

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА**

**ФАКУЛЬТЕТ РАДІОФІЗИКИ, ЕЛЕКТРОНІКИ ТА КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ**

Кафедра радіотехніки та радіоелектронних систем

«На правах рукопису»

Робота допущена до захисту в ЕК  
рішенням кафедри радіотехніки та радіоелектронних систем  
від \_\_\_ травня 2024 року, протокол № \_\_\_\_.  
Завідувач кафедри доктор фіз.-мат. наук, професор  
\_\_\_\_\_ Ігор АНІСІМОВ

**ДИПЛОМНА РОБОТА МАГІСТРА**

на тему:

**«ПОКРАЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ WI-FI 6 У ЗОНІ ВИСОКОЇ  
ЩІЛЬНОСТІ КЛІЄНТІВ»**

**Виконала:**

студентка 2-го курсу магістратури  
денної форми навчання  
спеціальності 172 - Телекомунікації та радіотехніка  
ОНП «Інформаційна безпека телекомунікаційних систем і мереж»  
Пеньківська Марія Володимирівна \_\_\_\_\_

**Науковий керівник:**

Асистент кафедри радіотехніки  
та радіоелектронних систем,  
кандидата тех. наук,  
Аль Шурайфі Муштак Таліб \_\_\_\_\_

**Рецензент:**

Завідувач кафедри кібербезпеки та комп'ютерної інженерії,  
Київського національного університету будівництва та архітектури,  
професор, доктор тех. наук  
Хлапонін Юрій Іванович \_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цій дипломній роботі  
немає запозичень з праць інших авторів без  
відповідних посилань

Студентка \_\_\_\_\_ Марія ПЕНЬКІВСЬКА

Київ – 2024

## РЕФЕРАТ

Дипломна робота: 63с., 9 табл., 13 рис., 29 джерел.

МЕРЕЖІ, IEEE 802.11, WI-FI 6, ВИСОКА ЩІЛЬНІСТЬ КЛІЄНТІВ, DATA RATE, ЗОНИ ПОКРИТТЯ СИГНАЛОМ, ПРОПУСКНА ЗДАТНІСТЬ Wi-Fi МЕРЕЖІ, QoS, BILLING, ІНФРАСТРУКТУРА МЕРЕЖІ

Об'єкт дослідження – розробка покращень пропускної здатності для дизайну бездротового покриття стадіону НСК «Олімпійський».

Мета роботи – розробка підходів для покращення продуктивності Wi – Fi 6 мережі у зонах високої щільності клієнтів. Моделювання покриття бездротової мережі.

Ця робота присвячена дослідженню технологій для створення Wi-Fi мереж високої щільності клієнтів. У ході роботи було окреслено основні проблеми, що виникають при побудові Wi-Fi рішень для даних зон, таж запропоновано засоби їх вирішення. За допомогою програмного забезпечення Ekahau Survey було виконано симуляцію Wi-Fi дизайну, який забезпечує якісне покриття для обраного сектора стадіону. Результати симуляції показали, що дизайн забезпечує стабільний рівень сигналу та ефективне обслуговування користувачів при різних співвідношеннях активних користувачів.

Було визначено пропускну здатність мережі для стадіону НСК «Олімпійський», яка становить приблизно 11.433 Gbit/s, що дозволяє забезпечити надійне з'єднання для великої кількості користувачів.

Також розглянуто методи сегментації мережі для забезпечення різних потреб користувачів, що дозволяє оптимізувати використання ресурсів та покращити якість обслуговування. Дані заходи сприятимуть покращенню продуктивності та надійності Wi-Fi мереж у середовищах з високою щільністю клієнтів, забезпечуючи ефективне використання мережевих ресурсів. Крім того, запропоновано рішення для тарифікації мережі з використанням системи Billing та програмного забезпечення Tridens Monetization, що дозволяє ефективно керувати трафіком та виставляти платежі.

## ЗМІСТ

Перелік умовних позначень .....	5
ВСТУП.....	6
1. Бездротова мережа Wi-Fi.....	8
1.1. Базові визначення та принципи Wi-Fi.....	8
1.1.1. Типи мереж .....	8
1.1.2. AP .....	9
1.1.3. CSMA/CA.....	11
1.1.4. SNR .....	11
1.1.5. RSSI.....	11
1.1.6. SSID .....	13
1.1.7. Data Rate .....	13
1.1.8. MIMO.....	14
1.1.9. MU MIMO .....	14
1.1.10. OFDM.....	15
1.2. IEEE стандарти .....	15
1.2.1. IEEE 802.11 .....	16
1.2.2. IEEE 802.11b (Wi-Fi 1).....	16
1.2.3. IEEE 802.11a (Wi-Fi 2) .....	16
1.2.4. IEEE 802.11g (Wi-Fi 3).....	17
1.2.5. IEEE 802.11n (Wi-Fi 4).....	17
1.2.6. IEEE 802.11ac (Wi-Fi 5) .....	17
1.2.7. IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6) .....	18
1.2.8. 802.11be (Wi-Fi 7).....	19
2. Зона покриття Wi-Fi мережею .....	21
2.1. Проблематика і труднощі у побудові Wi-Fi мережі .....	21
2.2. Опис об'єкта дослідження.....	23
2.3. Метод.....	24
2.4. Аналіз базових принципів побудови безпроводної мережі.....	27
2.4.1. Діапазони частот.....	27

2.4.2. Потужність випромінювання .....	29
2.4.3. Пристрої .....	33
2.4.4. Керування розмір соти.....	34
2.4.5. Перекриття сот.....	37
2.4.6. Повторне використання частотного каналу .....	37
2.4.7. Об'єднання каналів .....	40
2.4.8. Співвідношення сигнал/шум (SNR) .....	40
2.4.9. Якість обслуговування (QoS).....	41
2.5. Моделювання покриття .....	41
2.5.1. Вибір програмного забезпечення .....	41
2.5.2. Моделювання покриття .....	42
3. Трафікування .....	49
3.1. Пропускна здатність мережі.....	49
3.2. Розподіл трафіку.....	50
3.2.1. QoS .....	52
3.2.2. Інфраструктура мережі .....	56
3.3. Відмовостійкість і масштабування мережі.....	57
Висновок.....	58
Список літератури .....	59

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- AP – (Access Point) – точка доступу;
- BYOD - (Bring your own device) – принесіть свій власний девайс;
- BSSID – (Basic Service Set Identifier) - ідентифікатор точки доступу, або маршрутизатора;
- CIR – (Committed Information Rate) - обов'язкова інформаційна швидкість;
- CSMA/CA – (Carrier-sense multiple access with collision avoidance);
- IoT – (Internet of Things) – інтернет речі;
- ISP ( Internet Service Providers) – інтернет провайдери;
- LAN – (local area network) - локальна мережа;
- MAC – (Medium Access Control)
- MIMO – (Multiple Input Multiple Output ) - декілька входів декілька виходів;
- MU-MIMO (Multi-User Multiple-Input, Multiple-Output) – багатокористувацький технологія з декількома входами та виходами;
- MLO – (Multi-Link Operation) ;
- OFDM – (Orthogonal frequency-division multiplexing);
- OSI – (Open Systems Interconnection) – модель взаємозв'язку відкритих систем;
- PIR – (Peak Information Rate) - та пікову швидкість інформації;
- QoS – (Quality of Service) – якість обслуговування;
- RSSI – (Received Signal Strength Indicator) – індикатор потужності отриманого сигналу;
- SNR – (Signal-to-noise ratio) – співвідношення сигнал/шум;
- SSID – (Service Set Identifier) - ідентифікатор набору послуг;
- TX - (Transmitter) – передавач;
- VLAN – (Virtual Local Area Network) – віртуальна локальна мережа;
- VoIP – (Voice over Internet Protocol) - голос через Інтернет-протокол;
- WAN – (Wide area network)- глобальна мережа;
- WLAN – (Wireless Local Area Network) – бездротова локальна мережа;
- ПЗ – програмне забезпечення

## ВСТУП

Може виникнути питання «Навіщо стадіонам та великим майданчикам потрібен Wi-Fi?»

Стадіони, арени, великі майданчики та амфітеатри є одними з найвимогливіших середовищ для розгортання Wi-Fi. Конкретні проблеми включають надзвичайно велику кількість клієнтських пристроїв (надвисокої щільності), різноманітність пристроїв (наприклад, смартфони та окуляри/шоломи доповненої реальності/віртуальної реальності (AR/VR), високу пропускну здатність на споживання даних клієнта та унікальне фізичні, радіочастотні перешкоди для розгортання (наприклад, чаші на стадіоні/сидіння від середнього до верхнього рівня). Крім технічних проблем, стадіонний Wi-Fi повинен підтримувати широкий спектр критично важливих внутрішніх операцій, таких як орієнтування, продаж та перевірка квитків, товари та системи паркування, камери спостереження (для забезпечення безпеки а також камери транслявання (до них можна віднести камери, що розташовані на полі, ті що показують поле під різними кутами, наприклад, згори або з точки зору гравця, які транслюються в прямому ефірі для вболівальників, тощо).

Власники майданчиків (стадіонів у нашому випадку) знають, що для того, щоб змусити вболівальників перебратися зі своїх диванів на стадіон, потрібен справді інтерактивний та захоплюючий досвід. Щоб залучити вболівальників, стадіони вкладають значні кошти, щоб задовольнити їхні очікування, щоб забезпечити відмінний досвід, відчуття від простого домашнього перегляду, наприклад підтримку персоналізованих миттєвих повторів відео та селфі в прямому ефірі.

Метою даної роботи є розробка підходів для покращення продуктивності Wi-Fi мережі у зонах високої щільності клієнтів. Моделювання покриття бездротової мережі.

Об'єкт дослідження: розробка покращень пропускну здатності для дизайну бездротового покриття стадіону НСК «Олімпійський».

Предмет дослідження: вибір технік, та засобів для покращення пропускної здатності бездротової мережі, надання переваг для певних видів трафіку, тарифікування мережі.

Побудова мережі, що зможе обслуговувати зони з високою щільністю клієнтів є клопітким завданням. А саме побудувати Wi-Fi мережу для стадіону "Олімпійський", що зможе задовольнити потреби коректного функціонування стадіону, такі як: засоби безпеки (камери, серверна, автоматичне відкривання і закривання певних зон, доступи до цих зон) пожежна безпека (датчики диму, системи екстреного мовлення та ін.), а також забезпечити доступ до мережі для журналістів і звичайних відвідувачів, є головною задачею даної роботи.

## **1. БЕЗДРОТОВА МЕРЕЖА WI-FI**

Wi-Fi — це сучасна технологія бездротової мережі, що дозволяє різним пристроям, таким як комп'ютери, ноутбуки, мобільні телефони, планшети, а також інше обладнання (наприклад, принтери, відеокамери, пристрої Інтернету речей (IoT) та інші), взаємодіяти між собою та з Інтернетом. Ця технологія забезпечує можливість цим пристроям обмінюватися інформацією, створюючи єдину мережу, без необхідності використання кабелів, завдяки використанню високочастотних радіохвиль.

Стандарт Wi-Fi базується на наборі стандартів бездротової локальної мережі, розроблених Робочою групою комітету стандартів IEEE LAN/MAN (IEEE 802)[1]. Термін 802.11x використовується для позначення цього набору стандартів, включаючи різні специфікації та поправки, такі як 802.11a, 802.11b, 802.11e, 802.11g, 802.11n та інші. Кожна з цих специфікацій має свої унікальні характеристики, що впливають на швидкість передачі даних, частотний діапазон, стійкість до перешкод та інші параметри, що визначають якість та ефективність роботи бездротової мережі.

Завдяки своїй універсальності та можливості інтеграції з різноманітними пристроями, Wi-Fi став невід'ємною частиною сучасного життя, забезпечуючи швидкий і зручний доступ до інформації, як у домашніх умовах, так і на робочому місці, в публічних закладах і на великих об'єктах, таких як стадіони, аеропорти та торгові центри.

### **1.1. Базові визначення та принципи Wi-Fi**

#### **1.1.1. Типи мереж**

Мережа – це комп'ютерна система, яка дозволяє пристроям взаємодіяти один з одним.

Ось деякі типи мереж[1]:

LAN – Локальна мережа – є найпоширенішим типом мереж. Вона дозволяє користувачам підключатися і обмінюватися даними на коротких відстанях та у спільній зоні (бродкаст домену).

WLAN – Бездротова локальна мережа – працює подібно до локальної мережі, так як передає дані в невеликих територіальних межах. Відмінність полягає саме у типі з'єднання. У даному випадку середовищем передачі даних слугує повітря, а саме поширення електромагнітних хвиль різних довжин.

VLAN – віртуальна локальна мережа – це будь-який ширококомовний домен, котрий розділений і ізольований у комп'ютерній мережі на каналному рівні (тобто на 2 рівні моделі OSI).

WAN – Глобальна мережа – це розгалуження мережа, котра не обмежується географічним розташування (до неї ми можемо віднести всім відому Internet мережу).

VPN – Віртуальна приватна мережа - це приватна мережа, котра може бути доступна через Internet. Даний тип мережі забезпечує безпечне приватне конфіденційне з'єднання.

### **1.1.2. AP**

Точка доступу (AP – Access Point) – відноситься до мережевих пристроїв, що забезпечують з'єднання дротових і бездротових мереж. Вона має одн або декілька радіоприймачів, вбудований комп'ютер і щонайменше один порт для дротової мережі [2]. AP використовує радіоприймачі для передачі та отримання радіосигналів згідно з одним або кількома загальнодоступними стандартами. Це дозволяє AP спілкуватися з будь-якими іншими пристроями, які використовують ті ж самі стандарти та частоти. Потім AP з'єднує бездротову мережу, що використовує радіосигнали, з однією або кількома дротовими мережами за допомогою кабелів. Тобто точка доступу з'єднує бездротові та дротові фрейми L2 Ethernet, дозволяючи трафіку перетікати від дротової до бездротової мережі та навпаки.

В залежності від вимог та потреб мережі точки доступу поділяють на такі типи:

- Коренева точка доступу:

Це є одним із основних типів підключень. Коренева точка доступу безпосередньо підключається до провідної локальної мережі і служить вузлом для бездротових підключень користувачів. Якщо до локальної мережі (LAN) підключено декілька точок доступу (AP) то користувачі можуть вільно переміщатися в приміщенні без будь-яких перебоїв у їхньому мережевому з'єднанні.

- Ретрансляторна точка доступу:

Це точка доступу, котра налаштована як повторювач, що дозволяє розширити діапазон бездротової мережі або дозволяє подолати певні перешкоди, що блокують радіозв'язок. Ретрансляторна точка доступу пересилає трафік між бездротовими користувачами та дротовою мережею, надсилаючи дані на інший повторювач або кореневу точку доступу, підключену до дротової мережі.

- Міст:

Точки доступу можна налаштувати як кореневі або некореневі мости для приєднання до кількох мереж. Точка доступу в цій ролі встановить бездротове з'єднання з некорневим мостом. Потім трафік передається через бездротове з'єднання до дротової мережі.

- Міст робочої групи:

Точки доступу, які перебувають у режимі мосту робочої групи, можуть «асоціюватися» з іншими точками доступу як клієнти та забезпечувати мережеві підключення для пристроїв, підключених до портів Ethernet.

- Центральний блок в повністю бездротовій мережі:

У повністю бездротовій мережі точка доступу діє як окремий кореневий пристрій. Він не підключений до дротової локальної мережі. Натомість точка доступу функціонує як концентратор, який з'єднує всі станції разом. Він служить центром зв'язку, збільшуючи діапазон зв'язку бездротових користувачів[3].

### 1.1.3. CSMA/CA

CSMA/CA (Carrier-sense multiple access with collision avoidance) – це мережевий протокол, котрий працює на 2 рівні (канальний рівень) моделі OSI. Він призначений для контролю доступу пристроїв до середовища передачі даних, яке є спільним для всіх користувачів[4]. Цей протокол дозволяє уникати зіткнення (колізії) хвиль шляхом визначення несучої для того, щоб перевірити, чи даний канал є неактивним перед початком передачі даних. А також він і інші методи, для запобігання зіткнень, такі як: інтервали між кадрами, вікна для рукостискання і підтвердження, для зменшення ймовірності зіткнення двох хвиль.

### 1.1.4. SNR

SNR (Signal-To-Noise Ratio) – співвідношення сигнал/шум – це різниця між прийнятим корисним сигналом та рівнем шуму, котрий виникає на даній частоті, через помилки в передачі або, наприклад, випромінення інших, віддалених пристроїв. Чим більше значення SNR тим більш чіткіший сигнал[5].

### 1.1.5. RSSI

У телекомунікаціях RSSI (Received Signal Strength Indicator) - індикатор потужності (сили) отриманого сигналу – це показник рівня сигналу, що надходить від точки доступу або маршрутизатора до пристрою. Він показує наскільки добре користувач чує сигнал від передавачів бездротового сигналу. Даний показник використовується для перевірки та налаштування мереж.

Стандарт IEEE 802.11 (велика книга документації для виробництва обладнання Wi-Fi) [6] визначає, що RSSI може мати шкалу від 0 до 255 і що кожен виробник чіпсета може визначити власне значення «RSSI\_Max». RSSI є відносним індексом. Цей висновок можна зробити на основі того, що, наприклад, виробник Cisco використовує шкалу 0-100, тоді як Atheros використовує 0-60. І чим RSSI більше дане число, тим кращий сигнал. Параметр RSSI є дуже

мінливий і сильно залежить від навколишнього середовища, а також зазвичай зменшується з збільшенням відстані між пристроями приймач і передавач сигналу[7].

Оскільки значення RSSI сильно відрізняється від виробника до виробника, то більшість програмних забезпечень, що вимірюють і показують даний показник, використовують більш стандартизовану абсолютну міру потужності сигналу: децибелі або dBm за логарифмічною шкалою. Зазвичай RSSI позначається негативним значенням dBm і чим ближче до 0 dBm, тим кращий сигнал (Таблиця 1.1.)[8].

Таблиця 1.1. Прийнята потужність сигналу

Сила сигналу	Характеристика	Опис	Потрібна для
<b>-30 dBm</b>	Чудове з'єднання	Максимально досяжна сила сигналу. Щоб досягти даного значення, клієнт повинен перебувати лише на відстані кількох метрів від точки доступу. (Нетиповий, рідкісний або бажаний у реальному світі)	
<b>-67 dBm</b>	Дуже хороше з'єднання	Мінімальна потужність сигналу для програм, які потребують дуже надійної та вчасної доставки пакетів даних.	VoIP/VoWi-Fi, потокове відео
<b>-70 dBm</b>	Стандартне з'єднання	Мінімальна потужність сигналу для надійної доставки пакетів.	Пошта, перегляд веб сторінок

<b>-80 dBm</b>	Нестабільне з'єднання	Мінімальна потужність сигналу для базового підключення. Доставка пакетів може бути ненадійною. Можлива втрата пакетів.	Службові пакети
<b>-90 dBm</b>	Погане з'єднання	Наближення або потоплення в шумовому полі. Будь-яка функціональність дуже малоймовірна.	-
<b>-120 dBm</b>	Непридатний для використання	Сигнали нижче цього рівня вважаються шумом	-

### 1.1.6. SSID

Ідентифікатор набору послуг (SSID) – унікальна послідовність символів, що ідентифікують бездротову мережу. Іноді також можна почути таку назву - ім'я мережі. Це дозволяє пристроям підключатися до потрібної мережі, коли в одній зоні працюють декілька незалежних мереж [9].

### 1.1.7. Data Rate

Data Rate – швидкість передачі даних – це швидкість передачі даних у бездротовому зв'язку. Іншими словами швидкість передачі даних можна назвати кількістю бітів, які передаються від одного пристрою до іншого або через мережу за секунду. Швидкість передачі зазвичай виражається у Mbit/s або MByte/s.

Data Rate залежить від також від багатьох факторів, наприклад:

- якість сигналу передачі;
- зашумленості каналу передачі;

- відстань між точкою доступу і клієнтом (чим меншою буде ця відстань, тим вищою буде швидкість передачі. Це пов'язано з різними типами модуляцій.).

Згідно з теоремою Шеннона у зашумлених каналах, максимальна можлива швидкість передачі даних у бітах на секунду (bit/s) визначається за допомогою наступного рівняння (1.1): [10]:

$$R_{max} = B \log_2 (1 + SNR) \quad (1.1)$$

де:

SNR – співвідношення сигнал/шум;

B – пропускна здатність.

### **1.1.8. MIMO**

MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) - це бездротова технологія, яка використовує кілька передавачів і приймачів для передачі більшої кількості даних одночасно[11].

### **1.1.9. MU MIMO**

MU-MIMO (Multi-User Multiple-Input, Multiple-Output) – наступник технології MIMO (Рис. 1.1.), що дозволяє передачу інформації декільком клієнтам одночасно шляхом розподілення потоків даних. Це дозволяє зменшити затримку, часу чекання в черзі на передачу, у моменти коли є великий наплив користувачів у мережу[12].

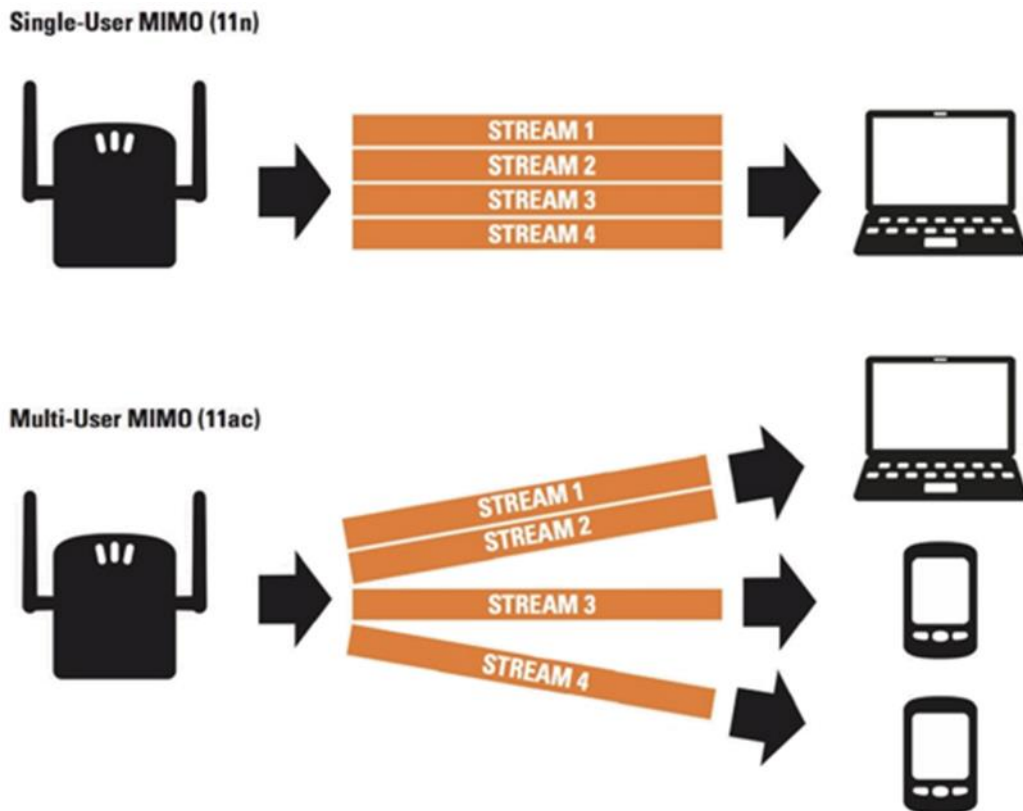


Рисунок 1.1. Візуальне ображення розподілення потоків даних у технологіях MIMO та MU-MIMO

### 1.1.10. OFDM

OFDM - (Orthogonal frequency division multiplexing) – це є технологією модуляції, а також технікою мультиплексування, що дозволяє ділити одну частоту широкопasmового каналу на декілька вузько-пasmових, із ближнім розташуванням піднесучих частот[13].

### 1.2. IEEE стандарти

Стандарт IEEE 802.11 (також відомий як Wi-Fi) [14] є основним та домінуючим стандартом для бездротових локальних мереж (WLAN). Він описує архітектуру та визначає специфікації рівня керування доступом до середовища (MAC) і фізичного рівня для даних мереж. Нижче наведено покоління Wi-Fi (Таблиця 1.2.).

Таблиця 1.2. Покоління Wi-Fi

Покоління	Стандарт IEEE	Рік прийняття	Максимальна швидкість з'єднання (Mbit/s)	Частотний діапазон (ГГц)
<b>Wi-Fi 8</b>	802.11bn	2028	100,000	2.4, 5, 6,7, 42.5, 71
<b>Wi-Fi 7</b>	802.11be	2024(триває)	1376 - 46,120	2.4, 5, 6
<b>Wi-Fi 6 E</b>	802.11ax	2020	574 - 9608	6
<b>Wi-Fi 6</b>		2019		2.4, 5
<b>Wi-Fi 5</b>	802.11ac	2014	433 - 6933	5
<b>Wi-Fi 4</b>	802.11n	2009	72 - 600	2.4, 5
<b>Wi-Fi 3*</b>	802.11g	2003	6 - 54	2.4
<b>Wi-Fi 2*</b>	802.11a	1999		5
<b>Wi-Fi 1*</b>	802.11b	1999	1 - 11	2.4
<b>Wi-Fi 0*</b>	802.11	1997	1 - 2	2.4

\* - названо заднім числом

### 1.2.1. IEEE 802.11

Специфікація бездротової мережі 802.11 була представлена у 1997 році. Максимальна швидкість передачі даних становила 2 Mbit/s. Робочий діапазон частот 2.4 ГГц( На даний момент ця технологія є застарілою)[14].

### 1.2.2. IEEE 802.11b (Wi-Fi 1)

Специфікація була представлена у 1999 році. Максимальна швидкість передачі даних становить 11 Mbit/s. Wi-Fi 1 забезпечував бездротовий зв'язок на відстані ~38 м у приміщенні та ~140 м на вулиці. Робочий діапазон частот 2.4 ГГц[14].

### 1.2.3. IEEE 802.11a (Wi-Fi 2)

Специфікація була представлена у 1999 році і стала наступником IEEE 802.11b. Максимальна швидкість передачі даних становила 54 Mbit/s при

ідеальному з'єднанні (але фактично вона дорівнювала 15-20 Mbit/s). Типова зона поширення сигналу в приміщенні була еквівалентною 30 м. Робочий діапазон частот 5 ГГц з смугою пропускання в 20 МГц, що підтримувала різні швидкості передачі даних. До того ж, це була перша специфікація Wi-Fi, що мала схему модуляції з кількома несучими (OFDM) для підтримки високих швидкостей передачі даних, на відміну від конструкції Wi-Fi 1 з однією несучою[14].

#### **1.2.4. IEEE 802.11g (Wi-Fi 3)**

Специфікація була представлена у 2003 році. Даний стандарт мав перевагу у тому, що міг підтримувати високі швидкості передачі даних, які раніше були доступні у 5 ГГц діапазоні стандарту IEEE 802.11a, але у діапазоні 2.4 ГГц. Дана технологія стала домінуючою протягом багатьох років. Причиною цього стала нижча вартість чіпів, котрі працюють в частотному діапазоні 2.4 (в порівнянні з такими ж у 5ГГц діапазоні) у поєднанні з вищою швидкістю передачі. Максимальна швидкість передачі даних становила 54 Mbit/s. Ширина каналу дорівнювала 20 МГц[14].

#### **1.2.5. IEEE 802.11n (Wi-Fi 4)**

Специфікація була представлена у 2009 році[14]. Максимальна швидкість передачі даних до 600 Mbit/s. Працює в діапазонах частот 2.4 або 5 ГГц з шириною каналів 20 або 40 МГц. Це був перший стандарт Wi-Fi, який дозволив використовувати технологію кількох входів/множинних виходів (MIMO), щоб можна було використовувати декілька антен як на пристроях, що надсилають, так і на приймачах, щоб зменшити помилки та підвищити швидкість. Кількість просторових потоків становила 1, 2, 3, або 4.

#### **1.2.6. IEEE 802.11ac (Wi-Fi 5)**

Специфікація була представлена у 2014 році[14]. Максимальна швидкість передачі даних до 7 Gbit/s. Працює в діапазоні частот 5 ГГц з шириною каналів в 20, 40, 80, 160 МГц. Стандарт Gigabit Wi-Fi IEEE 802.11ac використовує низку методів, що використовувалися у попередніх стандартах IEEE 802.11, а також

додаючи при цьому деякі нові методи, щоб забезпечити необхідну пропускну здатність. Було впроваджено технологію MU-MIMO.

### **1.2.7. IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6)**

Специфікація була представлена у 2020 році[14]. Максимальна швидкість передачі даних до 10 Gbit/s. Даний стандарт був розроблений для того щоб забезпечити значні покращення порівняно з 802.11ac, особливо щодо розгортання мереж WLAN у густонаселених зонах, а також покращення спектральної ефективності і доступу користувачів, а також багатьох інших функцій.

Ще однією з ключових проблем, що вирішує 802.11ax, є взаємні перешкоди котрі виникають між різними точками доступу. У деяких зонах із високою щільністю покриття ця проблема значно сповільнює роботу бездротових мереж із використанням попередніх варіантів розгортання WLAN. Вирішення цієї проблеми зазвичай має набагато більший вплив на реальну пропускну здатність, а ніж просте надання каналів.

Дана специфікація поєднує у собі діапазони 2.4 або 5 ГГц (6 ГГц у Wi-Fi 6 E). Це дозволяє використовувати більше каналів для передачі даних, а також додає технологію множинного доступу з ортогональним частотним поділом (OFDMA - Orthogonal Frequency Division Multiple Access)[15], що дозволяє декільком клієнтським пристроям (до 30) підключатися до одного каналу та передавати дані без перешкод або сповільнень. Візуальне зображення роботи даної технології показано на Рис.1.2..

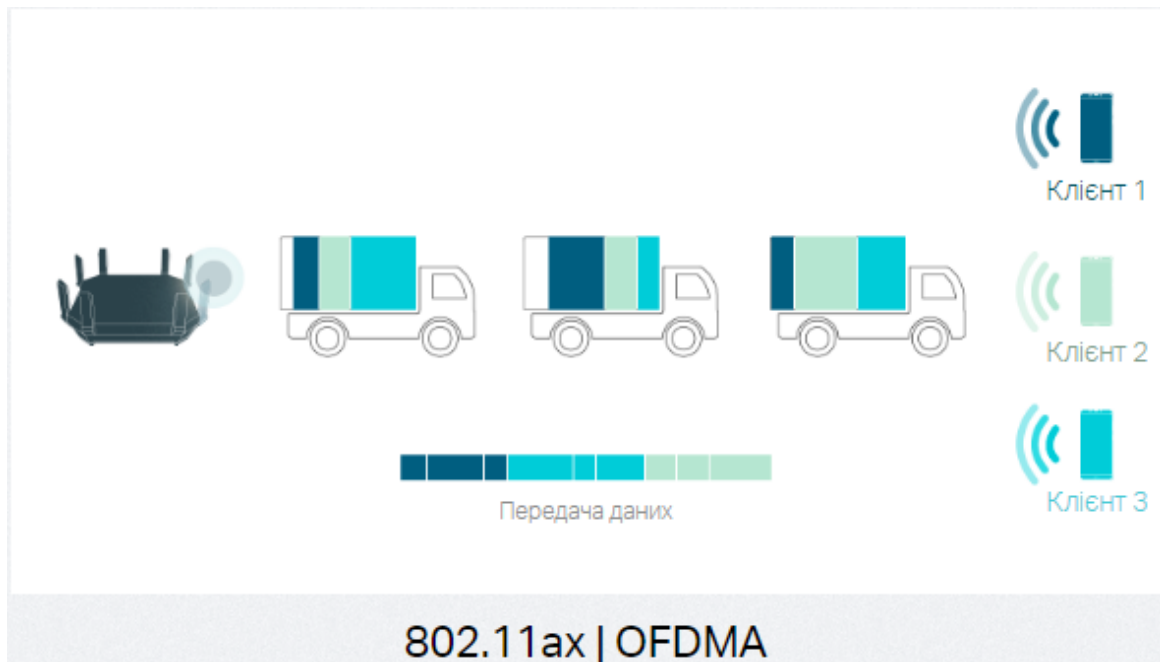


Рисунок 1.2. Візуальне зображення використання OFDMA

Також у Wi-Fi 6 використовується технологія цільового часу пробудження (TWT- Target Wake Time). Вона дозволяє пристроям визначати період часу для того щоб прокинутись і почати отримувати чи передавати дані. Дана технологія допомагає заощаджувати ресурс батареї, а також продовжує термін служби пристроїв (таких як смартфони, планшети, а також пристроїв котрі використовуються в системах розумного будинку, як камери, датчики і інші).

У Wi-Fi 6 доступно восьми потоковий MU-MIMO, передає дані одночасно, а не послідовно, і дозволяє більш рівномірно розподіляти пропускну здатність між підключеними клієнтами.

Окрім можливостей, що були вище згадані, Wi-Fi 6 пропонує підтримку 1024-QAM (Quadrature Amplitude Modulation). Це метод модуляції, що дозволяє упаковувати більше даних у кожен сигнал для збільшення пропускну здатності. До того ж, у даному стандарті присутній ідентифікатор сусідніх бездротових мереж (BSS Color - Base Service Station), котрий дозволяє усунути конфлікти з сусідніми мережами шляхом позначенням фреймів [16].

### 1.2.8. 802.11be (Wi-Fi 7)

Специфікація представлена у 2024 році, але розробка досі триває. Wi-Fi 7 представляє собою останню еволюцію технології бездротового зв'язку, яка обіцяє підключення з небаченими швидкістю і ефективністю. Пікова швидкість передачі даних передбачає бути понад 40 Gbit/s. Розроблений на основі технології Wi-Fi 6E, Wi-Fi 7 працює в радіодіапазонах 2,4 ГГц, 5 ГГц і 6 ГГц і підтримує 16 потоків MIMO, що значно збільшує пропускну здатність мережі. Також дане покоління представляє нову технологію Multi-Link Operation (MLO), що дозволяє декільком пристроям автоматично та одночасно надсилати й отримувати дані в різних діапазонах частот[17].

## **2. ЗОНА ПОКРИТТЯ WI-FI МЕРЕЖЕЮ**

### **2.1. Проблематика і труднощі у побудові Wi-Fi мережі**

#### **1. Повільніша передача даних:**

Бездротові мережі мають обмежену пропускну здатність порівняно з дротовими мережами. При бездротовій передачі даних пристрої використовують напівдуплексний режим, що означає, що вони можуть передавати або приймати дані, але не одночасно. Це може знижувати ефективність передачі, особливо у ситуаціях, коли декілька пристроїв спільно конкурують за доступ до каналу.

Застосування технологій, таких як MU-MIMO (Multi-User Multiple Input Multiple Output)[12], може допомогти покращити ефективність передачі даних, дозволяючи передачу даних декільком пристроям одночасно.

#### **2. Проблеми з підключенням:**

Деякі пристрої можуть мати проблеми з підключенням до бездротової мережі через різні фактори, такі як велика відстань до точки доступу, перешкоди (наприклад, стіни або металеві конструкції), перенавантаження мережі або проблеми з налаштуванням пристроїв.

Використання мережевих пристроїв таких як: підсилювачі сигналу або мережеві мости, може допомогти розширити покриття мережі та покращити доступність до неї.

#### **3. Безпека:**

Безпека є однією з основних проблем бездротових мереж. Це пов'язано з тим, що даний тип мережі є вразливим щодо несанкціонованого доступу та перехоплення даних. Нешифровані Wi-Fi мережі можуть бути легко скомпрометовані. Тому для їхнього захисту важливо використовувати шифрування даних та забезпечити правильну, коректну настройку точок доступу та інших мережевих пристроїв.

Також регулярне оновлення програмного забезпечення та використання сильних, надійних паролів може допомогти знизити ризик несанкціонованого доступу до мережі і її пристроїв.

#### 4. **Гостьові мережі:**

Наявність гостьових мереж може представляти загрозу для основної мережі, якщо вони не налаштовані правильно і не ізольовані від основної мережі.

Використання даних мереж допомагає налаштувати мережі так, щоб гості мали підключення до інтернету без доступу до внутрішньої мережі. Це також дозволяє нам підвищити рівень безпеки для мережі, через обмежені права даної категорії користувачів.

#### 5. **BYOD (Bring Your Own Device):**

BYOD - це термін введений для характеристики ситуацій, коли до мережі одночасно підключається декілька пристроїв одного користувача[18]. Це збільшує кількість підключених засобів, що призводить до появи проблем з пропускнуою здатністю та управлінням мережею.

#### 6. **Проблеми з покриттям:**

Проблеми з зоною покриття можуть виникати через наявність фізичних перешкод. Також на покриття впливає відстань до точок доступу або їхня пропускну здатність, що може бути обмеженою. Тому важливо проводити аналіз мережі та вибирати правильне розташування для точок доступу використовуючи різні техніки, такі як мапування покриття та/або оптимізації сигналу.

#### 7. **Інтерференція:**

Інтерференція – фізичне явище, що виникає при зіткненні декількох когерентних хвиль під час їхнього поширення в просторі. Це призводить до послаблення або підсилення хвильової амплітуди[19].

Інтерференція може з'являтися через наявність інших пристроїв, що працюють на тих же самих частотах, або використовують такий же частотний спектр. Ці конфлікти можуть призводити до спотворення сигналу та погіршення якості з'єднання. Для зменшення їхнього впливу один на одного, можна

використовувати канали із меншою загальною інтерференцією (наприклад, 5 ГГц замість 2.4 ГГц). Або також можна використовувати технологію для зменшення інтерференцій (наприклад, DFS - Dynamic Frequency Selection)

#### **8. Зміна середовища:**

Фізичні зміни в середовищі, такі як додавання перешкод або зміна планування приміщення, можуть впливати на якість сигналу і на надійність з'єднання та спричинити перебої в роботі мережі.

#### **9. Пристрої IoT:**

Пристрої Інтернету речей (IoT) можуть збільшувати навантаження на мережу та вимагати/конкурувати за більшу кількість мережевих ресурсів та впливати на загальну продуктивність мережі.

#### **10. Відмовостійка мережа:**

Побудова відмовостійкої мережі, котра завжди є доступна, вимагає застосування різних технологій та впровадження резервних механізмів, таких як резервне копіювання, живлення, додаткові-резервні або додаткові-розгужуючі мережеві пристрої та гнучкі конфігурації для них (наприклад масштабованість)

Ці проблеми (і інші аспекти) потребують уважного розгляду та вирішення для покращення продуктивності, ефективного управління і використання та безпеки бездротових мереж Wi-Fi.

### **2.2. Опис об'єкта дослідження**

Об'єктом дослідження для даної роботи став стадіон НСК «Олімпійський» розташований у місті Київ. Це найбільша спортивна арена України, яка вміщує 70 тисяч глядачів на 80 секторах, на двох ярусах.

Для розгортання дизайну Wi-Fi покриття було обрано типовий сектор №31. Його конструктивна схожість з іншими секторами дозволяє легко масштабувати запропоноване рішення на інші ділянки стадіону, забезпечуючи ефективне покриття для всього об'єкту. В даному секторі налічується 1354

глядацьких місць розташованих на 46 рядах. Орієнтовні розміри 40 метрів у довжину та 15 метрів у ширину.

Для розрахунку Wi-Fi покриття було обрано два варіанти співвідношення кількості активних користувачів Wi-Fi до загальної кількості глядачів за умови 100% заповненої трибуни:

1. 1:10 - У середньому, на стадіонах та подібних масових заходах, спостерігається різна кількість активних користувачів Wi-Fi відносно кількості глядачів. Наприклад, на об'єктах, де увага глядачів сфокусована на спортивних подіях, зазвичай один активний користувач Wi-Fi припадає на 10 глядачів. Такі умови стандартні для більшості спортивних заходів. Таким чином, на трибуні можна очікувати близько 135 активних користувачів Wi-Fi.
2. 1:3 – У порівнянні, сучасний американський ринок, як, наприклад, статистика зібрана NFL, показує іншу динаміку. Тут спостерігається вищий рівень активних користувачів Wi-Fi порівняно з кількістю глядачів, приблизно один користувач на трьох глядачів. Отже, на трибунах цих подій можна очікувати близько 450 активних користувачів Wi-Fi.

### **2.3. Метод**

Проектування бездротової мережі є складним завданням. Це пов'язано зі збільшенням змінних, котрі потрібно враховувати під час її побудови в порівнянні із дротовими мережами. У дротовій мережі сигнали передачі зв'язуються всередині кабелів, що робить підключення та пропускну здатність передбачуваними. У тому ж часі бездротові мережі використовують повітря для передачі радіочастотних (РЧ) сигналів. Їх важко стримувати незважаючи на всі технологічні вдосконалення. Як говорилося раніше, мережа Wi-Fi є напівдуплексною. Тобто коли один бездротовий пристрій передає, усі інші мають чекати. Коли один клієнт приєднується до точки доступу (AP), він може використовувати загальну пропускну здатність мережі. Коли приєднується кілька клієнтів, вони повинні конкурувати за доступний ефірний час на каналі. З

великою кількістю клієнтів кожен клієнт матиме менше ефірного часу, що призводить до низької продуктивності.

Побудова Wi-Fi мережі в умовах високої щільності клієнтів вимагає комплексного підходу та урахування ряду факторів. Ось декілька методологій, котрі можуть бути використані для оптимізації бездротової мережі:

### **1. Аналіз середовища**

Найперше на що потрібно звернути увагу перед початком будь-якого проектування - це проведення докладного аналізу середовища. До цього відноситься вивчення фізичних характеристик середовища, такі як: розмір приміщення, стіни (їхня товщина та матеріали з яких вони зроблені) та перешкоди, а також потенційні джерела інтерференції. Все це може впливати на поширення сигналу Wi-Fi.

### **2. Моделювання покриття**

Для визначення оптимального розташування AP а також для забезпечення максимального покриття та зменшення зон перекриття сигналу (для того щоб уникнути інтерференції) рекомендовано використовувати спеціалізоване програмне забезпечення, що дозволяє моделювання покриття.

### **3. Використання технологій Beamforming та MU-MIMO**

Технологія Beamforming дозволяє точкам доступу спрямовувати сигнали в конкретному напрямку для конкретних пристроїв, щоб забезпечити кращу якість сигналу та зменшити вплив інтерференції. А технологія MU-MIMO [12] дозволяє точкам доступу обслуговувати кілька пристроїв одночасно, що дозволяє підвищити ефективність передачі даних у високошвидкісних мережах.

### **4. Планування частотного спектра**

Завдяки вибору оптимальних частотних каналів та управлінню інтерференцією можливо зменшити вплив зовнішніх джерел перешкод на якість сигналу та на швидкість передачі даних.

## 5. **Управління ресурсами мережі:**

Використання систем управління ресурсами дозволяє ефективно розподіляти доступний спектральний та часовий ресурс між різними пристроями в мережі, забезпечуючи оптимальну продуктивність.

## 6. **Розгортання гостьових мереж та VLAN:**

Відділення гостьових мереж від основної мережі дозволяє контролювати доступ гостей до певних мережевих ресурсів що дозволяє зменшити навантаження на основну інфраструктуру.

## 7. **Моніторинг та налагодження:**

Постійний моніторинг мережі дозволяє вчасно виявляти проблем а також швидко реагувати на них і вживати відповідних заходів щодо їх вирішення. Це є одним із критеріїв стабільної та надійної роботи Wi-Fi мережі.

## 8. **Створення документації**

Створення документації для побудованої мережі є важливим етапом, який сприяє ефективному управлінню та забезпечує стабільну та безпечну роботу мережі. Ось деякі із важливих причин:

- **Документування конфігурації:** Документація дозволяє фіксувати конфігураційні налаштування мережі, включаючи параметри безпеки, налаштування пристроїв, інтерфейси зв'язку та інші важливі дані. Це дозволяє зберігати інформацію про стан мережі для майбутнього використання або для відновлення в разі виникнення проблем.
- **Легше управління:** Документація полегшує управління мережею, оскільки надає зрозумілу та структуровану інформацію про всі складові мережі. Це дозволяє швидко знаходити потрібну інформацію та проводити ефективну підтримку та адміністрування мережі.
- **Аудит та відповідність:** Документація допомагає виконувати аудит мережі та визначати відповідність її налаштувань вимогам безпеки та регуляторним

нормам. Вона також може бути важливою для отримання сертифікацій та стандартів якості.

## **2.4. Аналіз базових принципів побудови безпроводної мережі**

У даному пункті буде детально розглянуто базові принципи та ключові елементи, які слід враховувати під час розробки і перевірки бездротової мережі в умовах високої щільності. Крім теоретичного аспекту, також буде проведено аналіз та вирахування деяких параметрів, що дозволить нам отримати більш повне уявлення про ефективність даної мережі в конкретних умовах. Такий підхід дозволить не лише зрозуміти теоретичні основи, але й практично застосувати їх для оптимізації бездротового зв'язку.

Перед тим, як розпочинати, давайте розберемося в термінології. А що з саме означає «Зона високої щільності клієнтів»? Місцеположення можна класифікувати, як зону з високою щільністю клієнтів (High Client Density Areas), якщо більше 30 абонентів підключаються до однієї точки доступу. Тобто можна вважати, що це один клієнт на 1.5 м<sup>2</sup>. А Wi-Fi високої щільності – це стратегія проектування для великих мереж, що забезпечує стійке і повне з'єднання клієнтів у випадках, коли очікується, що велика кількість абонентів підключиться до точок доступу в обмеженому, невеликому просторі.

### **2.4.1. Діапазони частот**

**Діапазон (смуга) частот** – це визначений безперервний інтервал у частотній області, що обмежується верхньою і нижньою частотами, в якому коливанням та хвилі мають властиво мати схожі характеристики (Рис. 2.1.). Кожен із діапазонів також присвоюється умовна назва[20].

На даний момент для побудови Wi-Fi мереж доступні три частотні діапазони, а саме: 2.4, 5 та 6 ГГц. Ці смуги частотного спектру були спеціально звільнені від ліцензування та виділені для використання у бездротових мережах, а саме для технології Wi-Fi.

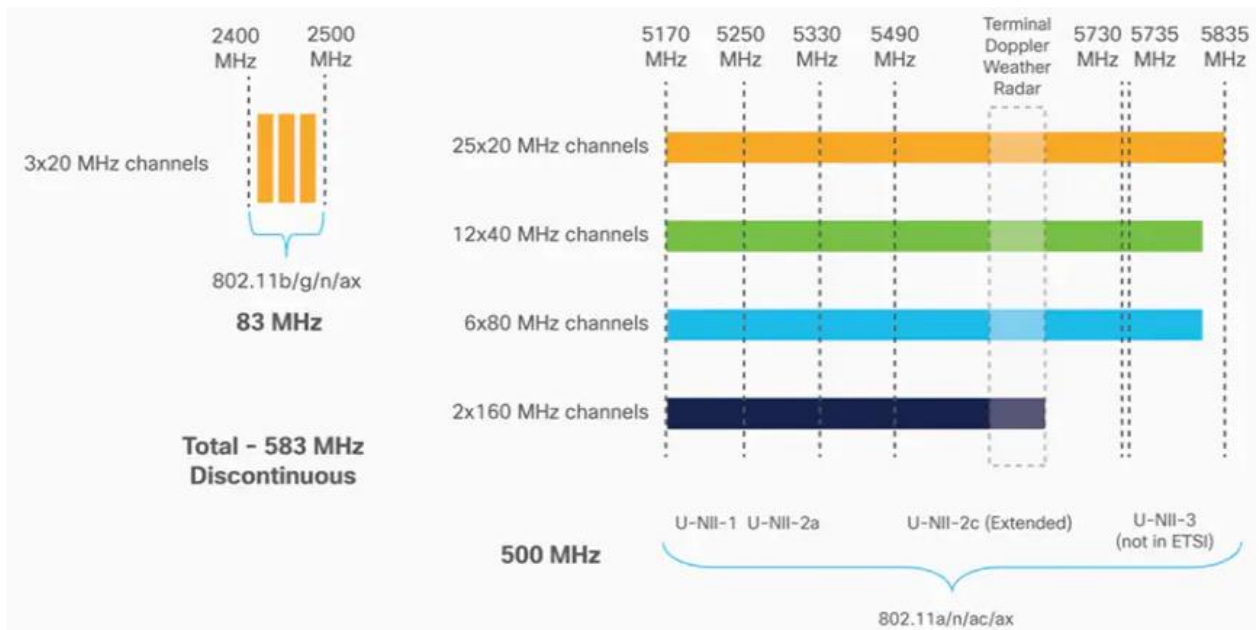


Рисунок 2.1. Спектр 2.4 ГГц та 5 ГГц діапазоні частот[21]

Переваги 2.4 ГГц діапазону:

- Діапазон 2.4 ГГц домінує в критерії мережевого покриття Wi-Fi. Це зумовлено наявністю нижчих частот, що забезпечують кращу проникність через тверді предмети, такі як стіни.

Недоліки 2.4 ГГц діапазону:

- Даний діапазон поступається швидкістю передачі даних 5ГГц.
- Обмеженість (або перешкоди загального каналу):

У діапазоні 2.4 ГГц є всього лише 11 каналів для передачі даних, і лише 3 із них не перекриваються. Це 1, 6, та 11 канали. Може виникнути питання, чому так важливо, щоб вони не перекривали одне одного? Причина в тому, щоб уникнути інтерференції променів, а також їхнього спотворення. Потрібно ще пам'ятати, що у даному діапазоні працюють і інші пристрої (побутові прилади, такі як мікрохвильова піч).

Переваги 5 ГГц діапазону:

- Даний діапазон має більшу швидкість передачі даних. Це пов'язано із вищим діапазоном.

- Майже відсутні перешкоди загального каналу. У 5 ГГц діапазоні є можливість вибрати канали, що не накладаються один на одного. Це зв'язано з тим що спектр має більшу довжину. Загальна кількість каналів дорівнює 28.

Недоліки 5 ГГц діапазону:

- Мережеве покриття у даному спектрі гірше, у порівнянні з 2.4. Це має відношення до того, що хвилям з вищими частотами важче проходити через різного типу перешкод, через їхнє швидке згасання.
- Проблеми можуть також виникнути з сумісністю з приладами. Тобто не всі користувацькі пристрої можуть підтримувати зв'язок на 5 ГГц (хоча можна ствердити, що більшість приладів можуть підтримувати обидва діапазони).

Не забуваємо також, що у новому стандарті Wi-Fi 6E отримано новий, безперервний діапазон спектра 6 ГГц (Рис. 2.2.) довжиною у 1200 МГц. Завдяки тому, що у ньому відсутні пробіли у покритті з'явилася можливість ефективно розширювати канали.

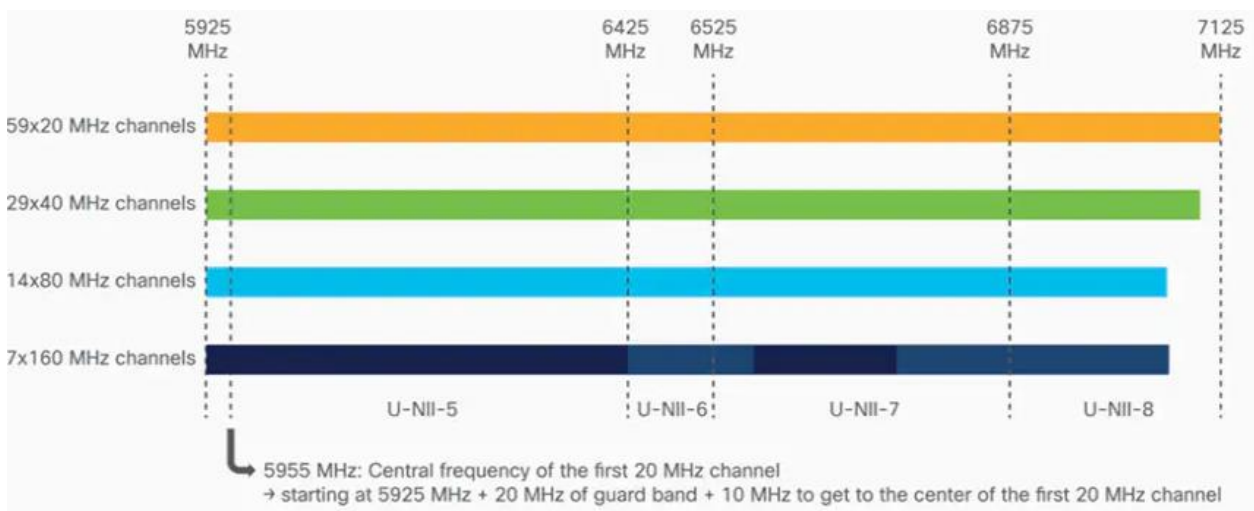


Рисунок 2.2. Новий діапазон 6 GHz[21]

## 2.4.2. Потужність випромінювання

При встановленні максимальної потужності на точках доступу може спричинити деякі проблеми такі як:

## 1. Міжканальна інтерференція

При встановленні високої потужності на AP може виникнути перехресна інтерференція між сусідніми каналами. Це призводить до погіршення якості зв'язку для користувачів у зоні покриття, особливо у місцях з високою щільністю мережі.

## 2. Клієнти не на максимальній потужності

Багато бездротових пристроїв (смартфони, ноутбуки і ін.) мають обмеження на вихідну потужність передавача. Це означає, що навіть якщо точка доступу відправляє сигнал на максимальній потужності, деякі клієнти, особливо ті, що знаходяться на межі соти, не зможуть дати відповідь їй, через недостатню потужність. Зазвичай користувацькі пристрої працюють у діапазоні 13 dBm. Це може призвести до нерівномірного покриття та зменшення ефективності мережі (Рис. 2.3.).

Рекомендовано налаштувати AP так, щоб вона випромінювала на  $\frac{1}{4}$  від максимальної потужності.

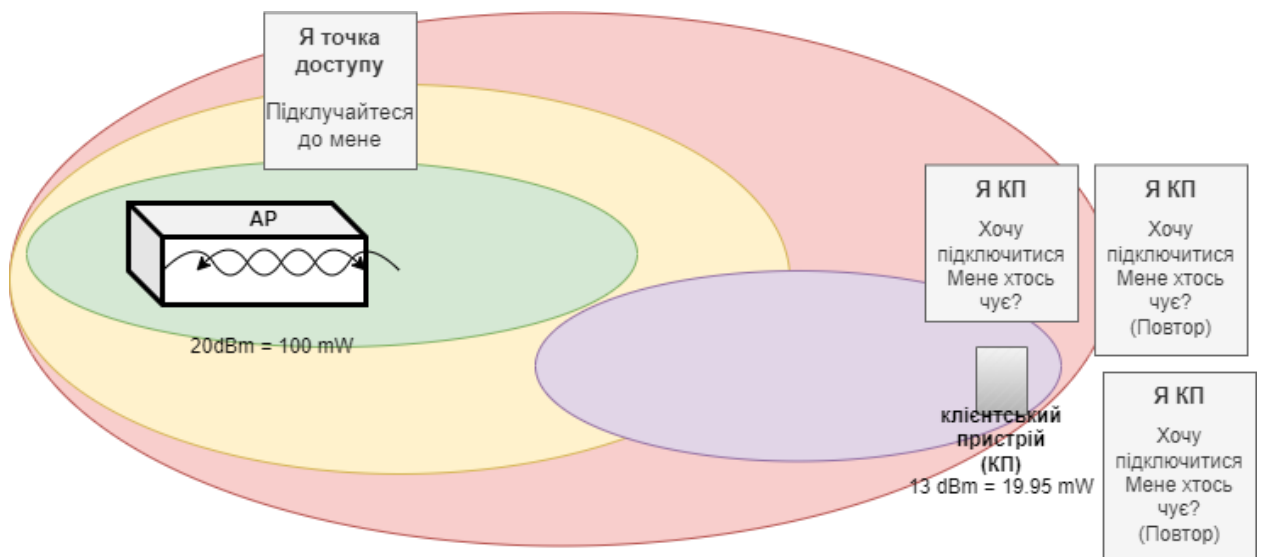


Рисунок 2.3. Візуальне зображення некоректного налаштування мережевого пристрою

Терміни децибелі (dB) або децибелі-міліват (dBm) не вимірюють потужність. Натомість вони дають відносне порівняння (або співвідношення) між двома значеннями потужності.

Рівень потужності в децибелах можна записати як співвідношення:

$$P(dB) = 10 \log_{10} \left( \frac{P_2}{P_1} \right) \quad (2.1)$$

де :

$P_1$  – еталонна потужність у ватах,  $P_1 = 1.0mW$ ;

$P_2$  – потужність у ватах.

Формула перетворення з dBm у W:

$$P(W) = 1W \times \frac{10^{\frac{P(dBm)}{10}}}{1000} \quad (2.2)$$

де :

$P(W)$  – потужність у ватах;

$P(dBm)$  – потужність у децибел-міліват.

Переставивши наведене вище рівняння (2.2), ми отримаємо формулу для зворотного перетворення W у dBm:

$$P(dBm) = 10 \times \log_{10} \left( \frac{1000 \times P(W)}{1W} \right) = 10 \times \log_{10} \left( \frac{P(W)}{1W} \right) + 30 \quad (2.3)$$

Тому у нашому випадку бажана потужність котру варто встановлювати на точці доступу дорівнює:

$$P(W) = 1W \times \frac{10^{\frac{13}{10}}}{1000} = 0.0199526 W \quad (2.4)$$

$$\text{Або } P(mW) = P(W) \times 1000 = 19.9526 mW$$

### 3. Утворення ‘дірки’ у покритті при виході з ладу однієї точки доступу

Якщо точка доступу виходить з ладу через деякі технічні або інші проблеми, це може призвести до великої ‘діри’(зони у якій відсутнє покриття Wi-Fi сигналом) в покритті мережі, особливо якщо вона була єдиною в даній області.

#### **4. Перегрів обладнання**

Висока потужність передавача може призвести до перегріву обладнання (особливо це стосується пристроїв у яких відсутня система охолодження або вона є обмеженою). Перегрів, а також використання і працювання пристрою на межі своїх можливостей, може призвести до зниження надійності та тривалості служби обладнання.

#### **5. Використання батареї в мобільних пристроях**

Підвищена потужність сигналу на точці доступу може призвести до швидшого розрядження батарей в мобільних пристроях, так як вони вимушені працювати на вищих потужностях щоб зберегти зв'язок з мережею.

#### **6. Погіршення якості зв'язку на великих відстанях**

Хоча підвищена потужність може покращити покриття мережі на коротких відстанях, на великих відстанях вона може призвести до погіршення якості зв'язку через інтерференцію та спотворення сигналу.

#### **7. Перевантаження маршрутизатора**

При використанні пристроїв на повній потужності, вони споживають всі доступні ресурси на 100%, що може створювати враження повної ефективності використання ресурсів. Однак, на практиці, це може виявитися не зовсім таким корисним, як здається на перший погляд. Наприклад, перевантаження маршрутизатора може призвести до тимчасового успішного оброблення всіх запитів, але це не означає, що він зможе зберігати такий режим роботи протягом тривалого терміну роботи. Також важливо враховувати ситуації, коли пристрій працює на повну потужність при низькому навантаженні користувачів. В таких випадках, коли до мережі приєднуються додаткові клієнти, існує ризик недостатньої масштабованості та можливого перевантаження, що може призвести до збоїв та відмов мережі.

Тому рекомендується налаштовувати пристрої таким чином, щоб вони працювали на половину своїх можливостей. Це не лише сприятиме подовженню

терміну їхнього життя, але й забезпечить достатню ємність мережі при збільшеному навантаженні, а також ураховує можливі зростання обсягу роботи в майбутньому.

### 2.4.3. Пристрої

Сучасні користувачі очікують хорошого бездротового з'єднання. Також зросла кількість бездротових пристроїв. Один користувач може мати ноутбук, планшет, один або два смартфони і, можливо, розумний годинник. Це чотири-п'ять пристроїв. Для планування ресурсів потрібно врахувати, скільки пристроїв матиме в середньому один користувач. Наприклад, від 1,5 до 3 пристроїв на користувача.

Також потрібно подумати про протоколи та частоти, які підтримують ці пристрої. І також, які програми використовуватимуть користувачі? Згідно з Федеральною комісією зі зв'язку (FCC - Federal Communications Commission)[22] надає набір вказівок щодо Mbit/s, необхідних на основі цифрової активності. Орієнтовні розрахункові дані наведено у Таблиці 2.1 знизу:

Таблиця 2.1. Орієнтовні швидкості передачі (Mbit/s) для різних типів трафіку

<b>Діяльність</b>	<b>Мінімальна швидкість завантаження (Mbit/s)</b>
<b>Обмін повідомленнями:</b> Whatsapp, Facebook Messenger, Viber, Telegram	0.5-1
<b>Електронна пошта:</b> GMail, Outlook	0.5-1
<b>Соціальні мережі:</b> Instagram, Facebook, LinkedIn, G+	0.5-1

<b>Дзвінки VoIP:</b> VoIP calls, Skype calls, WhatsApp calls	0.5
<b>Відео дзвінки:</b> Skype video call, Facetime video call	1-1,5
<b>Веб-перегляд:</b> Web browsing, Google, Yahoo!, Bing, News	0,5-1
<b>Обмін файлами:</b> Google Drive	2
<b>Потокове відео:</b> Video streaming з Інтернету, потокове медіа зі стандартною роздільною здатністю, пр. YouTube	3 - 4
<b>Потокове відео (HD):</b> YouTube, Netflix, Google Play Movies, Amazon Prime Video	5 - 8

Ці цифри є приблизними\*.

#### 2.4.4. Керування розмір соти

В умовах високої щільності клієнтів в бездротових мережах, нашою метою є зменшення розміру бездротової соти, щоб зменшити кількість клієнтів, які підключені до однієї точки доступу (AP). Це допоможе поліпшити продуктивність та якість обслуговування користувачів. Щоб досягти цієї мети, існують кілька стратегій, які можна використати для фізичного та логічного я соти. Давайте детальніше розглянемо кожен з них.

##### - Потужність передачі TX (Transmit)

Зниження потужності передачі на AP призводить до фізичного зменшення зони покриття через зменшення площі охопленої хорошим RSSI (Received Signal

Strength Indicator) цільових пристроїв. Даний спосіб є хорошим засобом, що допомагає регулювати розмір соти, але він має певний ряд своїх недоліків. До цього можемо віднести те, що при зменшенні потужності передачі, регулюється розмір тільки конкретної сели. І по суті ми не можемо контролювати інших клієнтів, те де вони розташовані або тип використаної антени, запасом потужності та іншими їхніми характеристиками. Але кожен із цих показників відіграє свою роль у кінцевому результаті щодо використання радіо ресурсів. Тому рекомендовано вираховувати та встановлювати такий рівень TX потужності, щоб він був достатній для виокремлення корисного сигналу. А також при зменшенні потужності передачі може збільшуватися рівень перешкод у спільному каналі від чого показник SNR (signal-to-noise ratio) знижується (це є наслідком того, що слабкий сигнал просто перетворюється на шум).

Тому згідно наших розрахунків (2.4) оптимальна потужність дорівнює  $P(\text{mW}) = 19.9526 \text{ mW}$ .

#### - Використання обов'язкової мінімальної швидкості передачі даних

Під терміном обов'язкова мінімальна швидкість передачі даних розуміється, що це найнижча швидкість передачі даних, яка підтримуються пристроєм. Це означає, що кожен клієнт, котрих хоче утворити з'єднання повинен підтримувати цю швидкість (і вищу). Це також дозволяє зменшити розмір сели, тому що, чим далі клієнт знаходиться від AP тим нижча швидкість з якою вони можуть обмінюватися даними. Додатково, зі збільшенням обов'язкової мінімальної швидкості передачі даних також зменшується відстань, на якій точки доступу можуть демодулювати сигнали один одного. Тобто, якщо AP не може демодулювати сигнал - він вважається шумом. Це дозволяє економити використання каналів. А при використанні вищих швидкостей передачі – економиться використання ефірного часу.

Цей критерій потрібно налаштовувати на точках доступу. Це включає в себе той факт, що швидкості, які будуть використовуватися для здійснення передачі

даних під час сесії Wi-Fi під'єднання, зазвичай визначається самим пристроєм відповідно до якості з'єднання, враховуючи показник SNR.

На основі попередньо сказаного у даному дизайні необхідно відключити підтримку низьких швидкостей (Data Rate), а саме 1, 2, 5.5, 6, 11, 12 Mdit/s.

#### **- Встановлення обов'язкової швидкості передачі даних**

На AP доступно для налаштування три режими роботи:

- **Обов'язковий** - у цьому режимі точка доступу вимагає, щоб клієнт підтримував певний рівень передачі даних. Якщо клієнт не може відповісти цим вимогам, він не може підключитися до цієї точки доступу.
- **Підтримується** – доступна швидкість передачі для приєднаних клієнтів.
- **Вимкнено** - дана швидкість передачі даних не підтримується і не використовується. Точка доступу не надає можливості підключення за цим рівнем швидкості.

Тому у конфігураціях точок доступу встановлюється обов'язкова підтримки швидкості 24 Mdit/s – це стратегічний крок для оптимізації бездротової мережі. Завдяки цьому зможемо забезпечити ефективне використання доступного ефірного часу, зменшити розмір сели та покращити продуктивність мережі.

#### **- Загасання сигналу в середині приміщення**

Цей метод працює лише, але бажано використовувати в крайніх випадках. В його основу покладено згасання променю підчас проходження перешкод таких, як стіни, підлога, предмети та навіть люди можуть використовуватися як атенюатори.

#### **- Вибір антени**

Завдяки антені формується зовнішній вигляд соти та визначається, як точка доступу передає та приймає бездротові сигнали. Більшість точок доступу мають внутрішні або зовнішні антени. Існує декілька видів антен, що можуть ефективно працювати у різних випадках відповідно до потреб. Тому, застосовуючи різні

типи антен, а також використовуючи їхні конструкційні особливості та параметри, ми можемо змінювати розміри сот.

У даному дизайні Wi-Fi використано обладнання одного із лідерів на ринку телекомунікацій, а саме компанії Cisco Systems. Були вибрано моделі Catalyst 9124AX Series [5]. Вибір був обґрунтований вуличними умовами експлуатації і дана лінійка ідеально підійшла для цього. Вся вона виконана у захищеному корпусі та витримує температуру від  $-40^{\circ}$  до  $65^{\circ}\text{C}$  та вологість від 0% до 100% з конденсуванням. Конкретні моделі Cisco C9124AXI та C9124AXD[23] точки доступу, що містять у собі вбудовані антени, та Cisco C9124AXE [23], що має вбудовані виходи для підключення зовнішніх антен. Для Cisco C9124AXE було вибрано AIR-ANT2513P4M-N [24] стаціонарну антену, що дозволить більш чітко сформулювати промінь а також полегшить керування зоною покриття.

#### **2.4.5. Перекриття сот**

Між сотами має бути достатнє перекриття. Це необхідно робити для того, щоб забезпечити безперебійний роумінгу. Але найяскравіше це стає помітно в мережах із високою щільністю клієнтів. Якщо перекриття недостатнє, клієнти можуть залишатися підключеними до віддаленої точки доступу протягом більш тривалого часу, використовуючи низьку швидкість передачі даних. Клієнти також надсилатимуть запити на пошук кращого з'єднання, що збільшує перевантаження ефірного часу. Правильне перекриття клітин також допомагає збалансувати навантаження. Коли клієнти бачать дві або більше точок доступу, вони можуть підключитися до тієї, що має найменшу кількість під'єднаних клієнтів.

#### **2.4.6. Повторне використання частотного каналу**

Сигнали 2,4 ГГц мають кращий діапазон і менше затухання, ніж сигнали 5 ГГц, але створити мережу високої щільності, використовуючи лише 2,4 ГГц, проблематично. Є лише три (чотири в деяких країнах) канали, які не перекриваються. Тому для забезпечення більшого покриття потрібно повторно

використовувати частотні канали. Ризик інтерференції в одному каналі на частоті 2,4 ГГц високий, оскільки багато точок доступу та клієнтів. Через це 5 ГГц зазвичай є кращим вибором для мережі з високою щільністю, через наявність 24-х каналів, що не перекриваються, для роботи на частоті 5 ГГц. Однак на деяких каналах існують обмеження на максимальну потужність передачі.

Багато клієнтів використовують дводіапазонні адаптери, які підтримують 2,4 і 5 ГГц. Однак це не гарантує, що клієнт віддає перевагу 5 ГГц перед 2,4 ГГц. Це рішення клієнта. Однак сучасні ОС будуть. Наприклад, Microsoft Windows шукатиме канали 5 ГГц, перш ніж шукати канали 2,4 ГГц.

Для співвідношення користувачів 1:10 розподіл частотних каналів буде виглядати таким чином Рис. 2.4.:

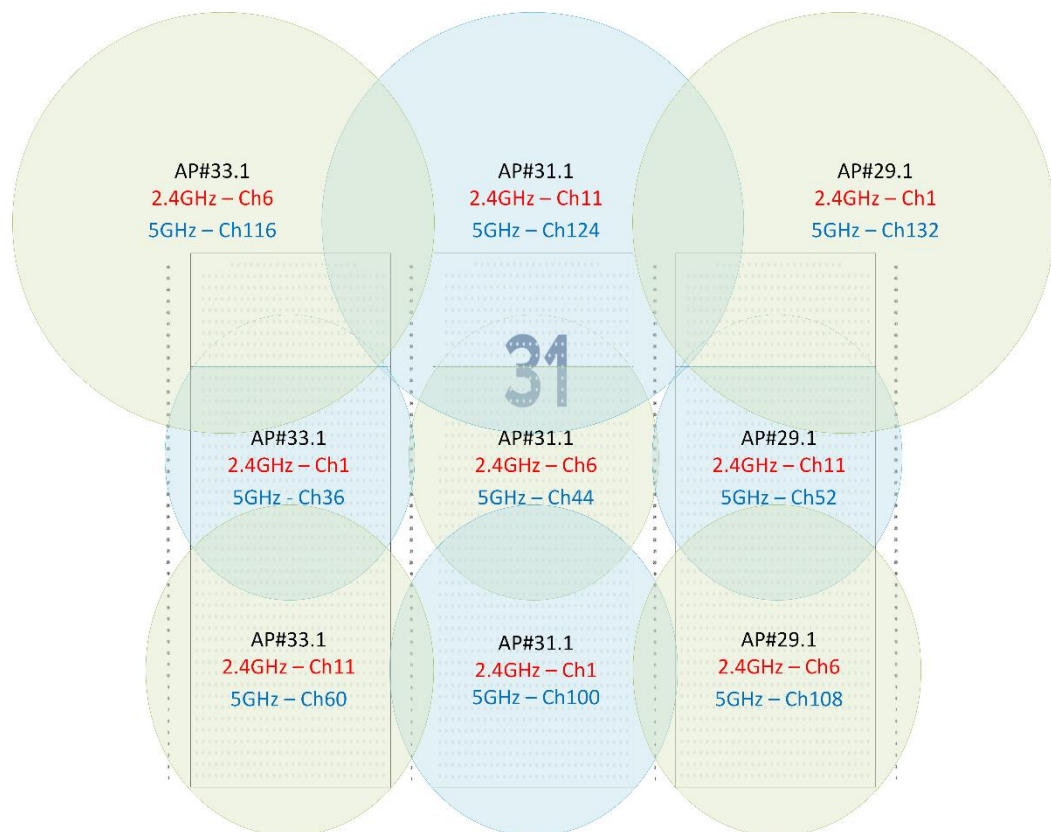


Рисунок 2.4. Розподіл частотних каналів

А для співвідношення 1:3 – Рис. 2.5.:

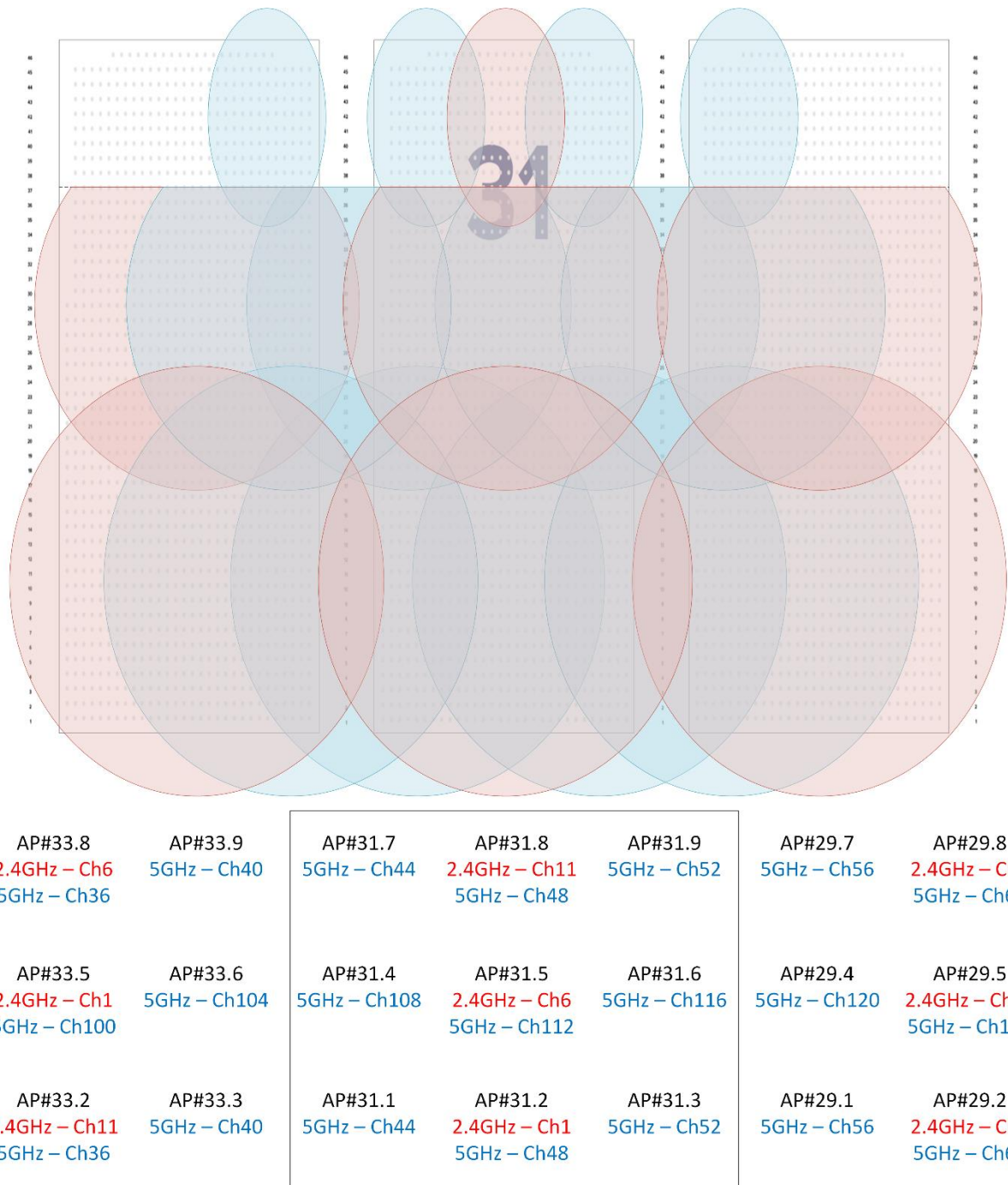


Рисунок 2.5. Розподіл частотних каналів для співвідношення 1:3

Вибрана послідовність частотних каналів дозволить уникнути утворення міжканальної інтерференції, що в тому ж часі забезпечить стабільну та надійну роботу бездротової мережі. Оптимальний розподіл частотних каналів зменшує ймовірність конфліктів між сусідніми точками доступу, це покращує загальну пропускну здатність і якість з'єднання. Завдяки ретельному плануванню і

дотриманню рекомендацій, мережа здатна підтримувати високу продуктивність навіть у середовищах з високою щільністю клієнтів, що є критичним фактором для забезпечення безперервного і якісного обслуговування користувачів.

#### **2.4.7. Об'єднання каналів**

Об'єднання каналів забезпечує вищу пропускну здатність за рахунок збільшення ширини каналу. На частоті 2,4 ГГц це неможливо, оскільки у вас буде лише один неперекриваючий канал. На 5 ГГц це можливо, але чи потрібно це, залежить від клієнтів, програм і вимог до пропускну здатності.

Згідно цього ми можемо дозволити використання ширини каналу в 40 МГц для діапазону частот 5 ГГц у дизайні для співвідношення 1:10 користувачів.

#### **2.4.8. Співвідношення сигнал/шум (SNR)**

Співвідношення сигнал/шум (SNR) порівнює бажаний сигнал з рівнем фонового шуму, виміряним у децибелах (dB) . Вищий SNR вказує на те, що потужність сигналу сильніша за відносний фоновий шум, що веде до кращої продуктивності мережі. Для швидкості передачі даних потрібен певний SNR.

AP зазвичай монтуються на стелі, на стіні тобто вище, від місця де знаходиться більшість клієнтів. Вона може чути практично все в зоні її дії (наприклад, кімнати) або за її межами. Основне джерело перешкод знаходиться на рівні підлоги . Тут перебувають всі клієнти, оточені людьми та іншими клієнтами. Клієнти будуть передавати тільки тоді, коли середовище буде вільним, але їхній досвід відрізняється від AP. На підлозі відбувається набагато більше бездротової активності. Оскільки люди чи інші об'єкти блокують сигнал. Моментами буває таке, що клієнти можуть вважати, що носій вільний, хоча це не так. Це спричиняє зіткнення декількох сигналів. Це збільшує загальний шум і знижує SNR. Результатом цього стане вищий рівень використання ефірного часу та гірша продуктивність мережі.

### **2.4.9. Якість обслуговування (QoS)**

Коли мережі працюють на основі найкращих зусиль, тобто увесь трафік має однаковий пріоритет а також рівні шанси бути доставленим своєчасно. У моменти коли виникає перевантаження мережі, весь трафік має однакові шанси бути відхиленним/дропнутим. У випадках коли мережа налаштовується з використанням QoS (якість обслуговування), інженер/адміністратор мережі можете вибрати конкретний мережевий трафік, пріоритезувати його (відповідно до його відносної важливості) та використовувати методи управління трафіком для надання йому пріоритетного обслуговування. Впровадження QoS у мережу робить її продуктивність більш передбачуваною та ефективнішою при використанні пропускнуої здатності [25].

Якість обслуговування (Quality of Service, QoS) – це сукупність технологій та механізмів, що використовуються для управління мережевими ресурсами та забезпечення визначеного рівня продуктивності для різних типів мережевих трафіків. QoS дозволяє мережам надавати різний рівень пріоритету різним потокам даних, що особливо важливо для програм з чутливими до затримки вимогами, таких як VoIP, відеоконференції та інші мультимедійні додатки.

Про дану технологію буде детальніше розказано в 3 розділі.

## **2.5. Моделювання покриття**

### **2.5.1. Вибір програмного забезпечення**

Для виконання дослідження та аналізу бездротової мережі Wi-Fi було важливо обрати потужний та функціональний інструмент, який зможе забезпечити надійні результати та дозволить проводити детальний аналіз мережі. Після перегляду та аналізу різноманітних програмних засобів було вирішено скористатися програмним забезпеченням Ekahau Survey[26].

Однією з головних причин вибору Ekahau Survey була його висока репутація та популярність серед професіоналів у галузі мережевих технологій. Дана програма вже довгий час використовується інженерами зв'язку та адміністраторами мереж для планування, розгортання та управління бездротовими мережами Wi-Fi.

Крім того, Ekahau Survey надає широкий спектр функцій, які відповідають потребам в проведенні досліджень та аналізу мережі. Зокрема, вона дозволяє створювати детальні плани мережі, вимірювати сигнал Wi-Fi на місці та будувати карти покриття, а також аналізувати різні параметри мережі для виявлення проблем та вирішення їх.

Крім того, Ekahau Survey має інтуїтивний і простий у використанні інтерфейс, що дозволяє швидко оволодіти програмою та ефективно використовувати її для проведення різноманітних досліджень та аналізу мережі.

Отже, вибір програмного забезпечення Ekahau Survey для аналізу Wi-Fi мережі був обґрунтований його високою репутацією, розширеними можливостями та простотою використання, що дозволить отримати надійні та детальні результати дослідження.

### **2.5.2. Моделювання покриття**

Під час розгортання проекту у ПЗ Ekahau Survey було використано попередньо розраховані параметри конфігурацій. Вони наведені у Таблиці 2.2. для співвідношення користувачів 1:10 та Таблиці 2.3., Таблиці 2.4., Таблиці 2.5. для співвідношення 1:3. Після введення всіх потрібних параметрів, було проведено симулювання покриття для заданих дизайнів. Результати даного моделювання можна побачити на Рис. 2.4. та Рис. 2.7..

## Співвідношення користувачів 1:10

Таблиця 2.2. Параметри налаштувань точок доступу для співвідношення користувачів 1:10

<b>Точки доступу</b>	<b>31.1</b>	<b>31.2</b>	<b>31.3</b>
<b>Модель точки доступу</b>	C9124AXE з антенами AIR-ANT2513P4M-N	C9124AXE з антенами AIR-ANT2513P4M-N	C9124AXI
<b>Номер каналу - 2,4 GHz</b>	1	6	11
<b>Ширина каналу (MHz)</b>	20	20	20
<b>Номер каналу - 5 GHz</b>	100	48	124
<b>Ширина каналу (MHz)</b>	40	40	40
<b>Потужність (mW)</b>	19.9526	19.9526	19.9526
<b>Висота (m)</b>	30	30	5
<b>Кут нахилу (°)</b>	-30	0	0

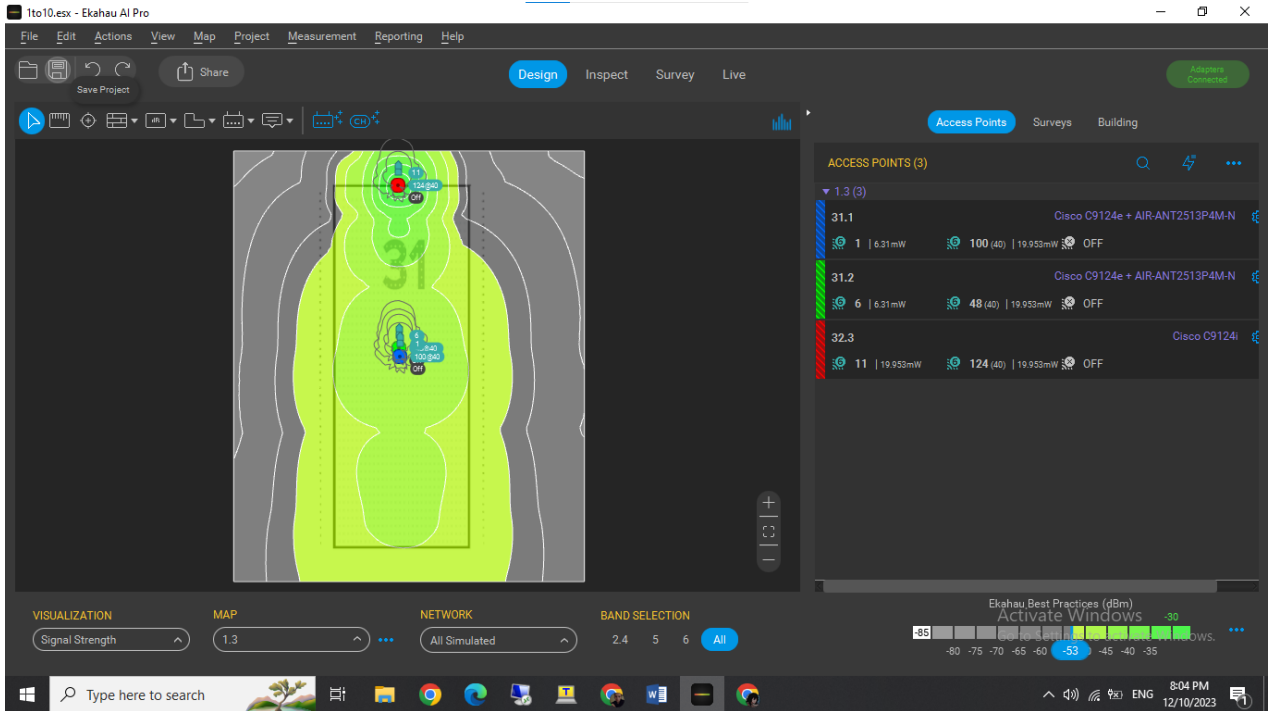


Рисунок 2.4. Розташування точок доступу і візуалізація зони покриття сигналом для співвідношення 1:10

Як видно із зображення, для даного співвідношення запропоноване рішення дизайну дозволяє покрити всю зону 31 сектора силою сигналу у діапазоні 2.4 ГГц від -55 dBm і вище, а у 5ГГц – від -61 dBm і вище (Рис. 2.5. і Рис. 2.6.).



Рисунок 1.5. Вимоги прохідної оцінки для 2,4 GHz каналу

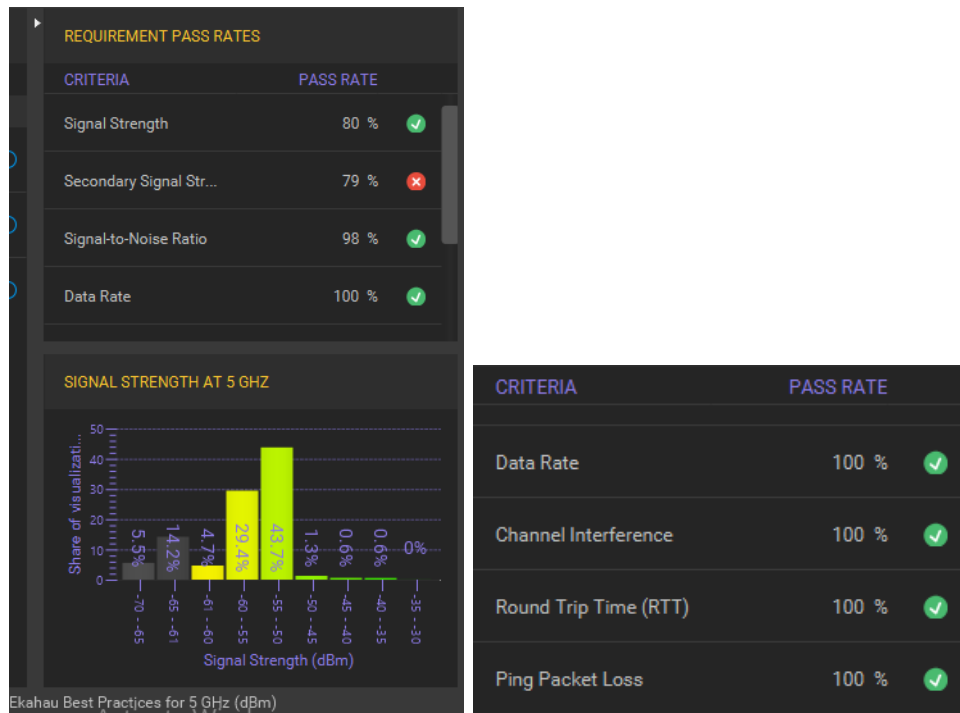


Рисунок 2.6. Вимоги прохідної оцінки для 5GHz каналу

### Співвідношення користувачів 1:3

Таблиця 2.3. Параметри налаштувань точок доступу для співвідношення користувачів 1:3

Точки доступу	31.1	31.2	31.3
Модель точки доступу	C9124AXE з антенами AIR-ANT2513P4M-N	C9124AXE з антенами AIR-ANT2513P4M-N	C9124AXE з антенами AIR-ANT2513P4M-N I
Номер каналу 2,4 GHz	-	1	-
Ширина каналу (MHz)	-	20	-
Номер каналу 5 GHz	44	48	52
Ширина каналу (MHz)	20	20	20

<b>Потужність (mW)</b>	19.9526	19.9526	19.9526
<b>Висота (m)</b>	30	30	30
<b>Кут нахилу (°)</b>	-30	-30	-30

Таблиця 2.4. Параметри налаштувань точок доступу для співвідношення користувачів 1:3

<b>Точки доступу</b>	<b>31.4</b>	<b>31.5</b>	<b>31.6</b>
<b>Модель точки доступу</b>	C9124AXE з антенами AIR-ANT2513P4M-N	C9124AXE з антенами AIR-ANT2513P4M-N	C9124AXE з антенами AIR-ANT2513P4M-N
<b>Номер каналу 2,4 GHz</b>	-	6	-
<b>Ширина каналу (MHz)</b>	-	20	-
<b>Номер каналу 5 GHz</b>	108	112	116
<b>Ширина каналу (MHz)</b>	20	20	20
<b>Потужність (mW)</b>	19.9526	19.9526	19.9526
<b>Висота (m)</b>	30	30	30
<b>Кут нахилу (°)</b>	0	0	0

Таблиця 2.5. Параметри налаштувань точок доступу для співвідношення користувачів 1:3

<b>Точки доступу</b>	<b>31.7</b>	<b>31.8</b>	<b>31.9</b>
<b>Модель точки доступу</b>	C9124AXD	C9124AXD	C9124AXD
<b>Номер каналу 2,4 GHz</b>	-	611	-

Ширина каналу (MHz)	-	20	-
Номер каналу 5 GHz	44	48	52
Ширина каналу (MHz)	20	20	20
Потужність (mW)	19.9526	19.9526	19.9526
Висота (m)	5	5	5
Кут нахилу (°)	-5	-5	-5

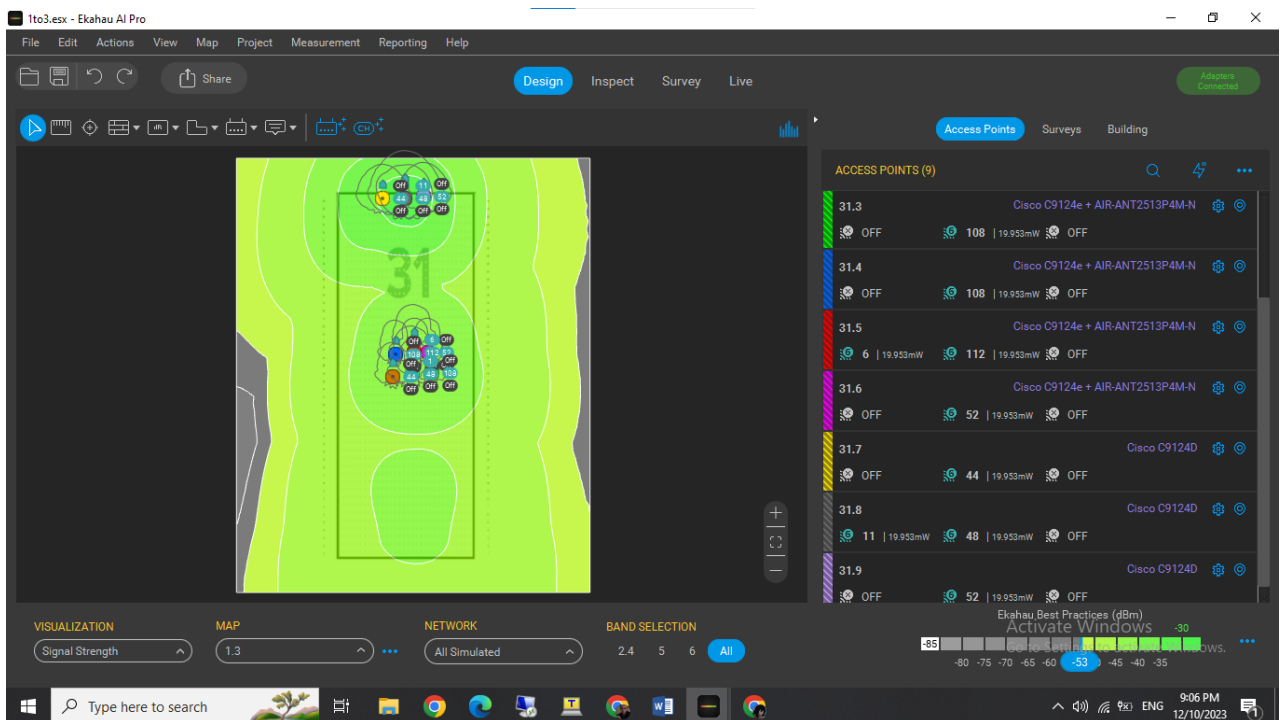


Рисунок 2.7. Розташування точок доступу і візуалізація зони покриття сигналом для співвідношення 1:3

Як видно із зображення, даний дизайн дозволяє покрити всю зону 31 сектора силою сигналу у діапазоні 2.4 ГГц від -53 dBm і вище, а у 5ГГц – від -57 dBm і вище (Рис. 2.8. і Рис. 2.9.).

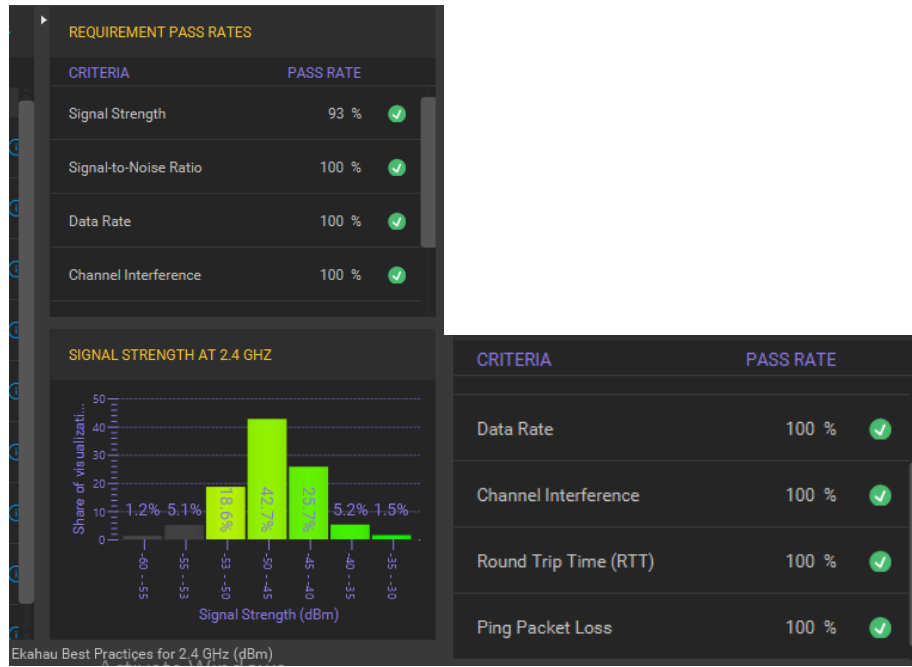


Рисунок 2.8. Вимоги прохідної оцінки для 4GHz каналу

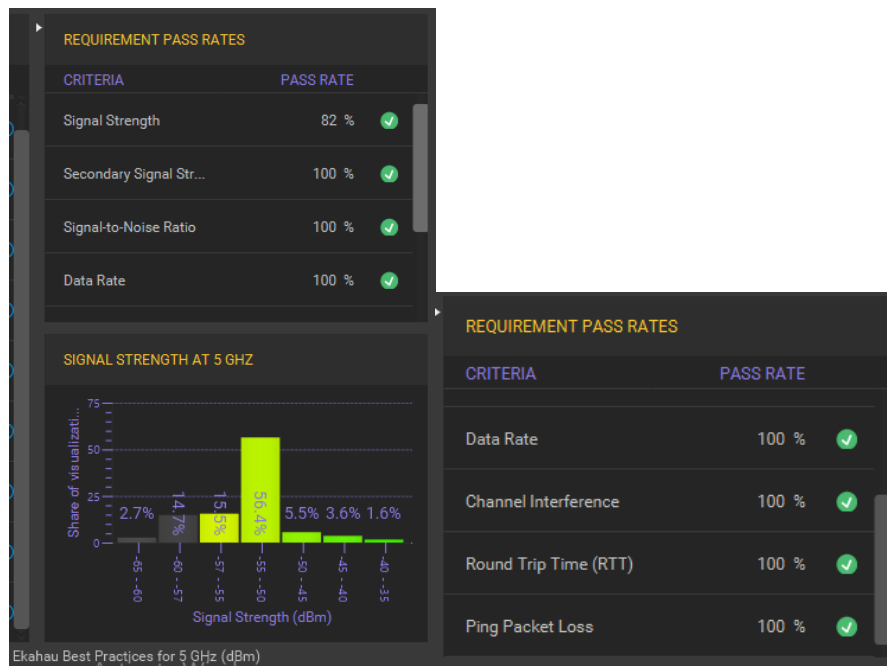


Рисунок 2.9. Вимоги прохідної оцінки для 5GHz каналу

### 3. ТРАФІКУВАННЯ

#### 3.1. Пропускна здатність мережі

Визначити пропускну здатність мережі можна за наступною формулою:

$$R_{net} = R_{user} \times U \times k_{act.user} \quad (3.1)$$

де:

- $R_{net}$  – це середня пікова data rate стадіону;
- $R_{user}$  – це середня data rate для одного користувача;
- $U$  – кількість користувачів;
- $k_{act.user}$  – коефіцієнт активних користувачів.

Відповідно до статистик, зібраних з різних стадіонів, коефіцієнт активних користувачів мережі Wi-Fi дорівнює:

$$k_{act.user} = 0.028014 \quad (3.2)$$

Середня швидкість data rate для одного користувача становить:

$$R_{user} = 5.83 \text{ Mbit/s}. \quad (3.3)$$

дана величина є статистичною і зібрана на основі не тільки стадіонів, але і інших місць користування Internet: аеропорти, заклади відпочинку, офісів та інш.

Це значення є середньою вижимкою, і не означає, що кожен користувач повинен використовувати такої швидкості (відповідно до Таблиці 2.1). Під цим розуміється, що коли ми маємо активного користувача, котрий повністю

використовує даний ресурс, то в цей же момент може бути інший користувач, котрий взагалі ним не користується.

Звідси випливає, що середня пікова data rate для стадіону дорівнює:

$$R_{net} \approx 5.83 \times 0.028014 \times 70000 = 11.433 \times 10^9 = 11.433 \text{ Gbit/s}$$

Згідно оцінок зібраних статистик з різних стадіонів: SoFi Каліфорнія, Raucor Огайо, St. Jakob-Park Швейцарія середня пікова пропускна здатність досягає 10.7Gbit/s. Відповідно до цих даних визначено що має вистачати каналу зв'язку  $R_{net} \approx 11.433 \text{ Gbit/s}$ . У разі виникнення потреби в розширенні мережі є можливість прокладення додаткової гігабітної лінії на вихід.

### 3.2. Розподіл трафіку

Одним із найефективніших підходів у побудові Wi-Fi рішень є розподіл трафіку. Під цим розуміється, поділ мережі на під мережі для ефективнішого використання і забезпечення безпеки.

У даному рішенні пропонується поділити мережу на основну і гостьову. До основної мережі буде підключено всі сервіси, що за забезпечують коректне функціонування стадіону НСК «Олімпійський». До них ми відносимо: сканери квитків, турнікети, камери відеоспостереження, термінали, датчики доступу до приміщень, серверна і інші. До гостьової мережі зможуть підключатися інші користувачі: звичайні та VIP відвідувачі, журналісти і так далі.

Також, потрібно зауважити, що не всі користувачі мають рівнозначний пріоритет для використання ресурсів мережі. Наприклад, основні сервіси потрібно обслуговувати в першу чергу, після чого можна перейти до глядацького трафіку. Тому у даному проекті пропоную використання тарифікування абонентів. Запропоновані пропускні здатності для тарифів наведені в Таблиці 3.1. і обрані відносно типів трафіку і потрібних дня них швидкостей:

Таблиця 3.1 Тарифна сітка для абонентів

	<b>Завантаження (Download)</b>	<b>Вивантаження (Upload)</b>
<b>Звичайний доступ</b>	3 Mbit/s	2 Mbit/s
<b>VIP доступ</b>	6 Mbit/s	5 Mbit/s
<b>Журналістський доступ</b>	15 Mbit/s	15 Mbit/s
<b>Журналістський доступ (для 4Квідео)</b>	30 Mbit/s	30 Mbit/s

Для тих користувачів, які бажає отримати вищі швидкості передачі даних для власного девайсу, буде можливість підвищити свій тариф за додаткову плату.

Для організування цього потрібно поділити нашу мережу не на 2 (основна та гостьова), а на 3 під мережі (основна, гостьова та VIP), що працюють на різних швидкостях, для того, щоб розрізняти трафік від різних тарифів. Тобто, користувачі будуть приєднуватися до гостьової мережі, а у разі підвищення свого тарифу, для отримання більших швидкостей передачі, їм би приходилося перепідключатися до іншої мережі. Так само це працювало б і іншу сторону, коли у користувача закінчувалися ресурси. Після чого трафік кожної мережі розподілявся відповідно до пріоритетів.

Розглянемо декілька варіантів, як організувати коректне використання ресурсів мережі.

### 3.2.1. QoS

Як говорилося раніше у п.2.4.9 QoS – якість обслуговування – це набір практик для керування мережевими ресурсами. Для мереж ще можливість впровадження різного ставлення до різного класу трафіку[27].

Основна діяльність QoS включає в себе наступні пункти:

#### - **Класифікація пакетів:**

Організація трафіку на основі співпадіння з певними критеріями. При надходженні пакету даних (більш коректно мабуть сказати фрейму, так як ми говоримо про 2 рівень моделі OSI), комутатор починає ідентифікувати всі ключові поля: CoS, DSCP, IP або MPLS EXP. Далі комутатор класифікує пакети на основі їхнього вмісту або на основі ACL.

Клас «class-default» використовується в політиці для позначення трафіку, що не відповідає жодному іншому класу в політиці

#### - **Політика пакетів**

Політика пакетів визначає, чи відповідає пакет профілю, порівнюючи швидкість вхідного трафіку з налаштованими політиками. Є можливість налаштувати обов'язкову швидкість інформації (CIR - committed information rate) та пікову швидкість інформації (PIR - peak information rate) і встановити дії, які виконуватимуться над пакетами, які відповідають CIR і PIR (conform-action), пакетів, які відповідають PIR, але не CIR (exceed-action), та пакетів, які перевищують значення PIR (violate-action).

#### - **Можливість переоцінки всіх пакетів, що належать до класифікації.**

При налаштуванні політик, пакети, що відповідають або перевищують дозволені вимоги до пропускну здатності (bit/s), можуть бути умовно пропущені, відкинуті або помічені.

#### - **Управління перенавантаженням**

В даному пункті використовується алгоритми черги та планування для чергування та сортування трафіку, що виходить з порту. Комутатор підтримує такі функції розкладування та обмеження трафіку: class-based weighted fair

queuing (CBWFQ), class-based traffic shaping, port shaping і class-based priority queuing. Завдяки цьому можна забезпечити гарантовану пропускну здатність для певного класу трафіку, при цьому обслуговуючи інші черги трафіку.

Коли обсяг трафіку перевищує той, який можна транспортувати через мережу, пристрої ставлять у чергу пакети у пам'ять, і тримають їх доки не з'являться ресурси для їх передачі. Це в свою чергу спричиняє затримку, оскільки нові пакети не можна буде передати, допоки попередні не пройдуть обробку. Якщо пам'ять буде заповнена повністю, всі інші пакети будуть відкидатися (дропатися).

### **1. Канальний**

Затримки розрізняю на декілька типів[28]: latency - час витрачений на проходження пакету в одну сторону; delay ( $2 * latency$ ) – час, потрібний для відправлення і повернення відповіді (може бути що в одну сторону він пройшов швидше в порівнянні із зворотнім напрямком); jitter – зміна delay та latency (чим менше дане значення, тим стабільніша мережа); фіксована затримка – час, що потрібний на певний процес (пр. час на розміщення біта на носії передавача); змінна затримка – є невизначеною по часу і залежить від обсягу трафіку, часу його обробки і інш..

Також розрізняють різні види трафіку: дані, голос, відео і інші. Наприклад голосовий трафік є передбачуваним і плавним, а також він дуже чутливий до затримок і відкидання пакетів. Тобто, якщо деякі пакети прийдуть пізніше, або дропнуться – то ми не зможемо коректно зібрати інформацію на пристрої і розібрати її (тоді вона стає не актуальною). З цього випливає, що трафіку з голосовими пакетами потрібно надати вищий пріоритет, в порівнянні з іншими видами. Якщо говорити про відео – то він є непередбачуваним, на послідовним і різким (тому що передаються дані тільки того в яких пікселях помінялася картинка. Тобто якщо людина не рухається, то дані зі змінами майже рівняються 0). У порівнянні з голосом стійкий до втрат і має більший обсяг даних на пакет. Дані – зазвичай пересилаються протоколом TCP, який не допускає втрати. Тобто

якщо якийсь пакет був втрачений, він буде повторно надісланий. Даний тип трафіку є менш чутливим до перепадів і затримок в порівнянні з голосом та відео. Для вирішення даного питання і була розроблена дана специфікація 802.1q і 802.1p.

Політика (policy) QoS активується при перевантаженні каналів. Постановка черги – це інструмент керуванням даного перенавантаженням, що може буферизувати, пріоритезувати, змінювати порядок передачі пакетів (за потреби).Є декілька алгоритмів організування даної черги:

- Хто перший прийшов, той перший пішов (FIFO – First-In, First-Out);
- Зважена справедлива черга (WFQ – Weight Fair Queuing);
- Зважена справедлива черга на основі класу (CBWFQ – Class-Based Weight Fair Queuing);
- Черга з низькою затримкою(LLQ - Low Latency Queuing).

Для функціонування QoS в маршрутизаторах реалізовані 8 черг на інтерфейсах. Є можливість описати трафік, який буде потрапляти в кожен чергу, та задати для неї відсоток від загальної пропускну здатності інтерфейсу. Обробка пакетів відбувається за принципами Weighted Fair Queueing (WFQ), що дозволяє надсилати дані понад задані обмеження при умові відсутності трафіку у інших чергах та забезпечувати задані пропорції при наявності конкурентного навантаження. Одна з черг Low-Latency Queue (LLQ) має пріоритет над іншими і пакети з неї обробляються і надсилаються спочатку.

Черги, передбачені в рамках дизайну рішення, наведені в Таблиці 3.2. Визначення приналежності мережевого трафіку відповідній черзі здійснюватиметься за допомогою правил на основі IP адресації, портів, протоколів, DSCP, додатків.

Таблиця 3.2. Черги QoS, передбачені в рамках дизайну рішення

<b>Черга</b>	<b>Опис</b>
Realtime	Високопріоритетна черга для даних реального часу, наприклад, голосового трафіку.

Default	Черга за замовчанням. Призначена для трафіку, що не був визначений до інших категорій.
Bulk Data	Черга для низькопріоритетного трафіку, наприклад, сервіси доставки оновлень.

Отже, не має сенсу у побудові тарифікації мережі на основі каналного QoS самій мережі Wi-Fi, оскільки Wi-Fi є середовищем з обмеженими ресурсами для паралельної передачі даних. Ефір у ньому один і коли один хтось у ньому передає то інші чекають. Тому важливо, щоб у мережі Wi-Fi усі користувачі могли як найшвидше, на максимальних своїх можливостях, передавати дані. Це пов'язано з тим, що для ефективного використання Wi-Fi слід зосередитися не над розподілом швидкості для окремих типів абонентів, а саме на ефективному розподілі часу (відносно фізики). І в такому випадку для обмеження трафіку, використовуюваного конкретним абонентом, доцільно впровадити окремі спеціальні сервери на виході із мережі, на яких буде проводитися тарифікація абонентів (Billing).

## 2. Billing система і обмеження

Billing - виставлення рахунків - це процес виставлення рахунків і збору платежів від клієнтів. Це важлива частина будь-якого бізнесу, яка гарантує, що компанії можуть покривати витрати та отримувати дохід.

ISP Billing - це рішення для керування рахунками для постачальників послуг Інтернету. ISP (Internet Service Providers) – інтернет провайдери – це компанії, котрі надають окремим особам і організаціям доступ до інтернету та пов'язаних із ними послуг.

Програмне забезпечення для ISP Billing – це спеціалізована система, котра допомагає постачальника послуг Інтернету спростити й автоматизувати складні процеси виставлення рахунків та керування обліковими записами клієнтів.

Основними перевагами використання програмного забезпечення для виставлення рахунків ISP включають: автоматичне виставлення рахунків, керування підписками, керування обліковими записами клієнтів, обмеження пропускнуої здатності, надання послуг, обробка платежів, а також звітність і аналітику. Також до цього можна додати легке масштабування.

Для вирішення проблеми з розподілом ресурсів мережі, а також для оплати наданих послуг обрано рішення від компанії Tridens technology [29]. Tridens Monetization — це перевірене найефективніше хмарне програмне забезпечення для виставлення рахунків у телекомунікаціях, енергетиці та комунальних послугах, медіа, та інших галузях. Даний сервіс ідеально підходить для підписок, виставлення рахунків за споживання або будь-якої гібридної бізнес-моделі зі складним ціноутворенням і виставленням рахунків.

Дане рішення дозволить організувати буферезацію трафіку на сервері, а не на самих AP, що дозволить економити ефірний час. Пр. передали якусь кількість даних і звільнили частотний ефір, а далі цей трафік буферезується на Billing сервері і відправляється з відповідною швидкістю відносно тарифного плану абонента.

### **3.2.2. Інфраструктура мережі**

Тож для спрощення процедури і уникнення зайвих перепідключань для користувачів, потрібно правильно побудувати інфраструктуру. На одній точці доступу (фізичному обладнанні) є можливість налаштування декількох віртуальних бездротових мереж, що будуть поділятися за певними технічними характеристиками: SSID - назва мережі, BSSID - технічна назва точки доступу, що обслуговує певну мережу. І при підключенні до мережі, клієнт бачить SSID мережі, як її клієнт, а підключається до точки по BSSID. І під однією SSID є декілька BSSID, між якими клієнт може вільно перепідключатися (мається на увазі не клієнт це робить, а сам пристрій коли бачить що RSSI одної AP кращий).

Тобто інфраструктура виглядає таким чином, багато точок доступу віщають одну мережу (SSID), а клієнт приєднується до однієї і тієї ж бездротової мережі але до різних фізичних AP. Але це не забороняє мати на одній точці доступу мати декілька BSSID, котрі будуть обслуговувати декілька SSID. Тому не потрібно технічно розділяти обладнання. Обладнання ставити для покриття, а кількість бездротових мереж які вони обробляють налаштувати програмно.

### **3.3. Відмовостійкість і масштабування мережі**

Для досягнення надійності, безперебійності, високої доступності та масштабованості мережі з високою щільністю клієнтів в дизайні передбачається ряд заходів для забезпечення даних критеріїв, а саме:

- Дублювання компонентів, додаткові-резервні або додаткові-розгужуючі мережеві пристрої.
- Наявність декількох шлюзів для виходу в WAN Internet і балансування трафіку між ними.
- Передбачається можливість додавання додаткових пристроїв для збільшення пропускної спроможності вузла.
- Передбачається підключення до двох WAN провайдерів та реалізовувати механізми детектування доступності та якості каналів зв'язку засобами протоколу Bidirectional Forwarding Detection (BFD).
- Живлення, для ключових маршрутизаторів рекомендується підведення окремих ліній живлення.
- Резервне копіювання конфігурацій пристроїв

До всього цього, слід ще додати документування мережі, для швидкого знайдення і вирішення проблем збоїв у роботі мережі.

## ВИСНОВОК

В процесі виконання роботи було проведено дослідження технологій для побудови мережі високої щільності клієнтів.

В рамках проведення дослідження було виконано:

- Окреслено проблематику у побудові Wi-Fi рішення для зон з високою щільністю клієнтів та засоби щодо їх вирішення.
- Проведено симуляцію Wi-Fi дизайну у ПЗ Ekahau Surve і визначено що даний дизайн дозволяє забезпечити хороше покриття для сектору №31 у межах -55 – -61 dBm для співвідношення активних користувачів 1:10, та -53 – -57 dBm – 1:3.
- Визначено пропускну здатність мережі для стадіону НСК «Олімпійський». Вона становить  $R_{net} \approx 11.433 \text{ Gbit/s}$ .
- Запропоновано рішення тарифікування мережі на основі Billing системи, а саме встановлення додаткових серверів на виході із мережі та використання ПЗ Tridens Monetization для виставлення платежів та керування трафіку.
- Запропоновано способи ділення мережі відносно потреб.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

[1] IEEE 802.11, Standard 2012, Part 1 1: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, IEEE-SA Standard Board (2012).

[2] 'Access Point and its Types'

URL: <https://www.pynetlabs.com/access-point-and-its-types/>

[3] Cisco ME 3800X and ME 3600X and ME 3600X-24CX Switch Software Configuration Guide Chapter 10

URL: [https://www.cisco.com/en/US/docs/switches/metro/me3600x\\_3800x/software/release/15.2\\_2\\_S/configuration/guide/swint.pdf](https://www.cisco.com/en/US/docs/switches/metro/me3600x_3800x/software/release/15.2_2_S/configuration/guide/swint.pdf)

[4] Leonidas Georgiadis, "Carrier-Sense Multiple Access (CSMA) Protocols", Wiley Encyclopedia of Telecommunications, vol.1, 2003.

URL: [https://pce-fet.com/common/library/books/51/3757\\_JohnG.Proakis-WileyEncyclopediaofTelecommunications\\_Full\(2003\).pdf](https://pce-fet.com/common/library/books/51/3757_JohnG.Proakis-WileyEncyclopediaofTelecommunications_Full(2003).pdf)

[5] Yuhao Ren, Yan Pan, Fabing Duan, SNR gain enhancement in a generalized matched filter using artificial optimal noise, Chaos, Solitons & Fractals, Volume 155, 2022, 111741, ISSN 0960-0779,

URL: <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2021.111741>

[6] "IEEE Standard for Information Technology--Telecommunications and Information Exchange between Systems - Local and Metropolitan Area Networks--Specific Requirements" in IEEE Std 802.11-2020 (Revision of IEEE Std 802.11-2016) - Redline, vol., no., pp.1-7524, 26 Feb. 2021.

[7] Michael Rademacher, Prof. Dr. Karl Jonas, Markus Kessel ` An Empirical Evaluation of the Received Signal Strength Indicator for fixed outdoor 802.11 links`

URL: <https://d-nb.info/1203379536/34>

[8] Oscar Belmonte-Fernández, ‘Modeling the Received Signal Strength Intensity of Wi-Fi signal using Hidden Markov Models’, March 2, 2021

URL:

<https://repositori.uji.es/xmlui/bitstream/handle/10234/192860/74527.pdf;jsessionid=FA76154E232C27D36EEE1EC4401BF6D8?sequence=1>

[9] S. Xie, X. Zhu and J. Shen, ‘Method and system for automatically adapting to Wi-Fi network with hidden SSID,’ US Patent 10,117,169, 2018

[10] A.S. Tanenbaum, D.J. Wetheral ‘Computer Networks’ - The Physical Layer CHAP. 2 - 5th edition

URL: <https://www.cs.csubak.edu/~jyang/Computer-Networks---A-Tanenbaum---5th-edition.pdf>

[11] Intel Documentation ‘Product Information & Documentation’, 2021.

URL: [https://www.intel.com/content/www/us/en/support/articles/000005714/wireless/legacy-intel-wireless-products.html#:~:text=Multiple%20Input%20Multiple%20Output%20\(,than%20products%20without%20802.11n.](https://www.intel.com/content/www/us/en/support/articles/000005714/wireless/legacy-intel-wireless-products.html#:~:text=Multiple%20Input%20Multiple%20Output%20(,than%20products%20without%20802.11n.)

[12] E. G. Larsson, O. Edfors, F. Tufvesson, and T. L. Marzetta, ‘Massive MIMO for next generation wireless systems,’ IEEE Commun. Magazine, February 2014.

URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6736761>

[13] B.Sathish kumar, K.R.Shankar Kumar, R.Radhakrishnan, ‘An efficient inter carrier interference cancellation schemes for OFDM systems’, IJCSIS 2009.

URL: <https://arxiv.org/pdf/1001.2250>

[14] ‘IEEE Standard for Information Technology--Telecommunications and Information Exchange between Systems - Local and Metropolitan Area Networks--Specific Requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and

Physical Layer (PHY) Specifications - Redline," in IEEE Std 802.11-2020 (Revision of IEEE Std 802.11-2016) - Redline, vol., no., pp.1-7524, 26 Feb. 2021.

[15] Danyang Chen, Xue Zhang, Kai Fan, Jianping Wang, Huimin Lu, Qingxuan Wang, Shuai Wu, Rui Hao, Zhao Li, Jianli Jin, Experimental demonstration of a hybrid OFDMA/NOMA scheme for multi-user underwater wireless optical communication systems, *Optics Communications*, Volume 548, 2023, 129823, ISSN 0030-4018,

URL: <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2023.129823>.

[16] Edward J. Oughton, William Lehr, Konstantinos Katsaros, Ioannis Selinis, Dean Bublely, Julius Kusuma, Revisiting Wireless Internet Connectivity: 5G vs Wi-Fi 6, *Telecommunications Policy*, Volume 45, 2021, 102127, ISSN 0308-5961,

URL: <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2021.102127>.

[17] Edward Oughton, Giovanni Geraci, Michele Polese, Vijay Shah, Dean Bublely, Scott Blue, Reviewing wireless broadband technologies in the peak smartphone era: 6G versus Wi-Fi 7 and 8, *Telecommunications Policy*, 2024, 102766, ISSN 0308-5961,

URL: <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2024.102766>.

[18] Tafheem Ahmad Wani, Antonette Mendoza, Kathleen Gray, Frank Smolenaers, Status of bring-your-own-device (BYOD) security practices in Australian hospitals – A national survey, *Health Policy and Technology*, Volume 11, Issue 3, 2022, 100627, ISSN 2211-8837,

URL: <https://doi.org/10.1016/j.hlpt.2022.100627>.

[19] Suzan Bayhan, Piotr Gawłowicz, Anatolij Zubow, Adam Wolisz, Null-While-Talk: Interference nulling for improved inter-technology coexistence in LTE-U and WiFi networks, *Pervasive and Mobile Computing*, Volume 56, 2019, Pages 71-87, ISSN 1574-1192,

URL: <https://doi.org/10.1016/j.pmcj.2019.04.002>.

[20] Нормативний документ ДСТУ 3254-95 РАДІОЗВ'ЯЗОК

URL: [https://www.ksv.biz.ua/GOST/DSTY\\_ALL/DSTY2/dsty\\_4213-2003.pdf](https://www.ksv.biz.ua/GOST/DSTY_ALL/DSTY2/dsty_4213-2003.pdf)

[21] Cisco Systems, `Wi-Fi 6E: The Next Great Chapter in Wi-Fi White Paper`

URL: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/enterprise-networks/802-11ax-solution/nb-06-wi-fi-6e-wp-cte-en.html>

[22] Broadband Speed Guide

URL: [https://www.fcc.gov/sites/default/files/broadband\\_speed\\_guide.pdf](https://www.fcc.gov/sites/default/files/broadband_speed_guide.pdf)

[23] Cisco Catalyst 9124AX Series Access Points Data Sheet

URL: <https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/wireless/catalyst-9100ax-access-points/nb-06-cat9124-ser-ap-ds-cte-en.html>

URL: [https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/wireless/access\\_point/9124ax/install-guide/b-hig-9124ax/overview.html](https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/wireless/access_point/9124ax/install-guide/b-hig-9124ax/overview.html)

[24] Cisco Aironet Four-Port Dual-Band Polarization-Diverse Array Antenna AIR-ANT2513P4M-N

URL: <https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/wireless/antenna/installation/guide/ant2513p4mn.html>

URL: <https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/routers/connectedgrid/antennas/installing-combined/b-cisco-industrial-routers-and-industrial-wireless-access-points-antenna-guide/m-air-ant2513p4m-n.html>

[25] Cisco ME 3800X and ME 3600X and ME 3600X-24CX Switch Software Configuration Guide Chapter 33

URL: [https://www.cisco.com/en/US/docs/switches/metro/me3600x\\_3800x/trash/swqos.pdf](https://www.cisco.com/en/US/docs/switches/metro/me3600x_3800x/trash/swqos.pdf)

[26] Ekahau Survey - Most Accurate Wi-Fi Site Survey App

URL: <https://www.ekahau.com/products/ekahau-connect/survey/>

[27] Z. M. Fadlullah, B. Mao and N. Kato, "Balancing QoS and Security in the Edge: Existing Practices, Challenges, and 6G Opportunities With Machine Learning," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 24, no. 4, pp. 2419-2448, Fourthquarter 2022, doi: 10.1109/COMST.2022.3191697.

[28] Miguel García-Torres, Diego P. Pinto-Roa, Carlos Núñez-Castillo, Brenda Quiñonez, Gabriela Vázquez, Mauricio Allegretti, María E. García-Díaz, Feature selection applied to QoS/QoE modeling on video and web-based mobile data services: An ordinal approach, *Computer Communications*, Volume 217, 2024, Pages 230-245, ISSN 0140-3664,

URL: <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2024.02.004>.

[29] Tridens technology

URL: <https://tridenstechnology.com/monetization/>