3) Поруч з електроприладами та іншими джерелами випромінювання радіохвиль. Рекомендується витримувати відстань між роутером і електроприладами не менше 1-2 метрів. Чи можемо відзначити,

що база від радіотелефону створює перешкоди навіть тоді, коли телефонна трубка неактивна. Багато електроприладів зосереджені саме на кухні, в зв'язку з цим кухня не краще місце для розміщення роутера.

4) Поруч з радіаторами опалення або в місцях, де ускладнена вентиляція пристрої. В цьому випадку роутер може перегріватися і нестабільно працювати.

В процесі роботи інтернет-центр нагрівається, тому:

- не піддавайте його дії в місцях з температурою повітря, що перевищує 40 ° С, в закритих шафах і порожнинах, а також на інші вироби чи предмети, які можуть нагріватися;
- не закривайте інтернет-центр і не ставте на нього ніяких предметів;
- стежте за тим, щоб ніщо не загороджувало вентиляційні отвори в корпусі [54].

5 СТАРТАП-ПРОЕКТ

5.1 Основні відомості

Сутність стартап-проекту. Під час дослідження ринку передавання контенту запропоновано нову систему по проведенню прямих трансляцій на основі Wi-Fi 6. Зміст ідеї стартапу та визначення її характеристик наведено в табл. 5.1 та табл. 5.2.

Таблиця 5.1 – Зміст ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Запропонувати нову систему передавання аудіо- та відеоконтенту у високій якості для прямих трансляцій з використанням Wi-Fi 6	1.Стрімінгові компанії	Висока швидкість передавання
	2.Соціальні мережі	Передавання контенту у високій якості в соціальних мережах задля підвищення популярності

Таблиця 5.2 – Визначення характеристик ідеї стартап-проекту

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів		W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Запропонований метод	Загальноживаний метод			
1.	Пропозиція оренди або продажу професійного обладнання для моделювання мережі Wi-Fi 6	Дає змогу	Дає змогу	Великі розміри установ ки	Цінова політика продажу або оренди не задовільняє споживача	Це рішення залишається дешевим за аналогічні

2.	Покращення швидкості передачі в декілька разів	Дає змогу	Не дає змогу	Забезпечення завадостійкого середовища передавання	Додаткове устаткування для приміщень з великою площею покриття	Забезпечується високоякісне передавання відеосигналу
----	--	-----------	--------------	--	--	--

5.2 Технологічний аудит ідеї стартап-проекту

В таблиці 5.3 оцінено технологічну здатність на реалізацію ідеї проекту та показано технології, які можна застосувати для реалізації проекту.

Таблиця 5.3. Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Моделювання покриття мережі Wi-Fi 6 для покращення швидкості та комфортного користування мережею	Використання MU-MIMO (обладнання з його підтримкою)	Наявна	Доступна в випадку достатнього бюджету
2		Середовище без завад з боку інших приладів зв'язку	Наявна	Доступна в випадку достатнього бюджету
3		Розробка власного програмного забезпечення	Необхідно розробити	Доступна в випадку достатнього бюджету

Обрана технологія реалізації ідеї проекту: моделювання покриття мережі Wi-Fi 6 для покращення швидкості та комфортного користування мережею.

5.3 Аналіз можливостей ринку для запуску проекту

У таблиці 5.4 показано попередню характеристику потенційного ринку стартап-проекту.

Таблиця 5.4. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість основних гравців, од	6
2	Обсяг продажів, грн/ум.од	200000
3	Тенденції ринку (якісна оцінка)	Швидко зростає
4	Обмеження для входу (вказати характер обмежень)	Пошук потенційних клієнтів
5	Специфічні вимоги стандартизування та сертифікування	Ліцензування
6	Середня норма рентабельності в даній галузі, %	$200000/140000 = 142\%$

У таблиці 5.5 показано характеристику потенційних клієнтів стартап-проекту

Таблиця 5.5. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності поведінки потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Забезпечення стабільності мережного зв'язку	ЗМІ, стрімінгові компанії, звичайні користувачі	Рівень очікування якості передавання медіаконтенту	Відповідність найвищим стандартам якості
Продовження табл. 5.5				

2	Забезпечення передавання відеосигналу високої чіткості	ЗМІ, стрімінгові компанії, звичайні користувачі	Кожна з потенційних цільових груп має свої вимоги до стандартів відеозображення	Забезпечення передавання контенту, швидкість якого залежить від рівня потреб споживача
---	--	---	---	--

У табл. 5.6 наведено основні загрози реалізації стартап-проекту.

Таблиця 5.6. Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Опис загрози	Планове реагування компанії
1	Мала зацікавленість клієнтів	Внаслідок невдалого маркетингу клієнт може не зацікавитись послугами	Внесення додаткових сервісних послуг
2	Втрата конкуренції	Втрата рангу надійного поставника	Якісне та кількісне нарощування інтенсивності та грамотна цінова політика

У табл.5.7 показано фактори можливостей при реалізації стартап-проекту.

Таблиця 5.7. Основні можливості

№	Фактор	Опис можливості	Планове реагування компанії
---	--------	-----------------	-----------------------------

п/п			
1	Перехід до домінування на ринку медійних послуг	Зростання попиту	Якісне та кількісне нарощування потужностей
2	Імплементация технологій в існуючі системи	Зростання попиту внаслідок зростання об'ємів закупівель	Якісне та кількісне нарощування потужностей

У таблиці 5.8 наведено особливості та вплив конкурентного середовища на впровадження проекту.

Таблиця 5.8. Аналіз конкуренції

Особливості конкурентного середовища	Прояв даної характеристика	Вплив на діяльність підприємства (планові дії компанії для забезпечення конкурентоспроможності)
1.Конкуренція	Використання вже існуючих технологій	Проведення стандартизації на високому рівні
2.Локальний	Відсутність єдиного постачальника послуг	Індивідуальний підхід до кожної локальної ділянки
3.Міжгалузєва	Відсутня	Відсутня
4.Товарно-видова	Використання стандартизованих технологій	За необхідності, використання загальноновживаних апаратних та програмних засобів
5.Цінова	Використання високовартісних спеціалізованих комплексів	Можливість заощадити за допомогою застосування загальноновживаних апаратних засобів
6.Марочна	Кожна діагностика повинна бути стандартизованою	Отримання переваги на ринку медійних послуг

У таблиці 5.9 проаналізовано конкуренцію проекту в галузі за М. Портером

Таблиця 5.9. Аналіз конкуренції за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	Постачальника апаратури	Нові гравці ринку систем безпеки	Залучення мало популярних постачальників	Самостійність у прийнятті клієнтських рішень	Надання переваги більш авторитетним рішенням
Висновки:	Середня	Є можливість виходу на ринок	Постачальники встановлюють цінову політику на обладнання	Клієнти встановлюють вимоги до якості	Обмеження існують лише у разі відмови від діагностики

У табл. 5.10 наведено фактори конкурентоспроможності та їх обґрунтування.

Таблиця 5.10. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (чинники, що роблять фактор порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Раціональніша цінова політика	Можливість раціональнішого використання ресурсів
2	Забезпечення сервісних послуг	Сервісна підтримка апаратної та програмної частини

У табл. 5.11 перелічено сильні та слабкі сторони проекту.

Таблиця 5.11. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Порівняння рейтингу товарів- конкурентів						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Раціональніша цінова політика	13		+					
2	Послуги сервісного обслуговування	11			+				
3	Періодична діагностика	8					+		
4	Потреба в залученні висококваліфікованих кадрів	8						+	

У табл.5.12 представлений SWOT-аналіз стартап-проекту.

Таблиця 5.12. SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: раціональна цінова політика, надання сервісних послуг	Слабкі сторони: потреба в залученні висококваліфікованих кадрів, періодична діагностика системи
Можливості: Перехід до ексклюзивного застосування нового методу, Імплементация методу в існуючі аудіо логічні комплекси	Загрози: Незацікавленість клієнтів, Втрата монополії

Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту наведені у табл.5.13.

Таблиця 5.13. Альтернативи ринкового впровадження проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність залучення ресурсів	Терміни реалізації
1	Укладення договорів із медійними компаніями та швидке захоплення ринку, використовуючи нове рішення	висока	короткі
2	Використання приладів загального вжитку для підвищення конкурентоспроможності	висока	короткі

5.4. Розроблення ринкової стратегії проекту

Обґрунтування вибору цільових груп потенційних споживачів показано в табл. 5.14.

Таблиця 5.14. Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профіль цільової групи потенційних клієнтів	Готовність сприйняття продукту споживачами	Орієнтовний попит цільової групи (сегменту)	Напруженість конкуренції в сегменті	Складність входу у сегмент
1	Стрімінгові компанії	Висока	Високий	Середня	Середня
2	Персональне користування	Низька	Середній	Середня	Висока

Визначення базової стратегії розвитку наведено у табл. 5.15.

Таблиця 5.15. Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Основні конкурентоспроможні позиції згідно з обраною альтернативою	Базова стратегія розвитку*
1	Застосування альтернативних технологій та пристроїв	Впровадження нового стандарту якості	Залучення ключових користувачів у галузі	Стратегія диференціації
2	Бюджетність проекту	Раціональніші витрати на обладнання, та послуги	Застосування загальноживаних апаратних рішень замість спеціалізованих комплексів	Стратегія лідерства по якості послуг та рівню обслуговування

Визначення основної стратегії конкурентної поведінки показано в табл. 5.16.

Таблиця 5.16. Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект унікальним на ринку?	Чи необхідно буде компанії шукати нових споживачів, чи опрацювати існуючих у конкурентів?	Чи необхідно компанії копіювати основні характеристики товару конкурента?	Стратегія конкурентної поведінки*
1	Ні	Опрацювати існуючих та шукати нових	Немає необхідності	Стратегія виклику лідера

Визначення стратегії позиціонування показано в табл. 5.17.

Таблиця 5.17. Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги цільової аудиторії до товару	Основна стратегія розвитку	Основні конкурентоспроможні позиції стартап-проекту	Визначення асоціацій, які сформують комплексну позицію стартап-проекту (три основних)
1	Висока якість послуг	Стратегія диференціації	Новизна, гарант якості, точність дослідження	Якість, точність, надійність
2	Мінімальні витрати	Стратегія лідерства по витратах	Гнучкість запропонованого рішення	Універсальність, бюджетність

5.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Ключові переваги концепції потенційного товару наведено у табл. 5.18.

Таблиця 5.18. Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Основні переваги перед
---	---------	----------------------------	------------------------

п/п			конкурентами (існуючі або потенційні)
1	Якість	Належна висока якість, надійність	Надійність
2	Бюджетне рішення	Раціональне використання коштів, дешевше обладнання	Дешевизна

Виявлено три рівні моделі товару. Зміст та складові рівнів товару показано в табл. 5.19.

Таблиця 5.19. Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Зміст та складові		
I. Товар за задумом	Якісний товар та послуги, стандартизована якість послуг та обладнання		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1)Вартість обслуговування, 2)Кількість комплектів обладнання 3)Строк безвідмовної експлуатації 4)Технологічна собівартість товару	1) М 2) М 3) М 4) М	1)Е 2) Пр 3)Нд 4)Тх
	Якість: міжнародні стандарти, постійне обслуговування та підтримка обладнання		
	Постачання, встановлення та налаштування		
	Марка: передавання медіаконтенту		
III. Товар із підкріпленням	До продажу – обладнання та встановлення		
	Після продажу – сервісна підтримка		

Потенційний товар буде захищено від копіювання завдяки: специфічна методика обробки даних.

Визначення цінової політики на послугу показано в табл. 5.20.

Таблиця 5.20. Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Цінова політика товарів-замінників	Цінова політика на товари-аналоги	Рівень купівельної спроможності цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1	9000 у.о./од. (стандартні системи безпеки)	-	Високий	Н.3000 у.о. – В.10000 у.о. (Товар) Н.500 у.о. – В.2000 у.о. (Послуга)

Формування системи збуту послуги наведено у табл. 5.21.

Таблиця 5.21. Створення системи збуту

№ п/п	Закупівельна поведінка цільових клієнтів	Функції збуту, що повинен забезпечувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Орієнтована на отримання максимальної швидкості передавання	Поставки якісного обладнання	Значна	Договірна система збуту

Концепції маркетингових комунікацій показано в табл. 5.22.

Таблиця 5.22. Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікації цільових клієнтів	Основні методи позиціонування	Завдання рекламного звернення	Концепція рекламного звернення
1	Зацікавленість якісному та якісному продукті з раціональним використанням ресурсів	Мережеві ресурси	Гарантія якості та стандартизація, сервісна політика	Зацікавити у покращеннях пов'язаних із зростаючою популярністю послуг	Представлення центру синхронізації відправною точкою на шляху до над якісного контенту
2	Зацікавленість у великих об'ємах продукції із дотриманням умов якості	Мережеві ресурси	Глибина каналу постачальників, гарант якості	Привернути увагу до переваг над іншими гравцями ринку	Представлення послуг центру синхронізації єдиним раціональним шляхом у забезпеченні трафіку

Висновки до розділу

Стартап-проект по впровадженню рішення для проведення високоякісних прямих відеотрансляцій є рентабельним. Він буде користуватись попитом на ринку медійних послуг. Стартап використовує товари заміники, програмне забезпечення власного виробництва та забезпечує періодичну діагностику, тому важливо зарекомендувати себе, як хорошого постачальника послуг та зайняти нішу в даній сфері для конкуренції з іншими постачальниками. Доречність на ринку послуг обумовлена тим, що основними клієнтами є стрімінгові, телевізійні компанії, та індивідуальні користувачі, для яких забезпечення безперебійним, швидкісним та якісним підключенням до мережі є головним критерієм вибору продукції. Також, після рекомунування себе, як високоякісного постачальника можливий вихід міжнародний ринок.

Конкурентноспроможність проекту обумовлена забезпеченням високої швидкості передавання даних та високою якістю трансляції в умовах, коли конкуренти не наближаються до таких показників за такими параметрами. Це і є основним критерієм входження на ринок.

ВИСНОВКИ

Під час виконання дисертації вирішено поставлене завдання, що полягало в прогнозуванні експлуатаційних характеристик та оцінці реальних показників на основі результатів моделювання процесу передавання аудіо- та відеоконтенту засобами безпроводових мереж IEEE 802.11ax, в тому числі отримано такі результати:

1. У результаті дослідження розрахованих у стандарті можливих характеристик специфікації IEEE 802.11ax з'ясовано, вони є важкодосяжними або недосяжними у разі спроби застосувати такі технології, як: MU-MIMO, метод модуляції 1024QAM та збільшення ширини частотної смуги каналу до 160 МГц. Це означає, що використання цих технологій одночасно потребує великої кількості різних ресурсів, яких у майбутньому може і не бути.

2. Зроблено моделювання покриття сигналом Wi-Fi у приміщенні з сильним загасанням із застосуванням програмного забезпечення TamoGraph Site Survey і отримано наведені нижче результати:

– точка доступу в діапазоні частот 2,4 ГГц має велику площу покриття і порівняно невелику (з 5 ГГц діапазоном) швидкість передавання даних. Також, завади в вигляді тонких стін мало впливають на швидкість передавання та рівень сигналу. Цей варіант підійде для великих офісів або будинків з малою кількістю точок доступу;

– точка доступу в діапазоні частот 5 ГГц, з іншого боку, має невелику площу покриття та дуже високу швидкість передавання. Є дуже чутливою навіть до стін з невеликою товщиною, що призводить до погіршення рівня сигналу і зменшення швидкості. Даний тип мережі підійде для людей, яким потрібна стабільна робота з передавання відео контенту з високою якістю (стрімінгові компанії) або для особистого користування в густонаселеному районі/ будинку;

– використання більше однієї точки доступу в діапазоні частот 2,4 ГГц не є доцільним через невелику відмінність щодо покриття та швидкості.

Однак, під час застосування їх в одному каналі зв'язку, через велику інтерференцію спостерігались великі втрати швидкості передавання;

3. Проаналізовано фізичну швидкість із застосуванням моделювання та розрахунків. Описано причини кардинальної відмінності між піковим значенням швидкості передавання та розрахованої швидкості з реальними показниками.

4. За результатами дослідження, відмінність між піковим значенням швидкості передавання та змодельованою швидкістю склала 27 разів. Це вказує на те, що пристрої, які працюють за специфікацією 802.11ax є малоефективними, не використовують більшу частину своїх можливостей та потребують удосконалення.

5. Прогнозовано приблизні досяжні показники стандарту IEEE 802.11ax в майбутньому на основі проведеного дослідження та аналізу ринку пристроїв, що підтримують 802.11ax та MU-MIMO. А саме:

- перспективним діапазоном частот для використання всіх інших характеристик в повній мірі є 5 ГГц;
- кількість потоків для нових пристроїв збільшиться до 4 – 5;
- ширина каналу прогнозовано так і залишиться 40 МГц через проблеми з інтерференцією;
- максимально можливим варіантом є використання модуляції порядку 256QAM, у випадку не вирішення проблем з всенапрямленими джерелами завад.

Таким чином, прогнозована досяжна швидкість передавання для одного пристрою в ідеальному для цього середовищі буде коливатись від 866 до 1083 Мбіт/с (в залежності від досягнутої кількості просторових потоків). Тобто, у порівнянні з теперішніми показниками – це приріст швидкості у 2 - 3 рази, а у порівнянні з ідеальними показниками – менше у 8 - 11 разів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Increasing their formation rates of optical communications via coded modulation: a study of transceiver performance. URL: <https://www.nature.com/articles/srep21278> (Дата звернення: 10.08.20).
2. Архитектура IEEE 802.11. URL: <https://www.intuit.ru/studies/courses/1004/202/lecture/5238?page=1>, 25.03.2017.
3. Сергей Пахомов, Протоколы беспроводных сетей семейства 802.11. URL: <http://compress.ru/article.aspx?id=10805> (Дата звернення: 10.08.20).
4. Василий Леонов, Беспроводные сети. URL: <https://www.ferra.ru/ru/networks/s25619/page-3/> (Дата звернення: 10.08.20).
5. Wi-Fi. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Wi-Fi> (Дата звернення: 10.08.20).
6. Сети IEEE 802.11. URL: www.rsasecurity.com/rsalabs/technotes/wep-fix.html (Дата звернення: 10.08.20).
7. Макаренко В. В. 802.11ах – новая версия стандарта высокоскоростной системы связи Wi-Fi, Электронные компоненты и системы, массовый технический журнал. – 2017 – с. 44.
8. Метод DSSS. URL: http://it-servis.ru/dokum/lan/wlan_metod_dsss.php (Дата звернення: 10.08.20).
9. Наказ Міністерства зв'язку і масових комунікацій РФ від 14 вересня 2010 року № 124 «Про затвердження Правил застосування обладнання радіодоступу. Частина I. Правила застосування обладнання радіодоступу для безпроводового передавання даних в діапазоні від 30 МГц до 66 ГГц» (zareestrovano в Міністерстві Юстиції РФ 12.10.2010 № 18695).
10. Сигналы с двоичной фазовой манипуляцией (BPSK). Дифференциальная BPSK (DBPSK). URL: <http://www.dsplib.ru/content/bpsk/bpsk.html> (Дата звернення: 10.08.20).
11. Параметры Wi-Fi-оборудования, разрешенного для использования в Российской Федерации. URL: http://www.wireless-e.ru/articles/wifi/2011_01_22.php (Дата звернення: 12.08.20).

12. Сучасні технології швидкісної передачі даних у локальних (LAN) та глобальних мережах (WAN). URL:

http://pidruchniki.com/18421120/bankivska_sprava/suchasni_tehnologiyi_shvidkis_noyi_peredachi_danih_lokalnih_lan_globalnih_merezhah_wan (Дата звернення: 13.08.20).

13. Сергей Пахомов. Анатомия беспроводных сетей//КомпьютерПресс. 2002.№7. С.167-175.

14. Стандарт 802.11a. URL: http://kunegin.com/ref7/wifi/80211a_1.htm (Дата звернення: 13.08.20).

15. Група стандартів 802.11. URL: <http://wi-life.ru/tehnologii/wi-fi/wi-fi-standarty> (Дата звернення: 13.08.20).

16. Беспроводные сети передачи данных Wi-Fi. Стандарт IEEE 802.11g и др. URL: <http://www.kunegin.narod.ru/ref7/wifi/index.htm> (Дата звернення: 13.08.20).

17. Стандарт IEEE 802.11g. URL: http://kunegin.com/ref7/wifi/80211g_1.htm (Дата звернення: 15.08.20).

18. Развитие технологии беспроводных сетей: стандарт IEEE 802.11. URL: <https://www.ixbt.com/comm/wlan.shtml> (Дата звернення: 15.08.20).

19. 802.11n – беспроводной стандарт с проводной скоростью передачи. URL: <http://www.russianelectronics.ru/leader-r/review/8602/doc/45654/> (Дата звернення: 15.08.20).

20. Базовые положения стандарта IEEE 802.11n для сетей Wi-Fi. URL: <https://help.keenetic.net/hc/ru/articles/213968809> (Дата звернення: 16.08.20).

21. Learn about Multiple-Input Multiple-Output. URL: <https://www.intel.com/content/www/us/en/support/articles/000005714/network-and-i-o/wireless-networking.html> (Дата звернення: 16.08.20).

22. Wi-Fi 802.11n: теория и практика. URL: <https://www.osp.ru/pcworld/2008/03/4951638/> (Дата звернення: 16.08.20).

23. Обзор стандарта Wi-Fi 802.11/ас. Характеристики и особенности. URL: <http://www.ubnt.ru/review/standard-wifi-802-11-ac.htm> (Дата звернення: 17.08.20).

24. Макаренко В. В. Особенности стандарта беспроводной связи IEEE 802.11ac (Wi-Fi) / Электронные компоненты и системы, №7, 2012. с.28-35. – [http://www.ekis.kiev.ua/UserFiles/Image/pdfArticles/V.Makarenko_STANDARD%20IEEE%20802.11ac%20\(Wi-Fi\)_EKIS_7_2012-3.pdf](http://www.ekis.kiev.ua/UserFiles/Image/pdfArticles/V.Makarenko_STANDARD%20IEEE%20802.11ac%20(Wi-Fi)_EKIS_7_2012-3.pdf).

25. Краткое описание стандарта беспроводных сетей IEEE 802.11ac. URL: <https://help.keenetic.net/hc/ru/articles/213968949-%D0%9A%D1%80%D0%B0%D1%82%D0%BA%D0%BE%D0%B5-%D0%BE%D0%BF%D0%B8%D1%81%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B5-%D1%81%D1%82%D0%B0%D0%BD%D0%B4%D0%B0%D1%80%D1%82%D0%B0-%D0%B1%D0%B5%D1%81%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D1%8B%D1%85-D1%81%D0%B5%D1%82%D0%B5%D0%B9-IEEE-802-11ac> (Дата звернення: 17.08.20).

26. Пространственные потоки в устройствах WiFi-стандарта с MIMO. URL: <http://wi-life.ru/wifi-academy-rus/wifi-academy-mimo-spatial-streams> (Дата звернення: 20.08.20).

27. Стандарт 802.11ax: WiFi нового поколения. URL: <http://ru.pcmag.com/feature/29268/standart-80211ax-wifi-novogo-pokoleniia> (Дата звернення: 20.08.20).

28. Новый стандарт 802.11ax. URL: <https://lanmarket.ua/stats/novyuy-standart-802-11ax-uvelichenie-proizvoditelnosti-wi-fi-v-4-raza> (Дата звернення: 20.08.20).

29. А. Г. Кирьянов, А. И. Ляхов, Д. А. Михлина, Е. М. Хоров, И. А. Щелкина. Проблемы создания IEEE802.11ax – нового поколения сетей Wi-Fi/Информационные процессы, Том 16, №1, 2016, стр.1–12.

30. Физический уровень технологии 802.11ax. URL: <http://www.techonline.com/electrical-engineers/education-training/tech-papers/4442856/802-11ax-High-Efficiency-Wireless/viewpdf>

(Дата звернення: 20.08.20).

31. Типы фреймов сети стандарта IEEE 802.11. URL: <http://wi-life.ru/tehnologii/wi-fi/wi-fi-frames-management-control-data> (Дата звернення: 20.08.20).

32. Аудиовизуальная информация. URL: http://kodeksy.com.ua/ka/dictionary/a/audiovizual_naya_informatsiya.htm (Дата звернення: 21.08.20).

33. Системи цифрового телебачення: конспект лекцій з дисципліни «Телекомунікаційні безпроводові системи», част.3 / Уклад. Лазебний Володимир Семенович, Попович Павло Васильович. – К.: НТУУ «КПІ», 2016. – 106 с.

34. Какие бывают видео разрешения . URL: <http://concept-labinsk.ru/stati/kakie-byvayut-video-razresheniya> (Дата звернення: 21.08.20).

35. Денисов Д. В Wi-Fi «закончились» частоты. Решение – DFS. URL: <https://nag.ru/articles/article/32561/v-wi-fi-zakonchilis-chastoty-i-reshenie-dfs.html> (Дата звернення: 30.11.2020).

36. Giuseppe Bianchi, Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function/ Giuseppe Bianchi // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2000. – vol. 18 – №. 3. – p. 1055 – 1067.

37. V. M. Vishnevsky. 802.11 LANs: Saturation Throughput in the Presence of Noise/ V. M. Vishnevsky, A. I. Lyakhov // in Proc. IFIP Networking'02. – Italy, Pisa. – 2002.

38. Lazebnyi V. S. Estimation of probabilistic processes in wireless networks of 802.11 standard/ V. S. Lazebnyi, Ch. Yin // Мікросистеми, електроніка та акустика. – 2017. – №5. – с. 47-53.

39. Вишняк А. В. Експериментальне дослідження параметрів каналу передавання мережі Wi-Fi./ А. В. Вишняк, В. С. Лазебний // Тези доповідей студентів та аспірантів, 2018.

40. CSMA/CA (CARRIER SENSE MULTIPLE ACCESS / COLLISION AVOIDANCE). URL: http://wi-fi.ua/2009032073/Slovar_Wi-

Fi_terminov/csmaca-carrier-sense-multiple-access--collision-avoidance.html

(Дата звернення: 16.09.20).

41. О технологиях мультиплексирования для беспроводной сети. URL: [https://m.geektimes.com/post/92980/](https://m.geektimes.com/post/92980/comments/)

comments/ (Дата звернення: 17.09.20).

42. IEEE Std 802.11, 2007 Edition, Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specification. – 3 Park Avenue, New York, NY 10016-5997, USA, June 2007. – 1232 p.

43. Юрий Богомолов, "Экспресс-Электроника". Беспроводное завтра 12/2004. URL: <http://citforum.ru/nets/wireless/wifiz/> (Дата звернення: 10.08.20).

44. Quadrature Amplitude Modulation (QAM). URL: <http://www.ni.com/white-paper/3896/en/> (Дата звернення: 01.10.20).

45. Subnetwork Access Protocol. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Subnetwork_Access_Protocol

(Дата звернення: 01.10.20).

46. Кадр Ethernet SNAP. URL: <http://lawbooks.news/telekommunikatsionnyie-sistemyi-kompyuternyie/kadr-ethernet-snap-63328.html> (Дата звернення: 01.10.20).

47. Сети IEEE 802.11. URL: www.rsasecurity.com/rsalabs/technotes/wep-fix.html (Дата звернення: 10.10.20).

48. Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс]: Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ: НТУУ, 2016. – 28 с.

49. Tamograph Site Survey. URL: <https://www.tamos.ru/products/wifi-site-survey/> (Дата звернення: 30.11.20).

50. Отличия частотных диапазонов 2,4 ГГц и 5 ГГц. URL: <https://help.keenetic.com/hc/ru/articles/115004527245-%D0%9E%D1%82%D0%BB%D0%B8%D1%87%D0%B8%D1%8F->

%D1%87%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%82%D0%BD%D1%8B%D1%85-
%D0%B4%D0%B8%D0%B0%D0%BF%D0%B0%D0%B7%D0%BE%D0%BD
%D0%BE%D0%B2-2-4-%D0%93%D0%93%D1%86-%D0%B8-5-
%D0%93%D0%93%D1%86 (Дата звернення: 10.12.20).

51. Full MCS Table. URL: <http://mcsindex.com/> (Дата звернення: 15.12.20).

52. Почему Wi-Fi не будет работать, как планировалось, и зачем знать, каким телефоном пользуется сотрудник URL: <https://habr.com/ru/company/comptek/blog/427575/> (Дата звернення: 15.12.20).

53. The list of devices supporting latest 802.11 ax standarts. URL: <https://clients.mikealbano.com/> (Дата звернення: 15.12.20).

54. Общие рекомендации по размещению в квартире интернет-центра для стабильной и качественной работы сети Wi-Fi. URL: <https://help.keenetic.com/hc/ru/articles/213968849> (Дата звернення: 25.12.20)

55. Wi-Fi Mesh. URL: <https://itc.ua/articles/wi-fi-mesh-kak-eto-rabotaet/> (Дата звернення: 25.12.20)

56. Wi-Fi Mesh сети для самых маленьких. URL: <https://habr.com/ru/post/196562/> (Дата звернення: 27.12.20)

57. Владимир Новоселов. Особенности Wi-Fi 6. URL: <https://wireless-e.ru/wp-content/uploads/5606.pdf> (Дата звернення: 27.12.20)