

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПРАТ «ПВНЗ «ЗАПОРІЗЬКИЙ ІНСТИТУТ ЕКОНОМІКИ
ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ»

Кафедра інформаційних технологій

ДО ЗАХИСТУ ДОПУЩЕНА

Зав.кафеди _____

д.е.н., доц. С.І. Левицький

МАГІСТЕРСЬКА ДИПЛОМНА РОБОТА
ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК
МЕРЕЖ СТАНДАРТУ IEEE 802.11ax

Виконав
ст. гр. КІ-111М

В.С. Зінченко

Керівник
професор

С.О. Сабанов

Запоріжжя

2023

ПРАТ «ПВНЗ «ЗАПОРІЗЬКИЙ ІНСТИТУТ ЕКОНОМІКИ
ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ»

Кафедра інформаційних технологій

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри

д.е.н., доцент Левицький С.І.

03.10.2022 р.

З А В Д А Н Н Я

НА МАГІСТЕРСЬКУ ДИПЛОМНУ РОБОТУ

студента гр.КІ-111М, спеціальності 123 - «Комп'ютерна інженерія»

Зінченка Владислава Сергійовича

1. Тема: «Дослідження експлуатаційних характеристик мереж стандарту IEEE 802.11ax»

затверджена наказом по інституту № 02-16 від 03.10.2022 р.

2. Термін здачі студентом закінченої роботи: 12.01.2023 р.

3. Перелік питань, що підлягають розробці:

1. Провести огляд предметної області, ознайомитися з літературою та інтернет-джерелами, що присвячені тематиці роботи.

2. Розглянути технічні нововведення стандарту IEEE 802.11ax та виконати його порівняння з стандартом IEEE 802.11ac

3. Виділити основні проблеми мереж Wi-Fi із високою щільністю.

4. Провести огляд програмно-апаратного забезпечення, що дозволить виконати дослідження характеристик мережі

5. Виконати моделювання з отриманням розрахункових характеристик.

6. Виконати експериментальні виміри характеристик на реальному обладнанні.

7. Порівняти розрахункові та фактичні характеристики. Проаналізувати отримані результати

8. Оформити звіт за результатами роботи

4. Календарний графік підготовки магістерської дипломної роботи

№ етапу	Зміст	Терміни виконання	Готовність по графіку %, підпис керівника	Підпис керівника про повну готовність етапу, дата
1	Формулювання (корегування) теми магістерської дипломної роботи, збір практичного матеріалу за темою магістерської дипломної роботи	20.10.22		
2	I атестація I розділ магістерської дипломної роботи	27.10.22		
3	II атестація II розділ магістерської дипломної роботи	17.11.22		
4	III атестація III розділ магістерської дипломної роботи, висновки та рекомендації, додатки, реферат, перевірка програмою «Антиплагіат»	29.12.22		
5	Доопрацювання роботи, підготовка презентації, отримання відгуку керівника і рецензії	10.01.23		
6	Попередній захист магістерської дипломної роботи	13.01.23		
7	Подача магістерської дипломної роботи на кафедру	за 3 дні до захисту		
8	Захист магістерської дипломної роботи	20.01.23		

Дата видачі завдання: 03.10.2022 р.

Керівник магістерської роботи

(підпис)

С.О. Сабанов

(прізвище та ініціали)

Завдання отримав до виконання

(підпис студента)

В.С. Зінченко

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Магістерська робота містить: 128 сторінок, 90 рисунків, 7 таблиць, 50 першоджерел та 2 додатки.

Об'єктом дослідження є мережі передачі даних стандарту IEEE 802.11ax.

Предметом дослідження є експлуатаційні характеристики мереж 802.11ax в умовах високої щільності розгортання.

Метою роботи є аналіз експлуатаційних характеристик мереж стандарту IEEE 802.11ax в умовах високої щільності розгортання, вплив цих характеристик на ефективність застосування стандарту в побудові бездротових сегментів.

У роботі докладно наведено методику моделювання тестових мереж та отримання показників ефективності експлуатаційних характеристик бездротових сегментів LAN.

Порівняння нового стандарту з фізично аналогічним стандартом IEEE 802.11ac проведено шляхом моделювання мережевих структур у спеціалізованому програмному забезпеченні та проведенням експериментальних досліджень, що дає можливість порівняння фактичних експлуатаційних характеристик мереж із розрахунковими.

ЕКАНАУ AI PRO, IEEE 802.11AC, IEEE 802.11AX, IPERF, LAN, WI-FI,
WLAN, ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ БЕЗДРОТОВИХ МЕРЕЖ,
БЕЗДРОТОВІ МЕРЕЖІ ВИСОКОЇ ЩІЛЬНОСТІ

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	7
ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОБЛЕМ МЕРЕЖ WI-FI З ВИСОКОЮ ЩІЛЬНІСТЮ	13
1.1 Проблеми мереж Wi-Fi із високою щільністю	13
1.2 Методи проектування мереж Wi-Fi з високою щільністю.....	17
1.2.1 Радіообстеження місцевості розгортання.....	18
1.2.2 Проектування мереж із зменшенням домену колізій	21
1.3 Поширені стандарти IEEE 802.11	24
1.4 Висновки за першим розділом	25
РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕРЕЖ.....	28
2.1 Вимоги та типові сценарії застосування IEEE 802.11ax	28
2.1.1 Офісні корпоративні мережі.....	29
2.1.2 Майданчики масових заходів.....	29
2.1.3 Великі хот-споти.....	30
2.1.4 Багатоквартирні будинки щільної забудови.....	30
2.2 Нововведення стандарту IEEE 802.11ax	33
2.2.1 OFDMA.....	35
2.2.1.1 Підносійні.....	38
2.2.1.2 Ресурсні одиниці (Resource Units).....	40
2.2.2 Вдосконалене об'єднання каналів (Channel Bonding)	42
2.2.3 Оновлена структура фрейму (HE-PPDU).....	45
2.2.3.1 Формат HE SU PPDU.....	45
2.2.3.2 Формат HE MU PPDU.....	46
2.2.3.3 Формат HE TB PPDU.....	46
2.2.3.4 Формат HE ER SU PPDU.....	47
2.2.4 Вищі модуляційно-кодові схеми	48
2.2.5 Механізми повторного використання спектру.....	52
2.2.6 MU-MIMO	55
2.2.7 TWT	57
2.3 Огляд програмного та апаратного комплексу для дослідження	59
2.3.1 EkaHau AI Pro	60
2.3.2 iPerf.....	61
2.3.3 Cisco Catalyst 9115AXI	62
2.3.4 Acer Aspire 5 A515	64
2.4 Моделювання та отримання розрахункових характеристик.....	65

2.5	Отримання експериментальних характеристик	79
2.6	Висновки за другим розділом	84
РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕРЕЖ		85
3.1	Порівняння розрахункових та фактичних характеристик мереж.....	85
3.1.1	Розрахунковий та фактичний RSSI.....	85
3.1.2	Розрахункова та фактична пропускна здатність.....	86
3.2	Порівняння характеристик в умовах єдиної мережі.....	88
3.2.1	Залежність пропускної здатності від відстані	89
3.2.2	Пропускна здатність для єдиного клієнта	91
3.2.3	Вплив збільшення кількості активних клієнтів	92
3.2.4	Розподілення експлуатаційних характеристик для 42 клієнтів...	101
3.3	Порівняння характеристик мереж в умовах суміжних мереж.....	104
3.3.1	Пропускна здатність для єдиного клієнта та суміжних мереж	104
3.3.2	Вплив інтерференції від неактивної суміжної мережі	105
3.3.3	Вплив збільшення кількості клієнтів в умовах суміжних мереж...	107
3.3.4	Розподілення експлуатаційних характеристик для групи із 42 клієнтів у 2 групах	116
3.4	Висновки за третім розділом	120
ВИСНОВКИ.....		121
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....		122
ДОДАТКИ.....		128

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

Слово / словосполучення	Скорочення	Умови використання
A		
Access Point	AP	
B		
Basic Service Set	BSS	
Basic Service Set Identifier	BSSID	
D		
Dual Carrier Modulation	DCM	
Download	DL	
H		
High Efficiency	HE	
I		
The Institute of Electrical and Electronics Engineers	IEEE	
L		
Local Area Network	LAN	
M		
Media Access Level	MAC	
Modulation Coding Scheme	MCS	
Multi In Multi Out	MIMO	
Multiple User	MU	
O		
Overlapping Basic Service Set	OBSS	
Orthogonal frequency-division multiplexing	OFDM	
Orthogonal Frequency-Division Multiple Access	OFDMA	
P		
Peak to average power ratio	PAPR	
Protocol Data Unit	PDU	

Слово / словосполучення	Скорочення	Умови використання
Physical	PHY	
Power Saving	PS	
Q		
Quadrature Amplitude Modulation	QAM	
Quality of Service	QoS	
R		
Received Signal Strength Indicator	RSSI	
S		
Signal Interference + Noise Ratio	SINR	
Signal-to-noise ratio	SNR	
Service Period	SP	
Solid State Drive	SSD	
Station	STA	
Single User	SU	
T		
Target Wake Time	TWT	
U		
Upload	UL	
З		
Затримка	З, з-ка	У таблицях
М		
Мегабайт	МБ	
Мегагерц	МГц	
П		
Пропускна Здатність	ПЗ	У таблицях
Т		
Точка Доступу	ТД	

ВСТУП

У наші дні бездротові мережі дуже поширені і з кожним днем вони стають все більш популярними та затребуваними. Постійно збільшується кількість пристроїв, що мають можливість або потребують обов'язкового підключення до мережі. Клієнтами таких мереж стають не тільки портативні пристрої, наприклад: смартфони, ноутбуки, смарт-годинники та браслети тощо, а й стаціонарні – все більше настільних комп'ютерів, оргтехніки, елементів розумного будинку та мультимедіа-пристроїв підключаються до мережі через бездротові канали зв'язку.

Серед великої кількості різноманітних бездротових мереж для побудови LAN використовують переважно Wi-Fi. Постійне збільшення кількості клієнтів вимагає й збільшення кількості самих мереж, що призводить до проблеми великої завантаженості діапазону частот, де працюють такі мережі, і спричиняє проблеми швидкості їх роботи та стабільності. Роботи по вирішенню проблем традиційних Wi-Fi мереж в сучасних реаліях призвели до необхідності виділення окремої категорії – бездротових локальних мереж високої щільності. Стандарт IEEE 802.11ax, розроблений у першу чергу саме з метою поліпшення стабільності роботи за умов великої щільності розгортання мереж шляхом оптимізації використання спектру частот, проте розробникам вдалося збільшити й теоретично можливу максимальну швидкість передачі даних. Таким чином, дослідження експлуатаційних характеристик мереж Wi-Fi, побудованих за сучасною редакцією, та порівняння їх із попереднім стандартом 802.11ac є актуальним напрямом роботи.

Існує досить велика кількість досліджень експлуатаційних характеристик мереж стандарту IEEE 802.11ax, проте в основу більшості із них покладено метод моделювання та розрахунків. Шляхом моделювання неможливо отримати абсолютно точні значення експлуатаційних

характеристик через неможливість точного відтворення фізичних властивостей середовища розгортання та відсутності відкритої інформації щодо алгоритмів роботи тих чи інших механізмів у обладнанні, яке виробники поставляють на ринок. Дослідження із використанням експериментального методу, як і методу моделювання, націлені на визначення характеристик в умовах низької щільності розгортання та визначення максимальних значень пропускної здатності мережі із застосуванням єдиного клієнтського пристрою. Досліджень, що використовують експериментальний метод для визначення експлуатаційних характеристик мереж стандарту IEEE 802.11ax в умовах високої щільності розгортання під час пошуку інформації знайдено не було.

Отже, наукову новизну роботи складають: отримані експериментальним шляхом значення експлуатаційних характеристик мереж стандарту IEEE 802.11ax в умовах високої щільності розгортання; порівняння їх із характеристиками фізично аналогічних мереж IEEE 802.11ac; визначення дійсної ефективності застосування стандарту IEEE 802.11ax в умовах високої кількості одночасно працюючого WiFi-обладнання.

Метою роботи є аналіз експлуатаційних характеристик мереж стандарту IEEE 802.11ax та порівняння їх з аналогами, що базуються на стандарті IEEE 802.11ac шляхом моделювання таких мереж у спеціалізованому програмному середовищі та проведення експериментальних досліджень.

Для досягнення мети роботи поставлено такі задачі дослідження:

- аналіз методів та технологій стандарту IEEE 802.11ax, порівняння їх із IEEE 802.11ac;
- вивчення особливостей проектування та моделювання мереж за стандартами IEEE 802.11ax та IEEE 802.11ac;
- отримання експлуатаційних характеристик мереж;
- порівняння отриманих експлуатаційних характеристик;
- визначення ефективності застосування стандарту IEEE 802.11ax у порівнянні із IEEE 802.11ac.

Для досягнення поставленої мети та виконання завдань було застосовано методи: моделювання, експерименту та порівняння.

Об'єктом дослідження є мережі стандарту IEEE 802.11ax.

Предметом дослідження є експлуатаційні характеристики мереж сімейства IEEE 802.11ax в умовах високої щільності розгортання.

Об'єкту та предмету дослідження були присвячені роботи та публікації авторів Vikulov A., Paramonov A [6], M. Kamel, W. Hamouda, and A. Youssef [17], B. Li, Q. Qu, Z. Yan, and M. Yang [25] та E. Khorov, A. Kiryanov, A. Lyakhov, and G. Bianchi [27].

Структура кваліфікаційної роботи містить у собі вступ, в якому описується предмет та конкретизується об'єкт дослідження й описуються комплексні задачі та мета роботи. В першому розділі описуються та досліджуються проблеми традиційних бездротових локальних мереж високої щільності та традиційні методи їх вирішення. У другому розділі детально розглядаються зміни та нововведення об'єкту дослідження – стандарту IEEE 802.11ax, проводиться моделювання та отримання розрахункових експлуатаційних характеристик тестових мереж із високою щільністю, проводиться експериментальне дослідження експлуатаційних характеристик таких мереж. У третьому розділі порівнюються та аналізуються отримані експлуатаційні характеристики, визначається ефективність застосування стандарту IEEE 802.11ax у порівнянні із IEEE 802.11ac в умовах високої щільності.

Практичне значення одержаних результатів роботи полягає в можливості виявлення ступеню ефективності та доцільність використання стандарту IEEE 802.11ax для побудови Wireless Fidelity-мереж в умовах їх щільного розгортання шляхом оцінки експлуатаційних характеристик таких систем передачі даних. Ці результати можуть бути використані для вибору оптимального рішення в процесі модернізації вже існуючих мереж та розгортання нових.

Апробація. Основні положення магістерської роботи доповідалися на XXIV науковій конференції в Запорізькому інституті економіки та інформаційних технологій в рамках секції «Інформаційні технології» та були опубліковані у збірнику тез конференції.

РОЗДІЛ 1

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОБЛЕМ МЕРЕЖ WI-FI З ВИСОКОЮ ЩІЛЬНІСТЮ

1.1 Проблеми мереж Wi-Fi із високою щільністю

За останні два десятиліття кількість пристроїв, що працюють у бездротових локальних мережах стала справді величезною. І з кожним днем кількість таких пристроїв стрімко зростає. Використання бездротових локальних мереж для людей по всьому світу стало настільки звичним, що ми не можемо уявити своє життя без такої речі як Wi-Fi.

Wi-Fi (від Wireless-Fidelity) – торгова марка об'єднання Wi-Fi Alliance, під назвою якої поширюються бездротові локальні мережі, побудовані відповідно до стеку стандартів IEEE 802.11.

Базовий стандарт стеку було представлено понад два десятиліття тому [1] і він продовжує активно розвиватися. Однак, давно придумані принципи взаємодії пристроїв Wi-Fi у робочому середовищі тривалий час залишалися незмінними [2].

Через постійне збільшення кількості пристроїв сформувалося таке поняття, як бездротові локальні мережі високої щільності. Під цим поняттям зазвичай мають на увазі мережі, в яких щільність клієнтів на квадратний метр площі перевищує значення в одиницю [3]. Тобто, під мережами Wi-Fi високої щільності розуміються бездротові середовища з високою концентрацією активних користувачів. Це можуть бути, наприклад, мережі великих навчальних аудиторій, конференц-залів, торгових майданчиків, стадіонів тощо [4]. Окрім того, мережами з високою щільністю також можуть бути й такі, що розгорнуто серед великої кількості навколишніх суміжних мереж чи зон обслуговування, які перетинають зону покриття один одного.

У подібних ситуаціях часто виникають додаткові проблеми у вигляді інших мереж, розгорнутих в зоні покриття тої, що розглядається, клієнтів інших мереж, зона поширення сигналу яких потрапляє в покриття мережі, а також інші джерела сигналів в використовуваних діапазонах частот. У такому випадку навіть добре спроектована мережа Wi-Fi на базі традиційних стандартів IEEE 802.11, що забезпечує хороший рівень сигналу покриття і співвідношення сигнал/шум не може забезпечити достатню продуктивність через нестачу робочого середовища. Головним обмежуючим чинником є час заняття середовища передачі, оскільки воно не обмежене і є спільним для всіх клієнтів і точок доступу, які змушені ділити його між собою. Такий обмежуючий фактор також виходить із основного механізму розподілу доступу до середовища CSMA/CA – багатостанційний доступ з контролем несучої та запобіганням колізій, результатом застосування якого є принцип: «Поки транслює один – інші слухають». Такий механізм не є найоптимальнішим з погляду досягнення максимально можливих швидкостей передачі, але саме завдяки йому мережі Wi-Fi працюють у міру своїх можливостей навіть там, де, здавалося б, середовище зайняте максимально, а мережа спланована зовсім неправильно.

CSMA/CA – мережевий протокол каналного (MAC) рівня, у якому вузли намагаються уникнути колізій. Загальний алгоритм роботи представлено на рис. 1.1:

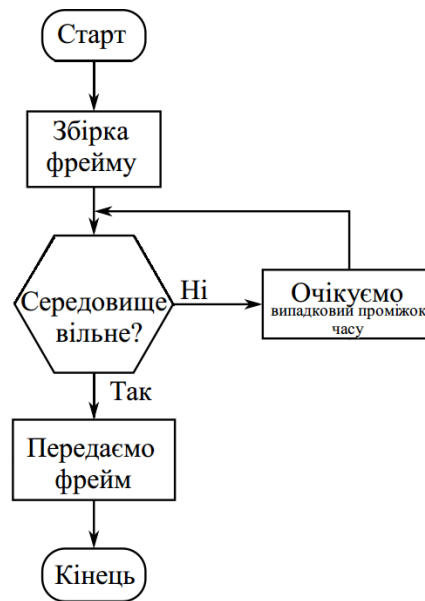


Рис. 1.1 – Загальний алгоритм роботи CSMA/CA

Однак, даний алгоритм схильний до проблем так званого прихованого вузла (рис. 1.2), коли вузол може взаємодіяти з точкою доступу, але не може безпосередньо взаємодіяти з іншими вузлами [5], і незахищеного вузла (рис. 1.3), коли вузол помилково вважає, що не може здійснювати передачу через активність сусіднього передавача [6].

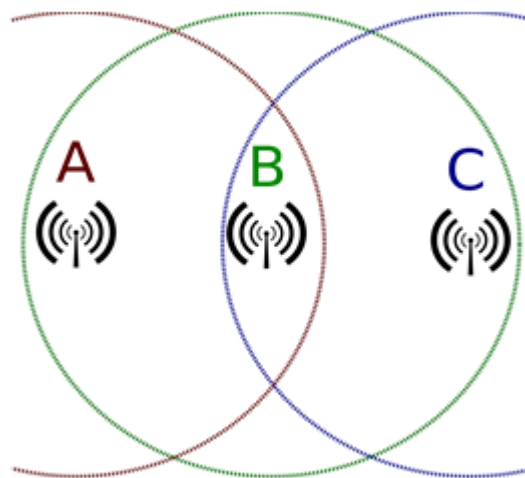


Рис. 1.2 – Проблема прихованого вузла

На прикладі, зображеному на малюнку 1.2, вузли А і С є прихованими один для одного. Станції А і С можуть взаємодіяти зі станцією В. Однак, вони не можуть взаємодіяти між собою у зв'язку з відмінностями в потужності передавачів та чутливості приймачів, а також з відстанню щодо один одного – зони покриттів. Це призведе до того, що станції А і С можуть почати передачі до станції В одночасно і вона не зможе почути їх передачу. В результаті, відбудеться колізія та пошкодження даних.



Рис. 1.3 – Проблема незахищеного вузла

На прикладі, зображеному малюнку 1.3, вузол S2 є незахищеним. Вузли-приймачі R1 і R2 знаходяться поза зоною покриття один одного, а зони покриття вузлів-передавачів S1 та S2 перетинаються. У цій ситуації відбувається передача від S1 до R1, а вузол S2 помилково вважає неможливою передачу до R2 так як середовище зайняте S1 і це призведе до колізії. Однак, R2 може отримати передачу S2 без виклику явища інтерференції (об'єднання хвиль при їх складанні з результатом зміни амплітуди), тому що знаходиться поза зоною покриття S1.

Для вирішення цих проблем у традиційних мережах IEEE 802.11 може бути використаний протокол запиту дозволу на надсилання RTS/CTS (Request To Send / Clear To Send) [7].

Використовуючи протокол RTS/CTS, станція, яка хоче зайняти середовище, замість передачі кадру даних спочатку має надіслати станції призначення короткий службовий кадр RTS – запит на передачу. На запит станція призначення повинна відповісти службовим повідомленням CTS – вільна для передачі, після чого відправник може передати кадр даних. Кадр CTS повинен повідомити про зайнятість середовища тим станціям, що знаходяться поза зоною покриття станції-відправника, але в зоні досяжності станції-одержувача, тобто є прихованими терміналами станції-відправника. Після здійснення передачі даних станція очікує кадр підтвердження АСК (від англ. Acknowledgement) про отримання даних, який є, свого роду, підтвердженням того, що пакет був коректно переданий. Якщо станція не отримує АСК протягом певного інтервалу часу, то пакет вважається загубленим в результаті колізії. Після цього станція збільшує період відстрочки та повторно намагається передати свій пакет.

Протокол добре підходить для рівноправного поділу каналу серед усіх учасників у загальній зоні покриття, проте, зі збільшенням кількості пристроїв у мережі, відбувається також збільшення кількості службових кадрів, а час очікування для отримання доступу нелінійно збільшується [8].

1.2 Методи проектування мереж Wi-Fi з високою щільністю

Важливою частиною розгортання мереж Wi-Fi є планування та проектування. Зважаючи на особливості технології, щоб забезпечити високі швидкості передачі, низькі затримки та високу стабільність з'єднання, слід враховувати наявність, у зоні необхідного покриття, інших мереж,

передбачувану кількість активних пристроїв, планування та особливості будівлі тощо. Традиційні мережі IEEE 802.11 не мають реалізованих механізмів ефективного розподілу ресурсів радіочастотного спектру для сценаріїв із великою кількістю клієнтів, наприклад, у традиційних стандартах стеку увесь обраний канал може використовуватися лише для обміну із єдиним клієнтом, тобто у режимі монопольного доступу. Також, традиційні мережі IEEE 802.11 суворо дотримуються правила активності лише одного пристрою у межах покриття. Тобто, такі мережі не мають механізмів, що дозволяють їм використовувати середовище одночасно із іншою зоною обслуговування, покритті яких накладаються, за виконання умов, що виключають ймовірність пошкодження трансляції іншої зони.

Виходячи із цього, традиційні мережі IEEE 802.11 непристосовані до умов високої щільності розгортання та вимагають застосування особливих методів проектування для забезпечення їх оптимальної працездатності у таких умовах, основні із яких розглянуто далі.

1.2.1 Радіообстеження місцевості розгортання

Радіообстеження є важливою частиною як етапу планування, так і самого проектування. Воно проводиться для збирання емпіричних даних про радіочастотний діапазон конкретного об'єкта. Головною перевагою проведення радіообстеження перед традиційним плануванням є можливість отримати максимально точні дані щодо конкретного об'єкта. Така процедура актуальна незалежно від того, чи здійснюється вона до або після розгортання мережі, проте використання отриманих даних під час планування дозволить уникнути багатьох проблем із інтерференцією сигналів та зоною покриття, а також звести до мінімуму перенесення точок доступу [9].

Радіообстеження до розгортання мережі проводиться головним чином для визначення характеристик об'єкта. У разі відсутності вже існуючої мережі процедура допоможе зібрати дані про радіочастотні властивості об'єкта, таких як загасання сигналу в стінах та інших перешкодах, а також виявити інші мережі та джерела сигналів у суміжних діапазонах. У разі необхідності модернізації вже існуючої мережі метод дозволяє виявити недоліки і проблеми в ній, що дозволяє врахувати їх вже на етапі проектування.

Також на даному етапі проведення процедури може використовуватися метод точки доступу на штативі (AP-on-a-Stick). У цьому методі використовується тестова точка доступу для імітації покриття мережі. Вона закріплюється на штативі та розміщується в передбачуваному місці встановлення точки. Після цього проводиться тестування дійсної для даного приміщення зони покриття та виявляються фактори, що послаблюють сигнал. Потім, у разі потреби, точка переноситься на нове місце і процес повторюється.

Після збирання даних створюється карта покриття, що імітує вже розгорнуту мережу.

Великою перевагою такого методу є те, що при обстеженні можна використовувати точки доступу, які передбачається розміщувати на об'єкті при безпосередньому розгортанні мережі. Це дозволяє отримати найточніше уявлення про характеристики майбутнього покриття в конкретній будівлі.

Безпосередньо після розгортання мережі може проводитись її верифікаційне обстеження. Після проектування мережі на об'єкті та встановлення точок доступу необхідно переконатися, що мережа працює справно. На цьому етапі можна виявити ряд проблем у роботі мережі, наприклад, якщо встановлена точка доступу була неправильно налаштована або зорієнтована під час монтажу. У такій ситуації карта покриття може суттєво відрізнятись від отриманої при плануванні або попередньому обстеженні. Також, обстеження після розгортання дозволяє виявити

особливості середовища, які були недоступні на етапі планування, наприклад вплив суміжних точок доступу, обладнання, що створює перешкоди, меблі тощо [10].

Радіообстеження також може бути діагностичним засобом безпосередньо під час роботи вже розгорнутої та працюючої мережі. Воно дозволяє виявити її проблеми та обмеження, що виникли з моменту проведення останнього обстеження.

Процедура радіообстеження не є заміною плануванню мережі, вона доповнює та підкріплює його. Попереднє планування дозволяє уточнити характеристики середовища, а верифікаційне – переконатися в коректності розгортання. В умовах створення мереж з високою щільністю, витрати на розгортання без попереднього планування, ймовірно, будуть значно вищими у зв'язку з можливою необхідністю коригування розміщення точок та їх налаштувань. Радіообстеження самостійно не може замінити комплексне проектування, як і планування не дозволить повністю відмовитися від обстеження.

Радіообстеження можна розділити на два види: пасивне та активне.

Пасивне обстеження дозволяє вивчити всі точки доступу та канали, що використовуються на об'єкті, для оптимального налаштування мережі. При пасивному обстеженні збирається вся інформація про середовище – сусідні та об'єктові точки доступу та джерела сигналу. Таким чином можна отримати інформацію про всі канали та потужність сигналу в досліджуваних діапазонах. Перешкоди та інтерференція сигналів як усередині одного каналу, так і між каналами можуть бути головними причинами низької пропускну здатності та нестабільної роботи обладнання.

Пасивне обстеження застосовується як до, так і після розгортання мережі. Якщо воно проводиться до розгортання – результати використовуються для оптимального вибору каналів точок доступу для мінімізації міжканальних перешкод від суміжних передавачів. У разі

проведення обстеження після розгортання мережі, воно дозволяє переконатися у відсутності проблем чи їх оптимальному вирішенні.

Активне обстеження дозволяє вивчити характеристики та зону покриття розгорнутої мережі. При активному обстеженні досліджується зона покриття на рівні лише конкретної точки доступу або всієї мережі. Застосовується переважно як верифікаційний метод і дозволяє визначити відповідність проектним вимогам пропускнуї спроможності та покриття. Проведення активного обстеження перед розгортанням мережі може допомогти краще спланувати розміщення та орієнтування точок доступу.

Частиною процедури радіобстеження може бути спектральний аналіз середовища. Перешкоди на суміжних частотах не пов'язані з бездротовими мережами можуть істотно збільшити загальний рівень шуму та зробити деяку частину діапазону фактично непридатною для передачі даних. Джерела таких перешкод можуть бути як самостійними пристроями, наприклад, НВЧ печі, Bluetooth пристрої та передавачі бездротових клавіатур та маніпуляторів тощо в діапазоні 2,4 ГГц, так і складовими інших технологічних рішень, наприклад, метеорологічні станції радіолокації тощо в діапазоні 5 ГГц.

1.2.2 Проектування мереж із зменшенням домену колізій

При необхідності розгортання мереж в умовах високої щільності застосовується методика проектування зі зменшенням домену колізій.

Зазвичай основну частину інтерференції становлять перешкоди від сторонніх мереж Wi-Fi або суміжних точок доступу. На великих площах, на кшталт торгових центрів, дуже містких навчальних аудиторій, конференц-залів, стадіонів тощо, зазвичай спостерігається висока інтерференція у спектрі, який використовується Wi-Fi. Часто це пов'язано з відсутністю численних перешкод поширенню радіосигналу та велику кількість користувачів

середовища передачі. Якщо в зоні покриття точки доступу виявляється інша точка, що працює на тому ж каналі, виникають ефекти внутрішньоканальної інтерференції CCI (Co-Channel Interference). Як правило, в мережах високої щільності розміщується велика кількість точок доступу, багато з яких можуть працювати на одному каналі [11]. Чим більше таких точок, тим більше буде спостерігатися ефект внутрішньоканальної інтерференції.

Виразність ефекту CCI залежить від багатьох факторів, таких як: тип точки доступу, тип і характеристики антен, розташування та орієнтація точки та інші, залежно від кількості клієнтів. При цьому, слід тримати можливу інтерференцію на мінімальному рівні. Ефекти внутрішньоканальної інтерференції є основною причиною проблем експлуатації мереж з високою щільністю. У цьому сенсі мета планування бездротових локальних мереж – збільшення кількості точок доступу настільки, що подальше збільшення не змінюватиме сукупну ємність мережі [12].

Міжканальна інтерференція сигналів (ACI – Adjacent Channel Interference) проявляється, коли у спектрі перетинаються смуги сигналів, що передаються у різних каналах. У бездротових локальних мережах це явище зустрічається дуже часто і є неминучим через використання коміркового принципу їх побудови, що передбачає перетин зон покриття точок доступу, що працюють на різних каналах.

Для зменшення впливу описаних ефектів застосовують метод проектування мереж із зменшенням доменів колізій. Сенс методу полягає у розміщенні більшої кількості точок доступу на тій же площі та обмеження потужності їхніх передавачів для забезпечення мінімального оптимального перекриття зон обслуговування для забезпечення роумінгу клієнтів.

На рисунках 1.4 і 1.5 зображені структури мереж із традиційним методом проектування, в якому спостерігається надмірна потужність передавачів і перекриття зон обслуговування та з використанням методу зменшення доменів колізій [13].

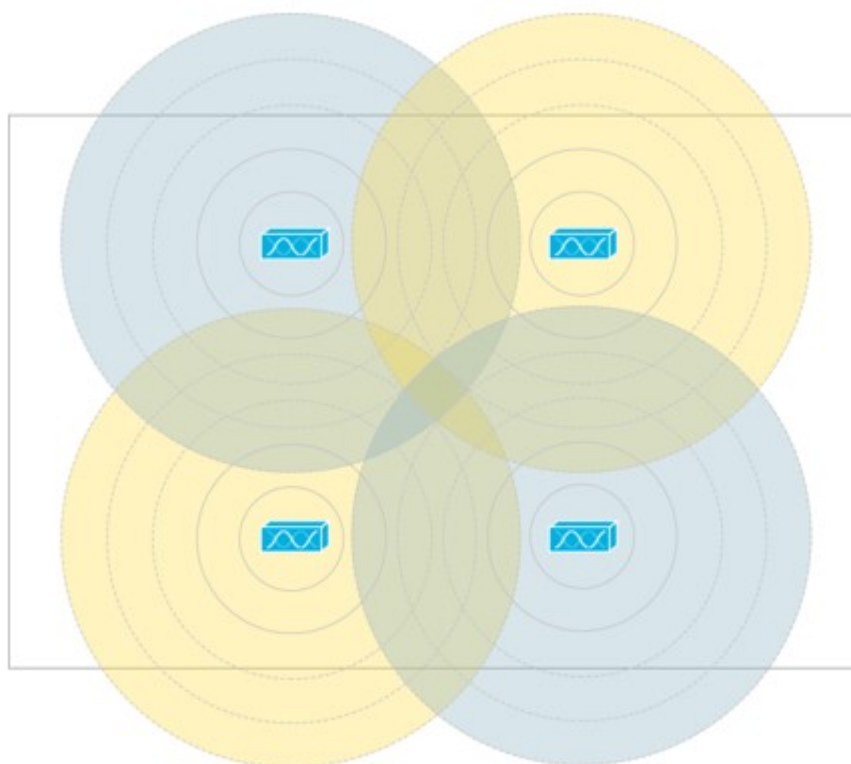


Рис. 1.4 – Традиційний метод

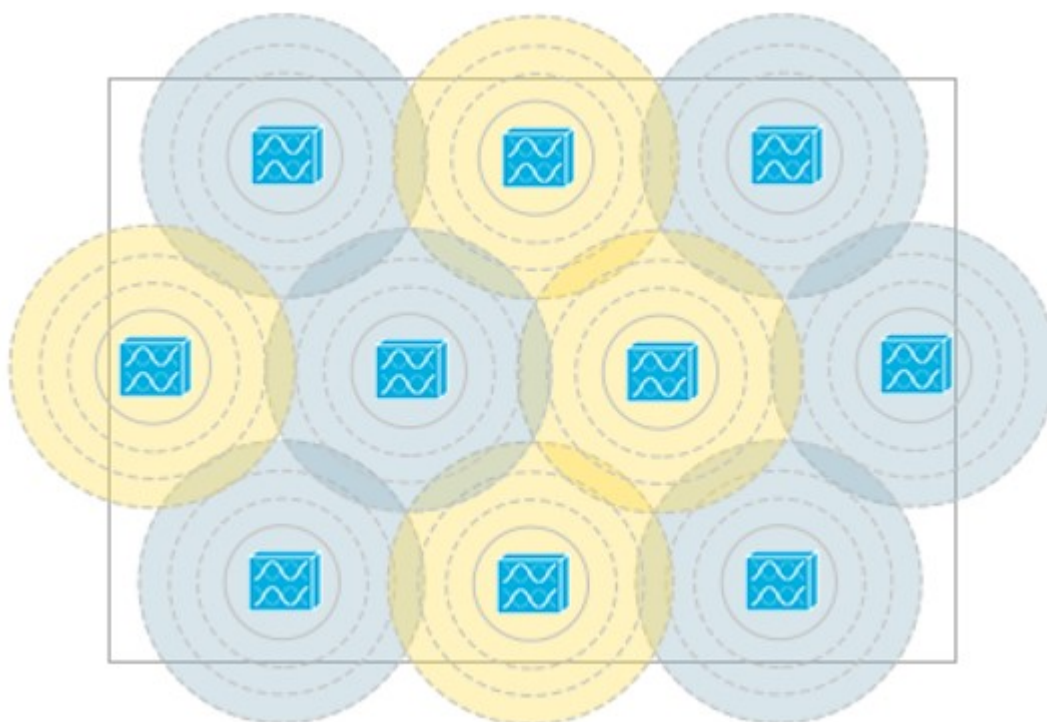


Рис. 1.5 – Метод зменшення домену колізій

Так, збільшення кількості точок доступу, що використовуються, і зменшення потужності їх сигналу дозволяє розмістити клієнта фізично ближче до точки доступу, яка його обслуговує, а також зменшити кількість клієнтів на точку доступу, що дозволяє значно знизити вплив ефекту інтерференції сигналів клієнтів. Крім того, це дозволяє застосувати більш продуктивну модуляцію та збільшити швидкість каналу. Варто відзначити також більш рівномірне навантаження на опорну провідну мережу та зниження створюваних перешкод сусіднім бездротовим мережам.

Застосовуючи описаний метод можна не тільки зменшити проблеми, пов'язані із інтерференцією наприклад, шляхом рознесення точок доступу за каналами й фізично, а й майже повністю позбутися впливу такого обмежуючого фактору як потужність передавачів бездротових клієнтів. Найчастіше, потужність передавача клієнта значно (у рази) нижча за потужність передавача точки доступу. Якщо не враховувати цей фактор належним чином і орієнтуватися переважно на покриття передавачів точок доступу, то ймовірно виникнення ситуації, коли клієнт бачить точку доступу може приймати від неї сигнал, однак точка доступу не бачить сигнал клієнта через малу потужність його передавача.

1.3 Поширені стандарти IEEE 802.11

На сьогоднішній день більшість бездротових локальних мереж працює відповідно до стандартів IEEE 802.11n та IEEE 802.11ac. Однак, стандарт IEEE 802.11ax продовжує швидко їх посувати. За даними Dell'Oro Group, кількість точок доступу в корпоративному сегменті, що підтримують стандарт IEEE 802.11ax у 2023, буде перевищувати 30 млн. шт. [15]. А згідно з прогнозами експертів агентства ABI Research, обсяги поставок чипсетів із підтримкою IEEE 802.11ax перевищать позначку в 1 мільярд одиниць до кінця 2022 р. [16].

Новий стандарт IEEE 802.11ax базується на стандарті IEEE 802.11ac, але має ряд нововведень та змін, завдяки яким він надає переваги при розгортанні Wi-Fi мереж із високими щільністю та навантаженням в умовах заповненості радіоефіру.

У порівнянні з попередніми стандартами, IEEE 802.11ax пропонує:

- збільшення максимальної теоретичної швидкості передачі даних;
- оптимізацію використання спектру за рахунок поділу окремих каналів на підканали та можливості об'єднання їх у групи – OFDMA;
- підтримку багатокористувацького режиму доступу до середовища як у низхідному та й у висхідному потоках – MU-MIMO;
- збільшення рівня модуляції сигналу;
- введення механізму фарбування мережевих пакетів для оптимізації роботи мереж, що перекриваються – BSS Coloring і деякі інші.

Детальний опис та розбір нововведень, порівняння із технологіями, що застосовуються у IEEE 802.11ac, вплив їх на процеси роботи в сценаріях бездротових локальних мереж із високою щільністю розгортання будуть розглянуті у другому розділі магістерської роботи.

1.4 Висновки за першим розділом

Планування, проектування та розгортання традиційних мереж Wi-Fi із високою щільністю та експлуатаційними характеристиками – непросте завдання.

Для виконання проекту традиційної мережі Wi-Fi із високою щільністю розгортання необхідно враховувати досить велику кількість факторів та особливостей технології, основними з яких є принципи розподілу доступу до середовища передачі, обмеження потужностей передавачів різних пристроїв,

вимоги до забезпечення певних рівнів експлуатаційних характеристик на кожного клієнта тощо.

Орім того, важливо враховувати індивідуальні особливості планування та конструкції об'єкта розгортання мережі, а також стан його радіоефіру. Слід використовувати методи радіообстеження як на етапі планування, так і після розгортання для контролю. Планування мережі слід виконувати з урахуванням суміжних мереж та джерел радіосигналів на об'єкті, власних структурних елементів мережі, а також індивідуальних особливостей стандарту, що використовується. Підсумовуючи, очевидно, що використання спеціалізованих методів проектування бездротових локальних мереж буде мати високу актуальність для забезпечення максимально можливих експлуатаційних характеристик високощільних мереж допоки всі вони працюють у спільному середовищі обміну інформацією, бо це дозволяє організувати максимально оптимальні умови для роботи мережі.

Популярні сьогодні мережі за стандартами IEEE 802.11n та IEEE 802.11ac в багатьох випадках вже не можуть задовільними потреби користувачів мереж із високою щільністю навіть при правильному проектуванні. В результаті, вони активно витісняються мережами, що відповідають стандарту IEEE 802.11ax, який пропонує низку нововведень та змін як на фізичному, так і на каналному рівні, що покликані вирішити проблеми мереж із високою щільністю.

Розробниками стандарту та виробниками обладнання заявлені дуже високі показники експлуатаційних характеристик, досягнені шляхом значно ефективнішого використання ресурсів середовища обміну. Таким чином, розробники заявляють збільшення пропускнуої здатності на кожного клієнта та місткості мережі до чотирьох разів, збільшення максимальної швидкості передачі даних майже у 1.4 рази та значно вищу стійкість та працездатність в умовах мереж високої щільності. Їх досягнення також підтверджують результати моделювання таких мереж у спеціалізованому програмному

забезпеченні, проте, достовірність моделей у вкрай несприятливих умовах роботи не завжди є повною через, наприклад, неможливість абсолютно точного моделювання середовища розгортання та недоступність внутрішньої інформації виробника щодо алгоритмів роботи механізмів розподілення ресурсів середовища, реалізованих у мережевому обладнанні, що поставляється клієнтам.

Виходячи з наведеного вище, питання визначення дійсної ефективності нових технологій стандарту IEEE 802.11ax у прямому порівнянні із попереднім стандартом IEEE 802.11ac у вкрай несприятливих умовах для роботи мереж із високою щільністю розгортання без використання методів проектування, покликаних зменшити вплив навколишніх радіостанцій є актуальним напрямом подальшої роботи в цьому дослідженні.

РОЗДІЛ 2

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕРЕЖ

2.1 Вимоги та типові сценарії застосування IEEE 802.11ax

До сучасних та майбутніх бездротових мереж висуваються вимоги до працездатності в умовах великої щільності розгортання як у приміщеннях так і за їх межами. Існують різні тлумачення визначення бездротових мереж високої щільності розгортання, наприклад, одне визначення бере за основу те, що щільність зон обслуговування, більша, ніж щільність активних користувачів [17]. Інше визначення – те, що щільність клієнтів зони обслуговування мережі перевищує значення в одиницю на квадратний метр. До того ж, мережами високої щільності вважаються такі, що розгорнуті серед великої кількості суміжних мереж, так що неможливо уникнути перетину зон покриття та використовуваних каналів.

На рисунку 2.1 відображено типові сценарії роботи бездротових мереж, які відповідають стандарту IEEE 802.11ax.

IEEE 802.11ax задачі та сценарії застосування



Рис. 2.1 – Вимоги та типові сценарії застосування IEEE 802.11ax

Як видно, сучасні стандарти бездротових мереж, зокрема IEEE 802.11ax, спрямовані саме на вирішення проблем функціонування таких мереж в умовах високої щільності розгортання і вже потім на підвищення експлуатаційних характеристик.

2.1.1 Офісні корпоративні мережі

Бездротові мережі на сьогодні є важливим компонентом корпоративних офісів. Тенденція переходу на мобільні комп'ютери та портативні комунікаційні пристрої дозволяє виключити жорстку прив'язку співробітників до їх робочих місць. Таким чином, перехід на бездротові тип мережі на рівні доступу дозволяє суттєво підвищити ефективність та зручність роботи водночас зменшуючи витрати на розгортання [18]. Проте, на підприємствах та офісах робочі станції та клієнтські пристрої (STA) можуть бути розміщені на досить малій відстані одне від одного, тому є необхідність у розміщенні точок доступу кожні 10-30 метрів, і кожна з таких точок доступу повинна обслуговувати десятки чи навіть сотні станцій. А із поширенням сервісів відеоконференцій зростають й вимоги до швидкості передачі даних на клієнта [19]. До того ж, на підприємствах, що мають великі складські приміщення та/або виробництво – питання покриття бездротової мережі на таких об'єктах є не менш гострим.

2.1.2 Майданчики масових заходів

Майданчики, що приймають людей на концертах, спортивних іграх, масштабних соціальних заходах, тощо, повинні забезпечувати послуги бездротових мереж як для організаційних потреб так і для відвідувачів.

Мережі WLAN на великих майданчиках, наприклад стадіонах, мають обслуговувати дуже велику кількість клієнтів, наприклад місткість невеликого стадіону 12 000 – 15 000, а великих – понад 100 000. Це надзвичайно ускладнює роботу бездротової мережі, а для забезпечення такої ємності потребує розміщення точок доступу кожні 10-20 метрів. Окрім того, на таких заходах спостерігається тенденція до збільшення бажання відвідувачів транслювати їх за допомогою сервісів потокового відео та використання послуг відеодзвінків [20, 21].

2.1.3 Великі хот-споти

Потреба забезпечення доступом до мережі Інтернет у сучасних містах стає все більш гострою. Розгортається велика кількість хот-спотів у місцях, що приваблюють велику кількість людей – торгові центри, концертні зали, парки, кафе тощо. На великих площах розгортання це часто вимагає розміщення точок доступу кожні 50-200 метрів (зазвичай серед інших мереж), і кожна повинна обслуговувати десятки чи сотні клієнтів. Окрім того, мобільні мережі також стикаються із нестачею пропускнуої здатності каналів і все більше вдаються до перенаправлення трафіку до Wi-Fi мереж [22].

2.1.4 Багатоквартирні будинки та щільні забудови

Ще у 2011 році, коли бездротові мережі тільки набирали популярності, понад 25% домогосподарств у світі мали WLAN [23]. З того часу їх кількість та щільність збільшилась у декілька разів. Сьогодні досить часто можна спостерігати звичайну домашню мережу, що має більше однієї точки доступу. Тому неважко уявити, яка велика кількість WLAN розгортається в

густонаселених житлових квартирах, коли майже кожне домогосподарство має принаймні одну точку доступу. З безперервним збільшенням кількості інтелектуальних пристроїв «розумного» будинку та Інтернету речей, розгорнута в кожній сім'ї точка доступу, повинна обслуговувати від 10 клієнтів і більше.

Очевидно, що у наведених типових та їм подібних сценаріях продуктивність традиційних WLAN в умовах високої щільності швидко погіршуватиметься та навряд чи зможе задовольнити поставленим вимогам. Тому робоча група IEEE 802.11 розробила нову, наразі актуальну ітерацію стандарту – IEEE 802.11ax, яка спрямована саме на сценарії розгортання з високою щільністю.

Технічна документація стандарту [24] вказує на те, що загальна мета IEEE 802.11ax полягає в значному покращенні взаємодії з користувачем у сценаріях розгортання з високою щільністю. Зокрема, IEEE 802.11ax має досягти принаймні чотириразового підвищення середньої пропускної здатності на клієнта у конкретних сценаріях розгортання з високою щільністю. Крім того, необхідно гарантувати 5% пропускної здатності на клієнта. Для досягнення цієї мети IEEE 802.11ax повинен відповідати низці технічних вимог.

Підвищення ефективності WLAN. По-перше, ефективність традиційних мереж IEEE 802.11 у сценаріях із високою щільністю стрімко знижується через обмеження фізичного середовища [25]. Таким чином, необхідне досягнення більш ефективного використання ресурсів спектру в сценаріях із високою щільністю STA (клієнтів) на BSS (базову зону обслуговування).

По-друге, у сценаріях OBSS (BSS, що перетинаються) явища інтерференції серйозно впливають на пропускну здатність усієї мережі, і у традиційному IEEE 802.11 відсутні ефективні засоби повторного використання спектру та керування інтерференцією. Таким чином, IEEE

802.11ax потребує значного покращення можливості повторного використання спектру та керування інтерференцією в сценаріях OBSS із високою щільністю як STA, так і BSS.

По-третє, традиційні стандарти IEEE 802.11 в основному зосереджувалися на роботі всередині приміщень. У мережах поза приміщень відстань передачі є більшою, а фізичне середовище передачі набагато складніше. До того ж, оскільки максимальна потужність передачі STA часто нижча, ніж AP (точки доступу), традиційний IEEE 802.11 навряд чи зможе забезпечити надійність та продуктивність передачі від клієнта до точки доступу. Таким чином, IEEE 802.11ax повинен забезпечувати ефективну роботу мережі в умовах відкритого простору.

Підтримка паралельної передачі. Традиційний IEEE 802.11 підтримує лише SU-MIMO, тобто одночасну передачу лише одного передавача в частотному діапазоні. Навіть стандарт IEEE 802.11ac wave 2 дозволяє паралельну передачу лише у напрямку від точки доступу до клієнта MU-MIMO, а у зворотному напрямку – ні. Це сильно знижує теоретичну продуктивність та ефективність. Таким чином, IEEE 802.11ax повинен забезпечувати можливості паралельної передачі в обох напрямках.

Покращення енергоефективності. Більшість клієнтських пристроїв, що працюють у бездротових локальних мережах, живляться від вбудованих акумуляторів. Виходячи із цього, питання енергоефективності надалі буде ставати все більш актуальним. Забезпечення високої ефективності споживання енергії залежить від комплексного підходу до оптимізації споживаючих компонентів. Тому, для підвищення енергоефективності пристроїв загалом, необхідно покращувати енергоефективність й компонентів зв'язку, зокрема на рівні протоколів взаємодії пристроїв, чому повинен відповідати стандарт IEEE 802.11ax.

2.2 Нововведення стандарту IEEE 802.11ax

Стандарт IEEE 802.11ax підтримує технології, що було введено в попередніх стандартах IEEE 802.11, але багатьох із них тепер зібрано разом, а деякі суттєво покращено [26] [27]. Найважливішою з нових функцій є OFDMA – множинний доступ з ортогональним частотним розподілом. Наступною за значимістю функцією є підтримка UP-Link та Down-Link MU-MIMO 8x8 разом із Beamforming – двонаправлене багатокористувальницьке множинне введення/виведення із підтримкою просторового формування радіопроменю.

Разом із технологією BSS Coloring – маркування належності пакетів даних певній базовій зоні обслуговування (BSS), все це обіцяє більш ефективне повторне використання спектру шляхом пом'якшення проблем інтерференції на сумісному каналі (особливо важливо для широких каналів 80/160 МГц). Окрім того, IEEE 802.11ax підтримує більш високі модуляційно-кодові схеми – MCS 10 і 11 (до 1024 QAM), що також допомагає підвищити максимальну пропускну здатність [28].

Покращення енергоефективності включає в себе технологію TWT – планування часу пробудження, що може суттєво покращити ситуацію із енергоспоживанням для мобільних пристроїв і пристроїв Інтернету речей. Введення змін у форматі кадру (HE-PPDU), включає в себе збільшення захисних інтервалів, що підвищує надійність сигналу у сценаріях поза приміщеннями. Стандарт також підтримує роботу двох діапазонів частот – 2,4 і 5 ГГц, на відміну від IEEE 802.11ac обох ітерацій і використовує шифрування WPA3 (Wireless Protected Access) для підвищеної безпеки з'єднання Wi-Fi.

Таблиця 2.1 відображає ключові зміни та нововведення стандарту IEEE 802.11ax та їх основну зону впливу.

Таблиця 2.1

Ключові зміни та нововведення IEEE 802.11ax та їх призначення

Зміни та нововведення IEEE 802.11ax	Підвищення ефективності використання спектру в одній зоні обсл.	Підвищення ефективності використання спектру в мульти-зонах обсл.	Покращення роботи поза приміщеннями	Паралельна передача	Енергоефективність
UL / DL OFDMA	X		X	X	
Збільшення кількості підносійних	X		X	X	
Resource Units	X			X	
Оновлена структура фрейму (HE-PPDU)	X		X	X	
Вищі модуляційно-кодові схеми	X		X		
Механізми повторного використання спектру		X			
MU-MIMO	X		X	X	
TWT					X

Детальніший огляд змін та нововведень стандарту наведено далі у розділі.

2.2.1 OFDMA

Множинний доступ з ортогональним частотним розподілом каналів (OFDMA) – технологія, що була представлена в IEEE 802.11ах. На сьогоднішній день OFDMA також використовується в стільниковому стандарті 4G LTE (Long Term Evolution) [29].

OFDMA належить до технології множинного доступу в частотній області, яка поділяє канал на кілька ресурсних одиниць (Resource Units, RU) із однаковою або різною смугою пропускання, де кілька підносійних об'єднуються в один RU. Кожен RU призначається певному клієнту для надсилання або отримання кадрів. Їх використання дозволяє точці доступу синхронізувати передачу в обидвох напрямках із декількома клієнтами, розподіленими за певним ресурсними одиницями. Розбиваючи канали на менші підносійні, дані можуть передаватися декільком користувачам одночасно. Таким чином, OFDMA забезпечує оптимальніше використання частотного спектру шляхом формування більшої кількості підносійних для одночасного обслуговування декількох клієнтів із різними потребами в пропускній здатності дозволяючи зменшити накладні витрати на рівні MAC, затримки та конкуренцію між клієнтами. Залежно від потреб клієнта, точка доступу може виділити весь канал одному клієнту або розділити його для одночасного обслуговування декількох клієнтів.

Радіостанції стандарту IEEE 802.11ах також підтримують OFDM для забезпечення зворотної сумісності.

На рисунку 2.2 наочно показано різницю між OFDM і OFDMA.

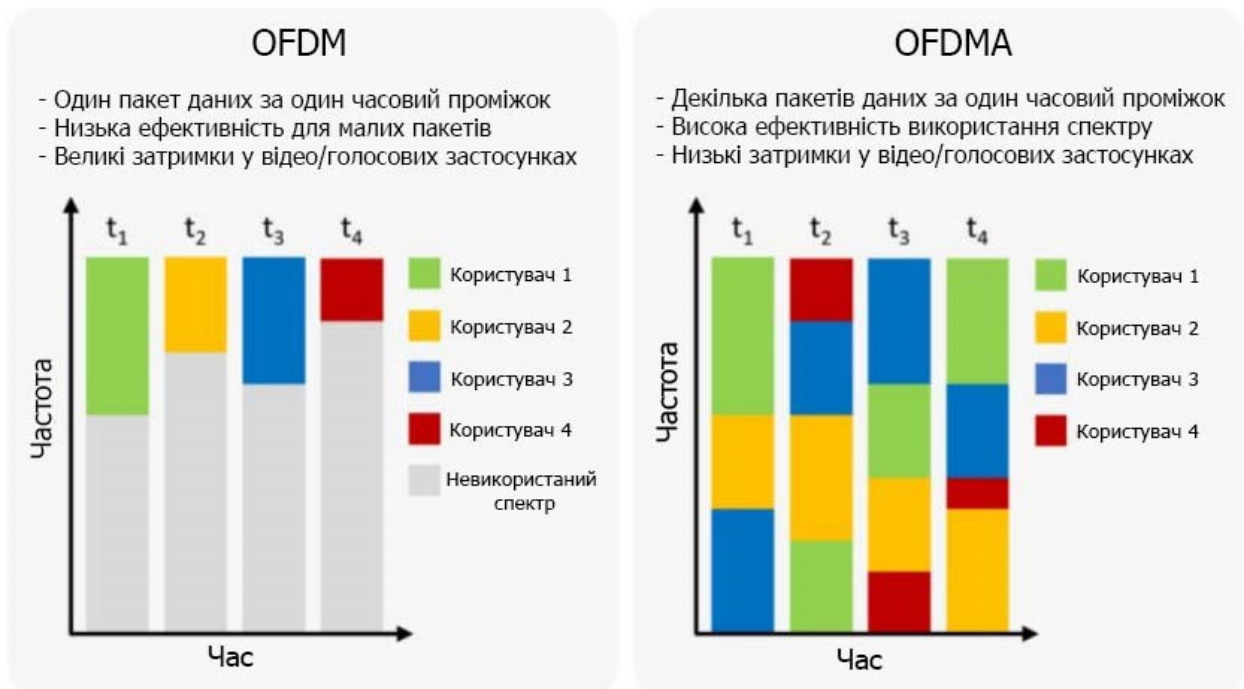


Рис. 2.2 – Розподіл використання каналу клієнтами за часом для OFDM та OFDMA

Стандарт IEEE 802.11ax підтримує OFDMA в обох напрямках передачі.

Точка доступу IEEE 802.11ax, як і раніше, конкурує зі станціями, що не використовують вищеназваний стандарт, за право доступу до каналу за механізмом випадкового доступу (Enhanced Distributed Channel Access, EDCA). Цей механізм забезпечує безперешкодний доступ до каналу зв'язку протягом періоду, який відомий як можливість передачі (Transmission Opportunity, TxOP).

Низхідна лінія OFDMA працює наступним чином. Точка доступу отримує ефірний час (TxOP) і надсилає тригерний кадр (MU-RTS) для синхронізації із клієнтами, що вільні для передачі (CTS). Визначаються клієнти, які готові приймати трафік. Клієнти надсилають CTS паралельно. Потім точка доступу передає дані в низхідній лінії зв'язку до клієнтів OFDMA, про кількість ресурсних одиниць і потужність передачі для кожної ресурсної одиниці, що визначаються точкою доступу. Після отримання даних клієнти надсилають підтвердження до точки доступу. Це зображено на рисунку 2.3:

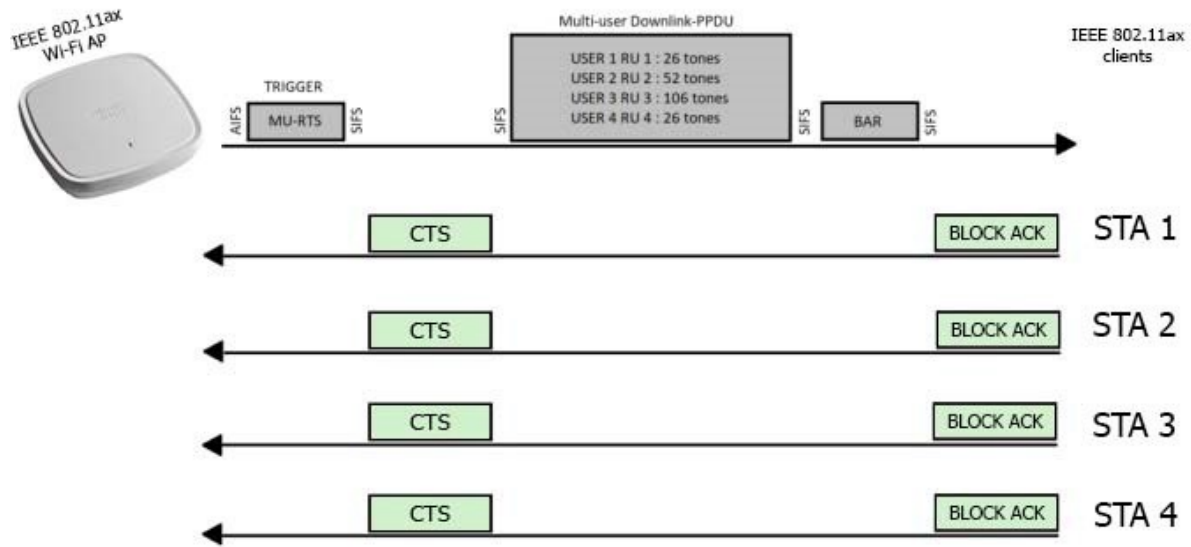


Рис. 2.3 – Процедура передавання даних для низхідної лінії зв'язку OFDMA

Висхідна лінія зв'язку працює наступним чином. Точка доступу контролює середовище, як і раніше, під час трансляції TxOP і надсилає опитування про стан буфера (Buffer Status Report, BSR). Клієнти відповідають синхронізованими фреймами звіту про стан буфера з інформацією про ідентифікатор асоціації (Association Identification, AID), довжину даних, тип даних тощо. Точка доступу розподіляє ресурсні одиниці та створює розклад із часом початку/зупинки, відображенням ресурсної одиниці клієнта, рівнів потужності на основі отриманих даних (варто зазначити, що опитування не проводиться для процедури низхідної лінії зв'язку, оскільки ці дані вже будуть присутні у точки доступу). Точка доступу отримує відповідь CTS від своїх клієнтів та надсилає базовий тригерний кадр для розподілу ресурсних одиниць та синхронізації часу, після чого клієнти надсилають дані за зазначеним розкладом через призначені їм RU. Для рівномірного розподілення навантаження та часу, дані, що мають різний розмір, доповнюються. Як завершальний етап, точка доступу надсилає своїм клієнтам кадр АСК. Це зображено на рисунку 2.4:

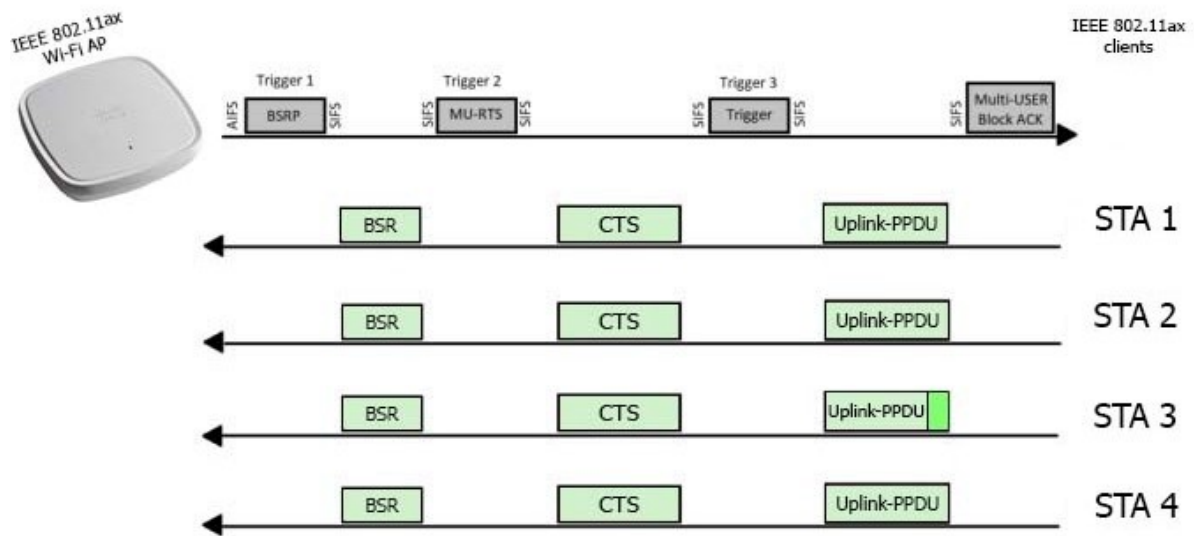


Рис. 2.4 – Процедура передавання даних для висхідної лінії зв'язку OFDMA

2.2.1.1. Підносійні

Сигнали у бездротових мережах передаються на фіксованих частотах, які називають носійними. У групі стандартів IEEE 802.11 ці частоти додатково розділені на підносійні.

Для попередніх стандартів IEEE 802.11a/g/n/ac смуга пропускання 20 МГц розділена на 64 підносійні, а їх інтервал становить $20\,000 / 64 = 312,5$ кГц. Кількість підносійних у IEEE 802.11ax у чотири рази більша, ніж у попередніх стандартах IEEE 802.11. У цьому випадку діапазон 20 МГц розділений на 256 підносійних, а смуга пропускання кожної зменшена до 78,125 кГц. Як показано на рисунку 2.5, взявши за приклад IEEE 802.11a/g, 64 підносійні складаються з 52 заповнених, однієї постійного значення (DC) для ідентифікації і 11 захисних для забезпечення захисних інтервалів. Крім того, заповнені підносійні складаються з 48 підносійних даних і чотирьох пілотних для компенсації частотних помилок при демодуляції отриманого сигналу. Оскільки частотний інтервал підносійної становить 312,5 кГц, довжина

символу OFDM становить 3,2 мкс, що додається до захисного інтервалу 0,8 мкс, отже, довжина повного символу OFDM становить 4 мкс.

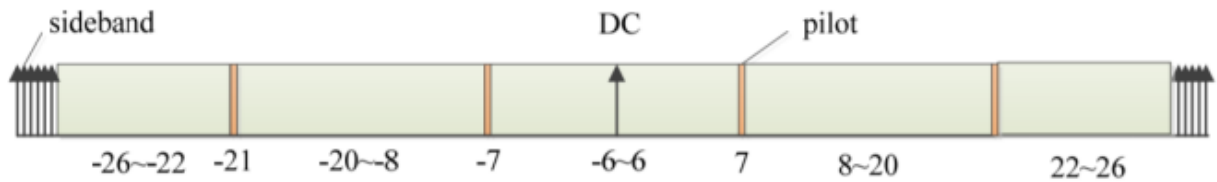


Рис. 2.5 – Розподілення підносійних попередніх стандартів IEEE 802.11

Для досягнення більш точного та ефективного розподілення ресурсів та покращення ефективності використання спектру, IEEE 802.11ах використовує набагато детальніший розподіл підносійних. Як показано на рисунку 2.6, смуга пропускання 20 МГц розділена на 256 підносійні, що призводить до скорочення їх інтервалу піднесучих до 78,125 кГц.

Отож, 256 підносійних складаються з 242 заповнених, 11 захисних для забезпечення захисного інтервалу та 3 постійного значення для ідентифікації. Окрім того, заповнені підносійні складаються з 234 підносійних даних і восьми пілотних підносійних для компенсації частотних помилок при демодуляції отриманого сигналу. Оскільки інтервал тепер становить 78,125 кГц, довжина символу OFDM IEEE 802.11ах становить 12,8 мкс. Захисний інтервал може бути обраний з 0,8 мкс, 1,6 мкс або 3,2 мкс. Відповідно, враховуючи накладні витрати, спричинені захисним інтервалом, ефективність використання спектру IEEE 802.11ах зросла з $3,2 / (3,2 + 0,8) = 0,8$ до найвищого значення $12,8 / (12,8 + 0,8) = 0,94$.

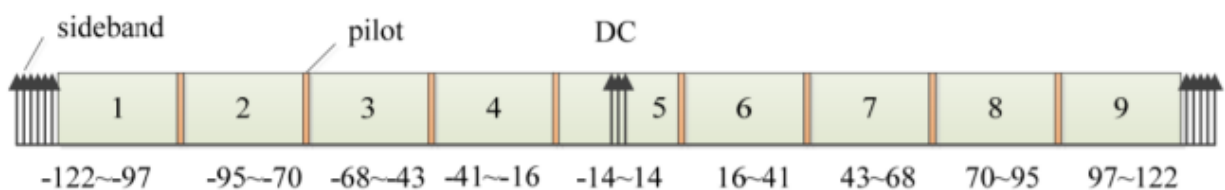


Рис. 2.6 – Розподілення підносійних IEEE 802.11ах

Використання довших символів OFDM призводить до збільшення циклічного префіксу для кожного символу, що додає частину кінця символу OFDM до початку корисного навантаження передачі, щоб забезпечити захисний інтервал проти перешкод і покращити надійність.

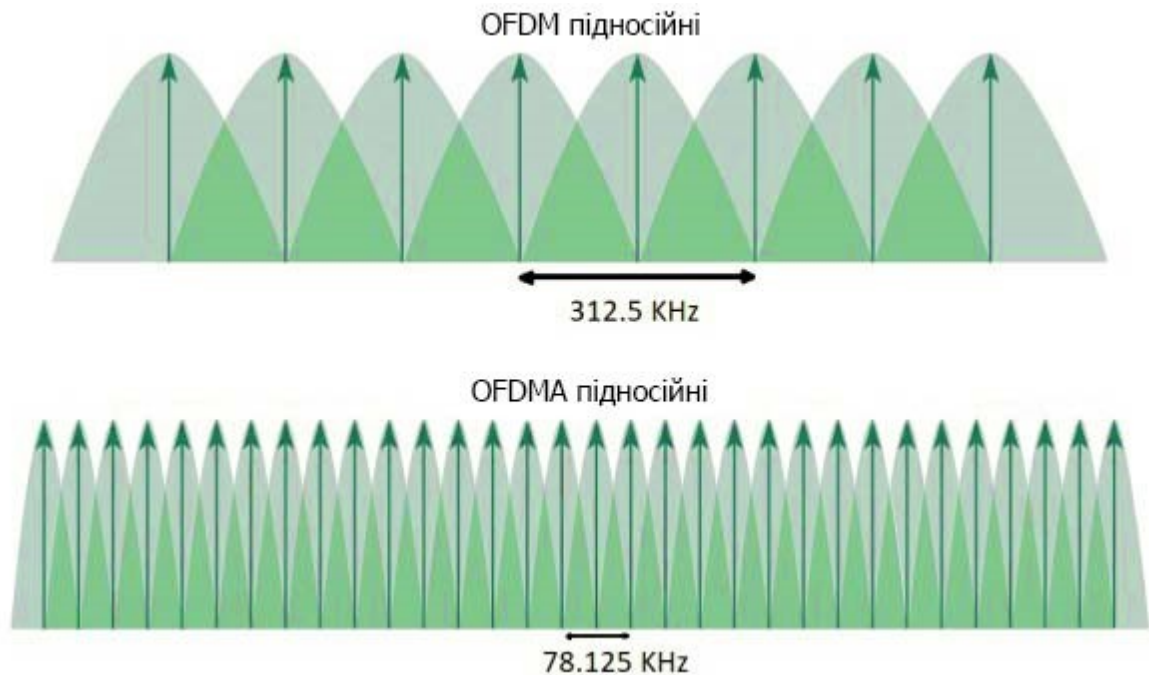


Рис. 2.7 – Розподілення підносійних для OFDM та OFDMA

Також, варто зазначити, що точка доступу може динамічно змінювати потужність випромінювання передатчика у зоні певних підносійних, що у свою чергу, може суттєво покращити ситуацію із проблемами інтерференції у сценаріях із щільним розгортанням мережі.

2.2.1.2. Ресурсні одиниці (Resource Units)

Для передавання даних у попередніх стандартах IEEE 802.11 кожна передача використовує весь частотний простір каналу OFDM. Наприклад, коли для передачі використовується ширина каналу 20 МГц, усі 64 підносійні

використовуються саме для цієї передачі. У випадку із OFDMA канал шириною 20 МГц складається зі 256 підносійних, які можуть бути розподілені для 9 клієнтів. Кожний із клієнтів отримує 26-тонову одиницю ресурсу. При цьому розмір ресурсної одиниці може змінюватися залежно від кількості клієнтів, їх потреб та ширини каналу. Таким чином, розділення каналу на ресурсні одиниці дозволяє збільшити кількість клієнтів, із якими одночасно зможе працювати точка доступу.

Таблиця 2.2 показує можливі розподіли ресурсних одиниць залежно від ширини каналу та кількості клієнтів [30].

Таблиця 2.2

Максимальна кількість ресурсних одиниць залежно від ширини каналу

Розмір RU	Канал 20 МГц	Канал 40 МГц	Канал 80 МГц	Канал 160 МГц	Канал 80+80 МГц та 160 МГц
26-tone	9	18	37	74	74
52-tone	4	8	16	32	32
106-tone	2	4	8	16	16
242-tone	1	2	4	8	8
484-tone	-	1	2	4	4
996-tone	-	-	1	2	2
2x996-tone	-	-	-	1	1

Рисунок 2.8 відображає розподілення ресурсних одиниць для стандарту IEEE 802.11ax:

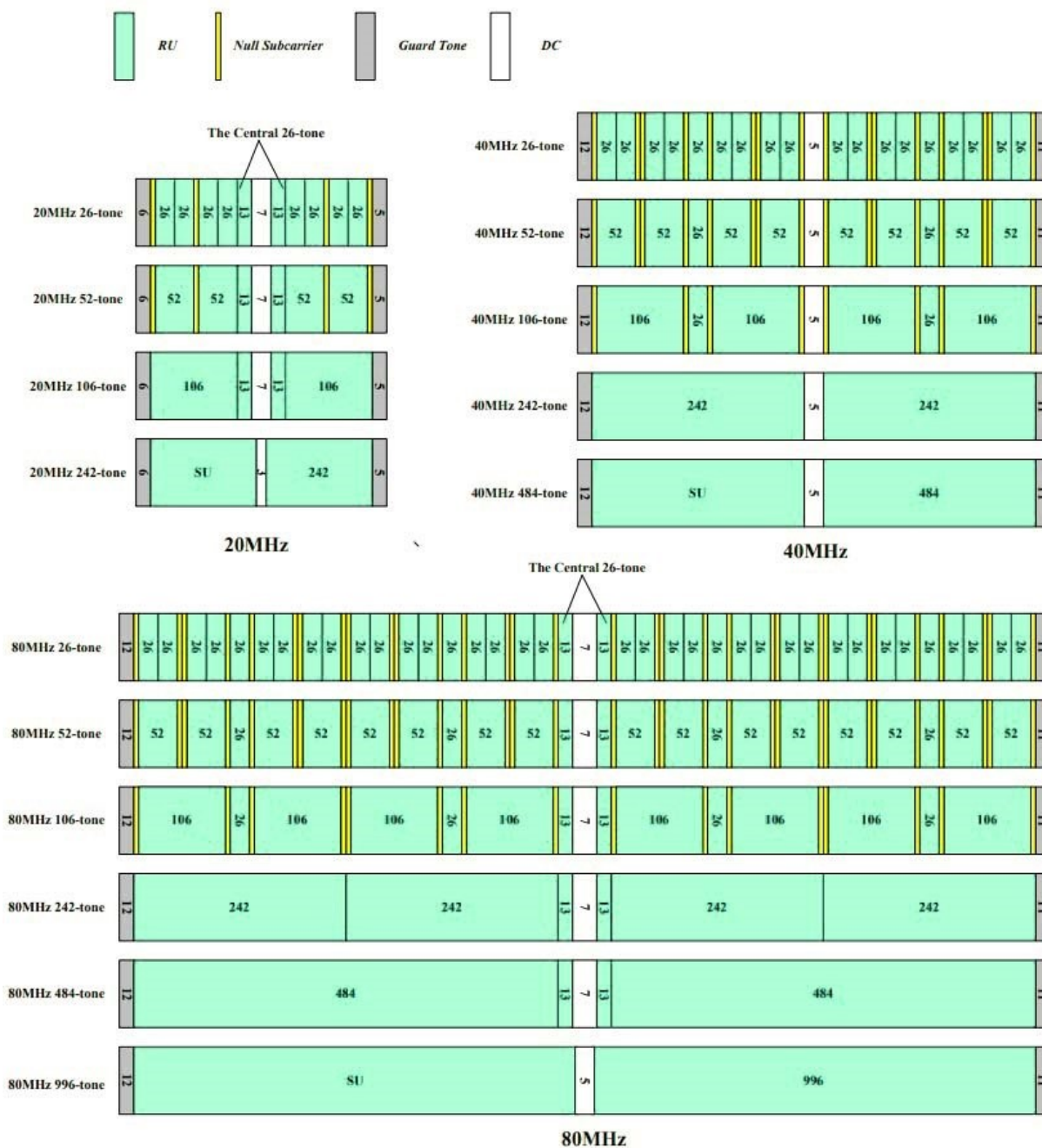


Рис. 2.8 – Розподілення RU OFDMA

2.2.2 Вдосконалене об'єднання каналів (Channel Bonding)

Із розвитком групи стандартів IEEE 802.11 спостерігається розширення смуги пропускання або ширини каналу. Спочатку використовували канали

лише у 20 МГц завширшки, у стандарті IEEE 802.11n з'явилась підтримка каналів у 20 та 40 МГц, а в IEEE 802.11ac – 20, 40, 80, 160 (80+80) МГц. Разом із еволюцією підтримки ширших смуг пропускання збільшувалась і загальна пропускна здатність з'єднання відповідно. Однак, за винятком режиму об'єднання каналів 80+80 МГц, усі інші режими вимагали безперервності об'єднаних каналів. Отже, об'єднати канали задля збільшення загальної пропускної здатності бездротової мережі у випадках, коли декілька вільних каналів розділені зайнятим було неможливо. В результаті це призводить до значної втрати коефіцієнту використання спектру, особливо у сценаріях із високою щільністю розгортання бо є висока вірогідність того, що точка доступу, що передає на широкому каналі, може почути передачу від сусідніх точок або станцій на одному із об'єднаних каналів.

Приклад такого випадку зображено на рисунку 2.9:

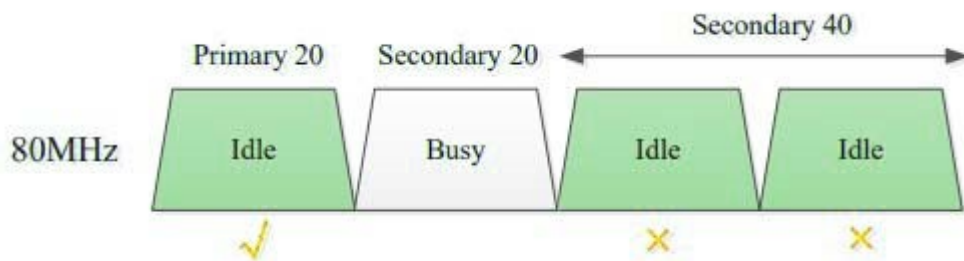


Рис. 2.9 – Традиційний механізм об'єднання каналів

Для вирішення цієї проблеми із метою ефективнішого використання спектру, у стандарті IEEE 802.11ax вводиться вдосконалений механізм об'єднання каналів – виколювання преамбули, що дозволяє неперервно з'єднувати непослідовні канали, збільшуючи доступну пропускну здатність.

Технологія вдосконаленого об'єднання каналів має декілька режимів.

Режими 0-3 відповідають традиційним (20, 40, 80 та 160 МГц). Режими 4-7 відповідають механізму проколу преамбули, як показано на рисунку 2.10.

Режим 4 вказує на ситуацію, коли загальна смуга пропускання становить 80 МГц, а вторинні 20 МГц пробиті. Точка доступу може з'єднати 60 МГц для зв'язку зі клієнтом, і тоді ефективність може бути покращена втричі від первинної із каналом у 20 МГц.

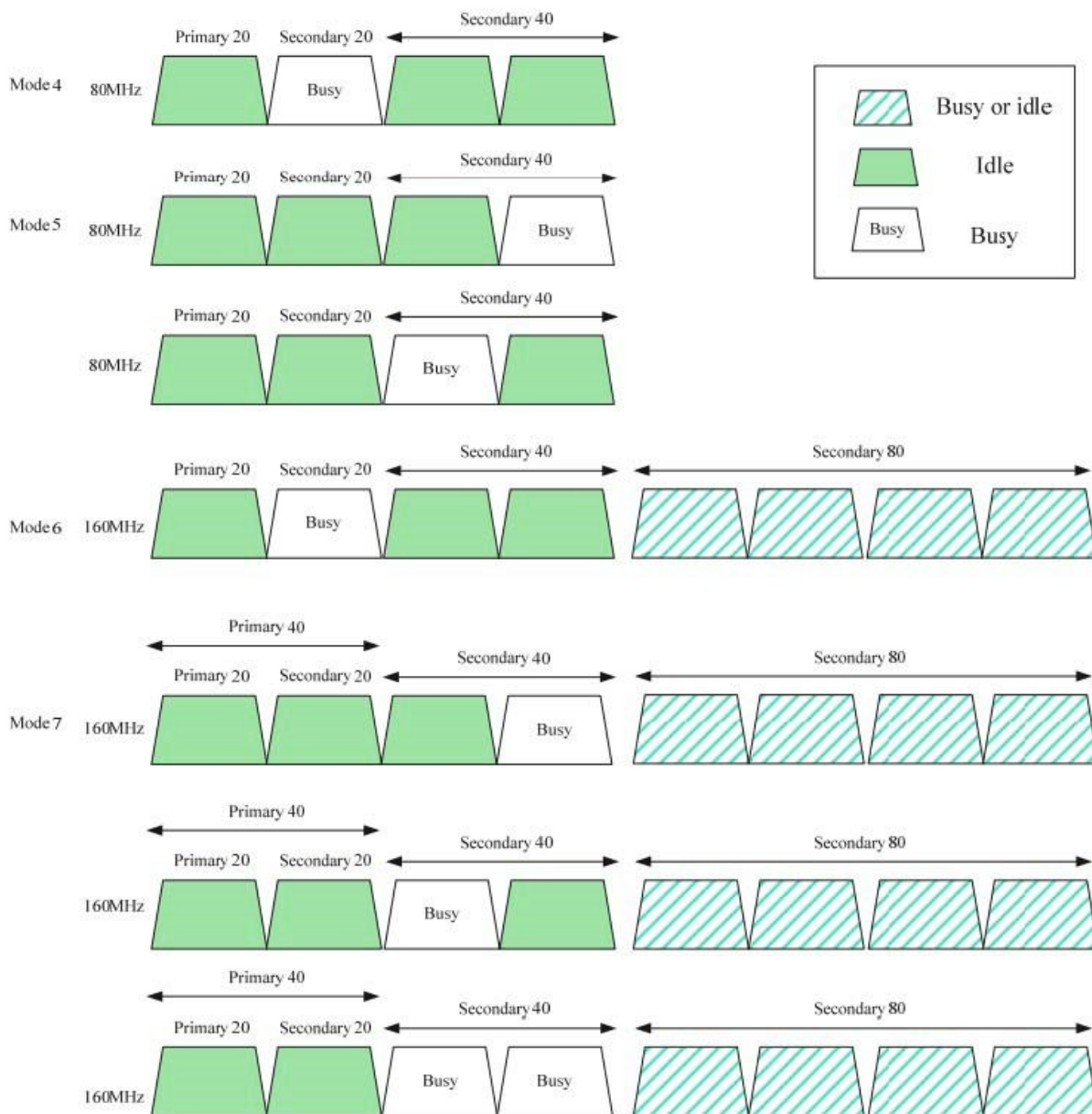


Рис. 2.10 – Механізм об'єднання каналів IEEE 802.11ax

Режим 5 вказує на ситуацію, коли загальна смуга пропускання становить 80 МГц, а одна 20 МГц у вторинній 40 МГц пробита;

Режим 6 вказує на ситуацію, коли загальна смуга пропускання становить 160 (80+80) МГц, а вторинні 20 МГц із первинних 80 МГц пробиті. Крім того, немає особливих вимог до вторинних 80 МГц.

Режим 7 вказує на ситуацію, коли загальна смуга пропускання становить 160 (80+80) МГц, а первинні 40 МГц з первинних 80 МГц є вільними. Цей режим охоплює також інші три випадки, що відповідають основному стану.

2.2.3 Оновлена структура фрейму (HE-PPDU)

Для забезпечення підтримки різних технологій і сценаріїв IEEE 802.11ax представляє нові формати структури кадру даних, які називаються HE – High Efficiency, або високоефективні фрейми.

2.2.3.1 Формат HE SU PPDU

HE SU PPDU (High Efficiency Single-User Protocol Data Unit) – це формат для одного користувача, формат структури пакету між точкою доступу і одним окремим клієнтом, а також між двома окремими клієнтами. На рисунку 2.11 зображено структуру такого пакета.

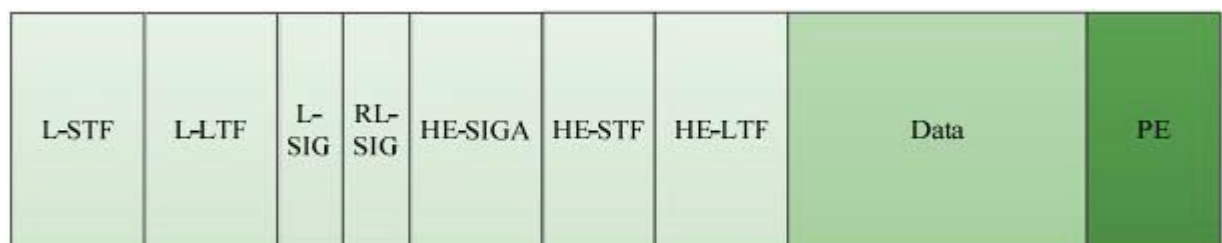


Рис. 2.11 – HE SU PPDU формат

Порівняно з IEEE 802.11ac, HE SU PPDU представляє повтор L-SIG (Repeat Legacy Signal Field, RL-SIG), який використовується для підвищення надійності передачі L-SIG і застосовується для підтвердження того, що кадр є форматом High Efficiency шляхом автоматичного розпізнавання. Розширення пакета (Packet Extension, PE) збільшує час обробки даних одержувачем.

2.2.3.2 Формат HE MU PPDU

HE MU PPDU (High Efficiency Multi-User Protocol Data Unit) – формат для декількох користувачів. Він забезпечує одночасну передачу між кількома користувачами через OFDMA з або без застосування MU-MIMO. На основі формату для одного користувача, як показано на рисунку 2.12, додається поле HE-SIG-B, щоб вказати інформацію про розподіл ресурсів для кількох користувачів.

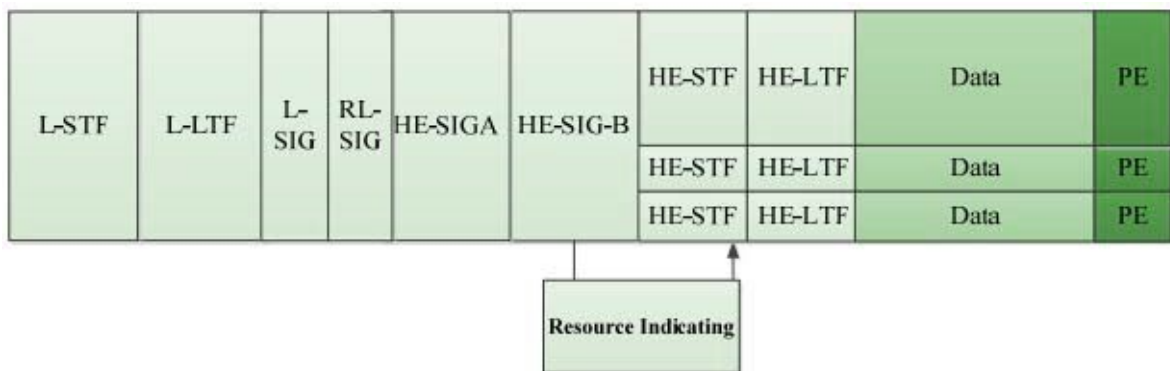


Рис. 2.12 – HE MU PPDU формат

2.2.3.3 Формат HE TB PPDU

HE TB PPDU – High Efficiency Trigger-Based Protocol Data Unit.

Після отримання кадру тригера декілька клієнтів одночасно передають кадри висхідної трансляції відповідно до інформації про розподіл ресурсів у

кадрі тригера. Таким чином, формат висхідної багатокористувацької передачі називається форматом на основі тригера, як показано на рисунку 2.13.

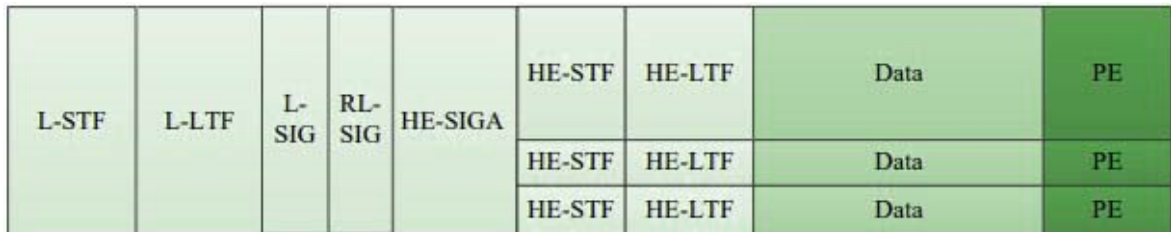


Рис. 2.13 – HE TB PPDU формат

У порівнянні з HE MU PPDU цей формат не має HE-SIG-B, оскільки точка доступу безпосередньо вказує інформацію про розподіл ресурсів у кадрі тригера.

2.2.3.4 Формат HE ER SU PPDU

HE ER SU PPDU – High Efficiency Extended Range Protocol Data Unit

Щоб підвищити надійність передачі у сценаріях поза приміщенням, кадр IEEE 802.11ax повторює поле HE-SIGA, безпосередньо розширюючи два символи до чотирьох символів, як показано на рисунку 2.14.

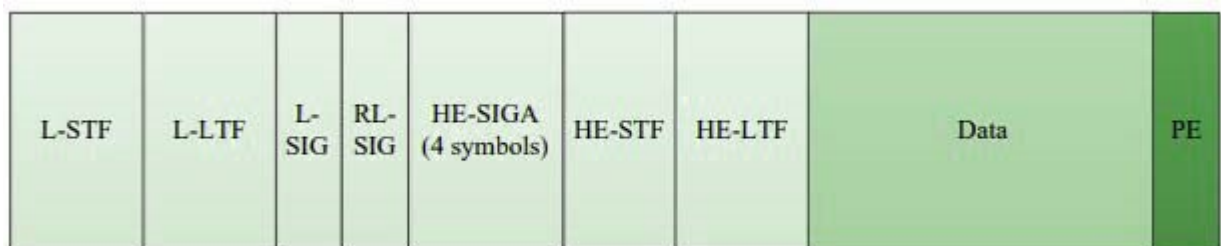


Рис. 2.14 – HE ER SU PPDU формат

Таким чином, IEEE 802.11ax посилює передачу традиційної преамбули (HE-SIGA), HE-STF і HE-LTF для подальшого розширення покриття передачі.

Нарешті, діапазон передачі поля даних може бути розширений за допомогою вузькосмугової передачі із подвійною модуляцією підносійної (Resource Unit Dual Sub-Carrier Modulation, RU-DCM).

Таким чином, для застосування нових та покращених методів та технологій, що вводить стандарт IEEE 802.11ax необхідне використання нових форматів кадрів. Якщо клієнтський пристрій не підтримує стандарт IEEE 802.11ax та не може інтерпретувати нові формати кадрів, то він просто проігнорує оновлені поля та буде працювати в режимі сумісності, як у звичайній IEEE 802.11ac мережі.

2.2.4 Вищі модуляційно-кодові схеми

Для підвищення SINR і надійності передачі, IEEE 802.11ax вводить модуляцію подвійної підносійної (DCM), що дозволяє модулювати інформацію одразу в парі підносійних. У DCM, щоб зменшити відношення пікової до середньої потужності (PAPR), інформація чергується на парі підносійних.

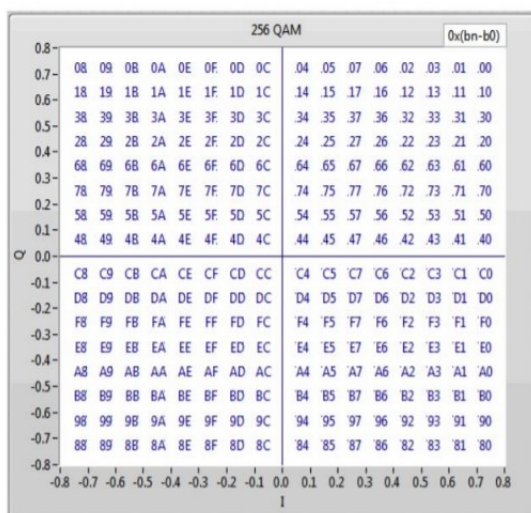
У стандарті IEEE 802.11ax модуляція подвійної підносійної використовується лише із модуляційно-кодovими схемами MCS 0, MCS 1, MCS 3 та MCS 4 та не більше а ніж із двома просторовими потоками так як її було розроблено із метою підвищення надійності передачі, а не для високої пропускної здатності. Головна область застосування технології – передача даних на відкритих просторах, тобто поза приміщеннями на велику відстань.

Таким чином, застосовуючи модуляцію подвійної підносійної разом із модуляційно-ковою схемою MCS 0 можна зменшити коефіцієнт бітової помилки на 3,5 дБ. Виходячи із цього, модуляція подвійної підносійної дозволяє суттєво збільшити надійність зв'язку поза приміщенням та висхідної передачі, а також зменшити втрату пакетів даних.

У бездротових мережах для передачі повідомлення через радіоканал, необхідно надіслати аналоговий сигнал, оскільки немає прямого способу передачі двійкових даних. Цей аналоговий сигнал складається з двох частин, відомих як амплітуда (потужність сигналу) і квадратура (зсув сигналу від контрольної точки). Контролюючи квадратуру та амплітуду, можна ефективно передавати цифрові дані аналоговим сигналом.

Схема квадратурно-амплітудної модуляції 256-QAM, яка використовується в IEEE 802.11ac, розділяє амплітуду та квадратуру на 16 попередньо визначених рівнів. Це дає загалом 256 (16×16) можливих комбінацій передачі та дозволяє передати до 8 біт на один радіо-символ ($2^8 = 256$). Передавачі та приймачі зазнали значного вдосконалення з моменту впровадження IEEE 802.11ac, отож тепер можна призначати більш точні значення для передачі. Замість того, щоб ділити квадратуру й амплітуду передачі на 16 можливих значень, IEEE 802.11ax може розділити її на 32 рівні. Це дає 1024 (32×32) можливих передачі (комбінацій) та до 10 біт на радіо-символ.

11ac – 256QAM
8bits / symbol



11ax – 1024 QAM
10 bits / symbol

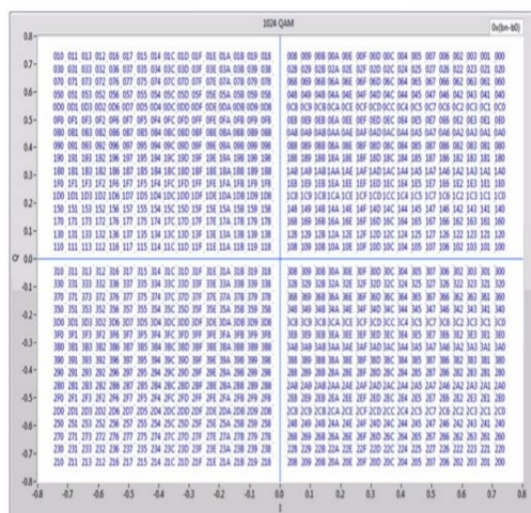


Рис. 2.15 – Таблиці модуляції 256-QAM та 1024-QAM

Тому, запровадивши 1024-QAM у IEEE 802.11ах можна досягти 25% приросту теоретичної максимальної швидкості передачі порівняно з IEEE 802.11аc у діапазоні високих SNR. Разом із прийняттям детальнішого поділу підносійних, а також використанням багатопотоковості із оновленим захисним інтервалом, мережі стандарту IEEE 802.11ах досягають максимальної швидкості передачі 9607,8 Мбіт/с або 9,6 Гбіт/с.

Наступні таблиці показують можливі модуляційно-кодові схеми для IEEE 802.11ах та мінімальне значення сили сигналу для їх застосування.

Таблиця 2.3

Модуляційно-кодові схеми IEEE 802.11ах для одного просторового потоку

HE-MCS Index	DCM	Modulation	R	N_{BPSCS}	N_{SD}	N_{CBPS}	N_{DBPS}	Data rate (Mb/s)				
								0.8 μ s GI	1.6 μ s GI	3.2 μ s GI		
0	1	BPSK	1/2	1	490	980	490	36.0	34.0	30.6		
	0		1/2					980	1 960	980	72.1	68.1
1	1	QPSK	1/2	2	490	1 960	980	72.1	68.1	61.3		
	0		1/2					980	3 920	1 960	144.1	136.1
2	N/A		3/4		980	3 920	2 940	216.2	204.2	183.8		
3	1	16-QAM	1/2	4	490	3 920	1 960	144.1	136.1	122.5		
	0		1/2					980	7 840	3 920	288.2	272.2
4	1	16-QAM	3/4	4	490	3 920	2 940	216.2	204.2	183.8		
	0		3/4					980	7 840	5 880	432.4	408.3
5	N/A	64-QAM	2/3	6	980	11 760	7 840	576.5	544.4	490.0		
6			3/4					8 820	648.5	612.5	551.3	
7			5/6					9 800	720.6	680.6	612.5	
8		256-QAM	3/4	8				15 680	11 760	864.7	816.7	735.0
9			5/6						13 066	960.7	907.4	816.6
10		1024-QAM	3/4	10				19 600	14 700	1 080.9	1 020.8	918.8
11			5/6						16 333	1 201.0	1 134.3	1 020.8

Таблиця 2.4

Мінімальна сила отриманого сигналу для застосування схеми

Modulation		Rate (R)	Minimum sensitivity (20 MHz PPDU) (dBm)	Minimum sensitivity (40 MHz PPDU) (dBm)	Minimum sensitivity (80 MHz PPDU) (dBm)	Minimum sensitivity (160 MHz or 80+80 MHz PPDU) (dBm)
Without DCM	With DCM					
N/A	BPSK	1/2	-82	-79	-76	-73
BPSK	QPSK	1/2	-82	-79	-76	-73
QPSK	16-QAM	1/2	-79	-76	-73	-70
QPSK	16-QAM	3/4	-77	-74	-71	-68
16-QAM	N/A	1/2	-74	-71	-68	-65
16-QAM	N/A	3/4	-70	-67	-64	-61
64-QAM	N/A	2/3	-66	-63	-60	-57
64-QAM	N/A	3/4	-65	-62	-59	-56
64-QAM	N/A	5/6	-64	-61	-58	-55
256-QAM	N/A	3/4	-59	-56	-53	-50
256-QAM	N/A	5/6	-57	-54	-51	-48
1024-QAM	N/A	3/4	-54	-51	-48	-45
1024-QAM	N/A	5/6	-52	-49	-46	-43

Скорочення, що застосовано у таблицях:

- ✓ R – порядок кодування;
- ✓ NBPSCS – к-сть кодованих бітів на підносійну на просторовий потік;
- ✓ NSD – кількість підносних даних;
- ✓ NCBPS – кількість кодованих бітів на символ;
- ✓ NDBPS – кількість біт даних на символ;
- ✓ GI - захисний інтервал.

Таким чином, у новому стандарті є підтримка усіх модуляційно-кодових схем, що використовувались раніше. Нові, вищі схеми квадратурно-амплітудної модуляції, можуть бути застосовані лише для випадків, коли потужність отриманого сигналу достатньо висока.

2.2.5 Механізми повторного використання спектру

Традиційно Wi-Fi використовує CSMA-CA (Carrier Sense with Multiple Access collision avoidance), щоб забезпечити передачу тільки однієї станції в каналі в будь-який момент часу. Коли радіостанція IEEE 802.11 чує преамбулу будь-якої іншої радіостанції з порогом виявлення сигналу 4 дБ (на 4 дБ вище, аніж визначений рівень шуму), вона відкладає свою передачу.

Такий механізм доступу до середовища стає великою проблемою у сценаріях щільного розгортання, коли навколо багато точок доступу або клієнтів на спільному каналі. Це явище сильно впливає на швидкість передачі даних. Усі відкладені передачі та очікування призводять до того, що швидкість передачі даних становить приблизно 55-65% [30] від можливої швидкості, а у деяких випадках середовище настільки завантажене, що стає проблемою навіть просто передати дані, не говорячи про швидкість. IEEE 802.11ax пропонує вирішення цієї проблеми, надавши кожній зоні обслуговування власний числовий ідентифікатор під назвою BSS Color. У реалізації протоколу він представляє собою 6-бітове поле даних High Efficiency кадру, що може приймати значення у діапазоні від 1 до 63. Колір зони допомагає станції в ідентифікації зони обслуговування, з якої походить пакет даних, для того щоб станція використовувала середовище максимально ефективно і, за можливості, передавала одночасно із іншими станціями.

Коли колір визначено, якщо він походить від того самого BSS, то передача відкладається. Якщо пакет належить іншій BSS, береться до уваги значення RSSI. Якщо RSSI менший за певний попередньо визначений поріг, тоді відбувається передача; якщо RSSI перевищує порогове значення (між BSS), то передачу буде відкладено. Таким чином, реалізується одномоментний множинний доступ до середовища в умовах високої щільності розгортання, у випадках коли будуть визначені відповідні порогові рівні сигналів та за певних умов це частково вирішує проблему прихованого вузла.

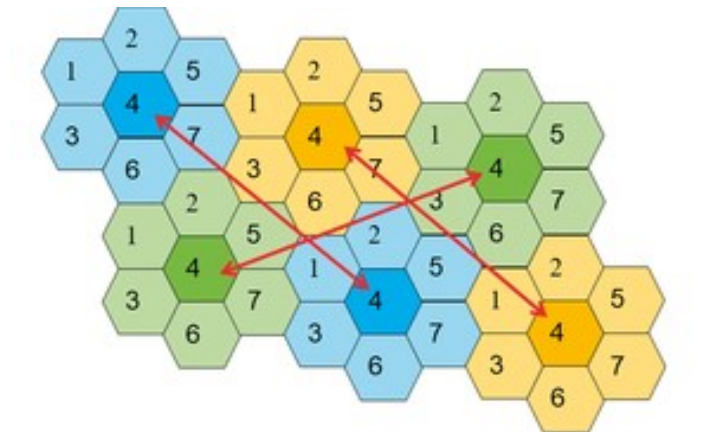


Рис 2.16 – BSS Coloring

Алгоритм прийняття рішень щодо ідентифікації пакетів виглядає так:

- станція виявляє радіопередачу;
- використовуючи адаптивний механізм оцінювання чистоти каналу визначає потужність прийнятого сигналу;
- якщо потужність більша за пороговий рівень (наприклад -82 дБм), то станція спробує демодулювати сигнал;
- у випадку успішної демодуляції буде зчитаний заголовок кадру;
- із заголовку виявляється ідентифікатор (колір) зони обслуговування;
- якщо колір співпадає – це кадр всередині зони і відбувається звичайних процес CSMA/CA;
- якщо колір не співпадає із власним – це кадр між зонами;
- на цьому етапі перевіряється потужність сигналу та визначається, чи є його рівень вищим за -62 дБм;
- якщо рівень вище, то вважається що середовище зайняте;
- якщо рівень нижчий, то середовище вважається вільним.

Таблиця 2.5 відображає можливі випадки, які описані в стандарті IEEE 802.11ax для ідентифікації пакетів як із зовнішньої або внутрішньої зон обслуговування. Крім того, якщо IEEE 802.11ax точка доступу отримує пакет, що не відповідає HE PPDU (тобто застарілий PPDU) або пакет HE MU PPDU, вона може ідентифікувати пакет як із зовнішньої зони обслуговування,

оскільки його власна зона обслуговування не надсилатиме MU PPDU пакет без тригера від самої точки доступу.

Таблиця 2.5

Можливі умови визначення походження пакету

Determination Conditions		Intra-BSS	Inter-BSS
BSS color in the received frame		same as the BSS color announced by the AP with which the STA is associated	not 0 and not matching the BSS color announced by the AP with which the STA is associated
RA field, TA field, or BSSID field of the received frame		same as the BSSID of the AP with which the STA is associated	none of the address fields match the BSSID of the AP with which the STA is associated
Partial AID	Case 1: group ID = 0	partial AID same as the BSSID[39:47] of the AP with which the STA is associated	different from the BSSID[39:47] of the AP with which the STA is associated
	Case 2: group ID = 63	same as the partial BSS color announced by the AP with which the STA is associated when the partial BSS color field in the most recently received HE operation element is 1	different from the partial BSS color announced by the AP with which the STA is associated when the partial BSS color field in the most recently received HE operation element is 1
RA field of a control frame that does not have a TA field		matches the saved TXOP holder address for the BSS with which it is associated	—————
Multiple BSSID		the RA field, TA field, or BSSID field of the received frame is same as the BSSID of any member of the multiple BSSID set a control frame that does not have a TA field, and the RA matches the saved TXOP holder address for a BSS that is a member of the multiple BSSID set	the BSSID field of the received frame does not match the BSSID of any member of the multiple BSSID set none of the address fields of the received frame match the BSSID of any member of the multiple BSSID set partial AID is different from the BSSID[39:47] of any member of the multiple BSSID set
MU PPDU received by AP		—————	An HE AP receives either a VHT MU PPDU or an HE MU PPDU

У випадку, коли відбувається конфлікт кольорів BSS – подія, коли два або більше сусідніх BSS мають однаковий колір BSS, точка доступу дізнається

про це двома способами: по-перше, коли точка доступу отримує пакет від зовнішньої зони і виявляє, що її власна BSS та зовнішня мають однаковий колір; по-друге, коли клієнт у своїй власній зоні обслуговування BSS повідомляє, що інша BSS і його власна BSS мають однаковий колір. Таким чином, коли клієнти виявляють, що інша BSS має той самий колір, що й їх власна BSS, їм потрібно надіслати кадр звіту про подію до своєї точки доступу. Звіт містить інформацію про колір усіх інших BSS, виявлених клієнтом. Це допомагає його власній точці доступу обчислити та оновити колір BSS. Коли конфлікт кольорів BSS триває протягом певного періоду часу, визначеного стандартом, точка доступу має ініціювати процес зміни власного кольору BSS.

Слід зазначити, що коли одна точка доступу використовує декілька ідентифікаторів BSSID, усі віртуальні точки доступу, розгорнуті в одній фізичній точці доступу, повинні використовувати однаковий колір BSS, щоб запобігти виникненню повторного використання середовища в одній фізичній точці доступу.

2.2.6 MU-MIMO

Технологія MU-MIMO (Multi-User Multi In Multi Out) використовує просторове мультиплексування з незалежними потоками даних в одній смузі пропускання, де кожен потік даних передається декількома антенами з визначеною фазою. Таким чином, технологія дозволяє точці доступу обмінюватися даними з декількома клієнтами одночасно. Також, технологія має можливість формування просторових потоків, що дозволяє фізично направити випромінювання передатчика у напрямку клієнта. Розрізняють MU-MIMO низхідної лінії зв'язку – DL MU-MIMO і висхідної лінії зв'язку – UL MU-MIMO.

Для низхідної лінії зв'язку (від точки доступу до клієнта) було реалізовано підтримку 4x4 MU-MIMO вже у стандарті IEEE 802.11ac Wave 2 (Wi-Fi 5). IEEE 802.11ax підтримує низхідну лінію 8x8 MU-MIMO, тобто до восьми просторових потоків за допомогою восьми антен, що забезпечує більшу пропускну здатність. Проте, далеко не всі точки доступу підтримують 8 просторових потоків, а більшість – тільки 4. Клієнтські пристрої, зазвичай, підтримують 2 просторових потоки. Додаткове значне підвищення пропускну здатності досягається за допомогою технології OFDMA у поєднанні з MU-MIMO, що дозволяє розподілити окремі ресурсні одиниці за просторовими потоками у багатокористувальницькому режимі. Нововведенням, порівняно з попередніми стандартами, IEEE 802.11ax є підтримка висхідного MU-MIMO – UL MU-MIMO, у якій дані передаються кількома просторовими потоками від клієнтів до точки доступу. Завдяки реалізації цих функцій в поєднанні із OFDMA та BSS Coloring ефективність передачі в багатокористувацьких сценаріях одночасної роботи значно підвищується, а затримки значно зменшуються [31]. Окрім того, формування направлених просторових потоків дозволяє значно зменшити внесок до інтерференції, чим підвищує ефективність роботи у сценаріях із високою щільністю розгортання.

На рисунку 2.17 зображено формування просторових потоків:

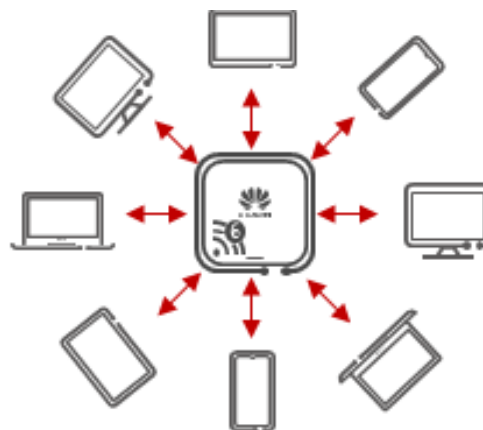


Рис. 2.17 – Формування просторових потоків для різних клієнтів

На рисунку 2.18 наочно порівняно застосування SU-MIMO із MU-MIMO та комбінацією MU-MIMO + OFDMA:

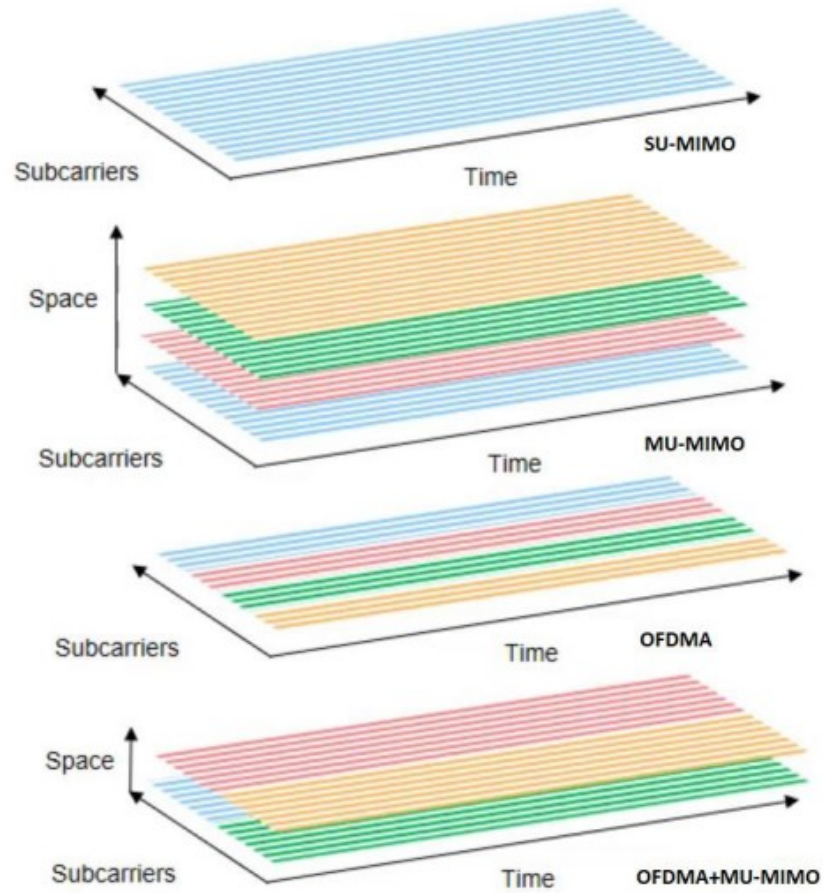


Рис. 2.18 – Застосування MIMO та OFDMA

2.2.7 TWT

Старіші мобільні пристрої стандартів IEEE 802.11 мали функцію U-APSD (Unscheduled-Automatic Power Save Delivery), що допомагала їм економити енергію, відключаючи радіомодулі бездротових мережевих адаптерів у той час, коли вони не використовуються. Для її реалізації використовувався буфер даних із відкладеною передачею. Точка доступу сигналізувала про наявність даних у буфері через періодичні сповіщення TIM (Traffic Identification Message). Це дозволяє клієнту вимикати свою

радіостанцію для економії енергії, періодично вмикаючи її для отримання сповіщень чи даних. Недоліком цієї функції є те, що доводиться вмикати радіостанцію для отримання сповіщень надто часто як для пристроїв Інтернету речей, яким доступ до мережі може бути потрібен суттєво рідше.

IEEE 802.11ax має новий механізм планування ресурсів у складі OFDMA. У новій функції TWT – Target Wake Time (Цільовий Час Пробудження) потреба в частій передачі кадрів-сповіщень суттєво зменшується. За допомогою кадрів налаштування TWT між клієнтом і точкою можна узгодити запланований розклад TWT. Кожний клієнт може мати до 8 запланованих пробуджень для різних типів трафіку. Стандартом також передбачена розширена неузгоджена можливість планування розкладу TWT. Точка доступу формує розклад пробудження та доставляє його клієнтам під час ширококомовної процедури TWT. Клієнту що запитує TWT, буде призначено конкретний час пробудження і зв'язку, тоді клієнт, що запитує, вийде з режиму сну, обмінюється кадрами із точкою доступу і оновить інформацію про розклад пробудження, а точка доступу, у свою чергу, оновить розклад відповіді. Коли використовується явний TWT, клієнт отримує конкретний розклад. Якщо використовується неявна TWT, клієнт обчислює наступний сеанс TWT, додаючи фіксоване значення до поточного значення TWT.

На рисунку 2.19 зображено алгоритм роботи механізму TWT. Точка доступу – AP. Клієнти – STA 1 і STA 2. Точка доступу для планування TWT включає ширококомовний елемент TWT у кадрі-маяку. Цей кадр-маяк вказує на трансляцію TWT під час або після якої точка доступу має намір надіслати тригерні кадри до STA із розкладом. Клієнти STA 1 і STA 2 прокидаються, щоб отримати маяк і визначити ширококомовний TWT. Під час TWT SP (період обслуговування) точка доступу надсилає кадр тригера. STA1 і STA2 відповідають, вказуючи, що вони активні. STA1 вказує, що він активний, надсилаючи PS-Poll (опитування в режимі енергозбереження), а STA 2 вказує,

що він активний, надсилаючи нульовий кадр QoS (Якість обслуговування). Клієнти STA 1 і STA 2 отримують свої блоки низхідної лінії зв'язку (DL MU PPDU) у подальшому обміні з точкою доступу, надсилають підтвердження та переходять у режим сну [26].

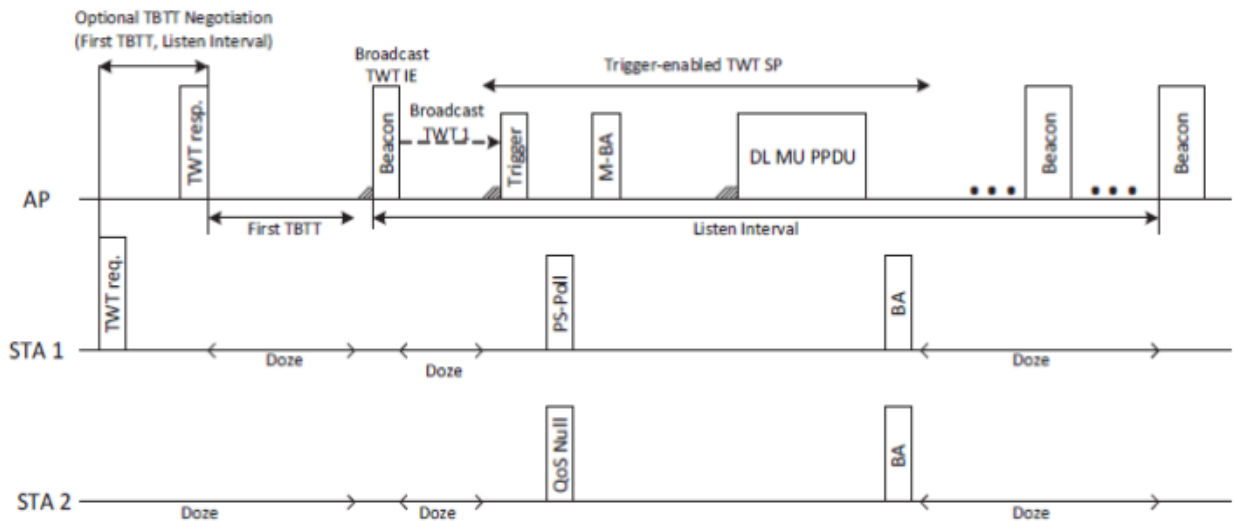


Рис. 2.19 – TWT алгоритм

Використання механізму цільового часу пробудження обіцяє значну економію енергії. Деякі виробники заявляють про збільшення терміну служби батареї до 700%.

2.3 Огляд програмного та апаратного комплексу для дослідження

Для проведення досліджень експлуатаційних характеристик мережі IEEE 802.11ax та безпосереднього порівняння їх із IEEE 802.11ac було використано два методи – моделювання та експеримент. Використання двох методів також дозволило визначити точність розрахункових експлуатаційних характеристик.

2.3.1 Ekahau AI Pro

Для проведення моделювання та визначення розрахункових експлуатаційних характеристик мереж на базі стандартів IEEE 802.11ах та IEEE 802.11ас було використано спеціалізоване програмне забезпечення Ekahau AI Pro.

Програмний продукт Ekahau AI Pro представляє собою потужний інструмент для моделювання та проектування будь-яких за складністю та масштабом бездротових локальних мереж. Програмне забезпечення містить відповідні моделі та алгоритми для розрахунку експлуатаційних характеристик мереж, що працюють за стандартами IEEE 802.11 a/b/g/n/ac/ax в діапазонах 2,4, 5 та 6 ГГц.

Продукт має вбудований комплекс штучного інтелекту для автоматичного прорахунку каналів для точок доступу та їх розміщення.

Програмне забезпечення дозволяє моделювати мережі у заданих фізичних умовах та будувати для них теплові карти покриття, швидкості передавання даних та пропускної здатності, завантаженості середовища тощо. Із застосуванням відповідного спеціалізованого апаратного забезпечення у продукті також є можливість виконувати радіообстеження об'єктів та спектральний частотний аналіз. Проте, продукт дозволяє виконати базове обстеження середовища навіть із використанням звичайного Wi-Fi адаптера [32].

2.3.2 iPerf

Для визначення експлуатаційних характеристик мереж у ході експериментального дослідження було використано iPerf3.

iPerf – це застосунок для виконання вимірювань швидкості передавання даних у мережах, розроблений The Energy Sciences Network /Lawrence Berkeley National Laboratory [33]. Застосунок дозволяє вимірювати максимально досягну пропускну здатність мереж в обох напрямках передачі.

iPerf3 для платформи Windows виконаний у вигляді консольного застосунку. Для налаштування параметрів запуску використовується набір ключів, перелік найважливіших зі них та їх призначення наведено нижче:

- -s: iperf 3 (в режимі сервера);
- -c: (режим клієнта);
- -t: (налаштування часу для передачі або отримання);
- -w: (налаштування розміру вікна TCP, більші вікна можуть розвинути більшу пропускну здатність);
- -r: (реверсивний режим, де сервер надсилає, а клієнт отримує);
- -i: (встановлення інтервалу звітів).

Зразок виконання вимірювання протягом 20 секунд у зворотному режимі із розміром вікна у 512 МБ та інтервалом в 1 секунду наведено на рисунку 2.20. Можна побачити, як для кожного інтервалу часу виводиться розмір переданих даних та еквівалентна пропускну здатність.

```

Connecting to host 192.168.50.41, port 5201perf>
Reverse mode, remote host 192.168.50.41 is sending
[ 4] local 192.168.50.138 port 49659 connected to 192.168.50.41 port 5201 (ct=5.41 ms)
[ ID] Interval      Transfer      Bandwidth
[ 4] 0.00-1.00    sec  75.4 MBytes  632 Mbits/sec
[ 4] 1.00-2.00    sec  75.4 MBytes  632 Mbits/sec
[ 4] 2.00-3.00    sec  79.7 MBytes  668 Mbits/sec
[ 4] 3.00-4.00    sec  77.4 MBytes  649 Mbits/sec
[ 4] 4.00-5.00    sec  74.0 MBytes  621 Mbits/sec
[ 4] 5.00-6.00    sec  76.7 MBytes  644 Mbits/sec
[ 4] 6.00-7.00    sec  75.1 MBytes  630 Mbits/sec
[ 4] 7.00-8.00    sec  77.2 MBytes  647 Mbits/sec
[ 4] 8.00-9.00    sec  71.3 MBytes  598 Mbits/sec
[ 4] 9.00-10.00   sec  72.2 MBytes  606 Mbits/sec
[ 4] 10.00-11.00  sec  72.3 MBytes  606 Mbits/sec
[ 4] 11.00-12.00  sec  79.9 MBytes  670 Mbits/sec
[ 4] 12.00-13.00  sec  73.0 MBytes  612 Mbits/sec
[ 4] 13.00-14.00  sec  76.2 MBytes  639 Mbits/sec
[ 4] 14.00-15.00  sec  72.4 MBytes  607 Mbits/sec
[ 4] 15.00-16.00  sec  70.6 MBytes  592 Mbits/sec
[ 4] 16.00-17.00  sec  72.0 MBytes  603 Mbits/sec
[ 4] 17.00-18.00  sec  74.5 MBytes  626 Mbits/sec
[ 4] 18.00-19.00  sec  74.7 MBytes  626 Mbits/sec
[ 4] 19.00-20.00  sec  76.9 MBytes  646 Mbits/sec
-----
[ ID] Interval      Transfer      Bandwidth
[ 4] 0.00-20.00   sec  1.47 GBytes  630 Mbits/sec
[ 4] 0.00-20.00   sec  1.47 GBytes  630 Mbits/sec
sender
receiver
iperf Done.

```

Рис. 2.20 – Приклад застосування iPerf3

Середня пропускна здатність протягом всього часу замірювання виводиться після інтервального звіту. Окрім того, утиліта iPerf3 дозволяє вимірювати затримку при передачі пакетів UDP.

2.3.3 Cisco Catalyst 9115AXI

Для виконання експериментальних досліджень було побудовано тестову мережу відповідно до змодельованої на базі точки доступу Cisco Catalyst 9115AXI, зовнішній вигляд якої представлено на рисунку 2.21.



Рис. 2.21 – Cisco Catalyst 9115AXI

Використана точка доступу представляє собою продукт із актуальної лінійки точок доступу Cisco. Вона має підтримку стандартів IEEE 802.11ax, IEEE 802.11ac та IEEE 802.11n [34].

Точка доступу має вбудовану всенаправлену антену, діаграма випромінювання якої представлена на рисунку 2.22, та призначена для розміщення на стелі у приміщеннях. Для з'єднання із дротовою мережею має інтерфейс Ethernet 2.5Гбіт/с. Також точка доступу має вбудований контролер бездротової мережі, що дозволяє не використовувати фізичний контролер у невеликих за кількістю точок доступу мережах.

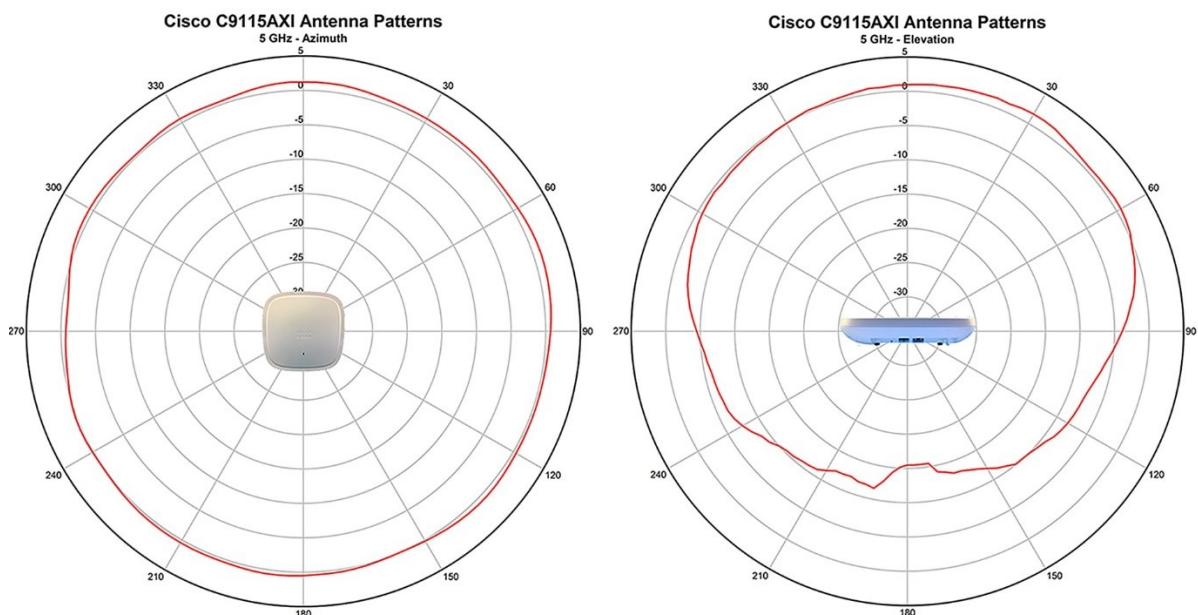


Рис. 2.22 – Діаграма направленості вбудованої антени 5ГГц

Технічні характеристики точки доступу при роботі за стандартом IEEE 802.11ac наведено нижче:

- 4x4 MU-MIMO із 4 просторовими потоками;
- 802.11ac формування просторових потоків;
- 20-, 40-, 80-, та 160-МГц канали;
- PHY data rates до to 3.47 Гбіт/с (160 МГц на 5 ГГц).

Технічні характеристики точки доступу при роботі за стандартом IEEE 802.11ax наведено нижче:

- 4x4 MU-MIMO із 4 просторовими потоками;
- UL/DL OFDMA;
- TWT
- BSS Coloring;
- 802.11ax формування просторових потоків;
- 20-, 40-, 80-, та 160-МГц канали;
- PHY data rates до 5.38 Гбіт/с (160 МГц на 5 ГГц та 20 МГц на 2.4 ГГц).

2.3.4 Acer Aspire 5 A515

У якості клієнтських пристроїв для експериментальних вимірювань експлуатаційних характеристик було використано низку ідентичних ноутбуків Acer Aspire 5 A515. Відносно до випробувань, найважливішим технічним критерієм цього пристрою є Wi-Fi модуль Intel AX201 із підтримкою IEEE 802.11ax. Ноутбук має антену 2x2, тобто підтримує MU-MIMO 2x2.

Зовнішній вигляд ноутбуку наведено на рисунку 2.23:



Рис. 2.23 – Acer Aspire 5 A515

Технічні характеристики ноутбуку [35]:

- процесор – AMD Ryzen 5 5500U (2.1 – 4.0 ГГц);
- графічний процесор – AMD RX640;
- оперативна пам'ять – 8ГБ, DDR4;
- SSD 512 ГБ;
- Wi-Fi модуль Intel AX201;
- 1 Гбіт/с Ethernet.

Технічні характеристики мережевого контролеру Intel AX201 [36]:

- підтримка антени 2x2;
- MU-MIMO;
- підтримка IEEE 802.11ax;
- максимальна швидкість – 2,4 Гбіт/с (160 МГц на 5 ГГц).

2.4 Моделювання та отримання розрахункових характеристик

Одним із методів дослідження було обрано метод моделювання. Тестова мережа була спроектована у середовищі Ekahau AI Pro, там же змодельовано її розрахункові експлуатаційні характеристики.

Перед початком моделювання мережі було створено схематичний план аудиторії, де буде розгортатися тестова мережа. На плані окреслено розміри аудиторії та стіни, а також визначено розміщення клієнтських пристроїв (зелені комірки).

Також, перед початком моделюванням було визначено деякі необхідні фізичні параметри приміщення, що моделюється, а саме загасання сигналу у проміжній стіні, що становить 9 дБ, а також рівень шуму у діапазоні 5 ГГц, що становить -92 дБм (рисунок 2.24).

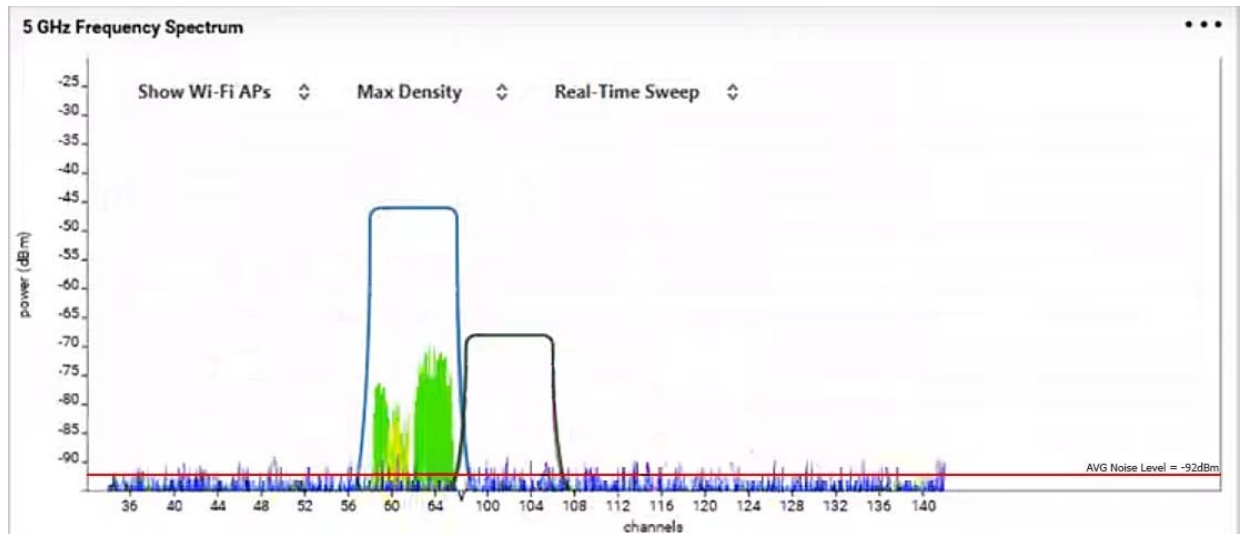


Рис. 2.24 – Вимірювання рівню шуму у діапазоні 5 ГГц

Для тестування було вирішено використати 42 клієнтських пристрої, що цілком відповідає визначенню мережі високої щільності, а саме на 28 кв. метрів активної зони (де безпосередньо розміщено клієнтські пристрої) маємо 42 клієнти, тобто співвідношення кількості клієнтів до площі дорівнює 1.5, що є суттєво більшим за одиницю значенням. Виходячи із описаної раніше класифікації мереж, така мережа є високощільною.

Для створення проекту мережі та її моделі, першим кроком завантажуюмо схематичний план приміщення та визначаємо його масштаб для правильного розрахунку розмірів (рисунок 2.25).

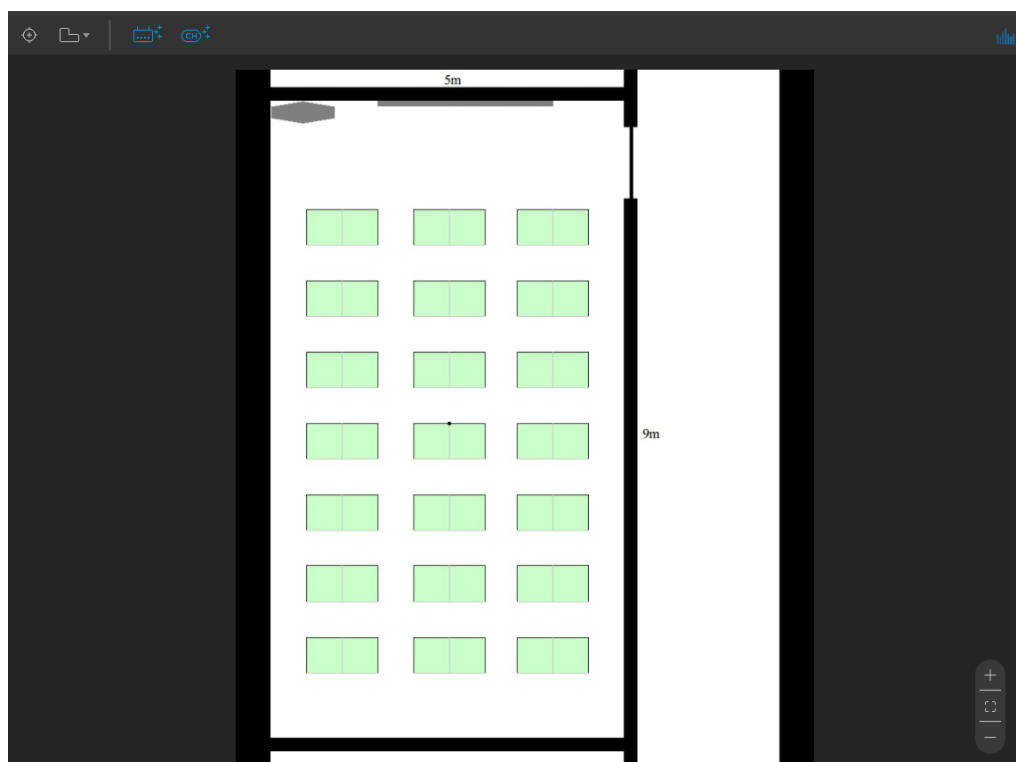


Рис. 2.25 – План приміщення

Наступним кроком визначаємо зону, що повинна обслуговуватися мережею (рисунок 2.26).

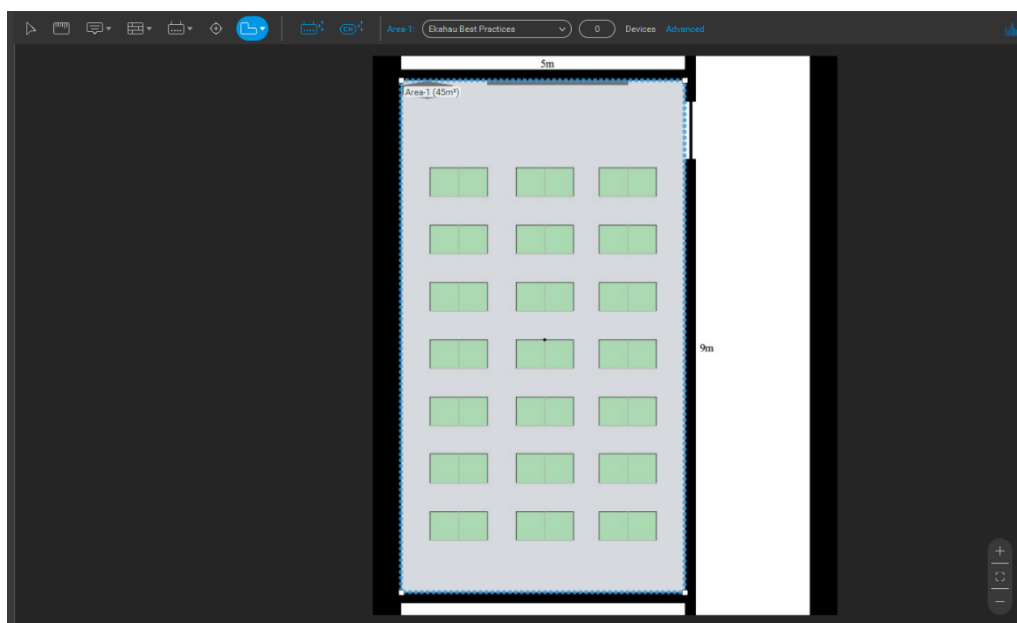


Рис. 2.26 – Зона обслуговування

Наступним кроком конфігуруємо точку доступу: IEEE 802.11ac, 36 канал, 20МГц, 25 мВт потужність випромінювання (рисунок 2.27).

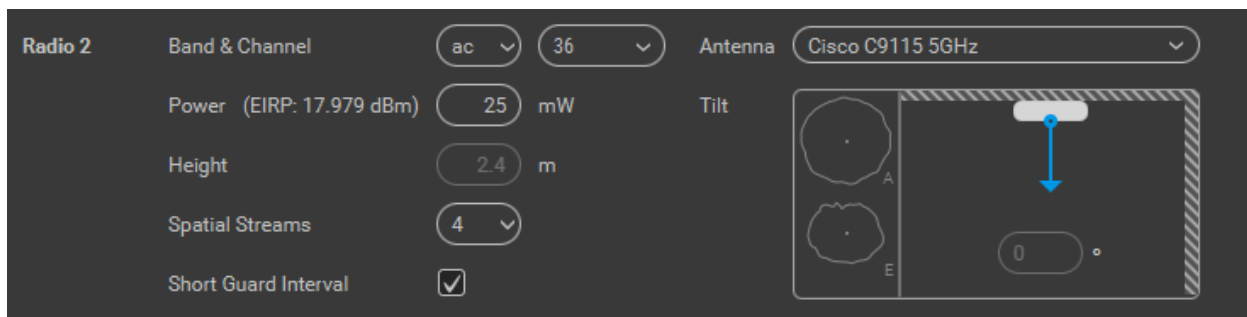


Рис. 2.27 – Конфігурація точки доступу

Розміщуємо точку доступу у центрі зони обслуговування (рисунок 2.28).

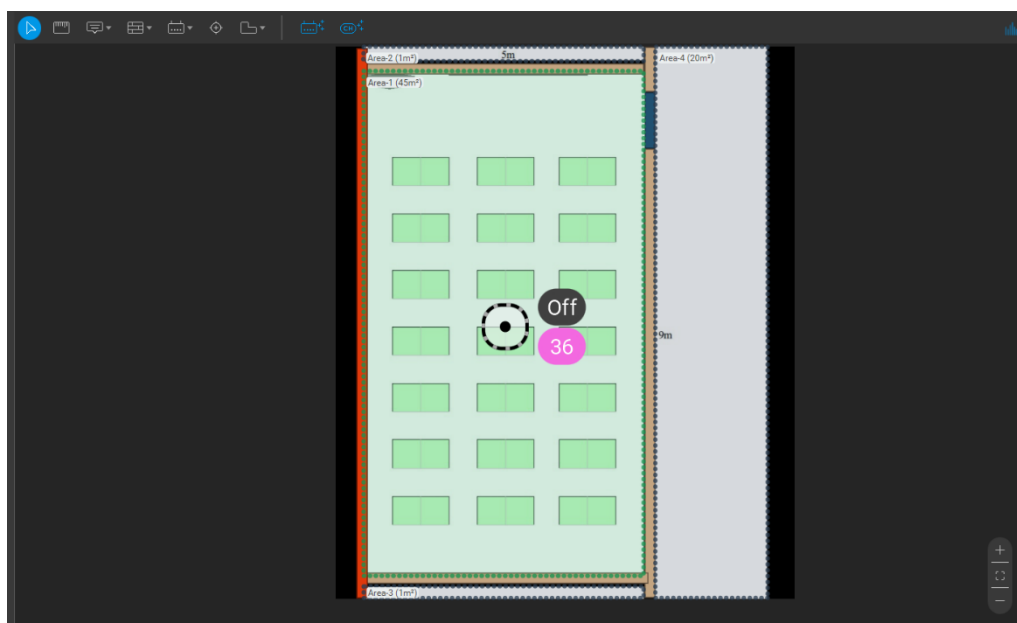


Рис. 2.28 – Розміщення точки доступу

Визначимо розрахункову потужність сигналу покриття у зоні обслуговування (рисунок 2.29).

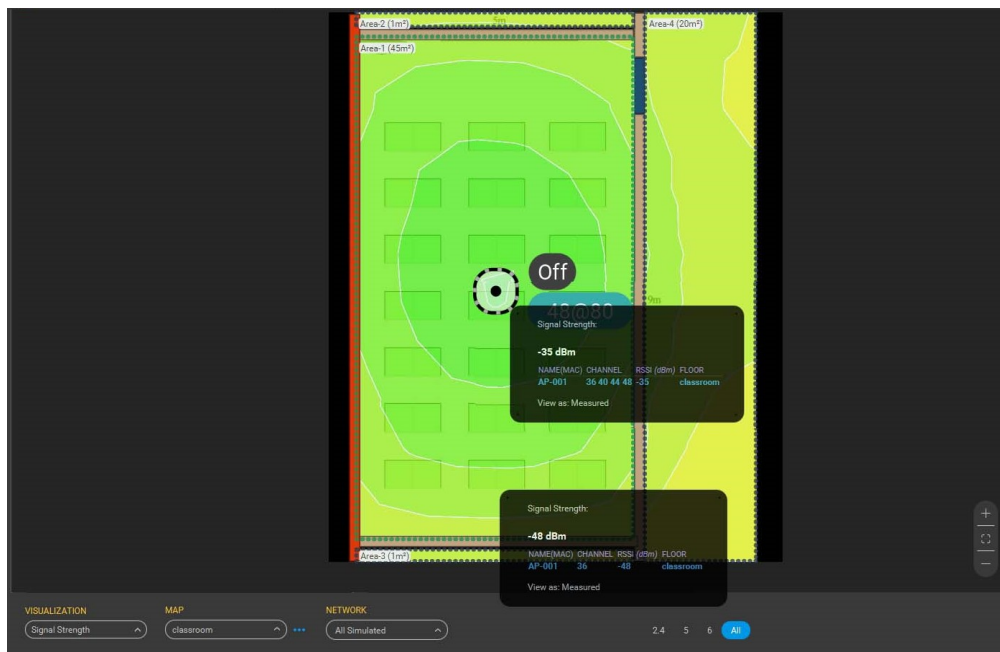


Рис. 2.29 – Визначення потужності сигналу

За даними розрахунків середовища моделювання маємо розрахункову мінімальну потужність у -48 дБм та максимальну у -35 дБм, а зниження потужності при збільшенні відстані характеризується як рівномірне. Варто зазначити, що мінімальним пороговим значенням для визначення сигналу як відмінного є позначка у -67 дБм. Тобто, у розрахунковій зоні обслуговування маємо відмінний сигнал, що дозволяє компенсувати можливу різницю між фактичною та розрахунковою чутливостями приймача клієнта.

Далі визначаємо розрахункову максимальну швидкість передавання даних для зони обслуговування використовуючи канал 20 МГц (рисунок 2.30).

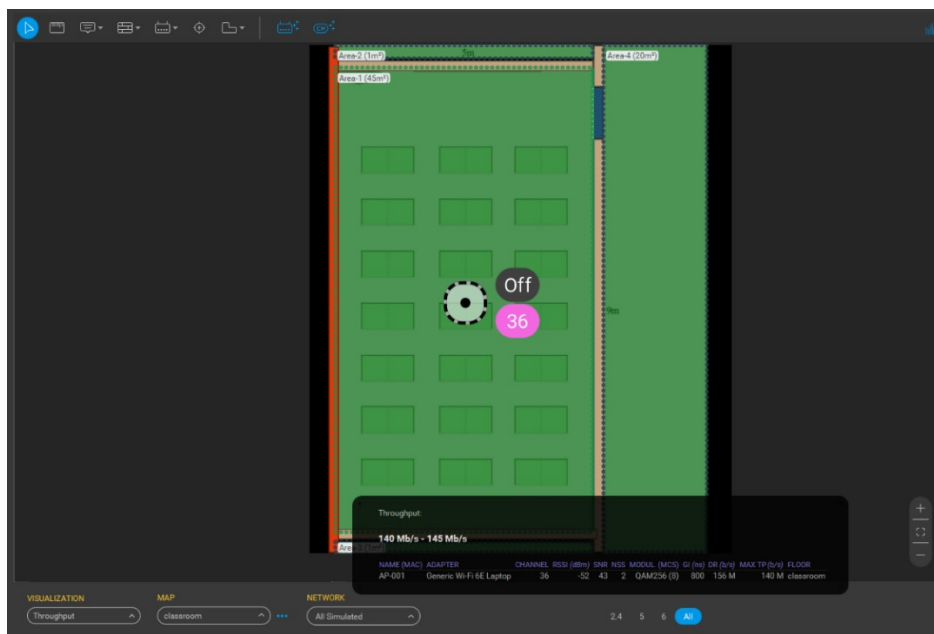


Рис. 2.30 – Визначення максимальної швидкості передавання (20 МГц)

За даними розрахунків отримуємо максимальну швидкість передавання даних для одного клієнта на рівні 140 – 145 Мбіт/с. Відповідно, на кожного із 42 клієнтів отримуємо 3,3 – 3,4 Мбіт/с при повному завантаженні каналу передачі.

Аналогічно визначаємо максимальну швидкість передавання даних для каналу шириною у 40 МГц (рисунок 2.31).

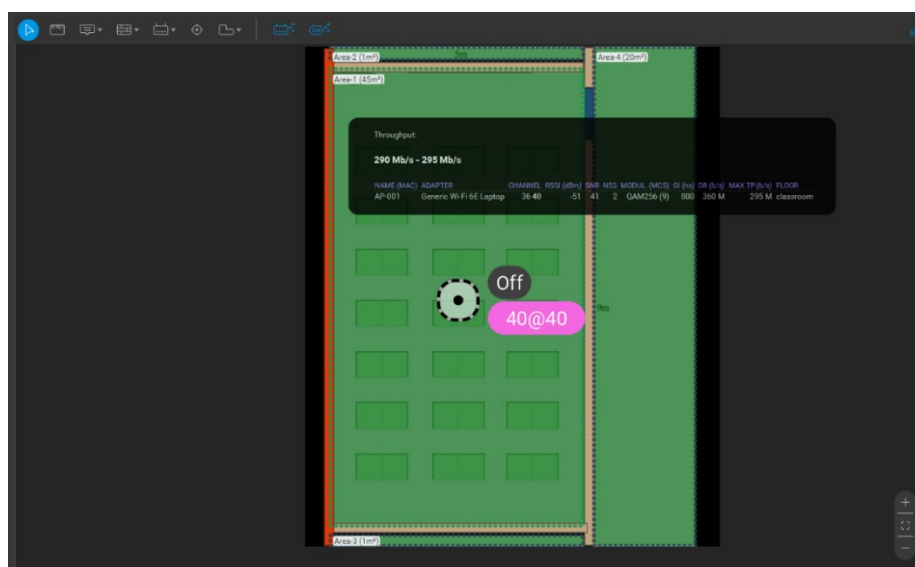


Рис. 2.31 – Визначення максимальної швидкості передавання (40 МГц)

За даними розрахунків отримуємо максимальну швидкість передавання даних для одного клієнта на рівні 290 – 295 Мбіт/с. Відповідно, на кожного із 42 клієнтів отримуємо 6,9 – 7 Мбіт/с при повному завантаженні каналу передачі.

Аналогічно визначаємо максимальну швидкість передавання даних для каналу шириною у 80 МГц (рисунок 2.32).

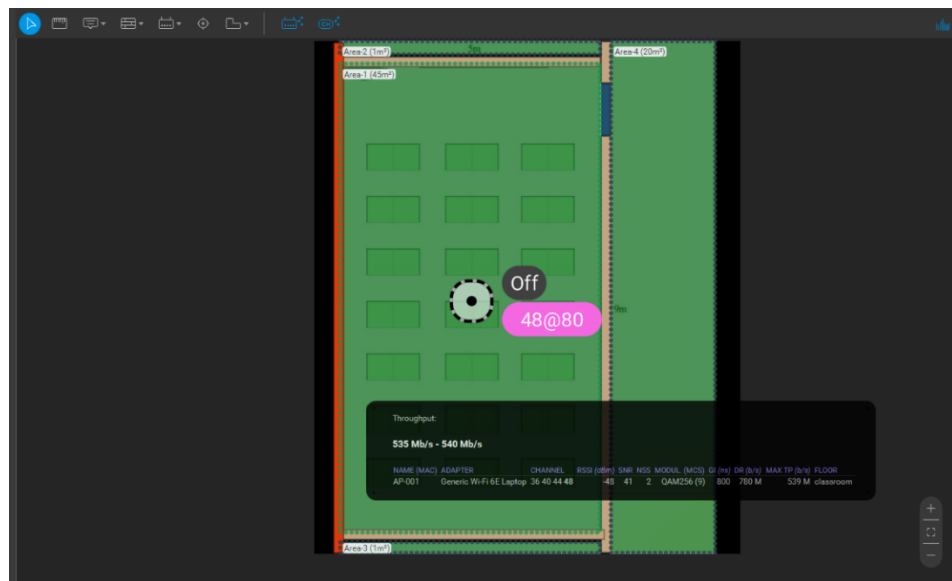


Рис. 2.32 - Визначення максимальної швидкості передавання (80 МГц)

За даними розрахунків отримуємо максимальну швидкість передавання даних для одного клієнта на рівні 535 – 540 Мбіт/с. Відповідно, на кожного із 42 клієнтів отримуємо 12.7 – 12.8 Мбіт/с при повному завантаженні каналу передачі.

Проте, варто зазначити, що у справжніх умовах мереж із високою щільністю дуже рідко використовуються канали ширші за 20 МГц через те, що за великої кількості точок доступу при використанні ширших каналів може не вистачити їхньої кількості для виконання умови неповторення каналів у зонах, що накладаються. У невеликих мережах із високою щільністю зазвичай

використовують канали 20 або 40 МГц. До того ж, ширші канали більш схильні до впливу радіоперешкод.

Для отримання розрахункових експлуатаційних характеристик мережі із використанням IEEE 802.11ax сконфігуруємо точку доступу, змінивши лише стандарт, за яким вона працює, залишивши інші параметри без змін (рисунок 2.33).

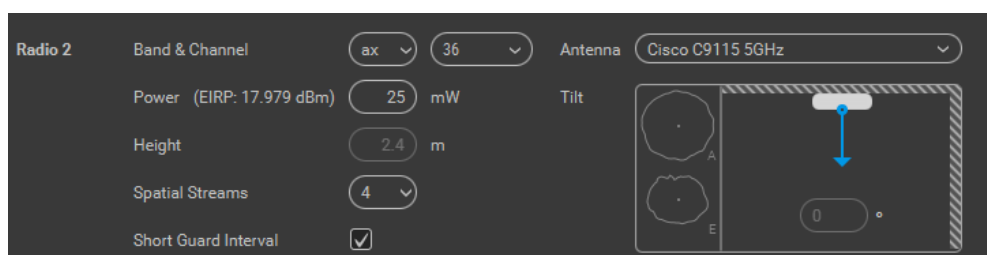


Рис. 2.33 – Конфігурація точки доступу (IEEE 802.11ax)

Визначаємо розрахункову максимальну швидкість передавання даних для зони обслуговування використовуючи канал 20 МГц та IEEE 802.11ax (рисунок 2.34).

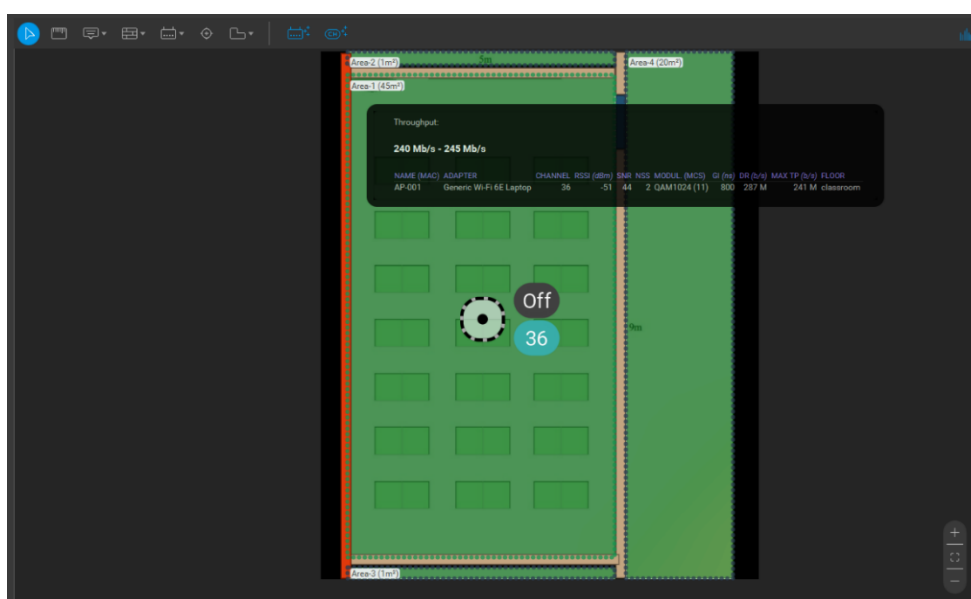


Рис. 2.34 – Максимальна розрахункова швидкість IEEE 802.11ax (20 МГц)

За даними розрахунків отримуємо максимальну швидкість передавання даних для одного клієнта на рівні 240-245 Мбіт/с. Відповідно, на кожного із 42 клієнтів отримуємо 5,7 – 5,8 Мбіт/с при повному завантаженні каналу передачі.

Аналогічно визначаємо максимальну швидкість передавання даних для каналу шириною у 40 МГц (рисунок 2.35)

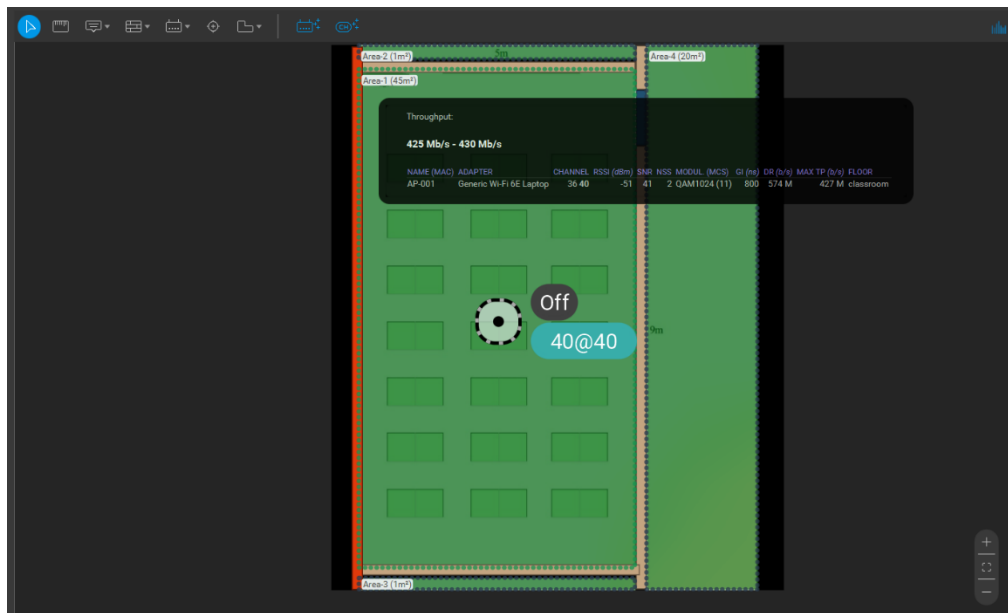


Рис. 2.35 – Максимальна розрахункова швидкість IEEE 802.11ax (40 МГц)

За даними розрахунків отримуємо максимальну швидкість передавання даних для одного клієнта на рівні 425 - 430 Мбіт/с. Відповідно, на кожного із 42 клієнтів отримуємо 10,1 – 10,2 Мбіт/с при повному завантаженні каналу передачі.

Аналогічно визначаємо максимальну швидкість передавання даних для каналу шириною у 80 МГц (рисунок 2.36).

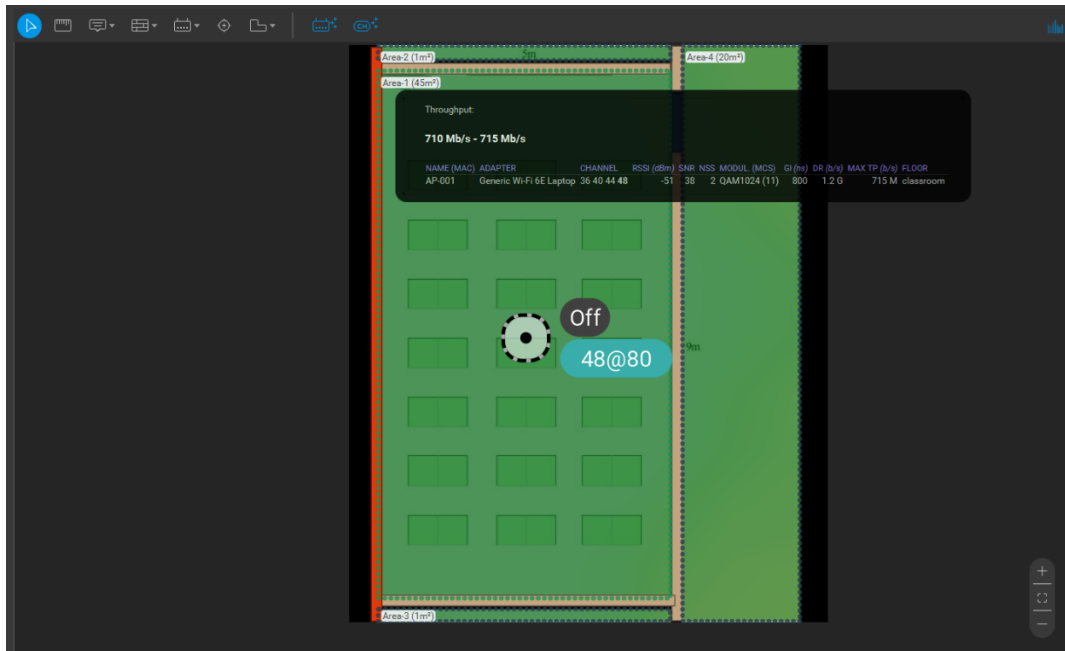


Рис. 2.36 – Максимальна розрахункова швидкість IEEE 802.11ax (80 МГц)

За даними розрахунків отримуємо максимальну швидкість передавання даних для одного клієнта на рівні 710 – 715 Мбіт/с. Відповідно, на кожного із 42 клієнтів отримуємо 16,9 – 17 Мбіт/с при повному завантаженні каналу передачі.

Наступним кроком, для створення ще більш несприятливих умов роботи мережі, додаємо на план іншу аналогічну аудиторію де розмістимо другу точку доступу із повністю аналогічною конфігурацією. Тепер, розділимо ті самі 42 клієнти навпіл між двома аудиторіями. Таким чином, середовище передавання розподіляється навпіл між двома зонами обслуговування.

Змінений план приміщення зображено на рисунку 2.37.

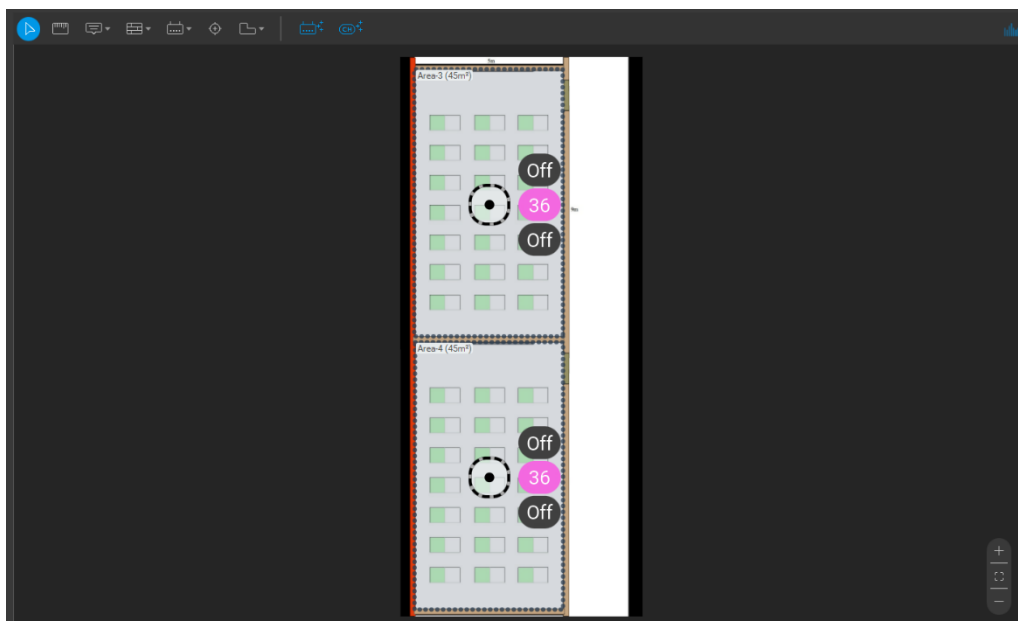


Рис. 2.37 – План із двома аналогічними аудиторіями

Сконфігуруємо обидві точки доступу так, щоб їх зона покриття охоплювала всю активну зону сусідньої аудиторії із нижнім порогом потужності сигналу у -72 дБм (рисунок 2.38).

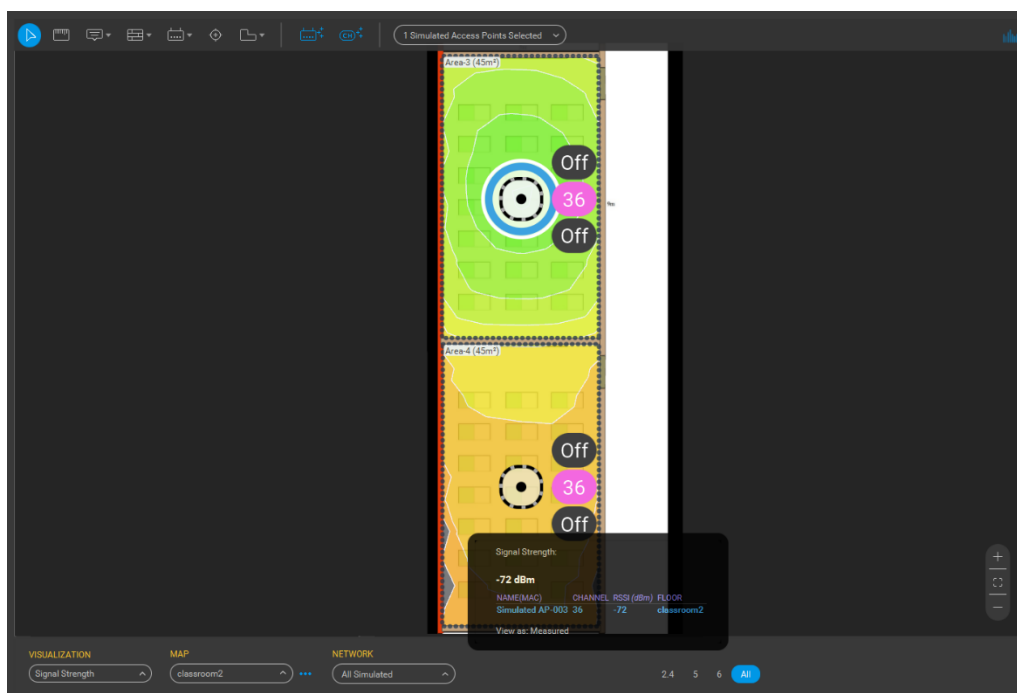


Рис. 2.38 – Потужність сигналу точки доступу у сусідній аудиторії

Такий пороговий рівень потужності сигналу обраний відповідно до алгоритму роботи механізму BSS Coloring. Таким чином, так налаштувавши передатчики точок доступу, на кордонах зон обслуговування отримаємо потужність сигналу від сусідньої точки доступу нижче -62 дБм, що дозволяє іншій точці доступу повноцінно застосувати механізм BSS Coloring для IEEE 802.11ax (рисунок 2.39).

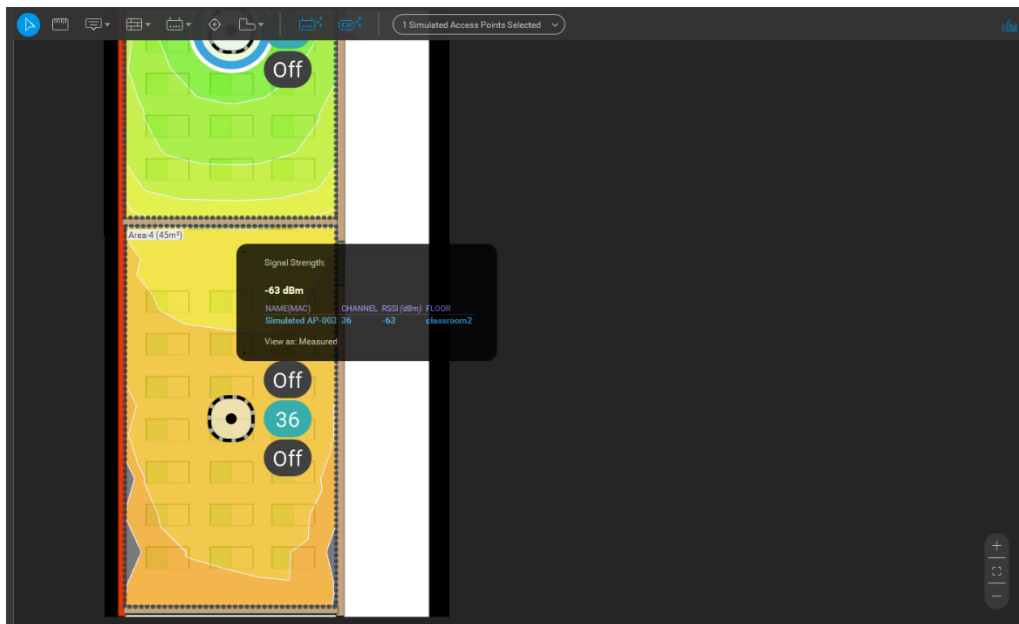


Рис. 2.39 – Потужність сигналу сусідньої точки доступу на кордоні зони обслуговування

Для дослідження характеристик у такій конфігурації мережі використовуємо лише канал у 20 МГц завширшки, бо метою цього експерименту є перевірка роботи механізму BSS Coloring, на який різна ширина каналу не повинна здійснювати впливу.

Отримаємо розрахункові характеристики мережі із новою конфігурацією (рисунок 2.40).

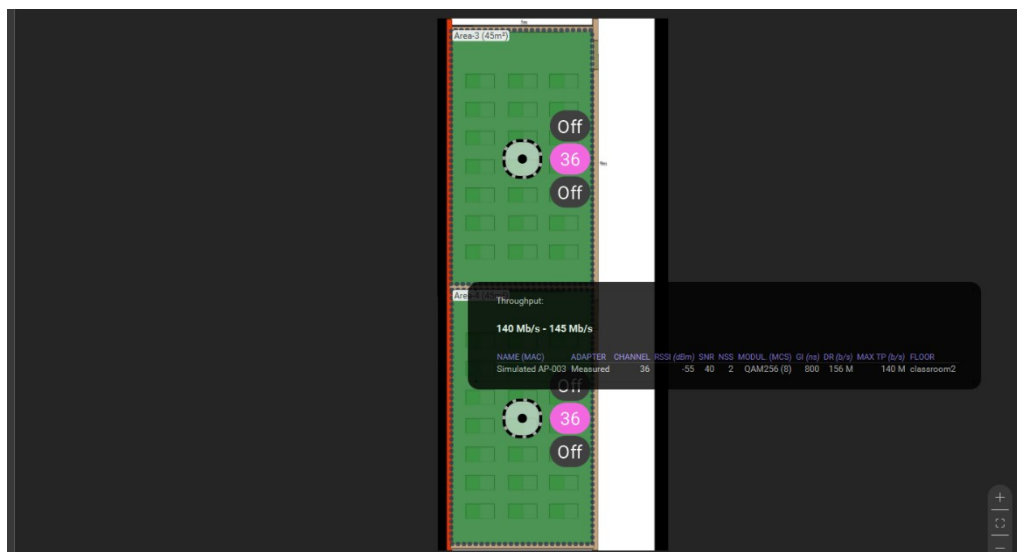


Рис. 2.40 – Максимальна розрахункова швидкість IEEE 802.11ac для двох зон

За даними розрахунків отримуємо максимальну швидкість передавання даних, спільну для двох зон обслуговування, для одного клієнта на рівні 140 – 145 Мбіт/с, що є аналогічним показнику, як і для єдиної зони обслуговування із аналогічними параметрами. Теоретично, за умов максимальної завантаженості каналу, для кожної зони буде доступна половина пропускної здатності середовища/каналу.

Сконфігуруємо обидві точки доступу для роботи у стандарті IEEE 802.11ax та отримаємо максимальну швидкість передачі даних (рисунок 2.41).

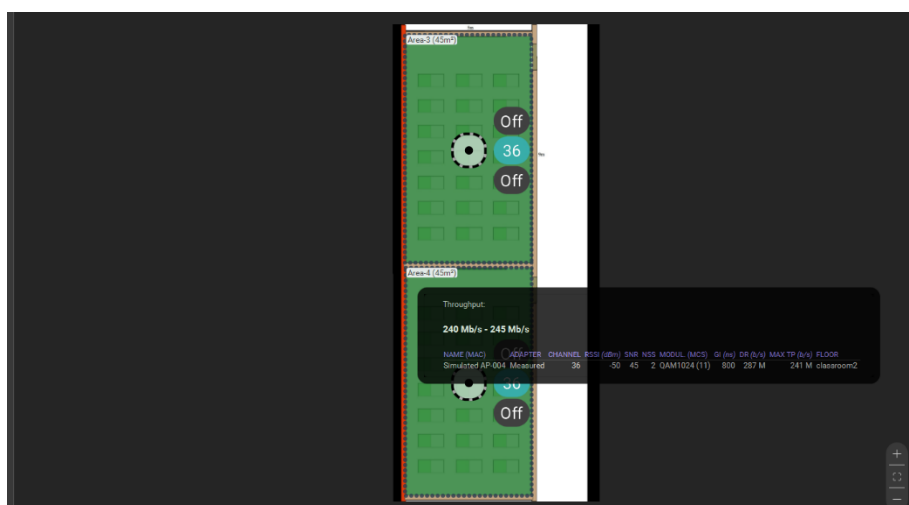


Рис. 2.41 – Максимальна розрахункова швидкість IEEE 802.11ax для двох зон

За даними розрахунків отримуємо максимальну швидкість передавання даних для єдиного клієнта на рівні 240 – 245 Мбіт/с. Використовуючи модель немає можливості визначити вплив механізму BSS Coloring на ступінь сумісного використання каналу передавання, однак при проектуванні були підібрані ідеальні параметри для повноцінного застосування вищеназваного механізму, що, відповідно до опису алгоритмів його роботи, дозволяє очікувати повного розділення пакетів від точок доступу із різних зон обслуговування та одночасної передачі без впливу зон одна на одну.

Таблиця 2.6 збирає усі отримані раніше експериментальні дані у ході моделювання.

Таблиця 2.6

Розрахункові експлуатаційні характеристики мереж

	IEEE 802.11ac			IEEE 802.11ax		
	20 МГц	40 МГц	80 МГц	20 МГц	40 МГц	80 МГц
Загальна пропускна здатність (Мбіт/с)	140-145	290-295	535-540	240-245	425-430	710-715
Пропускна здатність на кожного з 42 клієнтів (Мбіт/с)	3,3-3,4	6,9-7	12,7-12,8	5,7-5,8	10,1-10,2	16,9-17

Надалі, у розділі будуть отримані ці та ряд інших значень експлуатаційних характеристик мереж IEEE 802.11ac та IEEE 802.11ax.

2.5 Отримання експериментальних характеристик

Для проведення експериментального дослідження було розгорнуто тестову мережу у чіткій відповідності до раніше змодельованої. Для розгортання тестової мережі було використано: точки доступу Cisco Catalyst 9115AXI, комутатор Cisco Catalyst C9200-24PXG, 42 ноутбуки-клієнти Acer Aspire 5 A515 та, у якості серверу, стаціонарний комп'ютер на базі Intel Xeon E3-1230 v3 із PCI-е мережевим адаптером Realtek RTL8125, що дозволяє отримати швидкість на рівні 2,5 Гбіт/с через кабель типу «звита пара» Cat5e/6.

Топологію тестових мереж схематично наведено на рисунках 2.42 та 2.43.

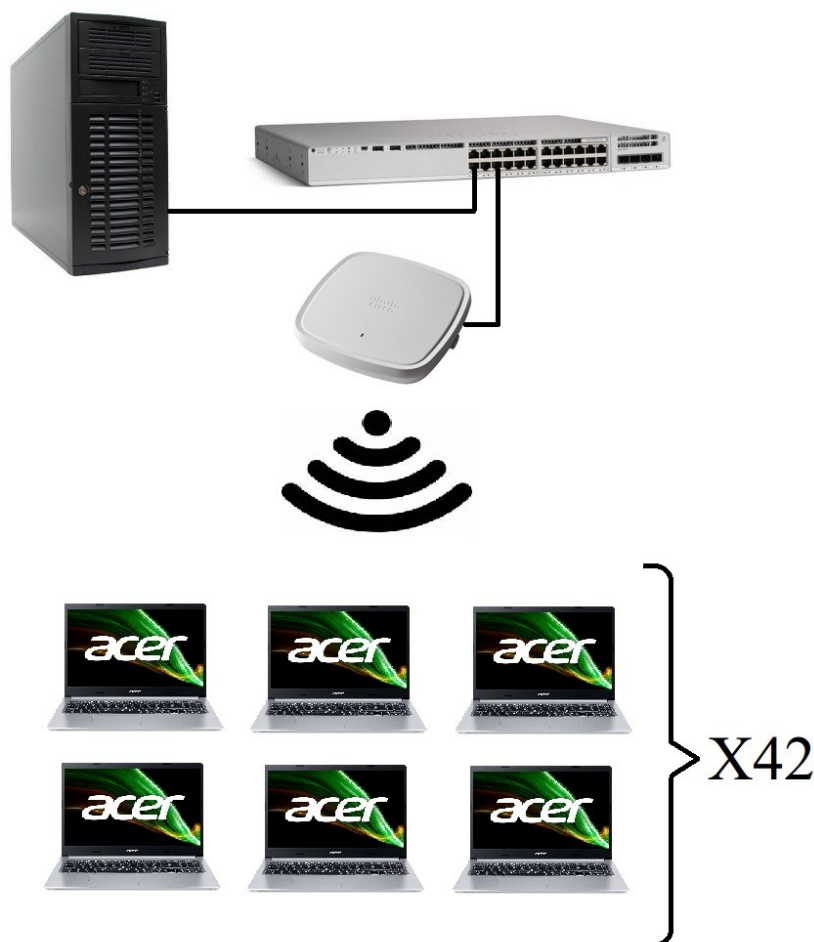


Рис. 2.42 – Топологія першої тестової мережі

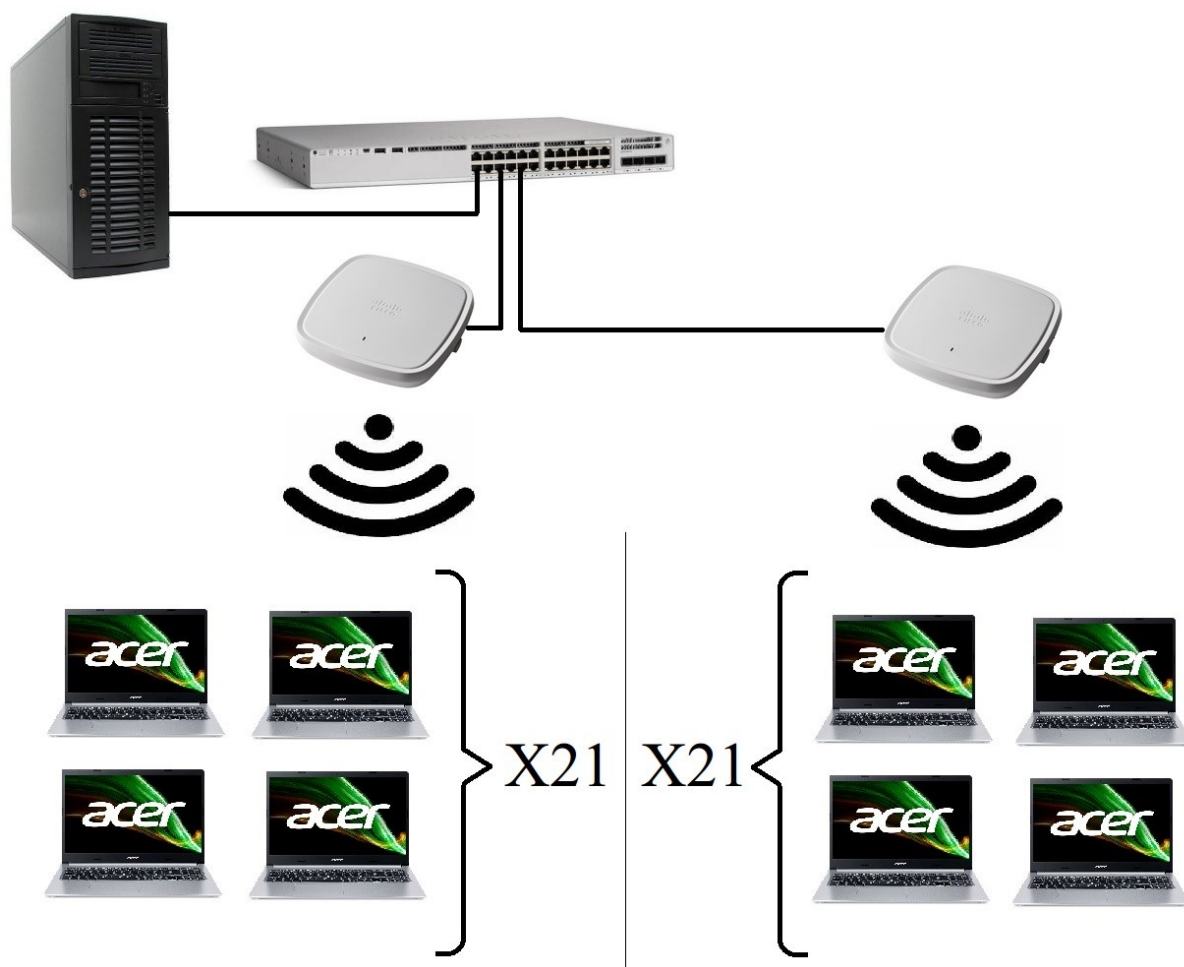


Рис. 2.43 – Топологія другої тестової мережі

На сервері виконується утиліта iPerf3. Сервер під'єднано кабелем до комутатора Cisco Catalyst C9200-24PXG. Також, до комутатора під'єднані точки доступу Cisco Catalyst 9115AXI. До точок доступу бездротовим шляхом під'єднано 42 тестових клієнти – ноутбуки Acer Aspire 5 A515 на яких також виконується утиліта iPerf3.

На кожному клієнтському пристрої запущено окрему копію утиліти iPerf3 у режимі серверу. Для тестування окремого пристрою було обрано розмір вікна у 512 МБ для забезпечення розвинення максимальної швидкості з'єднання. Для відтворення більш реалістичних умов роботи мережі із багатьма пристроями, розмір вікна було залишено за замовчуванням – 1 МБ. Із більшим розміром вікна, окремий пристрій може зайняти усю ширину смуги

пропускання і, виходячи із цього, результати тестів не матимуть сенсу. Для запуску тестування у висхідному напрямку застосовувався ключ “-r”.

В усіх тестах застосовано одне і те саме апаратне та програмне забезпечення. Точку доступу розташовано чітко у центрі аудиторії на стелі на висоті 2,4 метри. Усі клієнти-ноутбуки, для тестування великої групи, розташовано на дерев’яних столах, на висоті 80 см, у 6 колонок та 7 рядів для першої групи тестів (усі клієнти в одній аудиторії) та у 3 колонки та 7 рядів для другої групи тестів (клієнти поділено навпіл на дві аудиторії). Відстань між ноутбуками в ході тестів кожної групи не змінювалась. Для першої групи вона становила 20 см, а відстань між колонками – 70 см. Відстань між ноутбуками у другій групі тестів становила 110 см. Кут нахилу кришки екрану та, відповідно, антен становив 90 градусів і також не змінювався. Для групи тестів із двома аудиторіями конфігурації приміщень та розміщення обладнання чітко ідентичні за виключенням того, що для обидвох аудиторій використовувався один сервер, розміщений у першій аудиторії.

Перед початком тестування було перевірено потужність сигналу, що приймають клієнти від точки доступу, яка становила -37 дБм для центральних ноутбуків та -51 дБм для крайніх. Таблиця 2.7 відображає відстань від точки доступу до ноутбуків та потужність отриманого ними сигналу (RSSI). Варто зазначити, що відстань зазначається у площині розташування ноутбуків, тобто від точки-проекції розміщення точки доступу до клієнтів.

Отримані показники потужності прийнятого сигналу цілком відповідають критеріям ідеального сигналу. Такі значення дозволяють застосувати найвищі із доступних рівнів модуляції та кодові схеми для усіх клієнтів у зоні обслуговування, що, у свою чергу, дозволяє розвинути максимальні значення пропускної здатності.

Таблиця 2.7

Відстань та RSSI

Відстань (см)	RSSI (дБм)
0 – 50	-37
100	-38
150	-41
200	-42
250	-43
300	-45
350	-47
400	-49
450	-50
500	-51

Експериментальне дослідження включає в себе дві групи тестів. Перша група містить низку тестів для єдиної мережі та єдиної аудиторії. Друга група містить тести для двох мереж та двох ідентичних аудиторій, області обслуговування яких частково накладаються.

Перша група тестів включає в себе вимірювання експлуатаційних характеристик для єдиної аудиторії, а саме для: єдиного клієнта, пари клієнтів, трьох клієнтів, чотирьох клієнтів та усієї групи із 42 клієнтів при роботі мережі спочатку в режимі IEEE 802.11ac, а потім в режимі IEEE 802.11ax.

Варто зазначити, що вимірювання для великої групи із 42 пристроїв виконувалися із застосуванням смуги пропускання тільки у 20 МГц так як саме така ширина каналу зазвичай використовується у мережах із високою щільністю через більшу стійкість до перешкод та можливість проектувати більш ємні мережі шляхом збільшення кількості точок доступу із рознесенням їх за каналами.

У зв'язку із великим обсягом табличного матеріалу результати вимірювань першої групи наведено у додатку А.

Друга група тестів включає в себе вимірювання експлуатаційних характеристик мереж для двох сусідніх ідентичних аудиторії, а саме для: єдиного клієнта; пари клієнтів, що знаходяться у різних зонах; трьох клієнтів, два із яких знаходяться в одній зоні, а третій у іншій; чотирьох клієнтів; та усієї групи із 42 клієнтів, розподілених на дві групи по 21 у двох зонах при роботі мережі спочатку в режимі IEEE 802.11ac, а потім в режимі IEEE 802.11ah.

У зв'язку із великим обсягом табличного матеріалу результати тестів другої групи наведено у додатку Б.

Деякі експлуатаційні характеристики, отримані під час проведення експериментальних досліджень не можуть бути отримані шляхом моделювання.

2.6 Висновки за другим розділом

Впродовж виконання етапів дослідження, описаних у другому розділі було:

- розглянуто актуальні вимоги до сучасних та майбутніх бездротових локальних мереж та їх типові сценарії застосування;
- детально розглянуто основні зміни та нововведення стандарту IEEE 802.11ax;
- розглянуто програмні засоби для проведення дослідження;
- розглянуто апаратні засоби для проведення дослідження;
- змодельовано тестові мережі у спеціалізованому програмному забезпеченні Ekahau AI Pro;
- отримано значення експлуатаційних характеристик для змодельованих мереж на базі стандартів IEEE 802.11ac та IEEE 802.11ax;
- розгорнуто тестові мережі у чіткій відповідності до змодельованих;
- отримані значення експлуатаційних характеристик таких мереж шляхом застосування експериментального методу дослідження.

Слід зазначити, що деякі експлуатаційні характеристики мереж неможливо отримати шляхом моделювання, наприклад затримку. Тому деякі із досліджуваних характеристик були отримані лише під час експериментальних вимірювань.

РОЗДІЛ 3

АНАЛІЗ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕРЕЖ

Використовуючи отримані у другому розділі дані щодо експлуатаційних характеристик мереж за стандартами IEEE 802.11ax та IEEE 802.11ac порівняємо та визначимо ефективність застосування IEEE 802.11ax.

3.1 Порівняння розрахункових та фактичних характеристик мереж

Для визначення достовірності даних, що отримані шляхом моделювання із використанням спеціалізованого програмного забезпечення Ekahau AI Pro зі стандартними моделями пристроїв здійснено порівняння деяких розрахункових характеристик із фактичними, отриманими експериментальним шляхом.

3.1.1 Розрахунковий та фактичний RSSI

Як можна побачити на рисунку 3.1, моделювання розповсюдження та потужності отриманого сигналу дозволяє отримати досить точні дані.

Різниця розрахункових та фактичних показників, ймовірно, викликана неповною відповідністю моделі приймача клієнтського пристрою до використаного в експериментальних дослідженнях.

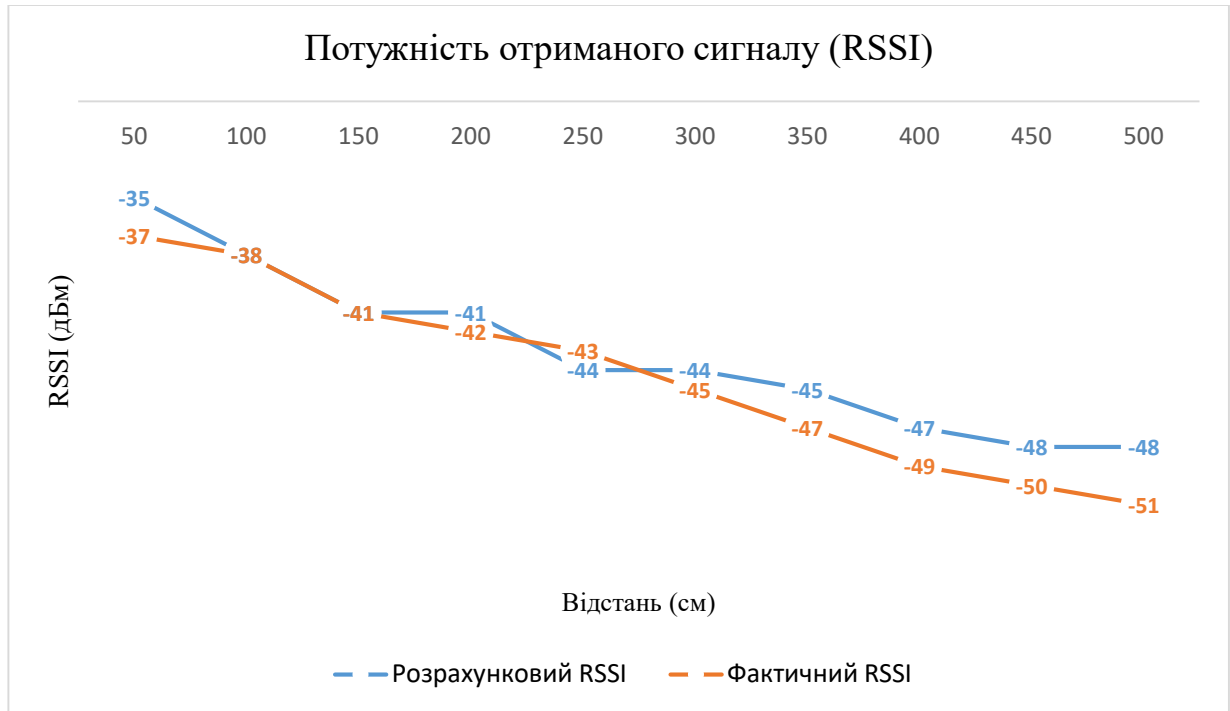


Рис. 3.1 – Розрахункова та фактична потужність сигналу

Проте, в реальних умовах, кожен пристрій може мати суттєво різні характеристики чутливості та коефіцієнт підсилення антен, отож при проектуванні та моделюванні необхідно враховувати запас та орієнтуватися переважно на найслабші пристрої.

3.1.2 Розрахункова та фактична пропускна здатність

Порівняння розрахункових та фактичних величин максимальної пропускної здатності із застосуванням одного клієнтського пристрою наведено на рисунках 3.2 та 3.3.

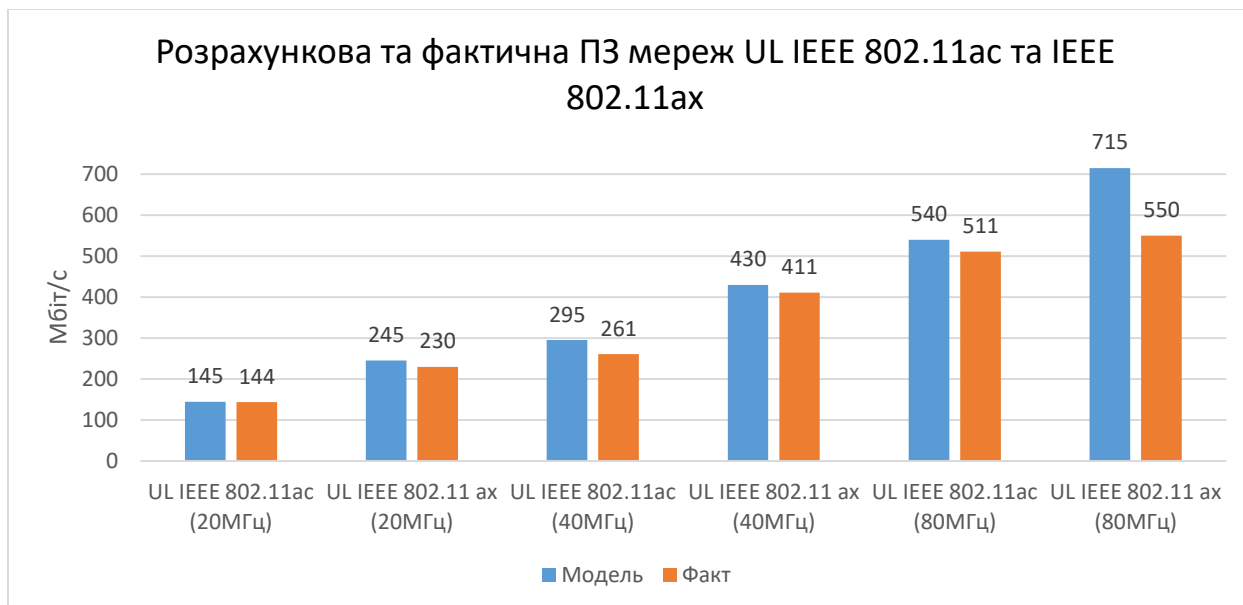


Рис. 3.2 – Розрахункова та фактична пропускна здатність у висхідному напрямку передачі

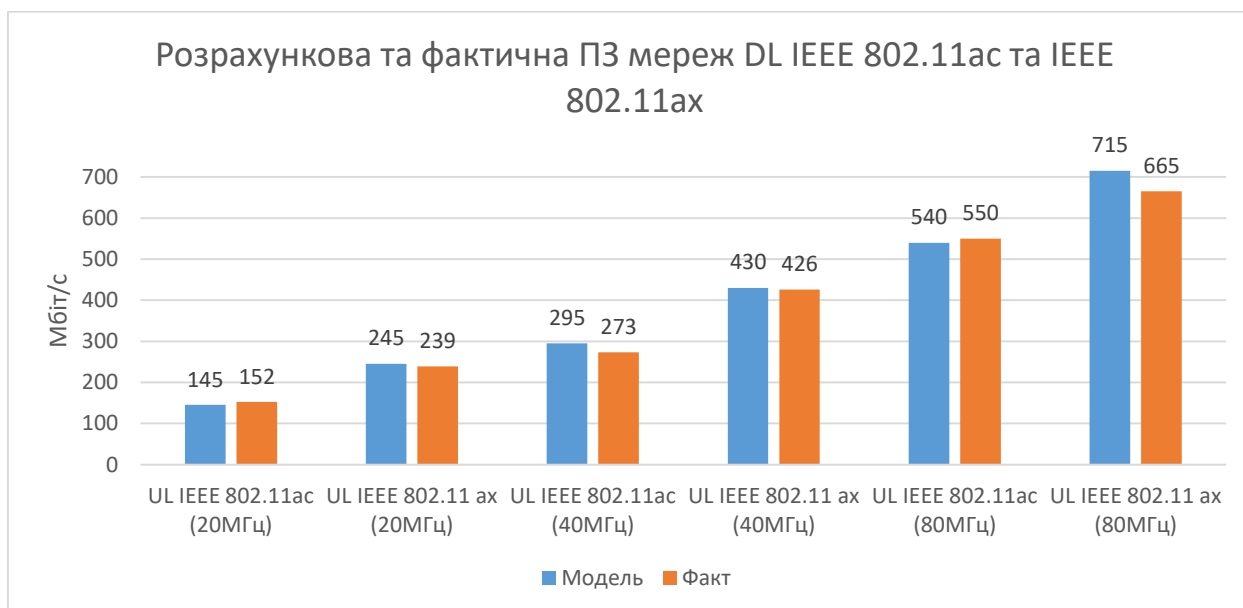


Рис. 3.3 – Розрахункова та фактична пропускна здатність у низхідному напрямку передачі

На рисунку 3.2 видно, що розрахункова максимальна пропускна здатність мережі із використанням одного клієнтського пристрою (із двома

просторовими потоками МІМО) у висхідному напрямку передачі має досить точні значення – для смуги пропускання у 20 МГц – величина похибки менше 1% та 6% для IEEE 802.11ac та IEEE 802.11ax відповідно. Для смуги 40 МГц похибка становить 12% та 4%, а для 80 МГц – вже 5% та 23% для IEEE 802.11ac та IEEE 802.11ax відповідно.

Із рисунку 3.3 можна побачити, що розрахункова максимальна пропускна здатність мережі із використанням одного клієнтського пристрою (із двома просторовими потоками МІМО) у низхідному напрямку передачі також має досить точні значення для смуги пропускання у 20 МГц – величина похибки <5% та 2% для IEEE 802.11ac та IEEE 802.11ax відповідно. Для смуги 40 МГц похибка становить 7% та 1%, а для 80 МГц – 2% та 7% для IEEE 802.11ac та IEEE 802.11ax відповідно.

Загалом, використане програмне забезпечення зі стандартними моделями пристроїв дає досить чітке розуміння очікуваної пропускної здатності мережі, проте зі збільшенням ширини каналу, переважно, збільшується й величина похибки. Враховуючи те, що обране програмне забезпечення орієнтоване переважно на проектування та моделювання великих мереж із багатьма точками доступу, у яких здебільшого використовуються вузькі канали у 20 МГц, можна вважати таку точність даних цілком прийнятною.

3.2 Порівняння характеристик в умовах єдиної мережі

Для визначення ефективності застосування стандарту IEEE 802.11ax і умовах єдиної мережі та зони обслуговування порівняємо експлуатаційні характеристики мереж IEEE 802.11ax та IEEE 802.11ac.

3.2.1 Залежність пропускної здатності від відстані

Для визначення залежності пропускної здатності для одного клієнтського пристрою від відстані до точки доступу порівнюємо вищеназвані величини для мереж на базі стандартів IEEE 802.11ax та IEEE 802.11ac. Порівняння залежності пропускної здатності від відстані для двох мереж наведено на рисунках 3.4 та 3.5:

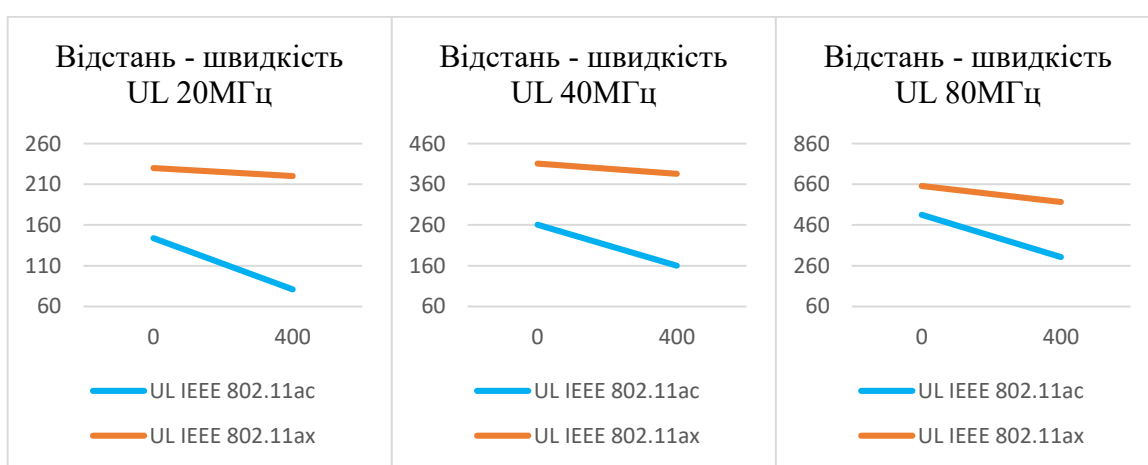


Рис. 3.4 – Залежність пропускної здатності від відстані у висхідному напрямку передачі для смуг пропускання 20, 40 та 80 МГц

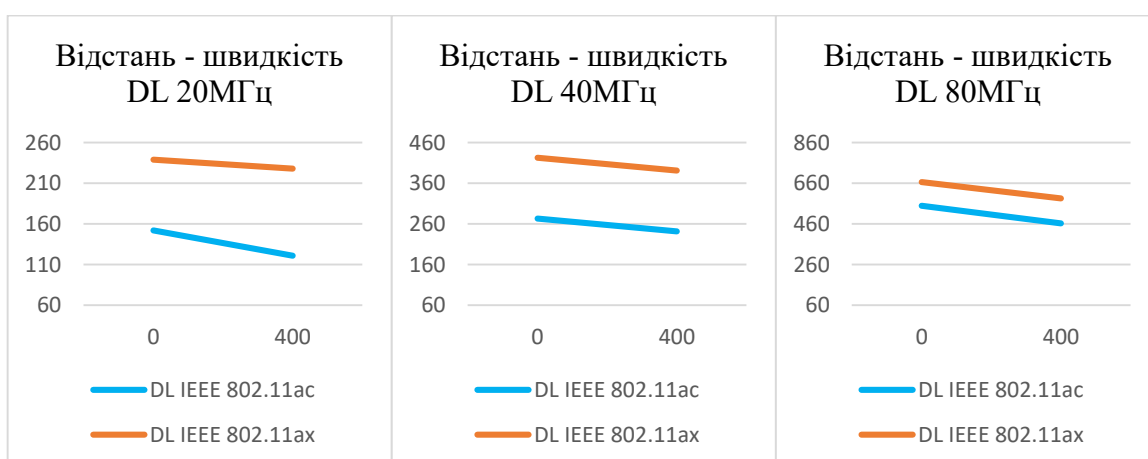


Рис. 3.5 – Залежність пропускної здатності від відстані у низхідному напрямку передачі для смуг пропускання 20, 40 та 80 МГц

У всіх випадках мережа IEEE 802.11ах надає клієнту значно вищу пропускну здатність, а саме: для каналу у 20 МГц у висхідному та низхідному напрямках для найближчого клієнта на 63% та 57% відповідно; для найвіддаленішого на 172% та 88% відповідно. Для каналу у 40 МГц у висхідному та низхідному напрямках для найближчого клієнта на 57% та 55% відповідно; для найвіддаленішого на 141% та 62% відповідно. І, для каналу у 80 МГц у висхідному та низхідному напрямках для найближчого клієнта на 28% та 21% відповідно; для найвіддаленішого на 89% та 26% відповідно. Таке суттєве збільшення пропускну здатності у висхідному напрямку для клієнтів із нижчим рівнем сигналу, ймовірно, викликано збільшеними захисними інтервалами та довжиною символу OFDMA. Проте, із збільшенням ширини смуги пропускання спостерігається зниження приросту пропускну здатності відносно мережі IEEE 802.11ac. Це явище, ймовірно, викликано збільшенням впливу радіоперешкод на цільовий сигнал. Тобто, як і раніше, цілком виконується правило «ширше смуга пропускання – більше перешкод».

Щодо відповідності розрахункової пропускну здатності до фактичної у відношенні до відстані від точки доступу, то слід зазначити, що розрахункова максимальна пропускну здатність є сталою величиною для усієї аудиторії, а фактичні значення демонструють суттєве її зниження зі збільшенням відстані навіть у невеликому, як використана аудиторія, приміщенні.

Загалом, мережі IEEE 802.11ах показують значно більшу стабільність характеристик та менше падіння пропускну здатності зі збільшенням відстані. Проте, вагомість наданої переваги знижується із збільшенням смуги пропускання. В усіх випадках передачі даних для одного клієнта та однієї точки доступу прослідковується стабільно низька затримка для обох стандартів (див. табл. А.1, А.2, А.11 та А.12). Середнє значення затримки – 1 мс.

3.2.2 Пропускна здатність для єдиного клієнта

Як можна побачити на рисунку 3.6, максимальна пропускна здатність мережі на базі IEEE 802.11ax для одного клієнтського пристрою (із двома просторовими потоками MIMO) має суттєво більші значення.

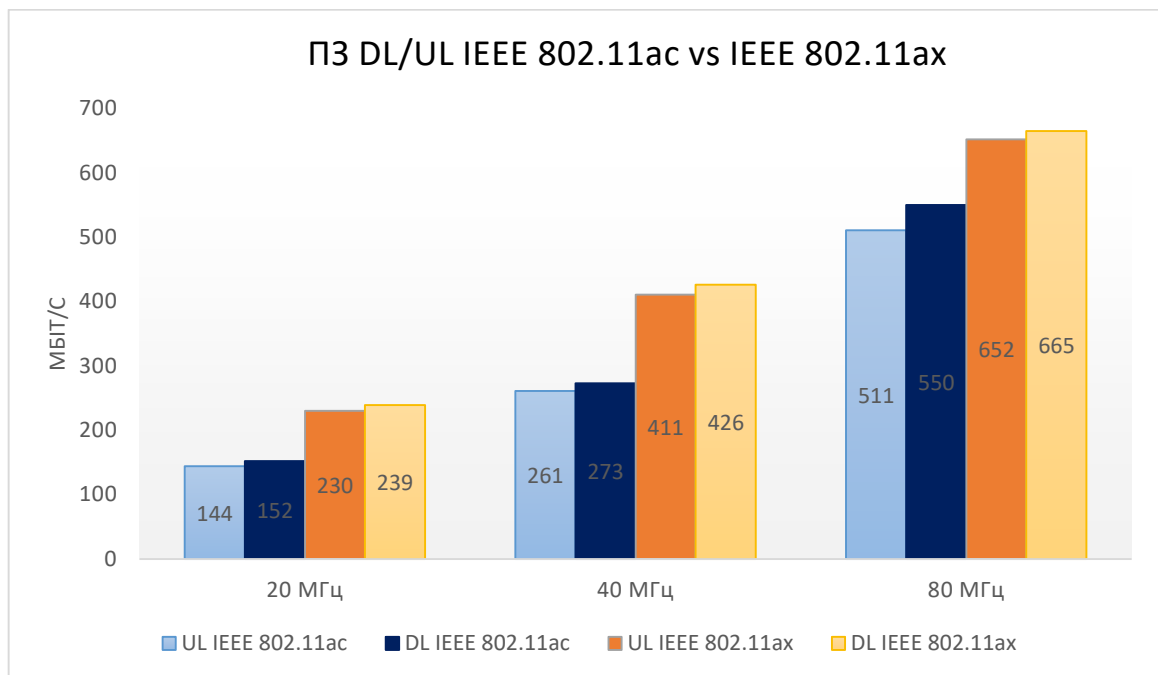


Рис. 3.6 – Пропускна здатність для єдиного клієнта

IEEE 802.11ax надає перевагу над IEEE 802.11ac у висхідному напрямку передачі: для смуги пропускання у 20 МГц – на 60%, для смуги у 40 МГц – на 57% та для смуги у 80 МГц – на 18%. У низхідному напрямку передачі: для смуги пропускання у 20 МГц – на 57%, для смуги у 40 МГц – на 56% та для смуги у 80 МГц – на 19%. Значення затримки для усіх випадків стабільно низьке – 1 мс.

Таку перевагу у пропускній здатності на одного клієнта, ймовірно, надає використання вищого порядку модуляції 1024QAM та відповідної кодової схеми.

3.2.3 Вплив збільшення кількості активних клієнтів

Для визначення впливу збільшення кількості активних клієнтських пристроїв на експлуатаційні характеристики мереж IEEE 802.11ac та IEEE 802.11ax порівняємо рівномірність розподілення пропускної здатності між клієнтами для мереж із смугами пропускання 20, 40 та 80 МГц в умовах єдиної зони обслуговування.

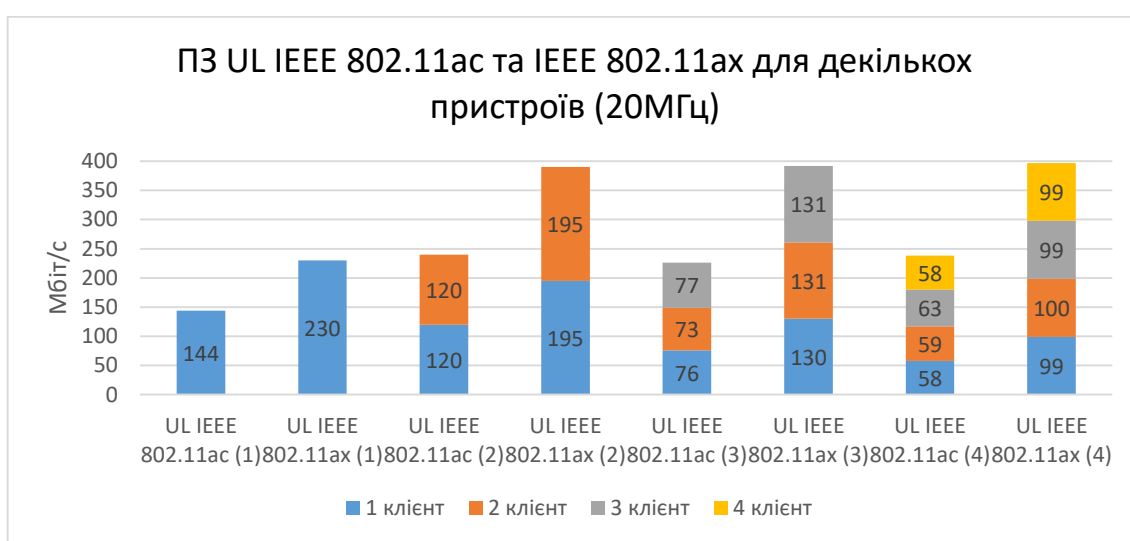


Рис. 3.7 – UL Пропускна здатність для декількох пристроїв (20 МГц)

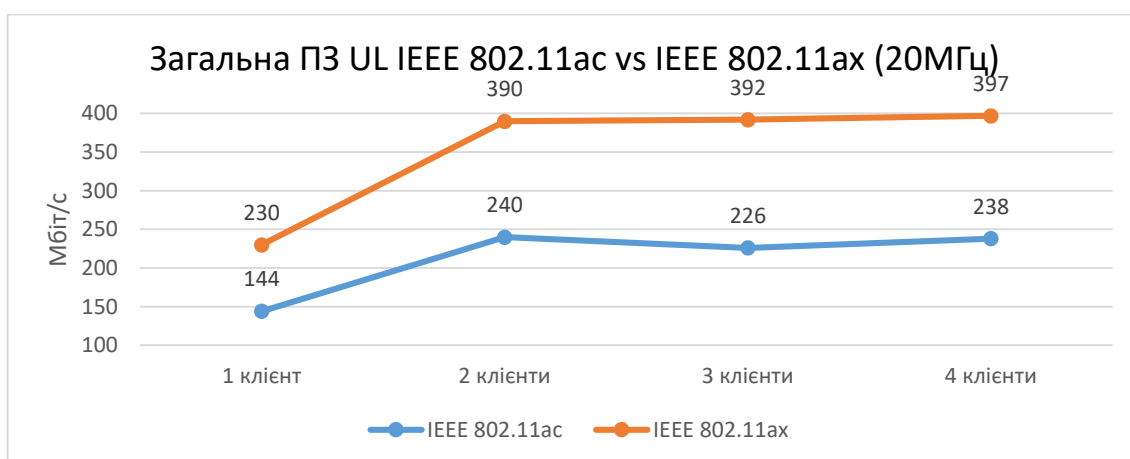


Рис. 3.8 – Загальна UL пропускна здатність мереж із декількома клієнтами

На рисунках 3.7 та 3.8 можна побачити, що при застосуванні смуги пропускання у 20 МГц у висхідному напрямку передачі та збільшенні кількості пристроїв у всіх випадках мережа IEEE 802.11ax демонструє суттєве збільшення загальної пропускної здатності. Також, така мережа більш рівномірно розподіляє пропускну здатність між клієнтами, що говорить про більш ефективне розподілення ресурсів середовища передачі (OFDMA). Дельта пропускної здатності між клієнтами для IEEE 802.11ac становить: для двох – 0, для трьох – 4, для чотирьох – 5. Тоді як для IEEE 802.11ax для: двох – 0, для трьох – 1, для чотирьох – 1. Загалом, мережа IEEE 802.11ax демонструє збільшення загальної пропускної здатності у порівнянні із IEEE 802.11ac на: 60% для єдиного клієнта, 63% для двох клієнтів, 73% для трьох клієнтів та 67% для чотирьох клієнтів.

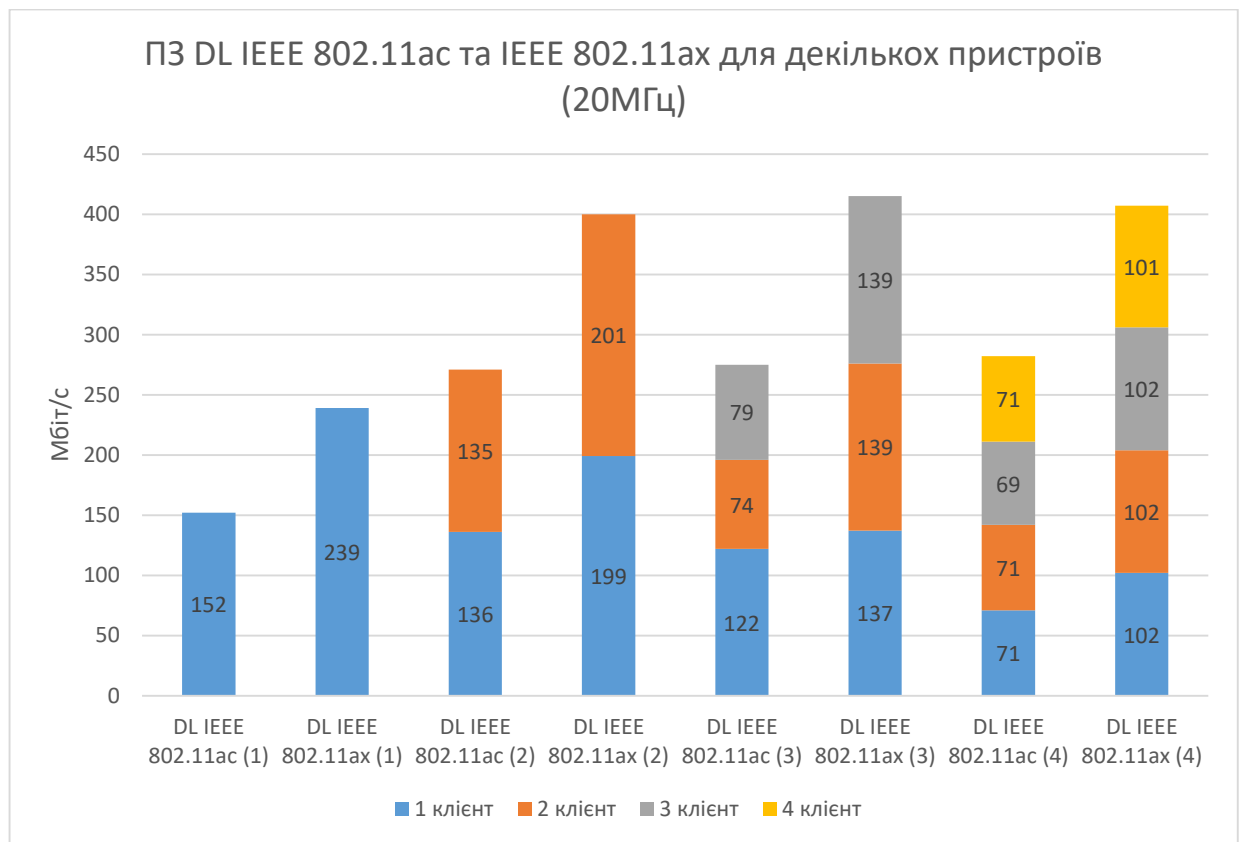


Рис. 3.9 – DL Пропускна здатність для декількох пристроїв (20 МГц)

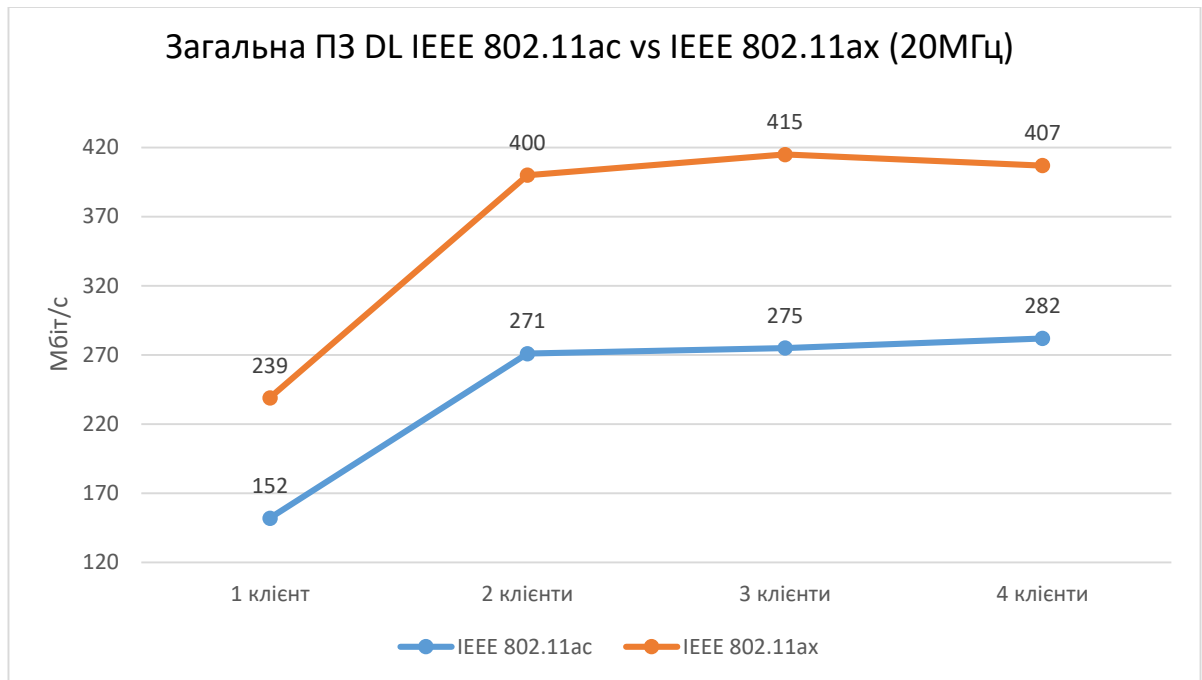


Рис. 3.10 – Загальна DL пропускна здатність мереж із декількома клієнтами

Як показано на рисунках 3.9 та 3.10, застосовуючи смугу пропускання у 20 МГц у низхідному напрямку передачі та збільшенні кількості пристроїв у всіх випадках мережа IEEE 802.11ax демонструє суттєве збільшення загальної пропускної здатності. Також, така мережа більш рівномірно розподіляє пропускну здатність між клієнтами, що говорить про більш ефективне розподілення ресурсів середовища передачі (MU-MIMO, OFDMA). Дельта пропускної здатності між клієнтами для IEEE 802.11ac становить: для двох – 1, для трьох – 48, для чотирьох – 2. Тоді як для IEEE 802.11ax для: двох – 1, для трьох – 2, для чотирьох – 1. Загалом, мережа IEEE 802.11ax демонструє збільшення загальної пропускної здатності у порівнянні із IEEE 802.11ac на: 57% для єдиного клієнта, 48% для двох клієнтів, 51% для трьох клієнтів та 45% для чотирьох клієнтів.

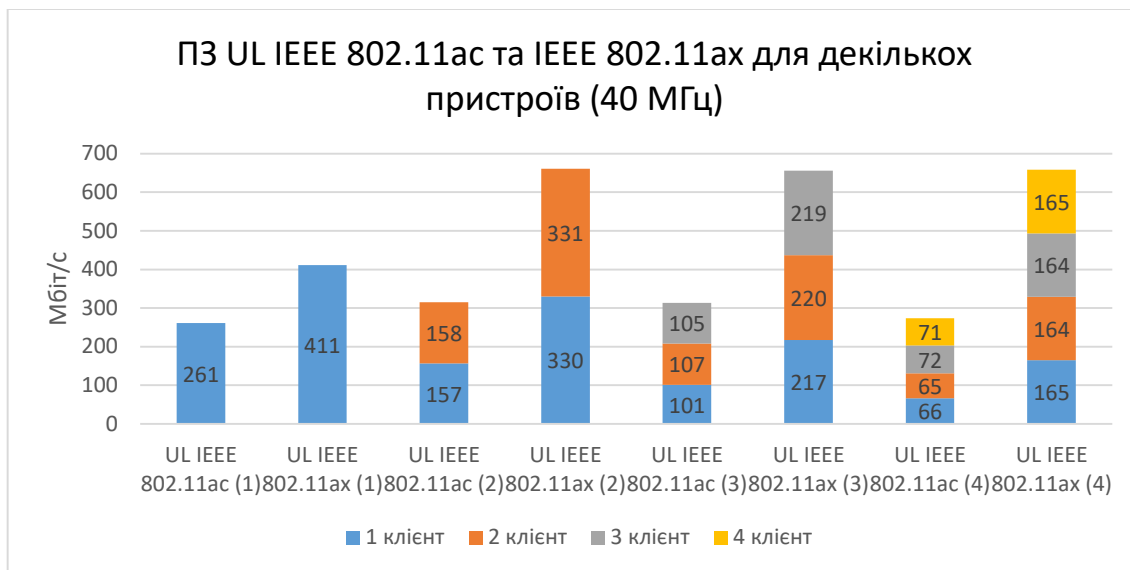


Рис. 3.11 – UL Пропускна здатність для декількох пристроїв (40 МГц)

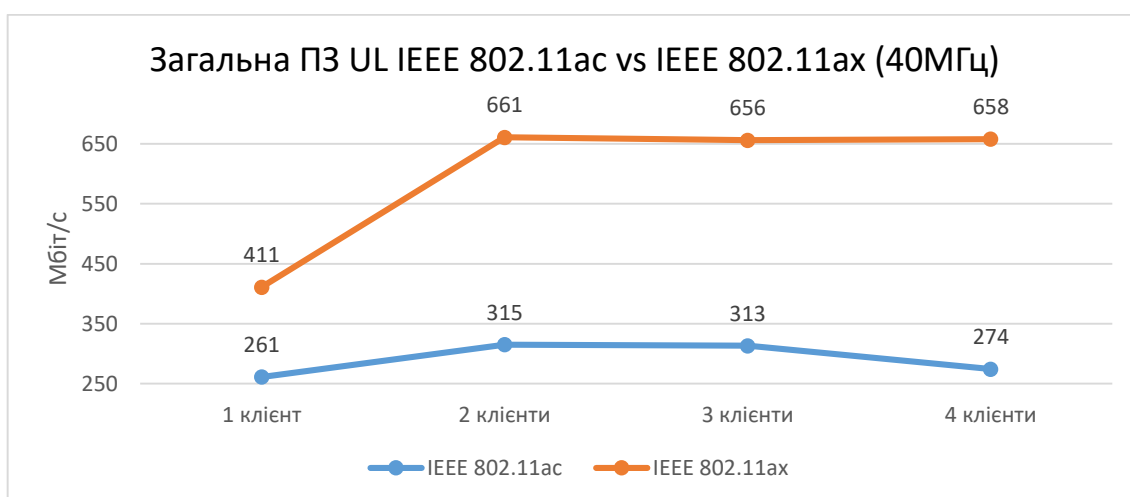


Рис. 3.12 – Загальна UL пропускна здатність мереж із декількома клієнтами

Як можна побачити на рисунках 3.11 та 3.12, у висхідному напрямку передачі та збільшенні кількості пристроїв у всіх випадках мережа IEEE 802.11ax демонструє суттєву перевагу у загальній пропускній здатності при застосуванні смуги пропускання у 40 МГц. Також, така мережа більш рівномірно розподіляє пропускну здатність між клієнтами, що говорить про більш ефективне розподілення ресурсів середовища передачі (OFDMA). Дельта пропускної здатності між клієнтами для IEEE 802.11ac становить: для

двох – 1, для трьох – 6, для чотирьох – 7. Тоді як для IEEE 802.11ах для: двох – 1, для трьох – 3, для чотирьох – 1. Загалом, мережа IEEE 802.11ах демонструє збільшення загальної пропускної здатності у порівнянні із IEEE 802.11ас на: 57% для єдиного клієнта, 110% для двох клієнтів, 110% для трьох клієнтів та 140% для чотирьох клієнтів.

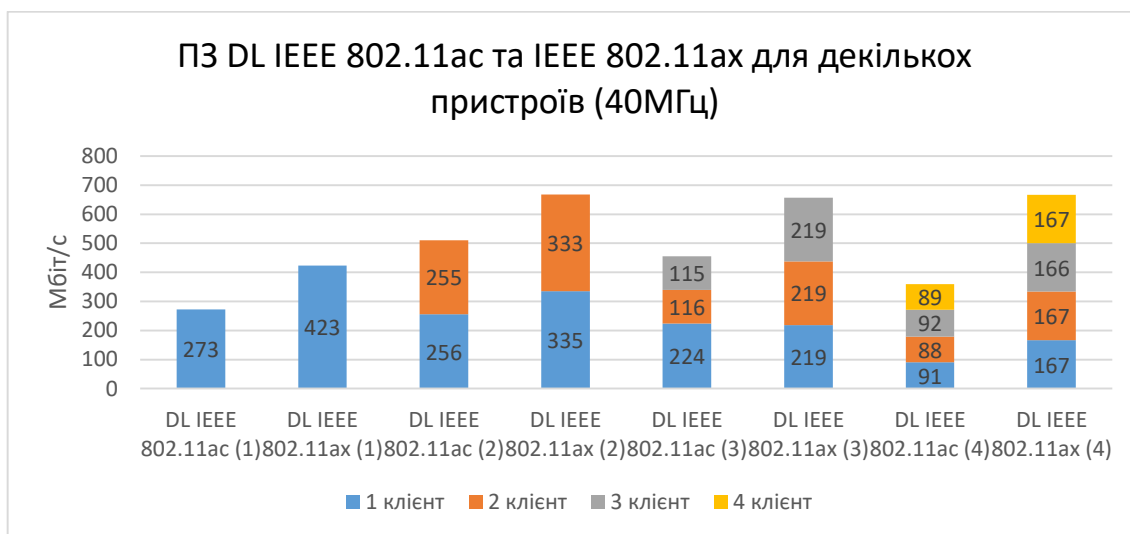


Рис. 3.13 – DL Пропускна здатність для декількох пристроїв (40 МГц)

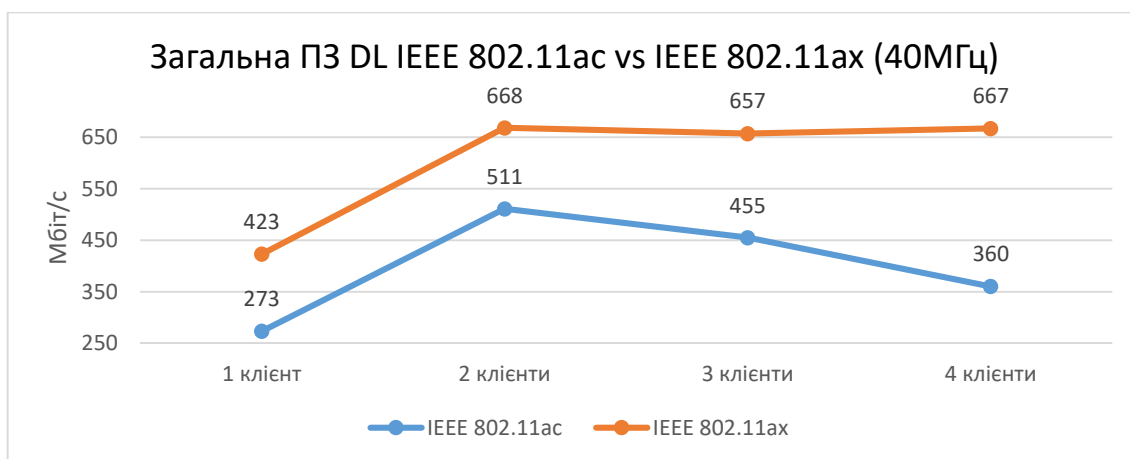


Рис. 3.14 – Загальна DL пропускна здатність мереж із декількома клієнтами

Як видно з рисунків 3.13 та 3.14, при застосуванні смуги пропускання у 40 МГц у низхідному напрямку передачі та збільшенні кількості пристроїв у всіх випадках мережа IEEE 802.11ах демонструє суттєве збільшення загальної

пропускної здатності. Також, така мережа більш рівномірно розподіляє пропускну здатність між клієнтами, що говорить про більш ефективне розподілення ресурсів середовища передачі (MU-MIMO, OFDMA). Дельта пропускної здатності між клієнтами для IEEE 802.11ac становить: для двох – 1, для трьох – 109, для чотирьох – 4. Тоді як для IEEE 802.11ax для: двох – 2, для трьох – 0, для чотирьох – 1. Загалом, мережа IEEE 802.11ax демонструє збільшення загальної пропускної здатності у порівнянні із IEEE 802.11ac на: 55% для єдиного клієнта, 31% для двох клієнтів, 44% для трьох клієнтів та 85% для чотирьох клієнтів.

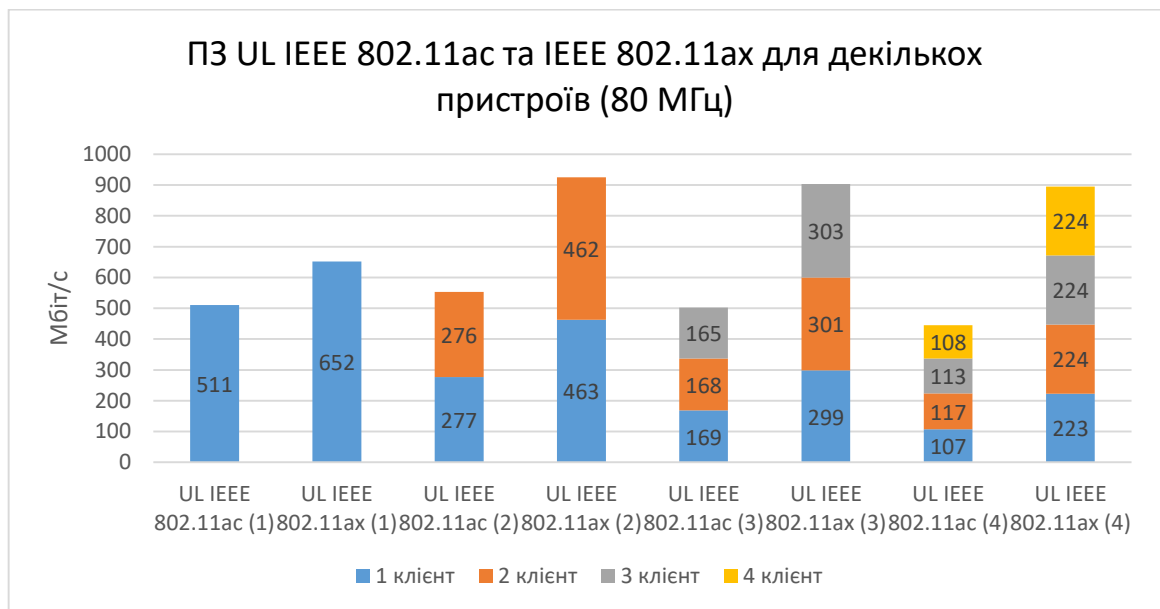


Рис. 3.15 – UL Пропускна здатність для декількох пристроїв (80 МГц)

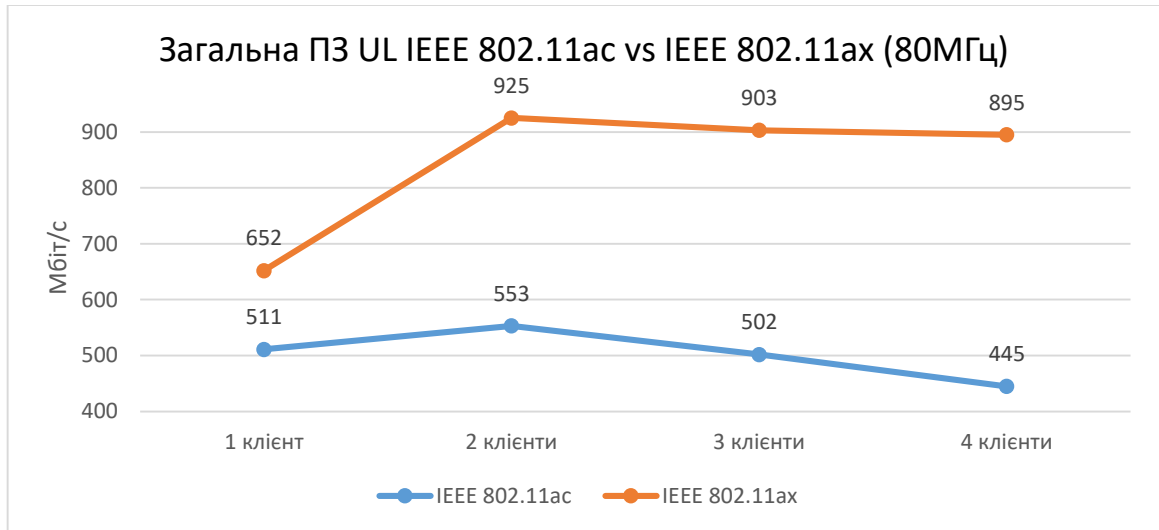


Рис. 3.16 – Загальна UL пропускна здатність мереж із декількома клієнтами

На рисунках 3.15 та 3.16 видно, що застосовуючи смугу пропускання у 80 МГц у висхідному напрямку передачі та збільшенні кількості пристроїв у всіх випадках мережа IEEE 802.11ax демонструє суттєву перевагу у загальній пропускній здатності. Також, така мережа більш рівномірно розподіляє пропускну здатність між клієнтами, що говорить про більш ефективне розподілення ресурсів середовища передачі (OFDMA). Дельта пропускної здатності між клієнтами для IEEE 802.11ac становить: для двох – 1, для трьох – 4, для чотирьох – 10. Тоді як для IEEE 802.11ax для: двох – 1, для трьох – 4, для чотирьох – 1. Загалом, мережа IEEE 802.11ax демонструє збільшення загальної пропускної здатності у порівнянні із IEEE 802.11ac на: 28% для єдиного клієнта, 67% для двох клієнтів, 80% для трьох клієнтів та 101% для чотирьох клієнтів.

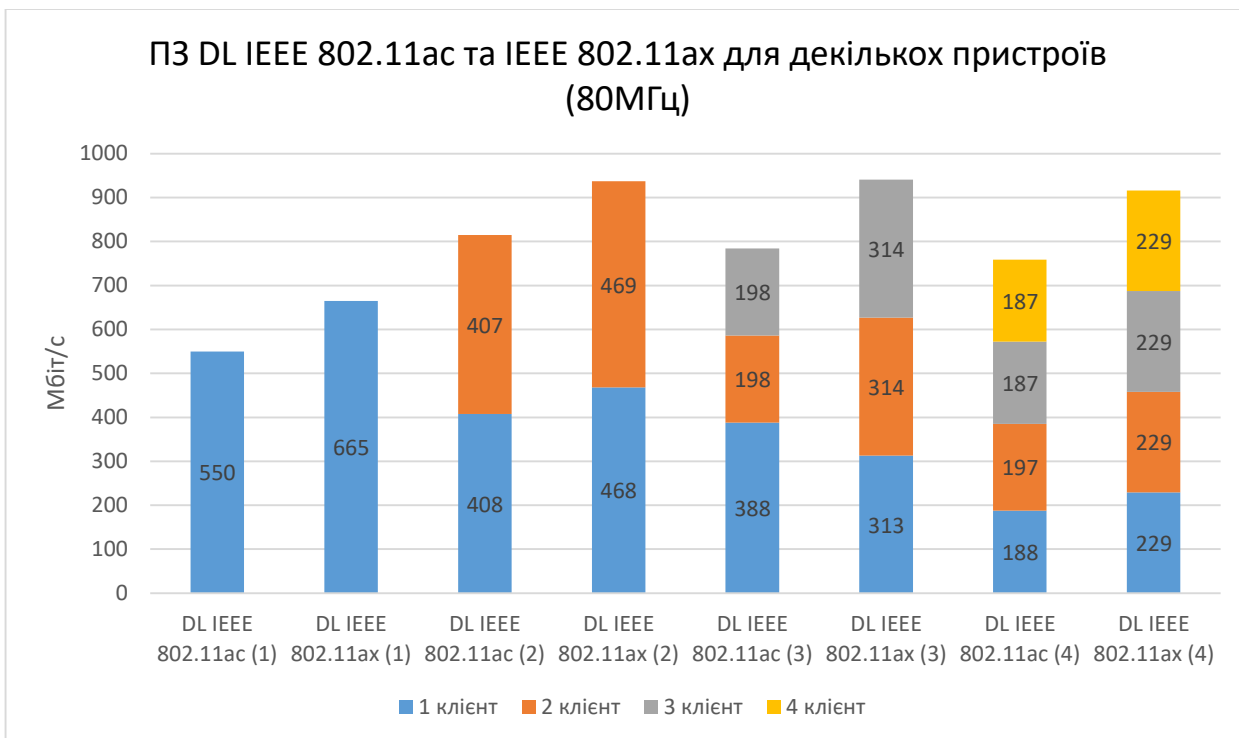


Рис. 3.17 – DL Пропускна здатність для декількох пристроїв (80 МГц)

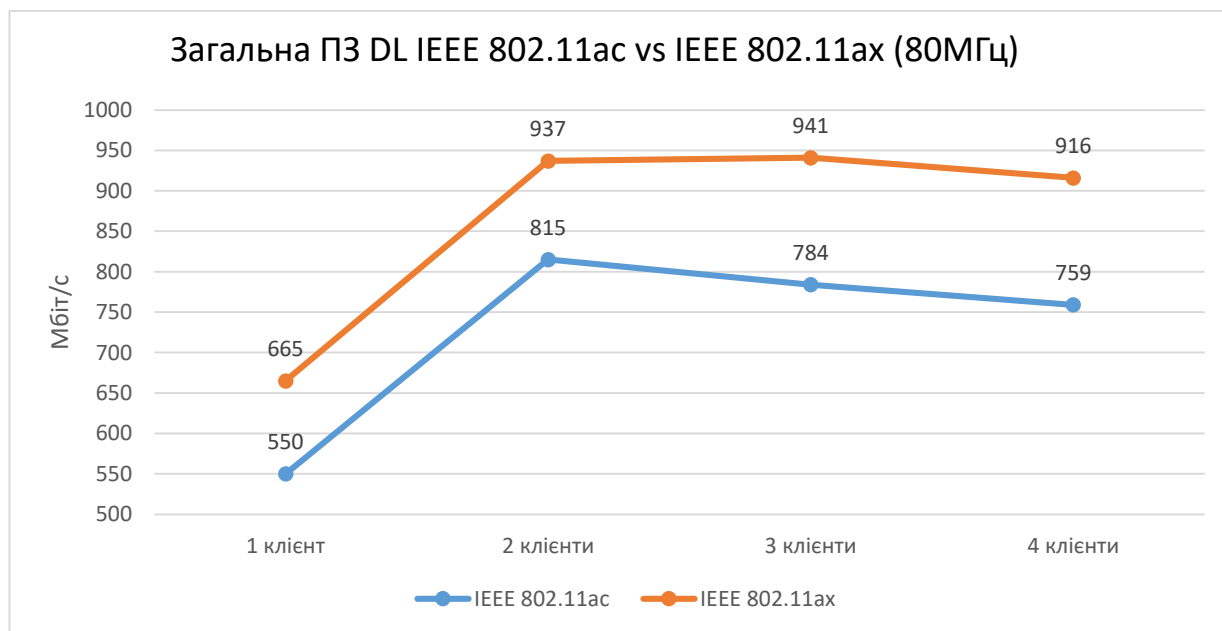


Рис. 3.18 – Загальна DL пропускна здатність мереж із декількома клієнтами

Як можна побачити на рисунках 3.17 та 3.18, при застосуванні смуги пропускання у 80 МГц у низхідному напрямку передачі та збільшенні

кількості пристроїв у всіх випадках мережа IEEE 802.11ax демонструє суттєве збільшення загальної пропускної здатності. Також, така мережа більш рівномірно розподіляє пропускну здатність між клієнтами, що говорить про більш ефективне розподілення ресурсів середовища передачі (MU-MIMO, OFDMA). Дельта пропускної здатності між клієнтами для IEEE 802.11ac становить: для двох – 1, для трьох – 190, для чотирьох – 10. Тоді як для IEEE 802.11ax для: двох – 1, для трьох – 1, для чотирьох – 0. Загалом, мережа IEEE 802.11ax демонструє збільшення загальної пропускної здатності у порівнянні із IEEE 802.11ac на: 21% для єдиного клієнта, 15% для двох клієнтів, 20% для трьох клієнтів та 21% для чотирьох клієнтів.

Загалом, мережа за стандартом IEEE 802.11ax демонструє як більшу загальну пропускну здатність так і пропускну здатність на одного клієнта аніж IEEE 802.11ac. До того ж, IEEE 802.11ax демонструє рівномірніше розподілення пропускної здатності на кожного клієнта, що особливо помітно у випадках низхідної передачі для трьох клієнтів. Така ситуація, ймовірно, викликана можливістю розподілення каналу передачі на ресурсні одиниці завдяки технології OFDMA та застосуванню MU-MIMO. Також, спостерігається зменшення переваги у пропускну здатності, що надається, із збільшенням ширини смуги пропускання. Таке явище, ймовірно, викликано зменшенням стійкості до перешкод та збільшенням їх кількості через ширший радіочастотний спектр.

Щодо затримок при передачі даних, обидві мережі демонструють низькі затримки, проте IEEE 802.11ax демонструє менші затримки при збільшенні кількості клієнтів, а саме: середня затримка для двох клієнтів становить 1 мс, для трьох – 1.3 мс, для чотирьох 1.4 мс, тоді як для IEEE 802.11ac: для двох клієнтів – 3.2 мс, для трьох – 3.1, для чотирьох – 3.1.

3.2.4 Розподілення експлуатаційних характеристик для 42 клієнтів

Для визначення ефективності використання стандарту IEEE 802.11ax для мереж із високою щільністю клієнтів порівняємо експлуатаційні характеристики мереж IEEE 802.11ax та IEEE 802.11ac для групи із 42 клієнтів.

Як видно на рисунках 3.19 та 3.20, для мережі IEEE 802.11ax відзначається суттєво вища пропускна здатність та значно рівномірніше її розподілення на кожного клієнта. Так, загальна пропускна мережі за стандартом IEEE 802.11ax у висхідному напрямку передачі зі смугую пропускання у 20 МГц дорівнює 97.12 Мбіт/с, тоді як для IEEE 802.11ac тільки 40.7 Мбіт/с. Тобто IEEE 802.11ax надає на 139%. Коливання середньої швидкості передачі для мережі IEEE 802.11ac дорівнює 1.3 Мбіт/с, тоді як для IEEE 802.11ax – лише 0.3 Мбіт/с. Таким чином, мережа на базі стандарту IEEE 802.11ax забезпечує максимально рівнозначні умови роботи для усіх клієнтів.

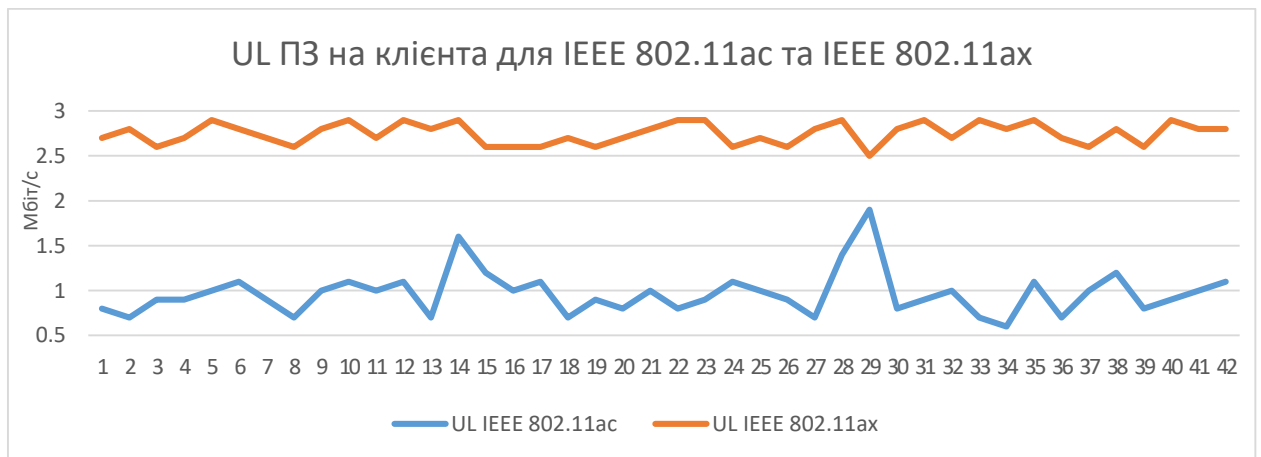


Рис. 3.19 – Розподілення UL пропускної здатності між 42 клієнтами для IEEE 802.11ax та IEEE 802.11ac

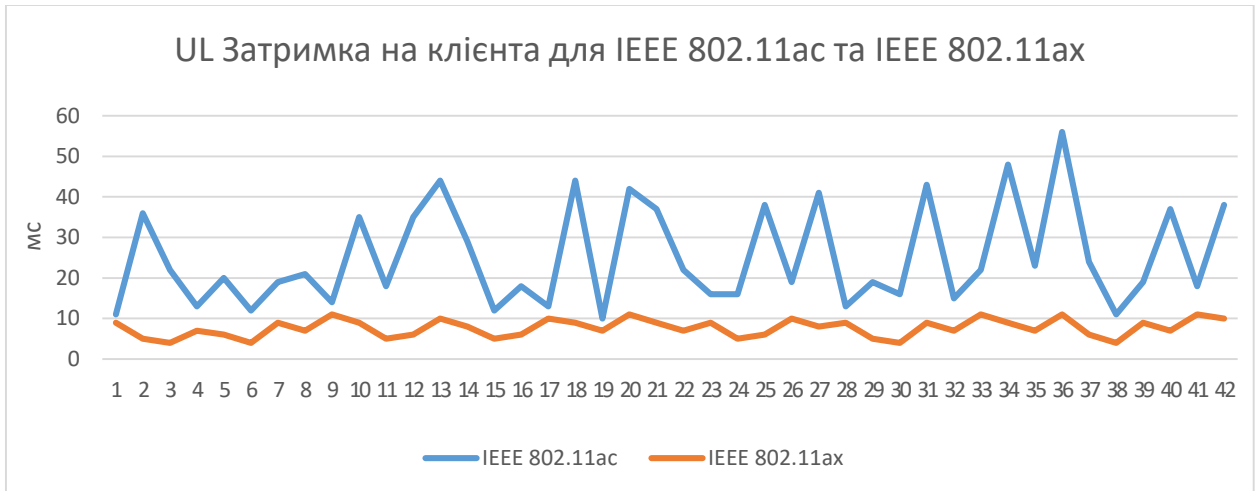


Рис. 3.20 – Затримка для 42 клієнтів для IEEE 802.11ax та IEEE 802.11ac

Затримка передачі даних для мережі IEEE 802.11ax суттєво нижча та стабільніша, аніж для IEEE 802.11ac. Аналізуючи такий параметр, як затримка, слід враховувати також й її коливання. Коливання значення затримки передачі – «джиттер», суттєво впливає на роботу сервісів, що надають послуги: VoIP, відеодзвінків, відеоконференцій тощо. Такі сервіси та застосунки чутливі насамперед до коливання параметра затримки бо їх завдання – зв'язок у реальному часі. Чим менше значення цього параметру – тим краще та стабільніші характеристики з'єднання. Отож, «джиттер» для мережі IEEE 802.11ac становить 45 мс, тоді як для IEEE 802.11ax лише 7 мс.

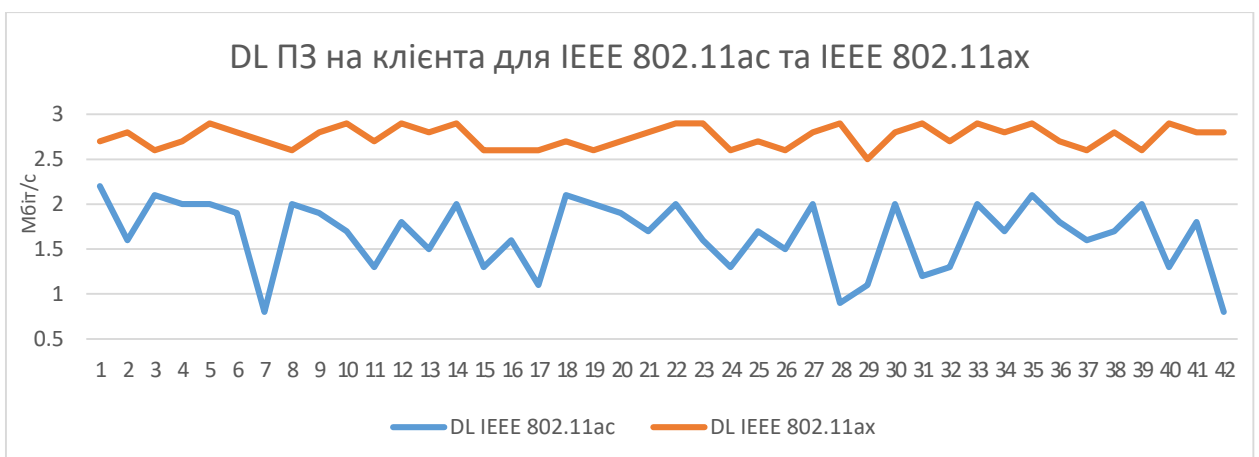


Рис. 3.21 – Розподілення DL пропускної здатності між 42 клієнтами для IEEE 802.11ax та IEEE 802.11ac

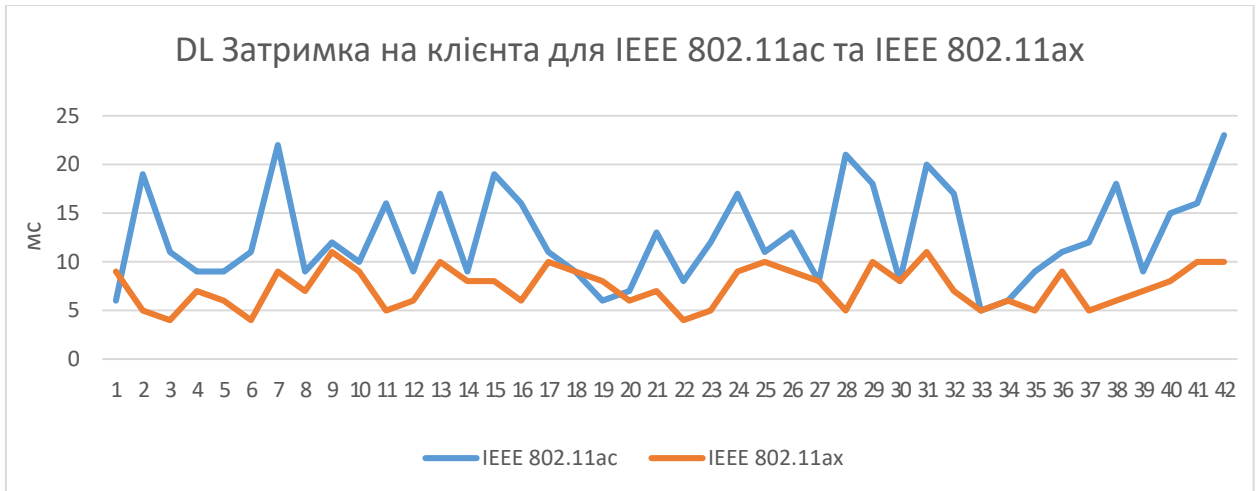


Рис. 3.22 – Затримка для 42 клієнтів для IEEE 802.11ax та IEEE 802.11ac

На рисунках 3.21 та 3.22 можна побачити, що для мережі IEEE 802.11ax, як і у випадку висхідної передачі, відзначається суттєво вища пропускна здатність та значно рівномірніше її розподілення на кожного клієнта. Так, загальна пропускна мережі за стандартом IEEE 802.11ax у низхідному напрямку передачі зі смугую пропускання у 20 МГц дорівнює 121 Мбіт/с, тоді як для IEEE 802.11ac тільки 69.9 Мбіт/с. Тобто IEEE 802.11ax надає на 73%. Коливання середньої швидкості передачі для мережі IEEE 802.11ac дорівнює 1.4 Мбіт/с, тоді як для IEEE 802.11ax – лише 0.3 Мбіт/с. Таким чином, мережа на базі стандарту IEEE 802.11ax знову забезпечує максимально рівнозначні умови роботи для усіх користувачів.

Затримка передачі даних для мережі IEEE 802.11ax, як і у випадку висхідної трансляції, нижча та стабільніша, аніж для IEEE 802.11ac. Коливання затримки або «джиттер» для мережі IEEE 802.11ac становить 18 мс, тоді як для IEEE 802.11ax лише 7 мс.

3.3 Порівняння характеристик мереж в умовах суміжних мереж

Для визначення ефективності використання стандарту IEEE 802.11ax в умовах існування суміжних мереж, зони покриттів яких накладаються, та які працюють на спільному каналі порівнюємо значення експлуатаційних характеристик мереж IEEE 802.11ax та IEEE 802.11ac.

3.3.1 Пропускна здатність для єдиного клієнта та суміжних мереж

Для визначення впливу суміжної мережі на спільному каналі для мереж IEEE 802.11ax та IEEE 802.11ac порівнюємо відповідні значення експлуатаційних характеристик для єдиного клієнтського пристрою.

На рисунку 3.23 видно, що мережа IEEE 802.11ax в усіх випадках демонструє значну перевагу у пропускній здатності над IEEE 802.11ac в умовах наявності суміжної мережі на спільному каналі, а саме: для каналу у 20 МГц на 70% та 67%, для 40 МГц на 66% та 59% і для 80 МГц на 30% та 26% для висхідної та низхідної передачі відповідно.

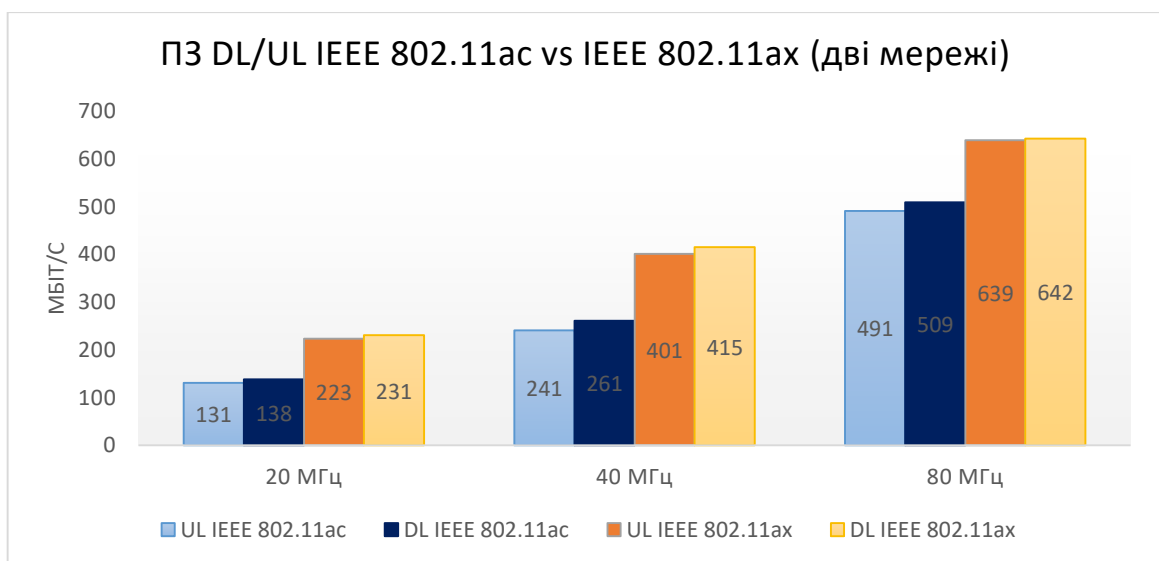


Рис. 3.23 – Пропускна здатність для єдиного клієнта

Як і у випадку із єдиною зоною обслуговування, перевага, що надається, зменшується зі збільшенням ширини каналу.

В усіх випадках передачі даних для одного клієнта прослідковується стабільно низька затримка для обох стандартів (див. табл. 2.28 та 2.36). Середнє значення затримки – 1.5 мс.

3.3.2 Вплив інтерференції від неактивної суміжної мережі

Для визначення впливу неактивної суміжної мережі на спільному каналі порівнюємо пропускну здатність мереж в умовах єдиної та суміжних мереж.

Виходячи із рисунку 3.24, накладання зон покриття двох мереж у спільному каналі несе за собою незначне зменшення пропускну здатності у висхідному напрямку передачі для одного пристрою, а саме: для смуги пропускання у 20 МГц на 7% та 3%, для 40 МГц на 8% та 2%, для 80 МГц на 4% та 2%.

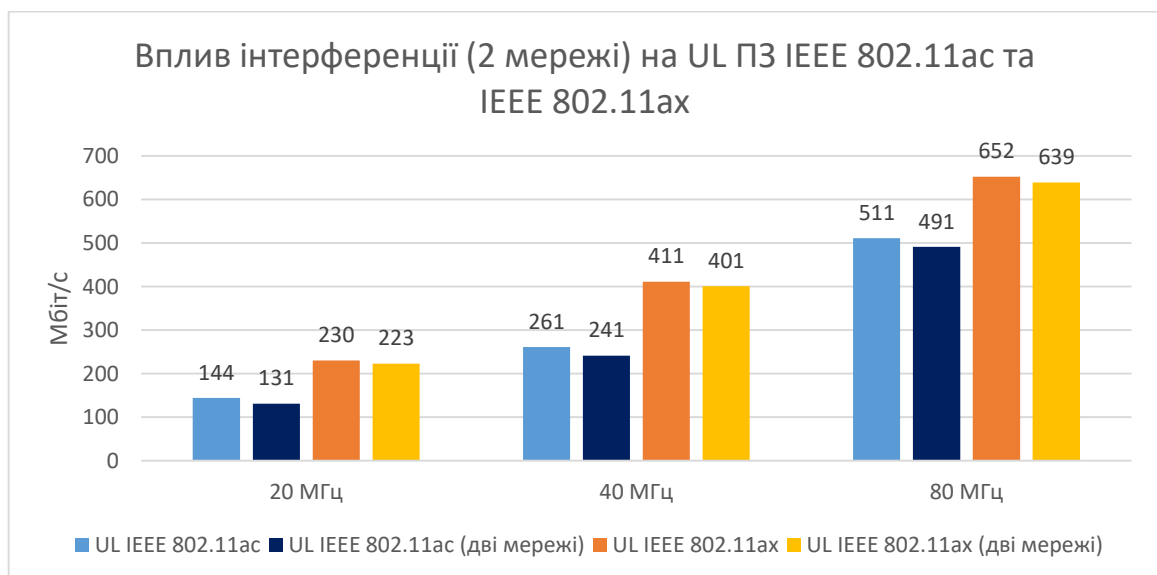


Рис. 3.24 – Вплив інтерференції на UL пропускну здатність

Загалом, IEEE 802.11ax демонструє більшу стійкість до впливу перешкод на пропускну здатність, що, ймовірно, є досягнення збільшеного захисного інтервалу та OFDMA символу.

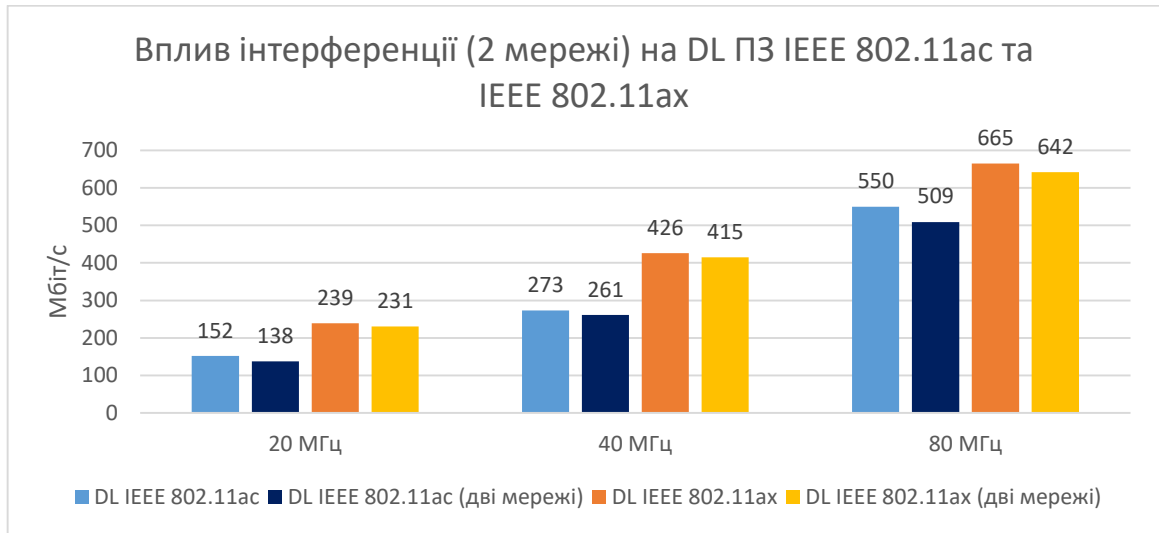


Рис. 3.25 – Вплив інтерференції на DL пропускну здатність

На рисунку 3.25 видно, що накладання зон покриття двох мереж у спільному каналі також несе за собою незначне зменшення пропускну здатності у низхідному напрямку передачі для одного пристрою, а саме: для смуги пропускання у 20 МГц на 9% та 3%, для 40 МГц на 4% та 3%, для 80 МГц на 7% та 3%. Загалом, IEEE 802.11ax демонструє більшу стійкість до впливу перешкод на пропускну здатність, що, ймовірно, є досягнення збільшеного захисного інтервалу та OFDMA символу.

Таким чином, неактивна суміжна мережа на спільному каналі не вносить дуже великих проблем у роботу іншої, у якій передаються дані.

3.3.3 Вплив збільшення кількості клієнтів в умовах суміжних мереж

Для визначення впливу збільшення кількості активних клієнтських пристроїв в умовах суміжних мереж у спільному каналі на експлуатаційні характеристики мереж IEEE 802.11ах та IEEE 802.11ас порівняємо їх значення.

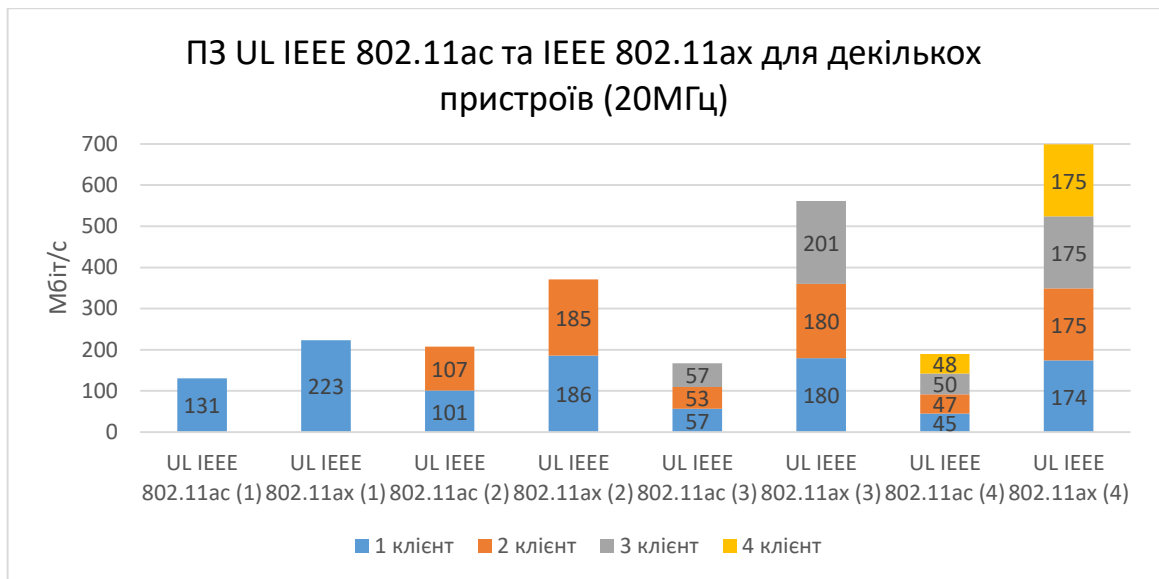


Рис. 3.26 – UL пропускна здатність для декількох клієнтів (20 МГц)

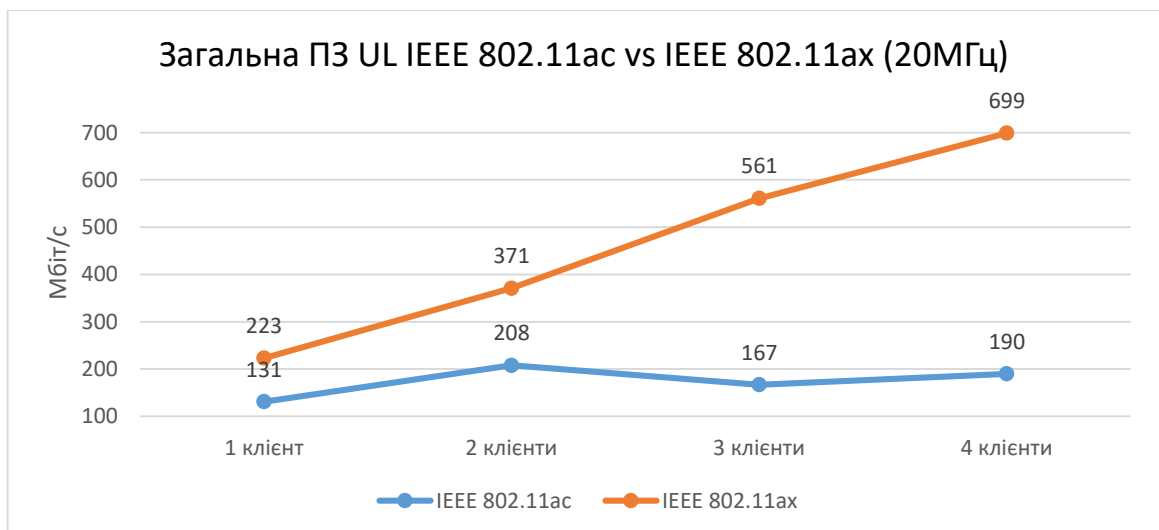


Рис. 3.27 – Загальна UL пропускна здатність для декількох клієнтів

На рисунках 3.26 та 3.27 можна побачити, що при застосуванні смуги пропускання у 20 МГц у висхідному напрямку передачі для двох зон та збільшенні кількості пристроїв, розподілених у різних зонах, у всіх випадках мережа IEEE 802.11ax демонструє суттєве збільшення загальної пропускнуої здатності. Проаналізувавши графіки можна побачити, що у випадку із IEEE 802.11ac середовище передавання розподіляється між двома зонами обслуговування приблизно навпіл. Також, свій вплив у зменшення пропускнуої здатності вносить канална інтерференція та затримки через боротьбу за доступ до середовища. Тоді як мережа IEEE 802.11ax демонструє майже повне розділення зон у сумісному каналі та одночасну передачу, що є досягненням механізму повторного використання середовища BSS Coloring.

Загалом, мережа IEEE 802.11ax демонструє збільшення загальної пропускнуої здатності у порівнянні із IEEE 802.11ac у висхідному напрямку передачі у каналі 20 МГц на: 70% для єдиного клієнта, 78% для двох клієнтів, 236% для трьох клієнтів та 268% для чотирьох клієнтів.

Як видно на рисунках 3.28 та 3.29, у низхідному напрямку передачі для двох зон та збільшенні кількості пристроїв у всіх випадках мережа IEEE 802.11ax також демонструє суттєве збільшення загальної пропускнуої здатності застосовуючи смугу пропускання у 20 МГц.

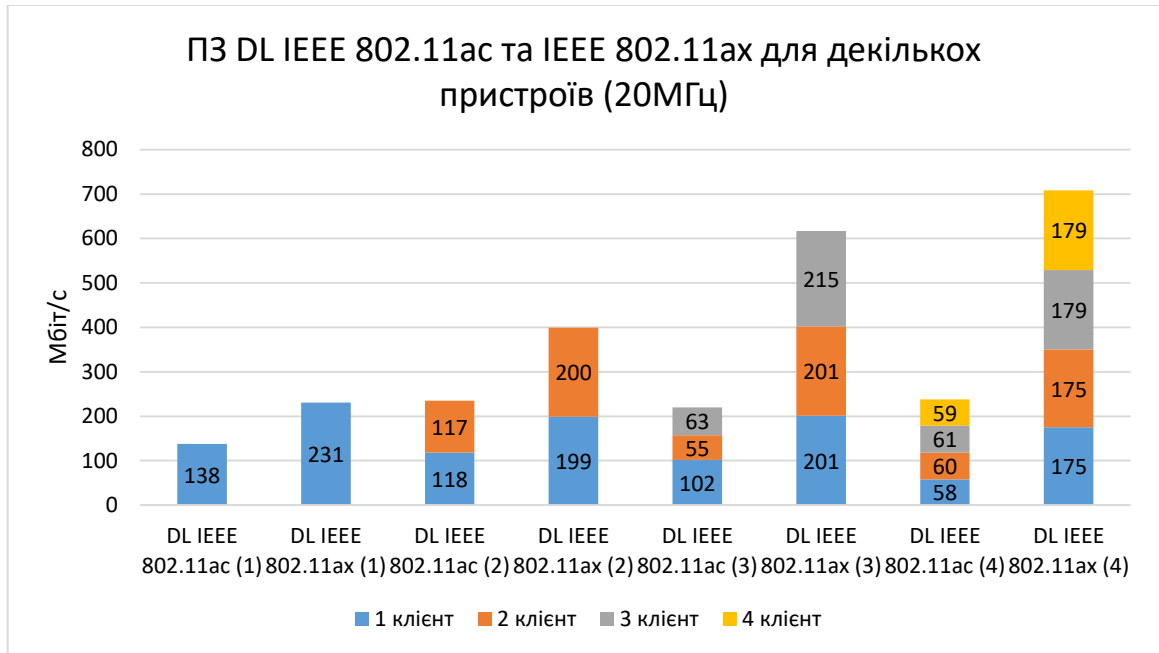


Рис. 3.28 – DL пропускна здатність для декількох клієнтів (20 МГц)

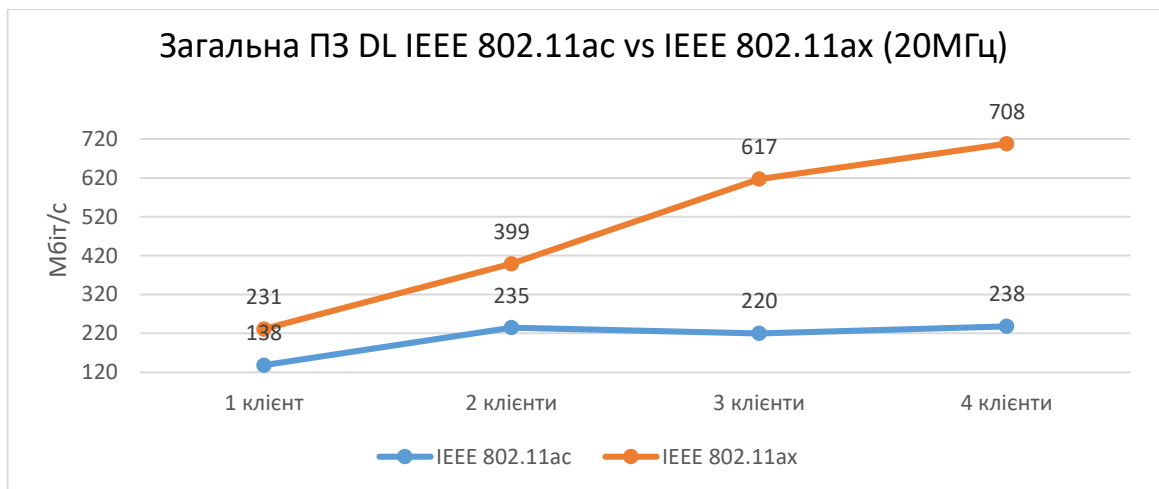


Рис. 3.29 – Загальна DL пропускна здатність для декількох клієнтів

Знову ж, проаналізувавши графіки можна побачити, що у випадку із IEEE 802.11ac середовище передавання розподіляється між двома зонами обслуговування навпіл. Тоді як мережа IEEE 802.11ax демонструє майже повне розділення зон у сумісному каналі та одночасну передачу, що є досягненням механізму повторного використання середовища BSS Coloring.

Загалом, мережа IEEE 802.11ax демонструє збільшення загальної пропускної здатності для двох зон обслуговування у порівнянні із IEEE 802.11ac на: 67% для єдиного клієнта, 70% для двох клієнтів, 180% для трьох клієнтів та 197% для чотирьох клієнтів у низхідному напрямку передачі на каналі у 20 МГц.

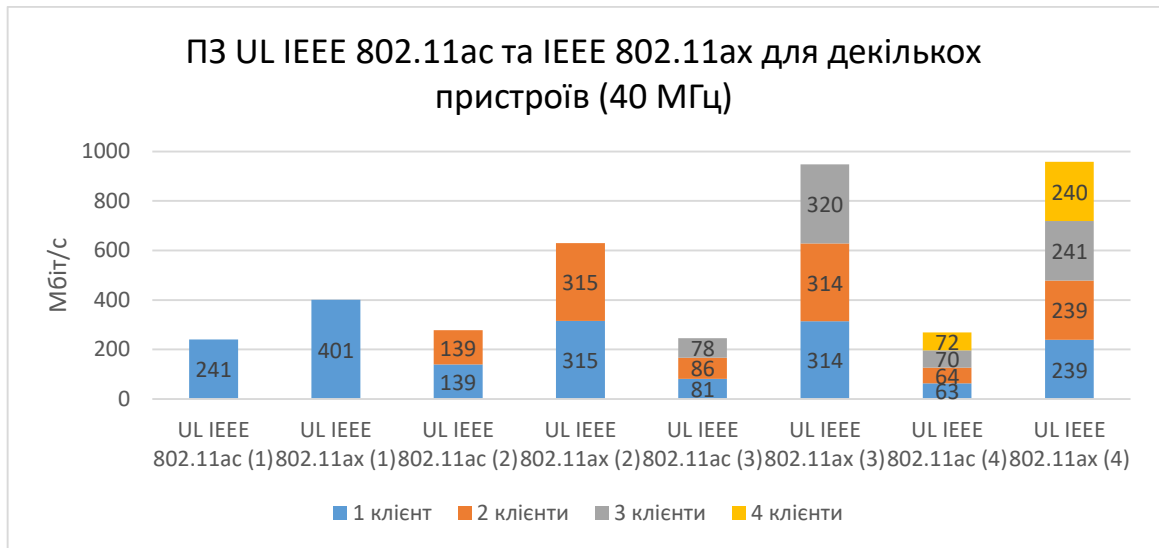


Рис. 3.30 – UL пропускна здатність для декількох клієнтів (40 МГц)

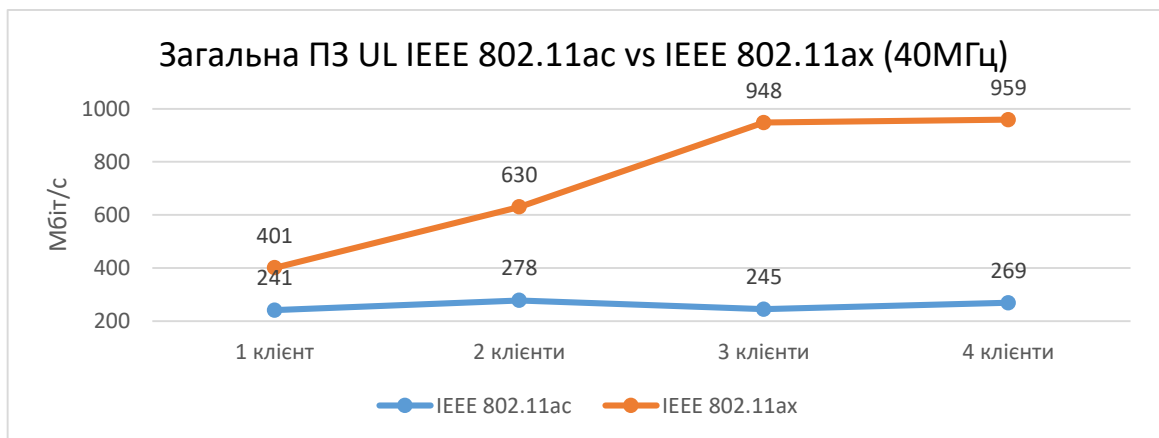


Рис. 3.31 – Загальна UL пропускна здатність для декількох клієнтів

Як можна побачити на рисунках 3.30 та 3.31, при застосуванні смуги пропускання у 40 МГц у висхідному напрямку передачі для двох зон та збільшенні кількості пристроїв у всіх випадках мережа IEEE 802.11ax

демонструє суттєву перевагу у загальній пропускній здатності. Як і у попередніх випадках, проаналізувавши графіки можна побачити, що у випадку із IEEE 802.11ac середовище передавання розподіляється між двома зонами обслуговування навпіл. Тоді як мережа IEEE 802.11ax демонструє майже повне розділення зон у сумісному каналі та одночасну передачу, що є досягненням механізму повторного використання середовища BSS Coloring.

Загалом, мережа IEEE 802.11ax демонструє збільшення загальної пропускної здатності у порівнянні із IEEE 802.11ac на: 66% для єдиного клієнта, 127% для двох клієнтів, 287% для трьох клієнтів та 257% для чотирьох клієнтів.

Виходячи із рисунків 3.32 та 3.33, у низхідному напрямку передачі для двох зон та збільшенні кількості пристроїв у всіх випадках мережа IEEE 802.11ax демонструє суттєве збільшення загальної пропускної здатності при застосуванні смуги пропускання у 40 МГц.

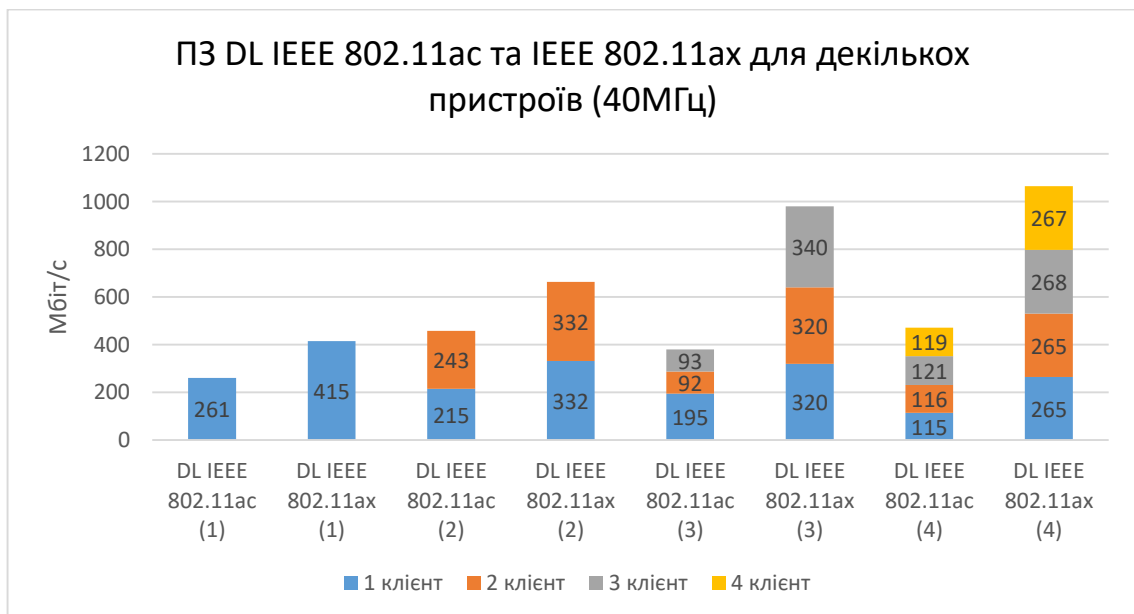


Рис. 3.32 – DL пропускна здатність для декількох клієнтів (40 МГц)

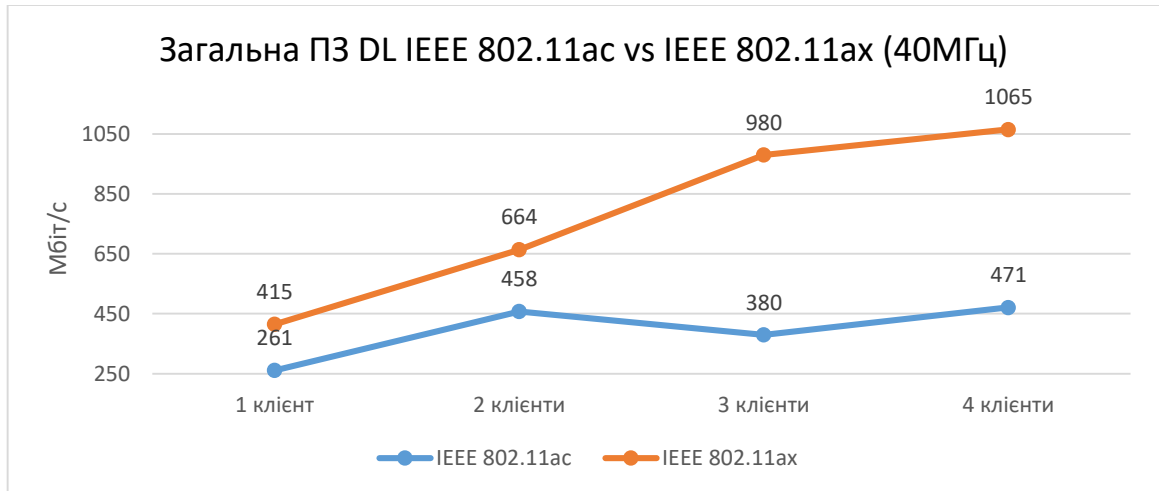


Рис. 3.33 – Загальна DL пропускна здатність для декількох клієнтів

Також, така мережа більш рівномірно розподіляє пропускну здатність між клієнтами, що говорить про більш ефективне розподілення ресурсів середовища передачі (MU-MIMO, OFDMA). Знову ж, проаналізувавши графіки можна побачити, що у випадку із IEEE 802.11ac середовище передавання розподіляється між двома зонами обслуговування навпіл. Тоді як мережа IEEE 802.11ax демонструє майже повне розділення зон у сумісному каналі та одночасну передачу, що є досягненням механізму повторного використання середовища BSS Coloring.

Загалом, мережа IEEE 802.11ax демонструє збільшення загальної пропускної здатності у порівнянні із IEEE 802.11ac на: 59% для єдиного клієнта, 45% для двох клієнтів, 158% для трьох клієнтів та 126% для чотирьох клієнтів.

Як видно на рисунках 3.34 та 3.35, застосовуючи смугу пропускання у 80 МГц у висхідному напрямку передачі та збільшенні кількості пристроїв у всіх випадках мережа IEEE 802.11ax демонструє суттєву перевагу у загальній пропускній здатності.

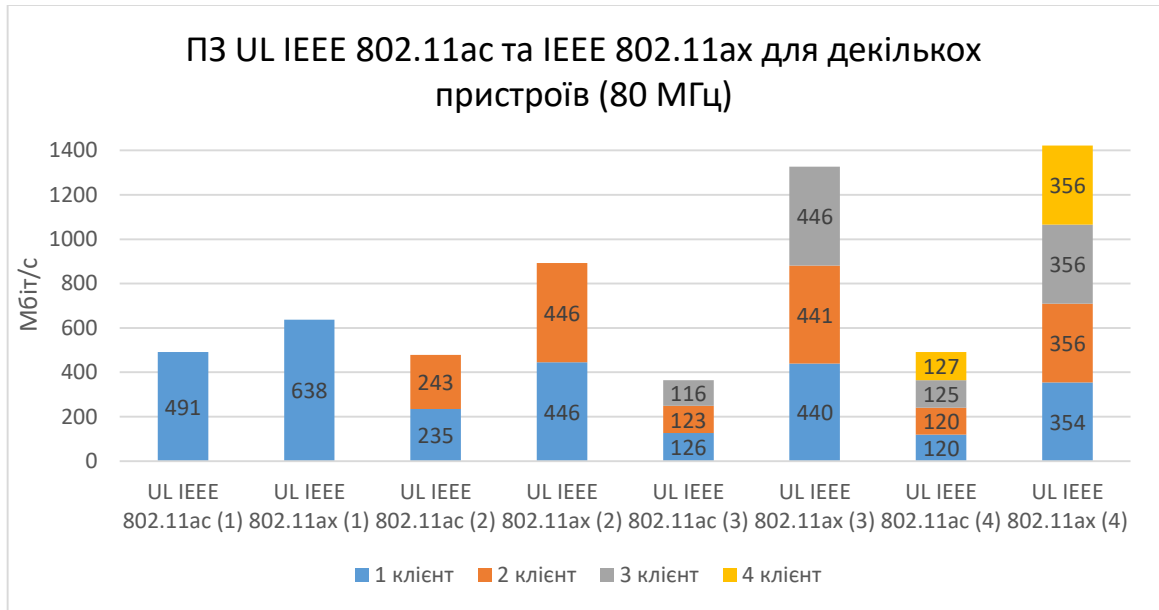


Рис. 3.34 – UL пропускна здатність для декількох клієнтів (80 МГц)

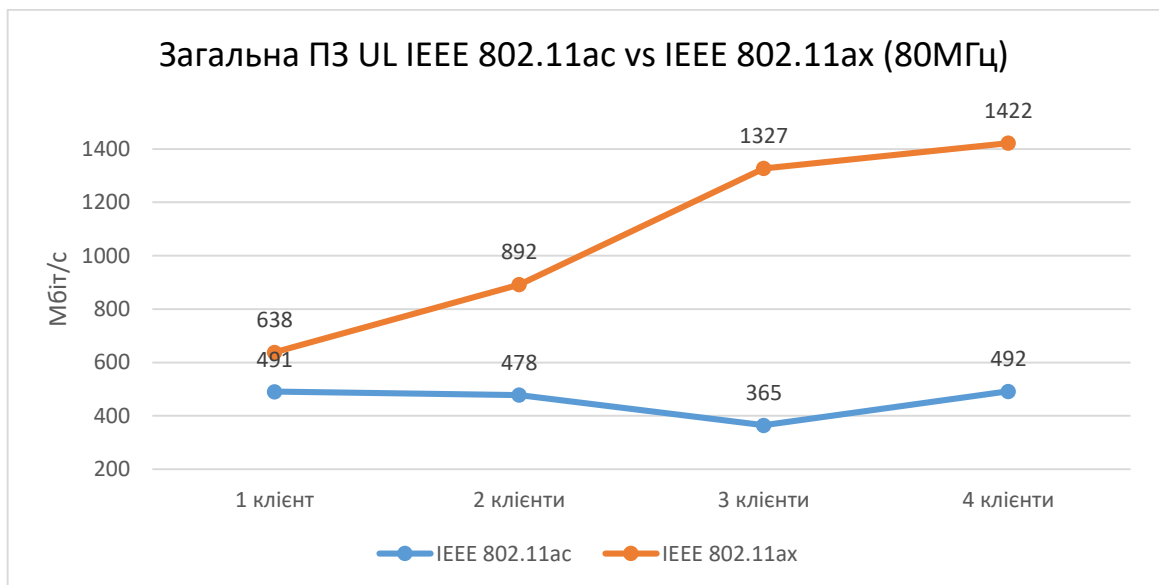


Рис. 3.35 – Загальна UL пропускна здатність для декількох клієнтів

Як і раніше, проаналізувавши графіки можна побачити, що у випадку із IEEE 802.11ac середовище передавання розподіляється між двома зонами обслуговування навпіл. Тоді як мережа IEEE 802.11ax демонструє майже повне розділення зон у сумісному каналі та одночасну передачу, що є досягненням механізму повторного використання середовища BSS Coloring.

Загалом, мережа IEEE 802.11ax демонструє збільшення загальної пропускної здатності у порівнянні із IEEE 802.11ac на: 30% для єдиного клієнта, 87% для двох клієнтів, 264% для трьох клієнтів та 189% для чотирьох клієнтів.

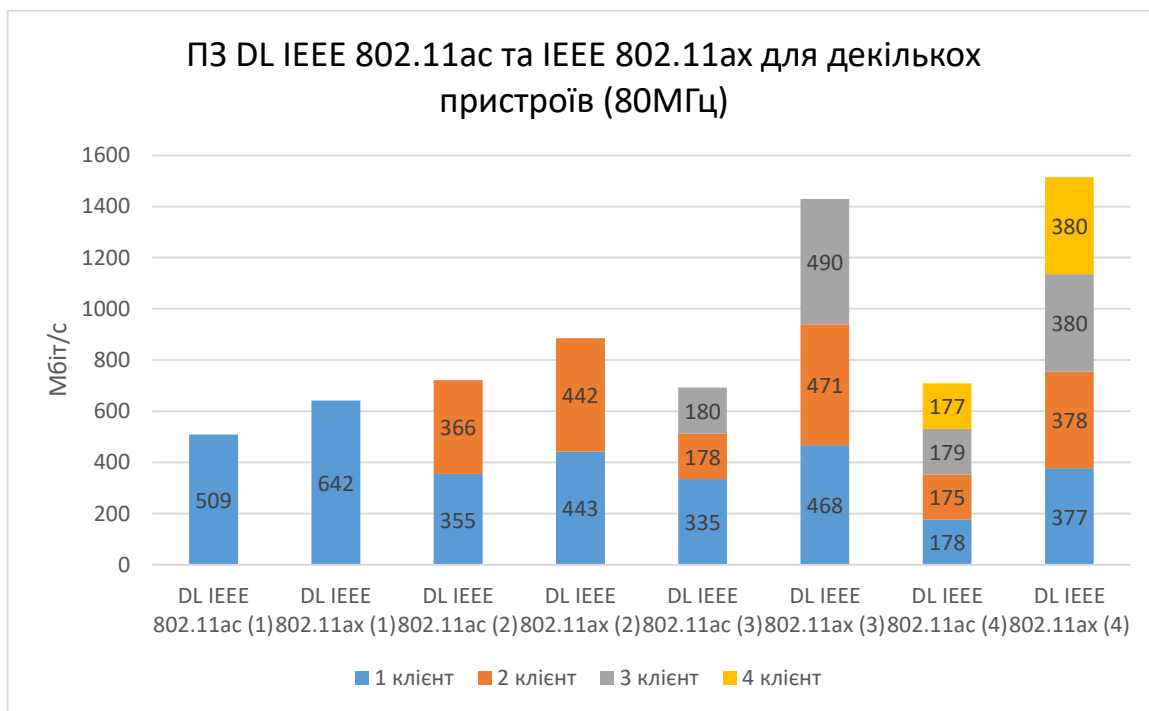


Рис. 3.36 – DL пропускна здатність для декількох клієнтів (80 МГц)

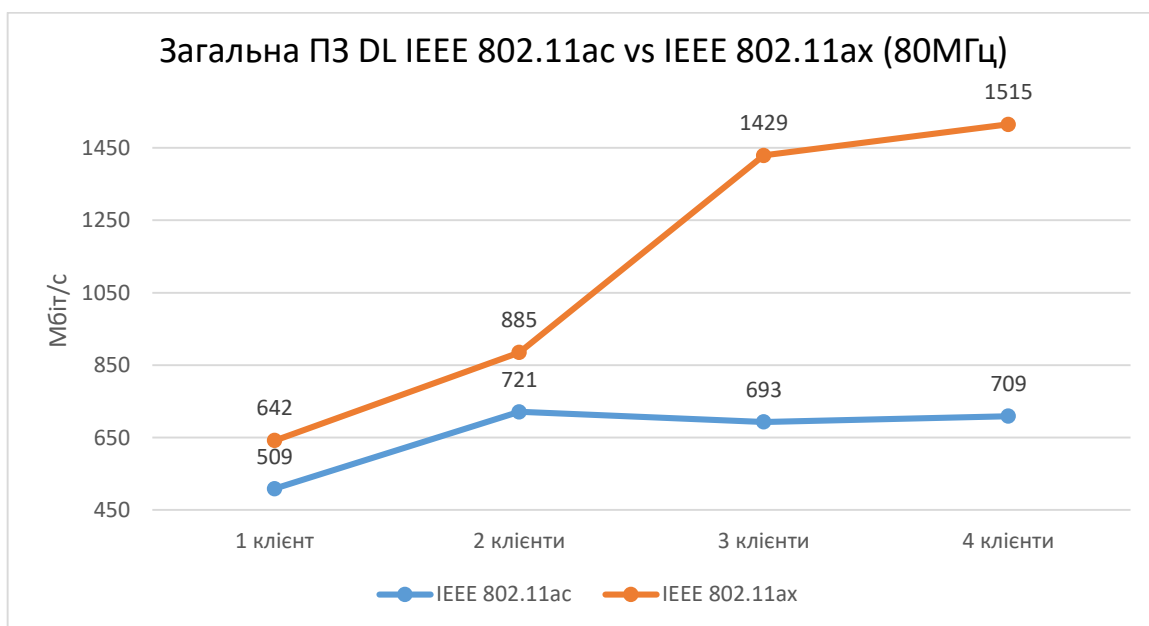


Рис. 3.37 – Загальна DL пропускна здатність для декількох клієнтів

Як можна побачити на рисунках 3.36 та 3.37, у низхідному напрямку передачі та збільшенні кількості пристроїв у всіх випадках мережа IEEE 802.11ax демонструє суттєве збільшення загальної пропускної здатності при застосуванні смуги пропускання у 80 МГц. Знову ж, проаналізувавши графіки можна побачити, що у випадку із IEEE 802.11ac середовище передавання розподіляється між двома зонами обслуговування навпіл. Тоді як мережа IEEE 802.11ax демонструє майже повне розділення зон у сумісному каналі та одночасну передачу, що є досягненням механізму повторного використання середовища BSS Coloring.

Також, така мережа більш рівномірно розподіляє пропускну здатність між клієнтами, що говорить про більш ефективне розподілення ресурсів середовища передачі (MU-MIMO, OFDMA). Загалом, мережа IEEE 802.11ax демонструє збільшення загальної пропускної здатності у порівнянні із IEEE 802.11ac на: 26% для єдиного клієнта, 23% для двох клієнтів, 106% для трьох клієнтів та 114% для чотирьох клієнтів.

Отож, мережа за стандартом IEEE 802.11ax демонструє як більшу загальну пропускну здатність так і пропускну здатність на одного клієнта аніж IEEE 802.11ac. Фактично, завдяки механізму повторного використання середовища BSS Coloring, IEEE 802.11ax дійсно дозволяє виконувати одночасну передачу у двох зонах обслуговування у спільному каналі. Особливо помітно більш рівномірне розподілення пропускної здатності у випадках низхідної передачі для трьох клієнтів. Така ситуація, ймовірно, викликана можливістю розподілення каналу передачі на ресурсні одиниці завдяки технології OFDMA та MU-MIMO.

Щодо затримок при передачі даних, обидві мережі демонструють низькі затримки, проте IEEE 802.11ax демонструє менші затримки при збільшенні кількості клієнтів, а саме: середня затримка для двох клієнтів становить 1.6 мс, для трьох – 1.4 мс, для чотирьох 1.6 мс, тоді як для IEEE 802.11ac: для двох клієнтів – 2.4 мс, для трьох – 3.4 мс, для чотирьох – 2 мс.

3.3.4 Розподілення експлуатаційних характеристик для групи із 42 клієнтів у 2 групах

Для визначення впливу наявності суміжних мереж у спільному каналі та ефективності використання стандарту IEEE 802.11ax порівняємо значення експлуатаційних характеристик мереж IEEE 802.11ax та IEEE 802.11ac в умовах розділення навпіл групи із 42 клієнтів на дві суміжні зони обслуговування.

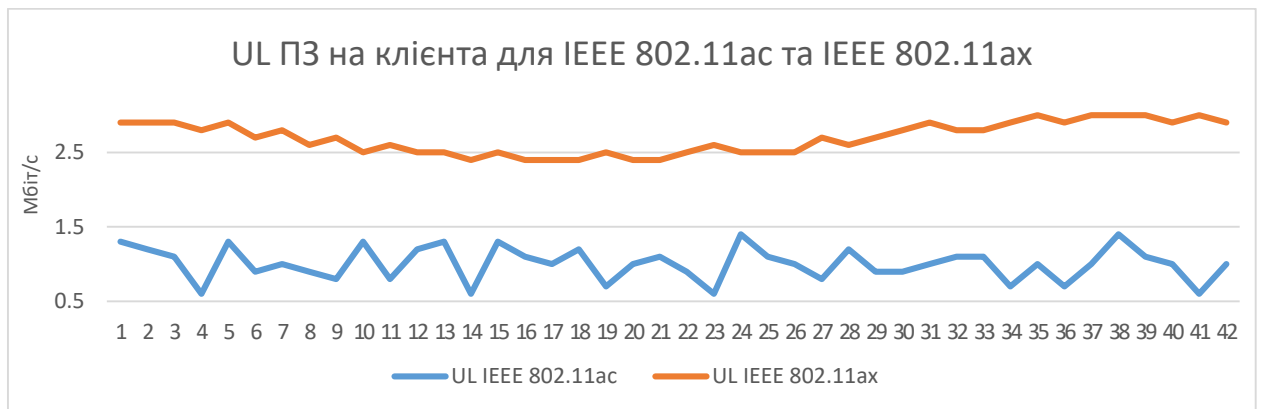


Рис. 3.38 – Розподілення UL пропускної здатності між 42 клієнтами у двох групах для IEEE 802.11ax та IEEE 802.11ac

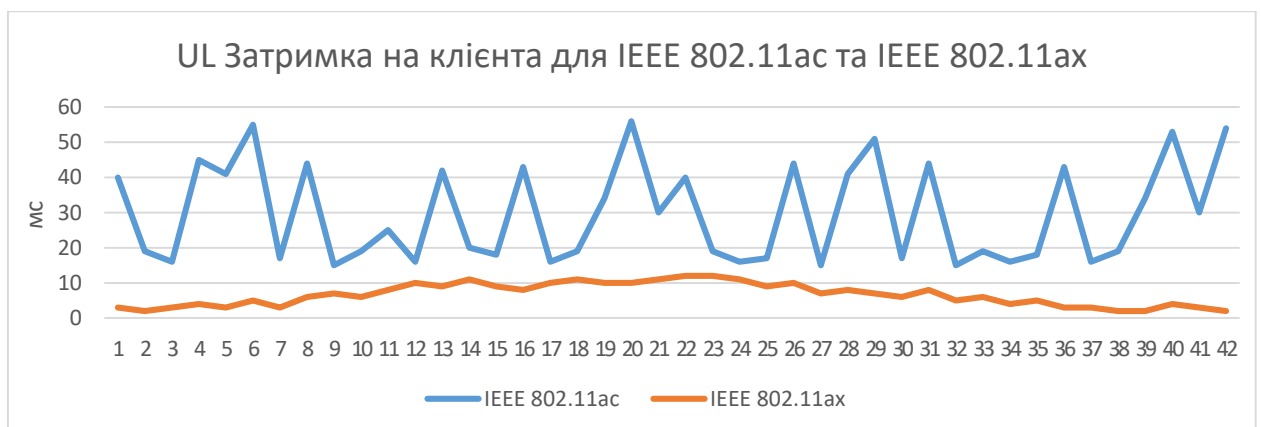


Рис. 3.39 – Затримка для 42 клієнтів для IEEE 802.11ax та IEEE 802.11ac

На рисунках 3.38 та 3.39 видно, що для мережі IEEE 802.11ax у випадку висхідної передачі відзначається суттєво вища пропускна здатність та значно

рівномірніше її розподілення на кожного клієнта. Так, загальна пропускна мережі за стандартом IEEE 802.11ax у висхідному напрямку передачі та зі смугую пропускання у 20 МГц дорівнює 113.2 Мбіт/с, тоді як для IEEE 802.11ac тільки 42.2 Мбіт/с. Тобто IEEE 802.11ax надає на 229%. Коливання середньої швидкості передачі для мережі IEEE 802.11ac дорівнює 1.3 Мбіт/с, тоді як для IEEE 802.11ax – 0.8 Мбіт/с. Таким чином, мережа на базі стандарту IEEE 802.11ax забезпечує суттєво кращі та максимально рівнозначні умови роботи для усіх пристроїв.

Проаналізувавши графіки можна побачити, що у випадку із IEEE 802.11ac середовище передавання розподіляється між двома зонами обслуговування навпіл. Також, свій вплив у зменшення пропускної здатності на пропускну здатність вносить канална інтерференція та затримки через боротьбу за доступ до середовища. Тоді як мережа IEEE 802.11ax демонструє майже повне розділення зон у сумісному каналі та одночасну передачу, що є відмінним досягненням механізму повторного використання середовища BSS Coloring.

Затримка передачі даних для мережі IEEE 802.11ax суттєво нижча та стабільніша, аніж для IEEE 802.11ac. Коливання затримки – «джиттер» для мережі IEEE 802.11ac становить 41 мс, тоді як для IEEE 802.11ax лише 10 мс.

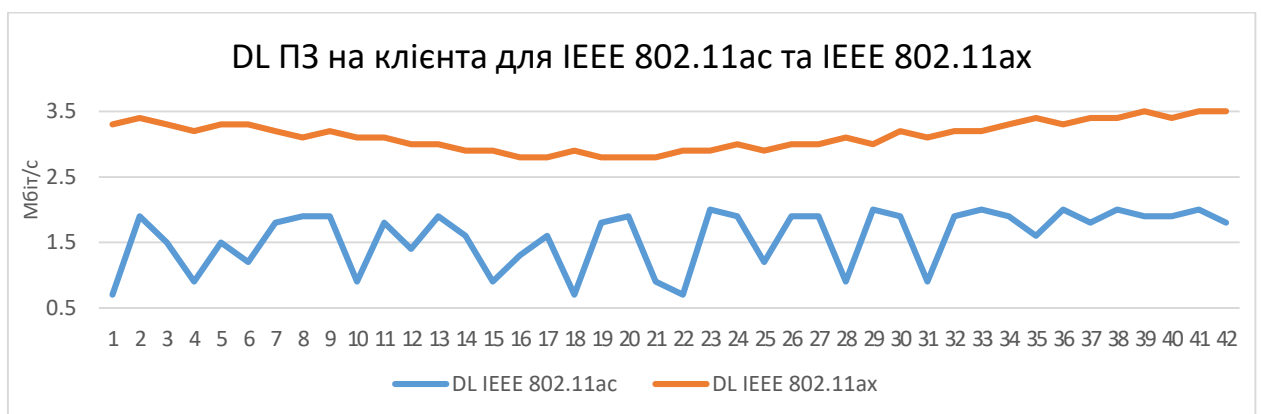


Рис. 3.40 – Розподілення DL пропускної здатності між 42 клієнтами у двох групах для IEEE 802.11ax та IEEE 802.11ac

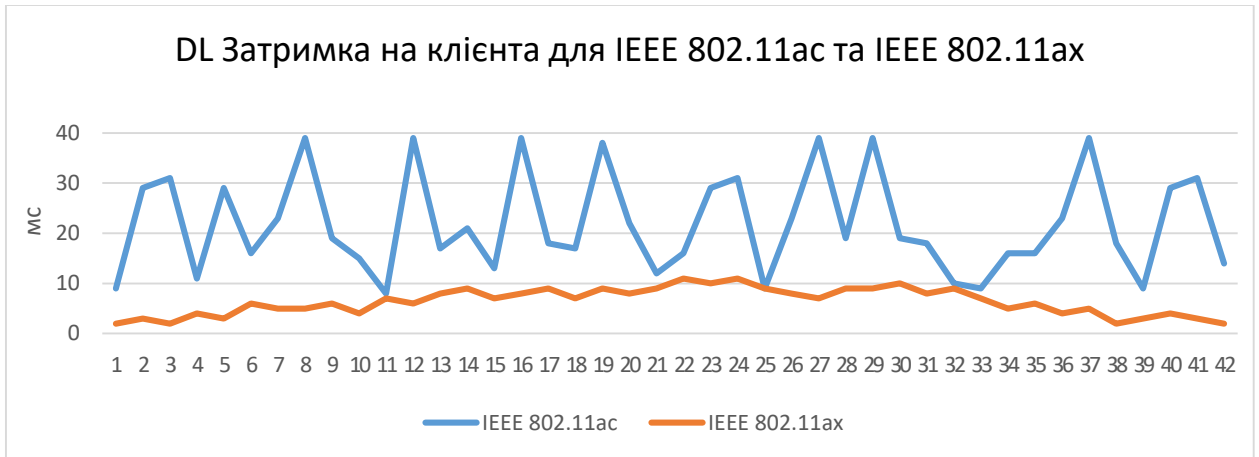


Рис. 3.41 – Затримка для 42 клієнтів для IEEE 802.11ax та IEEE 802.11ac

Як показують рисунки 3.40 та 3.41, для мережі IEEE 802.11ax, як і у випадку висхідної передачі, відзначається суттєво вища пропускна здатність та значно рівномірніше її розподілення на кожного клієнта.

Так, загальна пропускна мережі за стандартом IEEE 802.11ax у низхідному напрямку передачі та зі смугою пропускання у 20 МГц дорівнює 131.4 Мбіт/с, тоді як для IEEE 802.11ac тільки 66.1 Мбіт/с. Тобто IEEE 802.11ax надає перевагу на 99%. Коливання середньої швидкості передачі для мережі IEEE 802.11ac дорівнює 0.8 Мбіт/с, тоді як для IEEE 802.11ax – 0.6 Мбіт/с. Таким чином, мережа на базі стандарту IEEE 802.11ax знову забезпечує максимально рівнозначні умови роботи для усіх користувачів.

Як і попередньому випадку, проаналізувавши графіки можна побачити, що у мережі на базі IEEE 802.11ac середовище передавання розподіляється між двома зонами обслуговування приблизно навпіл. Тоді як мережа IEEE 802.11ax демонструє майже повне розділення зон у сумісному каналі та одночасну передачу, що є досягненням механізму повторного використання середовища BSS Coloring.

Затримка передачі даних для мережі IEEE 802.11ax, як і у випадку висхідної трансляції, нижча та стабільніша, аніж для IEEE 802.11ac. Коливання затримки або «джиттер» для мережі IEEE 802.11ac становить 31 мс, тоді як для IEEE 802.11ax лише 9 мс.

До того ж, на попередніх рисунках можна побачити стійке зменшення пропускної здатності та певне збільшення затримки у центральній частині графіків для мережі IEEE 802.11ax. Проаналізувавши це явище, вдалося визначити, що зниження швидкості та збільшення затримки пов'язані із фізичним розміщенням клієнтських пристроїв. Клієнти, що знаходяться ближче до другої зони обслуговування мають меншу пропускну здатність та більшу затримку і навпаки. Це, ймовірно, наслідок впливу явища інтерференції.

На рисунку 3.42 показано наочне розподілення пропускної здатності відносно розміщення клієнтських пристроїв у двох аудиторіях, кожна із яких має власну мережу на сумісному каналі (кожний стовпчик – клієнт, розміщений в аудиторії відповідно до пункту 2.4)

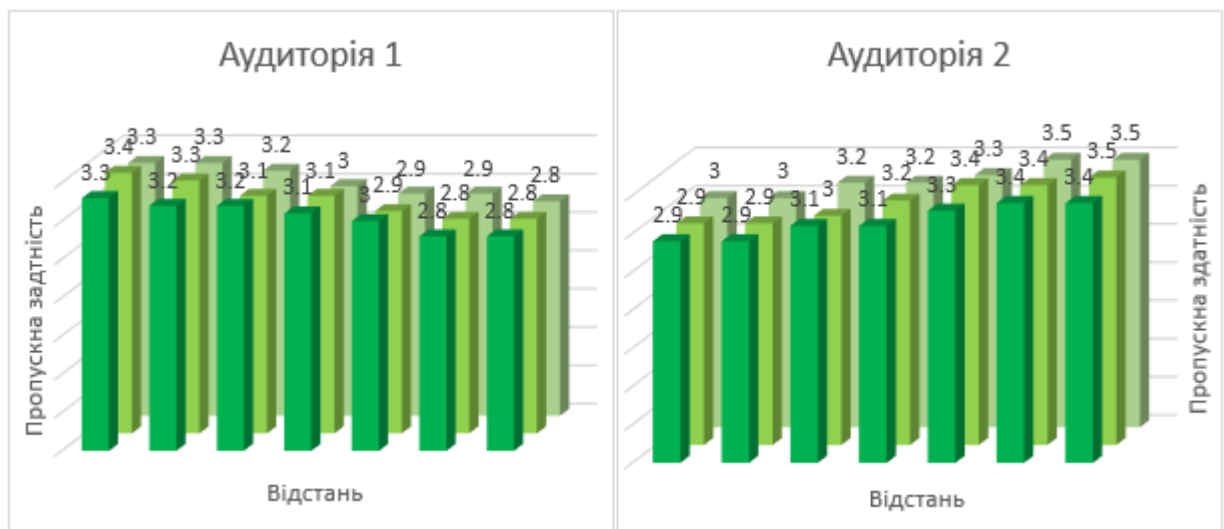


Рис. 3.42 – Розподілення пропускної здатності IEEE 802.11ax за умов двох мереж на сумісному каналі

3.4 Висновки за третім розділом

Впродовж роботи над третім розділом було порівняно та проаналізовано отримані раніше значення експлуатаційних характеристик мереж IEEE 802.11ac та IEEE 802.11ax.

Виявлено, що розрахункова потужність отриманого клієнтом сигналу дійсно дозволяє отримати достатньо точні дані, це ж стосується й розрахункових значень максимальної пропускної здатності, що можуть бути отримані із застосуванням єдиного клієнтського пристрою.

Було визначено фактичну залежність пропускної здатності від відстані – мережа IEEE 802.11ax надає суттєву перевагу над IEEE 802.11ac. Розрахункові значення пропускної здатності мають сталий характер для усієї зони обслуговування, а фактичні суттєво змінюються зі зростом відстані.

Зі збільшенням кількості активних клієнтів мережа IEEE 802.11ax демонструє збільшення загальної пропускної здатності у порівнянні із IEEE 802.11ac. У переважній більшості випадків мережа IEEE 802.11ax демонструє більш рівномірне розподілення пропускної здатності та значень затримки на кожного клієнта. При збільшенні кількості активних пристроїв та розподіленні їх у двох сумісних зонах обслуговування із IEEE 802.11ac середовище передавання розподіляється між двома зонами обслуговування приблизно навпіл, а мережа IEEE 802.11ax демонструє суттєве розділення зон у сумісному каналі та дозволяє одночасну передачу. До того ж, було визначено, що клієнти, що знаходяться ближче до іншої зони обслуговування мають меншу пропускну здатність та більшу затримку.

Таким чином, мережа на базі стандарту IEEE 802.11ax продемонструвала вищі значення пропускної здатності та менші затримки передачі, суттєво рівномірніше та стабільніше розподілення пропускної здатності та менші, більш рівномірні та стабільні значення затримок передачі.

ВИСНОВКИ

Загалом, мережа на базі стандарту IEEE 802.11ax демонструє перевагу в усіх випадках, що досліджувалися. У сценаріях із єдиним клієнтським пристроєм до 172% у висхідному напрямку передачі та до 88% у низхідному напрямку передачі. У сценаріях із невеликою щільністю клієнтів у випадку висхідної передачі – до 140%, у випадку низхідної передачі – до 85%. У сценаріях із високою щільністю клієнтів (42 клієнти) у єдиній зоні обслуговування у висхідному напрямку передачі до 139%, у низхідному напрямку передачі – до 73%. У сценарії із 42 клієнтами, розподіленими у двох суміжних зонах обслуговування у спільному каналі у висхідному напрямку передачі до 229%, у низхідному – до 99%.

Таким чином, експериментально було визначено та підтверджено дійсну ефективність: збільшених захисних інтервалів та довжини символу OFDMA, вищих порядків квадратурно-амплітудної модуляції – 1024QAM та модуляційно-кодових схем MCS 10 та MCS11, застосування OFDMA та ресурсних одиниць, застосування MU-MIMO та алгоритму повторного використання середовища та розпізнавання зон обслуговування BSS Coloring.

Підсумовуючи, за умови наявності всіх або, хоча б, більшості клієнтів мережі, що підтримують стандарт IEEE 802.11ax, використання апаратного забезпечення із підтримкою IEEE 802.11ax для побудови або модернізації такої мережі безумовно доцільне. Старіші пристрої, що не підтримують стандарт IEEE 802.11ax не зможуть вірно інтерпретувати нові формати кадрів даних та будуть працювати у режимі сумісності, як у звичайній IEEE 802.11ac мережі. Але, якщо у мережі на момент планування немає переважаючої кількості IEEE 802.11ax пристроїв, все одно може бути доцільним розглянути застосування відповідного обладнання, так як на сьогодні підтримка стандарту активно поширюється вже серед клієнтських пристроїв середнього цінового діапазону, а не тільки вищого.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. The Evolution of Wi-Fi networks: from IEEE 802.11 to Wi-Fi 6E [Електронний ресурс]/Режим доступу: www. URL: bit.ly/3ylQJcB – 12.09.2022 р.
2. CSMA/CA analysis and enhancement for IEEE 802.11ax WLANs [Електронний ресурс]/Режим доступу: www. URL: bit.ly/3SW72ok – 12.09.2022 р.
3. Florwick J., Whiteaker J., Amrod A. C., Woodhams J. Wireless LAN Design Guide for High Density Environments in Higher Education. Cisco Systems. [Електронний ресурс]/Режим доступу: www. URL: bit.ly/3fK35Vs – 13.09.2022 р.
4. Aruba High Density Wireless networks for Auditoriums. VRD. Aruba. [Електронний ресурс]/Режим доступу: www. URL: bit.ly/3C6ehTU – 14.09.2022 р.
5. Carrier-sense multiple access with collision avoidance [Електронний ресурс]/Режим доступу: www. URL: bit.ly/3ryFZnn – 14.09.2022 р.
6. D. Allen, Hidden Terminal Problems in Wireless LAN's, IEEE 802.11 Working Group paper 802.11/93-xx [Електронний ресурс]/Режим доступу: www. URL: bit.ly/3EkLKg1 – 16.09.2022 р.
7. A New Channel Access Method for Packet Radio [Електронний ресурс]/Режим доступу: www. URL: bit.ly/3fLUCRv – 19.09.2022 р.
8. 802.11 Wireless LAN Fundamentals. By Pejman Roshan, Jonathan Leary. Cisco Press [Електронний ресурс]/Режим доступу: www. URL: bit.ly/3T3O7YZ – 20.09.2022 р.
9. Радиообследование WiFi среды: полное руководство [Електронний ресурс]/Режим доступу: www. URL: bit.ly/3T11oBi – 22.09.2022 р.
10. Передовые методы радиообследования WiFi [Електронний ресурс]/Режим доступу: www. URL: bit.ly/3CBQ8WK – 22.09.2022 р.

11. Vikulov A., Paramonov A.: Analysis of radio interference influence on the design process of the high density Wi-Fi Networks // Telecom IT. 2018. [Электронный ресурс]/Режим доступа: www. URL: bit.ly/3CAZpOV – 23.09.2022 г.
12. Ruckus Wireless. Deploying very High Density Wi-Fi. Design and Configuration Guide for Stadiums. [Электронный ресурс]/Режим доступа: www. URL: bit.ly/3rvBLgq – 26.09.2022 г.
13. IEEE Std 802.11. 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. [Электронный ресурс]/Режим доступа: www. URL: bit.ly/3MdzH6m – 27.09.2022 г.
14. Разбираемся в тонкостях проектирования Wi-Fi сетей в помещениях [Электронный ресурс]/Режим доступа: www. URL: bit.ly/3fKtC5c – 27.09.2022 г.
15. The Telecom Equipment Market. Dell’Oro Group [Электронный ресурс]/Режим доступа: www. URL: bit.ly/3Egn9sR – 27.09.2022 г.
16. Wi-Fi to Retain Connectivity Crown in 5G Era as Wi-Fi 6 Chipset Shipments Break 1 Billion Unit Barrier by 2022 [Электронный ресурс]/Режим доступа: www. URL: bit.ly/3fKtK4G – 27.09.2022 г.
17. M. Kamel, W. Hamouda, and A. Youssef: Ultra-dense networks: A survey, IEEE Communications Surveys Tutorials [Электронный ресурс]/Режим доступа: www. URL: ieeexplore.ieee.org/document/7476821 – 01.10.2022 г.
18. The future of your office is wireless [Электронный ресурс]/Режим доступа: www. URL: www.inc.com/christina-desmarais/the-future-of-your-office-is-wireless.html – 01.10.2022 г.
19. E. Perahia, R. Abiri, H. Yin: New usage scenarios categorization [Электронный ресурс]/Режим доступа: www. URL: mentor.ieee.org/802.11/dcn/13/11-13-0795-00-0hew-usage-scenarios-categorization.pptx – 03.10.2022 г.

20. J. Soder, F. Mestanov, E. Sakai, K. Sakoda, and K. Agardh: Stadium scenario for hew [Электронный ресурс]/Режим доступа: www. URL: www.ijssred.com/volume3/issue4/IJSRED-V3I4P17.pdf – 07.10.2022 p.
21. H. Persson, J. Soder, F. Mestanov: Text proposal of a stadium scenario to ax [Электронный ресурс]/Режим доступа: www. URL: mentor.ieee.org/802.11/dcn/14/11-14-0860-00-00ax-text-proposal-of-a-stadium-scenario-to-ax.docx – 09.10.2022 p.
22. Cisco Annual Internet Report (2018–2023) White Paper [Электронный ресурс]/Режим доступа: www. URL: www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html – 12.10.2022 p.
23. Study: 25 percent of all households use Wi-Fi [Электронный ресурс]/Режим доступа: www. URL: www.neowin.net/news/study-25-percentof-all-households-use-wifi – 13.10.2022 p.
24. Project IEEE 802.11ax [Электронный ресурс]/Режим доступа: www. URL: ieee802.org/11/PARs/P802.11ax.pdf – 01.11.2022 p.
25. B. Li, Q. Qu, Z. Yan, and M. Yang: Survey on OFDMA based MAC protocols for the next generation WLAN in 2015 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW) [Электронный ресурс]/Режим доступа: www. URL: ieeexplore.ieee.org/document/7122542?arnumber=7122542 – 04.11.2022 p.
26. IEEE Draft Standard for Information Technology – Telecommunications and Information Exchange Between Systems Local and Metropolitan Area Networks – Specific Requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment Enhancements for High Efficiency WLAN [Электронный ресурс]/Режим доступа: www. URL: ieeexplore.ieee.org/document/9248710 – 05.11.2022 p.

27. E. Khorov, A. Kiryanov, A. Lyakhov, and G. Bianchi: A Tutorial on IEEE 802.11ax High-Efficiency WLANs [Электронный ресурс]/Режим доступа: www. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8468986> – 06.11.2022 г.
28. T. Ota, M. Nakamura, and H. Otsuka: Performance evaluation of OFDM-based 256- and 1024-QAM in multipath fading propagation conditions in 2017 Ninth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN) [Электронный ресурс]/Режим доступа: www. URL: ieeexplore.ieee.org/document/7993849/metrics – 08.11.2022 г.
29. Navita and Amandeep: Performance analysis of OFDMA, MIMO and SC-FDMA technology in 4G LTE networks in 2016 6th International Conference - Cloud System and Big Data Engineering [Электронный ресурс]/Режим доступа: www. URL: ieeexplore.ieee.org/document/7508181/figures – 09.11.2022 г.
30. 802.11ax and OFDMA | Perry Correll | WLPC Prague 2018 [Электронный ресурс]/Режим доступа: www.youtube.com/watch?v=uM6y_vt630Q&t=1537s – 10.11.2022 г.
31. Wireless LAN medium access control and physical layer specifications [Электронный ресурс]/Режим доступа: www. URL: <https://www.csd.uoc.gr/~hy439/reading/802.11-1999.pdf> – 11.11.2022 г.
32. iPerf [Электронный ресурс]/Режим доступа: iperf.fr/iperf-download.php – 11.11.2022 г.
33. Ekahau AI Pro [Электронный ресурс]/Режим доступа: www. URL: www.ekahau.com/products/ekahau-connect/ai-pro/ – 11.11.2022 г.
34. Cisco Catalyst 9115AXI Series Access Point [Электронный ресурс]/Режим доступа: www. URL: www.cisco.com/c/en/us/support/wireless/catalyst-9115ax-series-access-points/series.html – 11.11.2022 г.

35. Acer Aspire 5 A515 Specifications [Электронный ресурс]/Режим доступа: [www. URL: www.acer.com/ua-uk/laptops/aspire/aspire-5/pdp/NX.A8CEU.00G](http://www.acer.com/ua-uk/laptops/aspire/aspire-5/pdp/NX.A8CEU.00G) – 11.11.2022 г.
36. Intel AX201 Specifications [Электронный ресурс]/Режим доступа: [www. URL: /ark.intel.com/content/www/us/en/ark/products/130293/intel-wifi-6-ax201-gig.html](http://www.ark.intel.com/content/www/us/en/ark/products/130293/intel-wifi-6-ax201-gig.html) – 11.11.2022 г.
37. Wi-Fi 6 OFDMA – How Does it Work and How Do You Test? [Электронный ресурс]/Режим доступа: [www. URL: www.litepoint.com/blog/wi-fi-6-ofdma/](http://www.litepoint.com/blog/wi-fi-6-ofdma/) – 10.11.2022 г.
38. Using OFDMA for MU-MIMO User Selection in 802.11ax-Based Wi-Fi Networks [Электронный ресурс]/Режим доступа: [www. URL: www.semanticscholar.org/paper/Using-OFDMA-for-MU-MIMO-User-Selection-in-Wi-Fi-Lee/2399d1cd12a00082854c09e1d8ed59a778ad8360](http://www.semanticscholar.org/paper/Using-OFDMA-for-MU-MIMO-User-Selection-in-Wi-Fi-Lee/2399d1cd12a00082854c09e1d8ed59a778ad8360) – 10.11.2022 г.
39. Uplink Resource Allocation in IEEE 802.11ax [Электронный ресурс]/Режим доступа: [www. URL: ieeexplore.ieee.org/document/8761594](http://ieeexplore.ieee.org/document/8761594) – 08.11.2022 г.
40. Performance Analysis of the IEEE 802.11ax MAC 11ax [Электронный ресурс]/Режим доступа: [www. URL: mdpi-res.com/d_attachment/sensors/sensors-19-01540/article_deploy/sensors-19-01540-v2.pdf](http://www.mdpi-res.com/d_attachment/sensors/sensors-19-01540/article_deploy/sensors-19-01540-v2.pdf) – 15.11.2022 г.
41. Bridging the Transition from IEEE 802.11ac to IEEE 802.11ax: Survival of EDCA in a Coexistence Environment [Электронный ресурс]/Режим доступа: [www. URL: ieeexplore.ieee.org/document/8694787](http://ieeexplore.ieee.org/document/8694787) – 15.11.2022 г.
42. IEEE Standard for Information technology--Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks--Specific requirements [Электронный ресурс]/Режим доступа: [www. URL: standards.ieee.org/ieee/802.11/5536/](http://standards.ieee.org/ieee/802.11/5536/) – 16.11.2022 г.

43. IEEE 802.11ax: Next generation wireless local area networks [Электронный ресурс]/Режим доступа: [www. URL: ieeeexplore.ieee.org/document/6928663](http://www.ieeeexplore.ieee.org/document/6928663) – 16.11.2022 г.
44. Multiuser Access via OFDMA Technology in High Density IEEE 802.11ax WLANs [Электронный ресурс]/Режим доступа: [www. URL: ieeeexplore.ieee.org/document/9296440](http://www.ieeeexplore.ieee.org/document/9296440) – 14.11.2022 г.
45. Toward a MAC Protocol Overcoming Hidden Stations Issue in IEEE 802.11ax Unidirectional Full Duplex Radio Communications [Электронный ресурс]/Режим доступа: [www. URL: ieeeexplore.ieee.org/document/9296431](http://www.ieeeexplore.ieee.org/document/9296431) – 15.11.2022 г.
46. Upstream Content Scheduling in Wi-Fi DenseNets during Large-Scale Events [Электронный ресурс]/Режим доступа: [www. URL: ieeeexplore.ieee.org/document/7414130](http://www.ieeeexplore.ieee.org/document/7414130) – 16.11.2022 г.
47. In-frame querying to utilize full duplex communication in IEEE 802.11ax [Электронный ресурс]/Режим доступа: [www. URL: ieeeexplore.ieee.org/document/7390453](http://www.ieeeexplore.ieee.org/document/7390453) – 16.11.2022 г.
48. An OFDMA based multiple access protocol with QoS guarantee for next generation WLAN [Электронный ресурс]/Режим доступа: [www. URL: ieeeexplore.ieee.org/document/7338845](http://www.ieeeexplore.ieee.org/document/7338845) – 17.11.2022 г.
49. Spatial Clustering Group Based OFDMA Access Protocol for the Next Generation WLAN [Электронный ресурс]/Режим доступа: [www. URL: www.jnwpu.org/articles/jnwpu/abs/2018/05/jnwpu2018365p897/jnwpu2018365p897.html](http://www.jnwpu.org/articles/jnwpu/abs/2018/05/jnwpu2018365p897/jnwpu2018365p897.html) – 17.11.2022 г.
50. Single User MAC Level Throughput Comparison: IEEE 802.11ax vs. IEEE 802.11ac [Электронный ресурс]/Режим доступа: [www. URL: www.scirp.org/journal/paperinformation.aspx?paperid=76627](http://www.scirp.org/journal/paperinformation.aspx?paperid=76627) – 20.11.2022 г.

ДОДАТКИ

Додаток А

Результати експериментальних вимірювання першої групи

Таблиця А.1

Вимірювання для єдиного найближчого до ТД клієнта (IEEE 802.11ac)

Канал (МГц)	20		40		80	
Пропускна здатність (Мбіт/с)	UL	DL	UL	DL	UL	DL
Вимірювання 1	146	148	261	286	509	550
Вимірювання 2	143	155	263	269	511	549
Вимірювання 3	144	152	260	287	513	550
Середня ПЗ (Мбіт/с)	144	152	261	273	511	550
Середня затримка (мс)	1	1	1	1	2	1

Таблиця А.2

Вимірювання для єдиного найвіддаленішого від ТД клієнта (IEEE 802.11ac)

Канал (МГц)	20		40		80	
Пропускна здатність (Мбіт/с)	UL	DL	UL	DL	UL	DL
Вимірювання 1	83	121	160	241	301	463
Вимірювання 2	80	119	160	243	303	465
Вимірювання 3	80	124	161	241	305	460
Середня ПЗ (Мбіт/с)	81	121	160	242	303	463
Середня затримка (мс)	1	1	1	1	2	1

Таблиця А.3

Вимірювання для двох клієнтів у висхідному напрямку (IEEE 802.11ac)

Канал (МГц)	20		40		80	
Клієнт	1	2	1	2	1	2
ПЗ (Мбіт/с)	UL					
Вимірювання 1	121	119	158	161	275	276
Вимірювання 2	118	120	159	159	282	277
Вимірювання 3	120	120	155	155	274	275
Середня ПЗ (Мбіт/с)	120	120	157	158	277	276
Загальна ПЗ	240		315		553	
Середня затримка (мс)	2	1	1	2	2	3

Таблиця А.4

Вимірювання для двох клієнтів у низхідному напрямку (IEEE 802.11ac)

Канал (МГц)	20		40		80	
Клієнт	1	2	1	2	1	2
ПЗ (Мбіт/с)	DL					
Вимірювання 1	135	132	256	255	405	407
Вимірювання 2	136	137	255	257	408	409
Вимірювання 3	136	135	256	253	412	406
Середня ПЗ (Мбіт/с)	136	135	256	255	408	407
Загальна ПЗ	271		511		815	
Середня затримка (мс)	1	2	1	1	2	2

Таблиця А.5

Вимірювання для трьох клієнтів у висхідному напрямку (IEEE 802.11ac)

Канал (МГц)	20			40			80		
Клієнт	1	2	3	1	2	3	1	2	3
ПЗ (Мбіт/с)	UL								
Вимірювання 1	79	75	77	103	106	105	166	168	167
Вимірювання 2	77	72	78	99	109	105	171	169	168
Вимірювання 3	73	73	76	101	105	104	169	167	159
Середня ПЗ (Мбіт/с)	76	73	77	101	107	105	169	168	165
Загальна ПЗ	226			313			502		
Середня затримка (мс)	3	4	2	3	4	3	3	4	4

Таблиця А.6

Вимірювання для трьох клієнтів у низхідному напрямку (IEEE 802.11ac)

Канал (МГц)	20			40			80		
Клієнт	1	2	3	1	2	3	1	2	3
ПЗ (Мбіт/с)	DL								
Вимірювання 1	121	77	80	229	114	115	390	198	201
Вимірювання 2	117	74	76	228	116	119	385	196	200
Вимірювання 3	128	72	82	215	119	111	389	201	193
Середня ПЗ (Мбіт/с)	122	74	79	224	116	115	388	198	198
Загальна ПЗ	275			455			784		
Середня затримка (мс)	3	2	2	3	3	3	3	4	3

Таблиця А.7

Вимірювання для чотирьох клієнтів у висхідному напрямку (IEEE 802.11ac)

Канал (МГц)	20				40				80			
Клієнт	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
ПЗ (Мбіт/с)	UL											
Вимірювання 1	58	59	61	57	68	67	69	71	110	121	120	105
Вимірювання 2	53	58	64	60	65	67	71	70	105	111	104	119
Вимірювання 3	62	61	63	57	65	62	76	72	107	119	116	100
Середня ПЗ (Мбіт/с)	58	59	63	58	66	65	72	71	107	117	113	108
Загальна ПЗ	238				274				445			
Середня затримка (мс)	2	3	2	2	3	3	4	3	4	4	4	4

Таблиця А.8

Вимірювання для чотирьох клієнтів у низхідному напрямку (IEEE 802.11ac)

Канал (МГц)	20				40				80			
Клієнт	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
ПЗ (Мбіт/с)	DL											
Вимірювання 1	70	71	69	70	89	90	91	88	190	201	181	186
Вимірювання 2	72	69	68	72	91	88	93	90	192	194	192	191
Вимірювання 3	71	72	71	69	92	87	91	89	183	195	188	183
Середня ПЗ (Мбіт/с)	71	71	69	70	91	88	92	89	188	197	187	187
Загальна ПЗ	281				360				759			
Середня затримка (мс)	2	2	3	2	3	3	3	3	4	4	3	4

Таблиця А.9

Вимірювання для 42 клієнтів у висхідному напрямку (IEEE 802.11ac, 20МГц)

20 МГц								
UL								
№	ПЗ, Мбіт/с	З-ка, ms	№	ПЗ, Мбіт/с	З-ка, ms	№	ПЗ, Мбіт/с	З-ка, ms
1	0.8	11	15	1.2	12	29	1.9	19
2	0.7	36	16	1	18	30	0.8	16
3	0.9	22	17	1.1	13	31	0.9	43
4	0.9	13	18	0.7	44	32	1	15
5	1	20	19	0.9	10	33	0.7	22
6	1.1	12	20	0.8	42	34	0.6	48
7	0.9	19	21	1	37	35	1.1	23
8	0.7	21	22	0.8	22	36	0.7	56
9	1	14	23	0.9	16	37	1	24
10	1.1	35	24	1.1	16	38	1.2	11
11	1	18	25	1	38	39	0.8	19
12	1.1	35	26	0.9	19	40	0.9	37
13	0.7	44	27	0.7	41	41	1	18
14	1.6	29	28	1.4	13	42	1.1	38
Мін. з-ка, мс		11	Мін. з-ка, мс		10	Мін. з-ка, мс		11
Макс. з-ка, мс		44	Макс. з-ка, мс		44	Макс. з-ка, мс		56
Мін. ПЗ, Мбіт/с		0.7	Мін. ПЗ, Мбіт/с		0.7	Мін. ПЗ, Мбіт/с		0.6
Макс.ПЗ, Мбіт/с		1.6	Макс.ПЗ, Мбіт/с		1.4	Макс.ПЗ, Мбіт/с		1.9
Середня ПЗ		0.96	Середня ПЗ		0.96	Середня ПЗ		0.98
Загальна гр. ПЗ		13.5	Загальна гр. ПЗ		13.5	Загальна гр. ПЗ		13.7
Загальна пропускна здатність мережі, Мбіт/с								
40.7								

Таблиця А.10

Вимірювання для 42 клієнтів у низхідному напрямку (IEEE 802.11ac, 20МГц)

20 МГц								
DL								
№	ПЗ, Мбіт/с	З-ка, ms	№	ПЗ, Мбіт/с	З-ка, ms	№	ПЗ, Мбіт/с	З-ка, ms
1	2.2	6	15	1.3	19	29	1.1	18
2	1.6	19	16	1.6	16	30	2	8
3	2.1	11	17	1.1	11	31	1.2	20
4	2	9	18	2.1	9	32	1.3	17
5	2	9	19	2	6	33	2	5
6	1.9	11	20	1.9	7	34	1.7	6
7	0.8	22	21	1.7	13	35	2.1	9
8	2	9	22	2	8	36	1.8	11
9	1.9	12	23	1.6	12	37	1.6	12
10	1.7	10	24	1.3	17	38	1.7	18
11	1.3	16	25	1.7	11	39	2	9
12	1.8	9	26	1.5	13	40	1.3	15
13	1.5	17	27	2	8	41	1.8	16
14	2	9	28	0.9	21	42	0.8	23
Мін. з-ка, мс		6	Мін. з-ка, мс		6	Мін. з-ка, мс		5
Макс. з-ка, мс		22	Макс. з-ка, мс		21	Макс. з-ка, мс		23
Мін. ПЗ, Мбіт/с		0.8	Мін. ПЗ, Мбіт/с		0.9	Мін. ПЗ, Мбіт/с		0.8
Макс.ПЗ, Мбіт/с		2.2	Макс.ПЗ, Мбіт/с		2	Макс.ПЗ, Мбіт/с		2.1
Середня ПЗ		1.77	Середня ПЗ		1.6	Середня ПЗ		1.6
Загальна гр. ПЗ		24.8	Загальна гр. ПЗ		22.7	Загальна гр. ПЗ		22.4
Загальна пропускна здатність мережі, Мбіт/с								
69.9								

Таблиця А.11

Вимірювання для єдиного найближчого до ТД клієнта (IEEE 802.11ax)

Канал (МГц)	20		40		80	
Пропускна здатність (Мбіт/с)	UL	DL	UL	DL	UL	DL
Вимірювання 1	229	239	410	420	650	663
Вимірювання 2	232	238	412	422	653	667
Вимірювання 3	230	239	411	426	652	665
Середня ПЗ (Мбіт/с)	230	239	411	423	652	665
Середня затримка (мс)	1	1	1	1	1	1

Таблиця А.12

Вимірювання для єдиного найвіддаленішого від ТД клієнта (IEEE 802.11ax)

Канал (МГц)	20		40		80	
Пропускна здатність (Мбіт/с)	UL	DL	UL	DL	UL	DL
Вимірювання 1	219	229	386	392	575	585
Вимірювання 2	220	227	385	390	572	586
Вимірювання 3	222	228	387	391	575	585
Середня ПЗ (Мбіт/с)	220	228	386	391	574	585
Середня затримка (мс)	1	1	1	1	1	1

Таблиця А.13

Вимірювання для двох клієнтів у висхідному напрямку (IEEE 802.11ax)

Канал (МГц)	20		40		80	
Клієнт	1	2	1	2	1	2
Пропускна здатність (Мбіт/с)	UL					
Вимірювання 1	195	195	330	330	464	462
Вимірювання 2	196	194	329	331	462	463
Вимірювання 3	195	195	330	331	462	460
Середня ПЗ (Мбіт/с)	195	195	330	331	463	462
Загальна ПЗ	390		661		925	
Середня затримка (мс)	1	1	1	1	1	1

Таблиця А.14

Вимірювання для двох клієнтів у низхідному напрямку (IEEE 802.11ax)

Канал (МГц)	20		40		80	
Клієнт	1	2	1	2	1	2
Пропускна здатність (Мбіт/с)	DL					
Вимірювання 1	199	201	335	333	469	469
Вимірювання 2	199	202	334	334	469	468
Вимірювання 3	200	201	336	333	467	470
Середня ПЗ (Мбіт/с)	199	201	335	333	468	469
Загальна ПЗ	400		668		937	
Середня затримка (мс)	1	1	1	1	1	1

Таблиця А.15

Вимірювання для трьох клієнтів у висхідному напрямку (IEEE 802.11ax)

Канал (МГц)	20			40			80		
Клієнт	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Пропускна здатність (Мбіт/с)	UL								
Вимірювання 1	130	132	133	218	220	219	300	303	305
Вимірювання 2	131	133	131	218	221	218	300	301	304
Вимірювання 3	130	129	130	216	218	219	298	300	300
Середня ПЗ (Мбіт/с)	130	131	131	217	220	219	299	301	303
Загальна ПЗ	392			656			903		
Середня затримка (мс)	1	1	1	2	1	1	1	2	2

Таблиця А.16

Вимірювання для трьох клієнтів у низхідному напрямку (IEEE 802.11ax)

Канал (МГц)	20			40			80		
Клієнт	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Пропускна здатність (Мбіт/с)	DL								
Вимірювання 1	137	139	138	220	218	220	312	315	314
Вимірювання 2	138	138	139	219	220	218	311	313	313
Вимірювання 3	137	140	140	219	219	220	315	315	314
Середня ПЗ (Мбіт/с)	137	139	139	219	219	219	313	314	314
Загальна ПЗ	415			657			941		
Середня затримка (мс)	1	1	1	2	1	1	1	1	2

Таблиця А.17

Вимірювання для чотирьох клієнтів у висхідному напрямку (IEEE 802.11ax)

Канал (МГц)	20				40				80			
Клієнт	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Пропускна здатність (Мбіт/с)	UL											
Вимірювання 1	99	100	98	99	165	164	165	166	224	225	225	225
Вимірювання 2	100	100	99	100	164	165	164	165	222	224	225	223
Вимірювання 3	99	99	100	99	165	163	163	164	223	224	223	223
Середня ПЗ (Мбіт/с)	99	100	99	99	165	164	164	165	223	224	224	224
Загальна ПЗ	397				658				895			
Середня затримка (мс)	1	1	2	1	2	1	2	1	1	2	2	1

Таблиця А.18

Вимірювання для чотирьох клієнтів у низхідному напрямку (IEEE 802.11ax)

Канал (МГц)	20				40				80			
Клієнт	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Пропускна здатність (Мбіт/с)	DL											
Вимірювання 1	102	103	102	101	167	168	166	168	230	230	229	230
Вимірювання 2	101	101	103	101	166	167	166	167	228	230	231	228
Вимірювання 3	102	102	101	102	167	167	167	166	229	228	228	229
Середня ПЗ (Мбіт/с)	102	102	102	101	167	167	166	167	229	229	229	229
Загальна ПЗ	407				667				916			
Середня затримка (мс)	1	1	1	1	1	2	1	1	2	1	2	2

Таблиця А.19

Вимірювання для 42 клієнтів у висхідному напрямку (IEEE 802.11ах, 20МГц)

20 МГц								
UL								
№	ПЗ, Мбіт/с	З-ка, ms	№	ПЗ, Мбіт/с	З-ка, ms	№	ПЗ, Мбіт/с	З-ка, ms
1	2.3	9	15	2.1	5	29	2.2	5
2	2.3	5	16	2.1	6	30	2.2	4
3	2.1	4	17	2.3	10	31	2.1	9
4	2.3	7	18	2.2	9	32	2.2	7
5	2.2	6	19	2.1	7	33	2.3	11
6	2.1	4	20	2.2	11	34	2.2	9
7	2.3	9	21	2.4	9	35	2.3	7
8	2.2	7	22	2.4	7	36	2.3	11
9	2.2	11	23	2.1	9	37	2.1	6
10	2.1	9	24	2.3	5	38	2.2	4
11	2.3	5	25	2.1	6	39	2.3	9
12	2.3	6	26	2.2	10	40	2.1	7
13	2.3	10	27	2.2	8	41	2.1	11
14	2.1	8	28	2.1	9	42	2.2	10
Мін. з-ка, мс		4	Мін. з-ка, мс		5	Мін. з-ка, мс		4
Макс. з-ка, мс		11	Макс. з-ка, мс		11	Макс. з-ка, мс		11
Мін. ПЗ, Мбіт/с		2.1	Мін. ПЗ, Мбіт/с		2.1	Мін. ПЗ, Мбіт/с		2.1
Макс.ПЗ, Мбіт/с		2.3	Макс.ПЗ, Мбіт/с		2.4	Макс.ПЗ, Мбіт/с		2.3
Середня ПЗ		2.22	Середня ПЗ		2.2	Середня ПЗ		2.2
Загальна гр. ПЗ		33.32	Загальна гр. ПЗ		33	Загальна гр. ПЗ		30.8
Загальна пропускна здатність мережі, Мбіт/с								
97.12								

Таблиця А.20

Вимірювання для 42 клієнтів у низхідному напрямку (IEEE 802.11ах, 20МГц)

20 МГц								
DL								
№	ПЗ, Мбіт/с	З-ка, ms	№	ПЗ, Мбіт/с	З-ка, ms	№	ПЗ, Мбіт/с	З-ка, ms
1	2.7	9	15	2.6	8	29	2.5	10
2	2.8	5	16	2.6	6	30	2.8	8
3	2.6	4	17	2.6	10	31	2.9	11
4	2.7	7	18	2.7	9	32	2.7	7
5	2.9	6	19	2.6	8	33	2.9	5
6	2.8	4	20	2.7	6	34	2.8	6
7	2.7	9	21	2.8	7	35	2.9	5
8	2.6	7	22	2.9	4	36	2.7	9
9	2.8	11	23	2.9	5	37	2.6	5
10	2.9	9	24	2.6	9	38	2.8	6
11	2.7	5	25	2.7	10	39	2.6	7
12	2.9	6	26	2.6	9	40	2.9	8
13	2.8	10	27	2.8	8	41	2.8	10
14	2.9	8	28	2.9	5	42	2.8	10
Мін. з-ка, мс	4		Мін. з-ка, мс	4		Мін. з-ка, мс	5	
Макс. з-ка, мс	11		Макс. з-ка, мс	10		Макс. з-ка, мс	11	
Мін. ПЗ, Мбіт/с	2.6		Мін. ПЗ, Мбіт/с	2.6		Мін. ПЗ, Мбіт/с	2.6	
Макс.ПЗ, Мбіт/с	2.9		Макс.ПЗ, Мбіт/с	2.9		Макс.ПЗ, Мбіт/с	2.9	
Середня ПЗ	2.77		Середня ПЗ	2.71		Середня ПЗ	2.76	
Загальна гр. ПЗ	41.57		Загальна гр. ПЗ	40.71		Загальна гр. ПЗ	38.7	
Загальна пропускна здатність мережі, Мбіт/с								
121								

Додаток Б
Результати експериментальних вимірювань другої групи

Таблиця Б.1

Вимірювання для єдиного клієнта у тій самій зоні (IEEE 802.11ac)

Канал (МГц)	20		40		80	
Пропускна здатність (Мбіт/с)	UL	DL	UL	DL	UL	DL
Вимірювання 1	136	138	241	266	489	510
Вимірювання 2	133	145	243	249	491	508
Вимірювання 3	124	132	240	267	493	510
Середня ПЗ (Мбіт/с)	131	138	241	261	491	509
Середня затримка (мс)	2	2	2	2	2	2

Таблиця Б.2

Вимірювання для двох клієнтів у різних зонах у висхідному напрямку
(IEEE 802.11ac)

Канал (МГц)	20		40		80	
Клієнт	1	2	1	2	1	2
Пропускна здатність (Мбіт/с)	UL					
Вимірювання 1	100	110	141	143	239	246
Вимірювання 2	106	104	136	141	233	251
Вимірювання 3	98	106	139	132	234	231
Середня ПЗ (Мбіт/с)	101	107	139	139	235	243
Загальна ПЗ	208		278		478	
Середня затримка (мс)	2	2	3	2	3	3

Таблиця Б.3

Вимірювання для двох клієнтів у різних зонах у низхідному напрямку
(IEEE 802.11ac)

Канал (МГц)	20		40		80	
Клієнт	1	2	1	2	1	2
Пропускна здатність (Мбіт/с)	DL					
Вимірювання 1	118	122	210	250	361	362
Вимірювання 2	126	111	221	232	353	372
Вимірювання 3	111	118	215	246	350	363
Середня ПЗ (Мбіт/с)	118	117	215	243	355	366
Загальна ПЗ	235		449		721	
Середня затримка (мс)	1	2	2	3	3	3

Таблиця Б.4

Вимірювання для трьох клієнтів у різних зонах (два в одній і один в іншій) у висхідному напрямку (IEEE 802.11ac)

Канал (МГц)	20			40			80		
Клієнт	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Пропускна здатність (Мбіт/с)	UL								
Вимірювання 1	59	54	57	81	83	80	127	126	122
Вимірювання 2	58	53	58	76	89	79	123	121	116
Вимірювання 3	53	52	56	85	85	76	128	123	111
Середня ПЗ (Мбіт/с)	57	53	57	81	86	78	126	123	116
Загальна ПЗ	167			245			365		
Середня затримка (мс)	3	3	3	3	4	4	4	4	4

Таблиця Б.5

Вимірювання для трьох клієнтів у різних зонах (два в одній і один в іншій) у
низхідному напрямку (IEEE 802.11ac)

Канал (МГц)	20			40			80		
Клієнт	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Пропускна здатність (Мбіт/с)	DL								
Вимірювання 1	99	59	60	197	94	89	321	168	181
Вимірювання 2	101	54	67	198	92	93	335	176	183
Вимірювання 3	106	53	63	189	91	96	349	191	176
Середня ПЗ (Мбіт/с)	102	55	63	195	92	93	335	178	180
Загальна ПЗ	220			380			693		
Середня затримка (мс)	3	3	3	3	4	3	4	4	3

Таблиця Б.6

Вимірювання для чотирьох клієнтів (по два у кожній зоні) у висхідному
напрямку (IEEE 802.11ac)

Канал (МГц)	20				40				80			
Клієнт	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Пропускна здатність (Мбіт/с)	UL											
Вимірювання 1	44	46	51	55	61	65	69	72	119	122	129	126
Вимірювання 2	46	46	50	43	66	61	71	73	121	118	126	128
Вимірювання 3	44	49	49	46	62	65	71	71	120	120	121	126
Середня ПЗ (Мбіт/с)	45	47	50	48	63	64	70	72	120	120	125	127
Загальна ПЗ	190				269				492			
Середня затримка (мс)	1	2	2	2	2	2	3	1	3	3	2	3

Таблиця Б.7

Вимірювання для чотирьох клієнтів (по два у кожній зоні) у низхідному напрямку (IEEE 802.11ac)

Канал (МГц)	20				40				80			
Клієнт	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Пропускна здатність (Мбіт/с)	DL											
Вимірювання 1	55	61	62	51	115	119	122	119	176	174	179	174
Вимірювання 2	59	60	60	59	114	114	120	121	177	174	178	175
Вимірювання 3	59	58	60	66	116	116	120	116	180	176	179	181
Середня ПЗ (Мбіт/с)	58	60	61	59	115	116	121	119	178	175	179	177
Загальна ПЗ	238				471				709			
Середня затримка (мс)	1	2	1	2	1	2	2	2	3	2	3	3

Таблиця Б.8

Вимірювання для 42 клієнтів у двох зонах (IEEE 802.11ac, 20 МГц)

№	DL		UL		№	DL		UL	
	ПЗ, Мбіт/с	З, мс	ПЗ, Мбіт/с	З, мс		ПЗ, Мбіт/с	З, мс	ПЗ, Мбіт/с	З, мс
1	0.7	9	1.3	40	22	0.7	16	0.9	40
2	1.9	29	1.2	19	23	2	29	0.6	19
3	1.5	31	1.1	16	24	1.9	31	1.4	16
4	0.9	11	0.6	45	25	1.2	9	1.1	17
5	1.5	29	1.3	41	26	1.9	23	1	44
6	1.2	16	0.9	55	27	1.9	39	0.8	15
7	1.8	23	1	17	28	0.9	19	1.2	41
8	1.9	39	0.9	44	29	2	39	0.9	51
9	1.9	19	0.8	15	30	1.9	19	0.9	17
10	0.9	15	1.3	19	31	0.9	18	1	44
11	1.8	8	0.8	25	32	1.9	10	1.1	15
12	1.4	39	1.2	16	33	2	9	1.1	19
13	1.9	17	1.3	42	34	1.9	16	0.7	16
14	1.6	21	0.6	20	35	1.6	16	1	18
15	0.9	13	1.3	18	36	2	23	0.7	43
16	1.3	39	1.1	43	37	1.8	39	1	16
17	1.6	18	1	16	38	2	18	1.4	19
18	0.7	17	1.2	19	39	1.9	9	1.1	34
19	1.8	38	0.7	34	40	1.9	29	1	53
20	1.9	22	1	56	41	2	31	0.6	30
21	0.9	12	1.1	30	42	1.8	14	1	54
	Мінімальна затримка, мс					Мінімальна затримка, мс			
	8		15			9		15	
	Максимальна затримка, мс					Максимальна затримка, мс			
	39		56			39		54	
	Мінімальна ПЗ, Мбіт/с					Мінімальна ПЗ, Мбіт/с			
	0.7		0.6			0.7		0.6	
	Максимальна ПЗ, Мбіт/с					Максимальна ПЗ, Мбіт/с			
	1.9		1.3			2		1.4	
	Середня ПЗ, Мбіт/с					Середня ПЗ, Мбіт/с			
	1.43		1.03			1.72		0.98	
	Загальна ПЗ групи, Мбіт/с					Загальна ПЗ групи, Мбіт/с			
	30		21.7			36.1		20.5	
Загальна пропускна здатність мережі, Мбіт/с									
DL					UL				
66.1					42.2				

Таблиця Б.9

Вимірювання для єдиного клієнта у тій самій зоні (IEEE 802.11ax)

Канал (МГц)	20		40		80	
Пропускна здатність (Мбіт/с)	UL	DL	UL	DL	UL	DL
Вимірювання 1	221	231	401	412	643	642
Вимірювання 2	223	230	402	415	636	641
Вимірювання 3	225	231	400	417	638	642
Середня ПЗ (Мбіт/с)	223	231	401	415	639	642
Середня затримка (мс)	1	1	1	1	1	1

Таблиця Б.10

Вимірювання для двох клієнтів у різних зонах у висхідному напрямку (IEEE 802.11ax)

Канал (МГц)	20		40		80	
Клієнт	1	2	1	2	1	2
Пропускна здатність (Мбіт/с)	UL					
Вимірювання 1	186	185	313	315	445	447
Вимірювання 2	187	186	316	314	446	444
Вимірювання 3	185	185	315	315	447	448
Середня ПЗ (Мбіт/с)	186	185	315	315	446	446
Загальна ПЗ	371		630		892	
Середня затримка (мс)	1	1	2	1	2	2

Таблиця Б.11

Вимірювання для двох клієнтів у різних зонах у низхідному напрямку
(IEEE 802.11ax)

Канал (МГц)	20		40		80	
Клієнт	1	2	1	2	1	2
Пропускна здатність (Мбіт/с)	DL					
Вимірювання 1	198	201	332	333	444	442
Вимірювання 2	199	200	331	330	442	441
Вимірювання 3	200	200	333	333	443	442
Середня ПЗ (Мбіт/с)	199	200	332	332	443	442
Загальна ПЗ	399		664		885	
Середня затримка (мс)	1	1	2	2	2	2

Таблиця Б.12

Вимірювання для трьох клієнтів у різних зонах (два в одній і третій в іншій) у висхідному напрямку (IEEE 802.11ax)

Канал (МГц)	20			40			80		
Клієнт	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Пропускна здатність (Мбіт/с)	UL								
Вимірювання 1	179	181	203	315	314	321	441	443	447
Вимірювання 2	181	178	199	313	315	319	439	440	445
Вимірювання 3	180	180	200	314	314	320	440	440	446
Середня ПЗ (Мбіт/с)	180	180	201	314	314	320	440	441	446
Загальна ПЗ	561			948			1327		
Середня затримка (мс)	1	1	1	2	2	1	1	2	2

Таблиця Б.13

Вимірювання для трьох клієнтів у різних зонах (два в одній і третій в іншій) у
низхідному напрямку (IEEE 802.11ax)

Канал (МГц)	20			40			80		
Клієнт	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Пропускна здатність (Мбіт/с)	DL								
Вимірювання 1	201	198	216	320	319	341	469	471	491
Вимірювання 2	203	202	215	320	320	339	465	473	490
Вимірювання 3	200	204	214	321	320	340	470	470	490
Середня ПЗ (Мбіт/с)	201	201	215	320	320	340	468	471	490
Загальна ПЗ	617			980			1429		
Середня затримка (мс)	1	1	1	2	1	2	1	2	2

Таблиця Б.14

Вимірювання для чотирьох клієнтів (по два у кожній зоні) у висхідному
напрямку (IEEE 802.11ax)

Канал (МГц)	20				40				80			
Клієнт	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Пропускна здатність (Мбіт/с)	UL											
Вимірювання 1	174	175	176	175	238	239	241	240	354	356	357	356
Вимірювання 2	175	176	173	175	239	239	240	241	355	355	356	355
Вимірювання 3	174	174	177	176	239	240	241	240	354	356	356	357
Середня ПЗ (Мбіт/с)	174	175	175	175	239	239	241	240	354	356	356	356
Загальна ПЗ	699				959				1422			
Середня затримка (мс)	1	2	2	1	2	2	2	1	2	2	2	2

Таблиця Б.15

Вимірювання для чотирьох клієнтів (по два у кожній зоні) у низхідному напрямку (IEEE 802.11ax)

Канал (МГц)	20				40				80			
Клієнт	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Пропускна здатність (Мбіт/с)	DL											
Вимірювання 1	174	176	178	178	265	263	268	267	376	380	379	379
Вимірювання 2	175	174	179	180	264	266	268	265	377	377	381	381
Вимірювання 3	175	174	179	179	265	265	267	268	379	377	380	381
Середня ПЗ (Мбіт/с)	175	175	179	179	265	265	268	267	377	378	380	380
Загальна ПЗ	708				1065				1515			
Середня затримка (мс)	1	1	1	1	2	1	2	1	2	2	2	2

Таблиця Б.16

Вимірювання для 42 клієнтів у різних зонах (IEEE 802.11ax, 20МГц)

№	DL		UL		№	DL		UL	
	ПЗ, Мбіт/с	З, мс	ПЗ, Мбіт/с	З, мс		ПЗ, Мбіт/с	З, мс	ПЗ, Мбіт/с	З, мс
1	3.3	2	2.9	3	22	2.9	11	2.5	12
2	3.4	3	2.9	2	23	2.9	10	2.6	12
3	3.3	2	2.9	3	24	3	11	2.5	11
4	3.2	4	2.8	4	25	2.9	9	2.5	9
5	3.3	3	2.9	3	26	3	8	2.5	10
6	3.3	6	2.7	5	27	3	7	2.7	7
7	3.2	5	2.8	3	28	3.1	9	2.6	8
8	3.1	5	2.6	6	29	3	9	2.7	7
9	3.2	6	2.7	7	30	3.2	10	2.8	6
10	3.1	4	2.5	6	31	3.1	8	2.9	8
11	3.1	7	2.6	8	32	3.2	9	2.8	5
12	3	6	2.5	10	33	3.2	7	2.8	6
13	3	8	2.5	9	34	3.3	5	2.9	4
14	2.9	9	2.4	11	35	3.4	6	3	5
15	2.9	7	2.5	9	36	3.3	4	2.9	3
16	2.8	8	2.4	8	37	3.4	5	3	3
17	2.8	9	2.4	10	38	3.4	2	3	2
18	2.9	7	2.4	11	39	3.5	3	3	2
19	2.8	9	2.5	10	40	3.4	4	2.9	4
20	2.8	8	2.4	10	41	3.5	3	3	3
21	2.8	9	2.4	11	42	3.5	2	2.9	2
	Мінімальна затримка, мс					Мінімальна затримка, мс			
	2		2			2		2	
	Максимальна затримка, мс					Максимальна затримка, мс			
	9		11			11		12	
	Мінімальна ПЗ, Мбіт/с					Мінімальна ПЗ, Мбіт/с			
	2.8		2.4			2.9		2.5	
	Максимальна ПЗ, Мбіт/с					Максимальна ПЗ, Мбіт/с			
	3.4		2.9			3.5		3	
	Середня ПЗ, Мбіт/с					Середня ПЗ, Мбіт/с			
	3.06		2.61			3.2		2.8	
	Загальна ПЗ групи, Мбіт/с					Загальна ПЗ групи, Мбіт/с			
	64.2		54.7			67.2		58.5	
Загальна пропускна здатність мережі, Мбіт/с									
DL					UL				
131.4					113.2				