

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроніки
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра акустичних та мультимедійних електронних систем
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»
УДК УДК 681.772.3:778.534

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри


(підпис)

Сергій НАЙДА
(ініціали, прізвище)

“09 ” _____ грудня _____ 2022 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності (спеціалізації) 171 Електроніка (Електронні системи
мультимедіа та засоби Інтернету-речей)
(код і назва спеціальності)

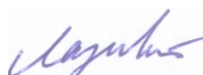
на тему: «Дослідження ефективності застосування сучасних технологій Wi-Fi
за умов великої щільності безпроводових локальних мереж».

Виконав: студент II курсу, групи ДВ-12мп
(шифр групи)

Соколов Денис Сергійович
(прізвище, ім'я, по батькові)


(підпис)

Науковий керівник доцент, к.т.н., доц. Лазебний В.С.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)


(підпис)

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

Рецензент доц. кафедри ЕПС доц., к.т.н. Цибульський Л.Ю.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)


(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2022 року

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

Інститут (факультет) _____ Факультет електроніки _____

(повна назва)

Кафедра _____ акустичних та мультимедійних електронних систем _____

(повна назва)

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

Спеціальність (освітня програма) _____ 171 Електроніка _____

(Електронні системи мультимедіа та засоби Інтернету речей)

(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри



(підпис)

Сергій НАЙДА

(ініціали, прізвище)

« 17 » вересня 2021 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Соколову Денису Сергійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації «Дослідження ефективності застосування сучасних технологій Wi-Fi за умов великої щільності безпроводових локальних мереж».
Науковий керівник дисертації к.т.н., доц. Лазебний Володимир Семенович
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по батькові)
затверджені наказом по університету від « 08 » грудня 2022 р. № 4092-с
2. Строк подання студентом дисертації 10.12.2022 р.
3. Об'єкт дослідження: Безпроводова технологія Wi-Fi (802.11ac, 802.11ax).
4. Вхідні дані для магістерської дисертації за освітньо-професійною програмою: стандарт безпроводових мереж IEEE 802.11, функціонування безпроводової мережі за умов завад від інших мереж, передавання потокової інформації.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити: 1) Проаналізувати особливості сучасних

технологій Wi-Fi (802.11ac, 802.11ax). 2) Обґрунтувати методики оцінювання ефективності застосування безпроводових мереж IEEE 802.11. 3) Дослідити особливості електромагнітної обстановки в зоні розгортання мережі IEEE 802.11 і особливості формування зони обслуговування точки доступу в багатоповерховій споруді. 4) Дослідити пропускну здатність конкретної безпроводової мережі IEEE 802.11 в різних точках зони обслуговування з урахуванням впливу інших безпроводових мереж.

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: комп'ютерна презентація результатів досліджень.

7. Дата видачі завдання 10. 09. 2021 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Аналіз особливостей сучасних технологій Wi-Fi (802.11ac, 802.11ax)	11.09.2021 – 30.11.2021	Виконано
2	Аналіз особливостей сучасних технологій Wi-Fi (802.11ac, 802.11ax)	1.12.2021 – 31.01.2021	Виконано
3	Опрацювання характеристик сигнальних потоків в мережах IEEE 802.11	1.02.2022 – 31.03.2022	Виконано
4	Дослідження особливостей сучасних технологій Wi-Fi (802.11ac, 802.11ax)	1.04.2022 – 31.05.2022	Виконано
5	Аналіз алгоритмів підімкнення користувача та захист інформації в мережі Wi-Fi.	02.06.2022-07.07.2022	Виконано
6	Тестування електромагнітної обстановки в зоні розгортання Wi-Fi мережі	08.08.2022-12.09.2022	Виконано
7	Опрацювання матеріалів до першого і другого розділів дисертації та написання висновків до них	12.09.2022-19.10.2022	Виконано
8	Моделювання зони покриття точкою доступу Wi-Fi	12.10.2022-01.12.2022	Виконано
9	Оформлення дисертації підготовки презентації до захисту	2.12.2022-09.12.2022	Виконано

Студент



(підпис)

Соколов Денис

(ініціали, прізвище)

Науковий керівник



(підпис)

Володимир ЛАЗЕБНИЙ

(ініціали, прізвище)

Соколов Д.С. Дослідження ефективності застосування сучасних технологій Wi-Fi за умов великої щільності безпроводових локальних мереж: : магістерська дисертація за освітньо-професійною програмою : 171 Електроніка. – Київ, 2022. – 88 с.

БЕЗПРОВОДОВА МЕРЕЖА, ВЗАЄМНІ ЗАВАДИ, ЗОНА ОБСЛУГОВУВАННЯ, ПРОПУСКНА ЗДАТНІСТЬ, СТАНДАРТ IEEE 802.11, Актуальність дослідження. Повсюдне поширення мереж стандарту IEEE 802.11 призводить до їх взаємного впливу і зменшення ефективності їх функціонування. Врахування особливостей взаємного впливу безпроводових мереж дозволить забезпечити їх ефективне застосування як на етапі планування, так і на етапі експлуатації.

Мета дослідження оцінити умови функціонування безпроводових мереж IEEE 802.11 й визначити взаємний вплив мереж на ефективність їх функціонування для потреб планування і експлуатації.

Завдання дисертаційної роботи: Проаналізувати особливості сучасних технологій Wi-Fi. Обґрунтувати методики оцінювання ефективності застосування безпроводових мереж IEEE 802.11. Дослідити особливості електромагнітної обстановки в зоні розгортання мережі IEEE 802.11. Дослідити пропускну здатність конкретної безпроводової мережі IEEE 802.11 в різних точках зони обслуговування з урахуванням впливу інших безпроводових мереж.

Об'єкт дослідження: безпроводова технологія Wi-Fi

Предмет дослідження: ефективність застосування сучасних технологій IEEE 802.11 за умов великої щільності безпроводових локальних мереж.

Методи дослідження: критичний аналіз, теорія функціонування безпроводових мереж, метод комп'ютерного моделювання, натурний експеримент.

Новизна отриманих результатів: полягає в отриманні конкретних значень параметрів електромагнітної обстановки і кількісної оцінки взаємного впливу близько розташованих безпроводових мереж.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що їх можна використати для підвищення ефективності функціонування мереж на етапі планування або модернізації, а також результати дисертаційної роботи можна використати в навчальному процесі в дисциплінах, пов'язаних із застосуванням безпроводових мереж IEEE 802.11.

ABSTRACT

Sokolov D.S. Research of the effectiveness of modern Wi-Fi technologies under conditions of high density of wireless local networks: master's thesis under the educational and professional program: 171 Electronics. - Kyiv, 2022. - 88 p.

WIRELESS NETWORK, MUTUAL INTERFERENCE, SERVICE AREA, BANDWIDTH CAPACITY, IEEE STANDARD 802.11,

Relevance of research. Wide spread of IEEE 802.11 standard networks leads to their mutual influence and decrease in the efficiency of their functioning. Taking into account the peculiarities of the mutual influence of wireless networks will ensure their effective use both at the planning stage and at the operational stage.

The purpose of the study is to evaluate the conditions of operation of IEEE 802.11 wireless networks and to determine the mutual influence of networks on the efficiency of their operation for the needs of planning and operation.

Dissertation task: To analyze the features of modern Wi-Fi technologies. To substantiate the methods of evaluating the effectiveness of the use of IEEE 802.11 wireless networks. Investigate the features of the electromagnetic environment in the deployment zone of the IEEE 802.11 network. Investigate the bandwidth of a specific IEEE 802.11 wireless network at various points in the service area, taking into account the influence of other wireless networks.

Research object: Wi-Fi wireless technology

The subject of the study: the effectiveness of the use of modern IEEE 802.11 technologies under conditions of high density of wireless local networks.

Research methods: critical analysis, theory of operation of wireless networks, computer modeling method, natural experiment.

The novelty of the obtained results: consists in obtaining specific values of the parameters of the electromagnetic environment and quantitative assessment of the mutual influence of closely located wireless networks.

The practical significance of the obtained results is that they can be used to increase the efficiency of the functioning of networks at the stage of planning or modernization, as well as the results of the dissertation work can be used in the educational process in disciplines related to the use of IEEE 802.11 wireless networks.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1 ПРИНЦИПИ ТА ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕХНОЛОГІЇ	
БЕЗПРОВОДОВИХ МЕРЕЖ СТАНДАРТУ IEEE 802.11 (WI-FI).....	10
1.1 Загальна характеристика безпроводових мереж IEEE 802.11.	10
1.2 Принципи використання середовища передавання сигналів в мережах IEEE 802.11	16
1.3 Особливості технічних рішень передбачених специфікацією IEEE 802.11 ac.	24
1.4 Особливості технічних рішень передбачених специфікацією IEEE 802.11 ah.	28
1.5 Проблеми, що впливають на ефективність функціонування мереж стандарту IEEE 802.11.	32
Висновки до розділу	35
2 ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДИКИ ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ	
ЗАСТОСУВАННЯ МЕРЕЖ IEEE 802.11	37
2.1 Загальна характеристика методик оцінювання експлуатаційних характеристик безпроводової мережі IEEE802.11	37
2.2 Особливості методу насиченого навантаження.....	38
2.3 Особливості удосконаленої методики розрахунку характеристик мережі, адаптованої для мережі стандарту IEEE 802.11ac	44
2.4 Методика оцінювання параметрів безпроводової мережі на підґрунті концепції віртуального конкурентного вікна.....	47
Висновки до розділу	51
3 ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК СЕРЕДОВИЩА ПЕРЕДАВАННЯ	
МЕРЕЖ IEEE 802.11 НА ФІЗИЧНОМУ РІВНІ	53
3.1 Тестування електромагнітної обстановки в зоні розгортання Wi-Fi мережі	53

3.2 Програмні засоби для моделювання зони покриття точки доступу Wi-Fi.....	64
Висновки до розділу	67
4 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ МЕРЕЖІ 802.11ac ЗА УМОВИ ПОТОКОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ	68
4.1 Оцінювання максимальної пропускної здатності безпроводового каналу IEEE 802.11	68
4.2 Дослідження впливу суміжних мереж на пропускну здатність безпроводового каналу	71
Висновки до розділу	80
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	85

ВСТУП

Безпроводові мережі стандарту IEEE 802.11 (Wi-Fi) за час їх існування набули великого поширення. Їх використовують державні установи, навчальні заклади, медичні установи, побутові користувачі тощо. Важко уявити галузь, в якій не застосовують безпроводові стандарту IEEE 802.11.

Сучасна технологія мобільного зв'язку 5G теж багато в чому спирається саме на мережі стандарту IEEE 802.11 як засіб для організації доступу до високошвидкісного каналу передавання даних. Wi-Fi – це найдешевший і найшвидший спосіб передавання даних на короткі відстані, що забезпечує перегляд веб-сторінок, онлайн-ігри, відеострімінг та VoIP-дзвінки. У 2021 році кількість поставлених Wi-Fi пристроїв перевищила 250 мільйонів.

Актуальність дослідження полягає в тому, що кількість розгорнутих безпроводових мереж є дуже великою, що призводить до їх взаємного впливу і, як наслідок, до деградації експлуатаційних параметрів. Урахування особливостей взаємного впливу безпроводових мереж дозволить забезпечити їх ефективне застосування як на етапі планування, так і на етапі експлуатації.

Метою дослідження є: оцінити умови функціонування безпроводових мереж IEEE 802.11 й визначити взаємний вплив мереж на ефективність їх функціонування для потреб планування і експлуатації.

Об'єкт дослідження: безпроводові мережі стандарту IEEE 802.11

Предмет дослідження: ефективність застосування сучасних технологій IEEE 802.11 за умов великої щільності безпроводових локальних мереж.

Для досягнення мети дисертаційної роботи необхідно було виконати такі **завдання**:

- проаналізувати особливості сучасних технологій IEEE 802.11;
- обґрунтувати методики оцінювання ефективності застосування безпроводових мереж IEEE 802.11;
- дослідити особливості електромагнітної обстановки в зоні розгортання

мережі IEEE 802.11 і особливості формування зони обслуговування точки доступу в багатоповерховій споруді;

- дослідити пропускну здатність конкретної безпроводової мережі IEEE 802.11 в різних точках зони обслуговування з урахуванням впливу інших безпроводових мереж.

Під час виконання досліджень магістерської дисертації були використані **методи** критичного аналізу для з'ясування особливостей функціонування безпроводових мереж IEEE 802.11 за сучасними специфікаціями, теорія функціонування безпроводових мереж для обґрунтування методики оцінювання експлуатаційних характеристик, метод комп'ютерного моделювання для оцінювання розподілу електромагнітного поля в зоні обслуговування з урахуванням впливу перешкод, метод натурного експерименту для визначення електромагнітної обстановки в просторі функціонування безпроводової мережі.

Новизна отриманих результатів полягає в отриманні конкретних значень параметрів електромагнітної обстановки і кількісної оцінки взаємного впливу близько розташованих безпроводових мереж, які функціонують із застосуванням частотних каналів, що частково перекриваються.

Практичне значення результатів полягає в тому, що їх можна використати для підвищення ефективності функціонування мереж на етапі планування або модернізації, а також результати дисертаційної роботи можна використати в навчальному процесі в дисциплінах, пов'язаних із застосуванням безпроводових мереж IEEE 802.11.

1 ПРИНЦИПИ ТА ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕХНОЛОГІЇ БЕЗПРОВОДОВИХ МЕРЕЖ СТАНДАРТУ IEEE 802.11 (WI-FI)

1.1 Загальна характеристика безпроводових мереж IEEE 802.11

Першу версію технології стандартизовано в 1997 році. Крім номера 802.11 стандарт отримав назву «Безпроводовий Езернет». За роки існування технологія зазнала суттєвих змін. Основні технічні характеристики і параметри, які передбачені різними специфікаціями цього стандарту наведено в табл. 1.1 [1].

Перш ніж зробити короткий огляд змін технології Wi-Fi доцільно з'ясувати відмінність між поняттями «стандарт» і «специфікація». Специфікація – це частина стандарту, в якій наведено опис певної модифікації стандарту. Коли запропоновані зміни стандарту достатньо суттєві, ці зміни оформлюють новим розділом стандарту, а самій технології, в якій реалізовано ці зміни надають нове позначення. Так в табл. 1.1 ми бачимо позначення (назви) 802.11(перша версія стандарту), 802.11b (перша модифікація стандарту), ..., 802.11ax (остання модифікація стандарту).

Всі позначення специфікацій в табл. 1.1 характеризують саме технології передавання даних на каналному і фізичному рівнях. Але крім таких специфікацій в стандарті є специфікації, якими регламентовано захист інформації в безпроводовому каналі, пріоритезацію трафіку тощо. Для позначення таких специфікацій використано більшість літер латинської абетки, тому останні версії технології мають позначення двома літерами «ас» та «ах» (ай-икс).

В разі внесення в стандарт нової специфікації організація Wi-Fi Alliance (некомерційна організація, яка опікується технологією Wi-Fi) оприлюднює оновлену версію стандарту IEEE 802.11. Такий документ називають англійсько Release (випуск).

Таблиця 1.1 – Порівняння основних характеристик специфікацій стандарту IEEE 802.11

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

Важливо зазначити, що обладнання мереж Wi-Fi, розроблене з урахуванням найновіших версій стандарту підтримує всі попередні версії безпроводової технології. У такий спосіб забезпечено сумісність обладнання

безпроводових мереж різних поколінь. Так само новий випуск стандарту містить всю інформацію попередніх специфікацій і доповнений останньою специфікацією.

Технологію мереж 802.11 розроблено для використання в не ліцензованому частотному діапазоні.

Як відомо Міжнародний союз електрозв'язку створив Регламент електрозв'язку, в якому визначив (за згодою всіх країн учасниць) правила використання частотних ресурсів. Цим регламентом виділені частоти для різноманітних застосувань: радіомовлення, телебачення, супутникового зв'язку, служби надзвичайних ситуацій тощо. В кожній країні правила стосовно використання зазначених частотних ресурсів врегульовано відповідними законами і для їх використання, як правило, треба отримати ліцензію (право на використання) на платній основі. Тобто, всі зазначені частотні діапазони і смуги (ресурси) є ліцензованими. В той же час країни всього світу домовились виділити кілька частотних смуг для вільного використання за спеціальним призначенням. Для радіосистем, що функціонують у зазначених частотних смугах, не потрібно отримувати ліцензію. Такі частотні смуги (діапазони частот) називають не ліцензованими. Ці діапазони позначають як діапазони ISM [2].

ISM – Industrial, Scientific, Medical.

Світова практика використання не ліцензованих діапазонів частотного спектра:

1. Industrial/Промисловий: 902 – 928 МГц (ширина 26 МГц),
2. Scientific/Науковий: 2400 – 2500 МГц (ширина 100 МГц),
3. Medical/Медичний: 5725 – 5875 МГц (ширина 150 МГц).

В цьому діапазоні для мереж стандарту Wi-Fi використовують в основному частину діапазону 2400 - 2500 МГц.

UNII – Unlicensed National Information Infrastructure – набір частотних смуг в діапазоні 5150 – 5825 МГц (частково використовують для системи

WiFi).

Вибір коректних частотних каналів є одним з ключових завдань для проектування мережі стандарту IEEE 802.11. У процесі вибору треба враховувати фундаментальний вибір частотної архітектури відповідного WiFi-рішення: багатоканальна або одноканальна архітектура. Ця інформація також вкрай важлива під час дослідження радіо обстановки (site survey) зони покриття майбутньої мережі стандарту IEEE 802.11.

Таблиця 1.2 – Частотні смуги та канали стандарту IEEE 802.11 у діапазоні 2.4 ГГц [3]

Канал WiFi	Нижня частота	Центральна частота	Верхня частота
1	2.401	2.412	2.423
2	2.406	2.417	2.428
3	2.411	2.422	2.433
4	2.416	2.427	2.438
5	2.421	2.432	2.443
6	2.426	2.437	2.448
7	2.431	2.442	2.453
8	2.436	2.447	2.458
9	2.441	2.452	2.463
10	2.446	2.457	2.468
11	2.451	2.462	2.473
12	2.456	2.467	2.478
13	2.461	2.472	2.483

Загальну діаграму розташування частотних смуг окремих каналів для організації мереж стандарту IEEE 802.11 в частотному діапазоні 2.4ГГц наведено на рис. 1.1. Треба зазначити, що із всієї частотної смуги 100 МГц для потреб мереж стандарту IEEE 802.11 використовують перші 75МГц.

Чотирнадцятий канал використовують тільки в Японії.

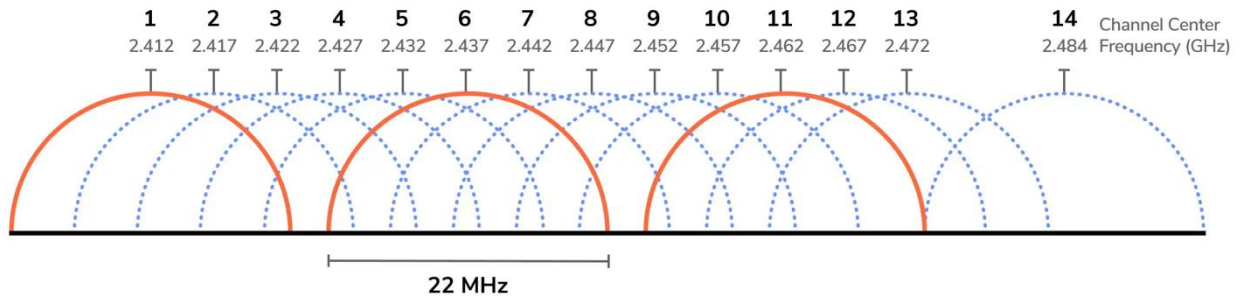


Рисунок 1.1 – діаграма перекриття частотних каналів Wi-Fi в діапазоні 2.4 ГГц [4]

У смузі частот WiFi 2.4 ГГц доступні 3 канали, що не перекриваються: 1, 6, 11, рис.1.2. Таке розділення зроблено з урахуванням вимоги IEEE щодо забезпечення мінімально необхідного рознесення центрів частотних каналів Wi-Fi, що не перекриваються, величиною 25 МГц. За такої умови ширина каналу становить 22 МГц.

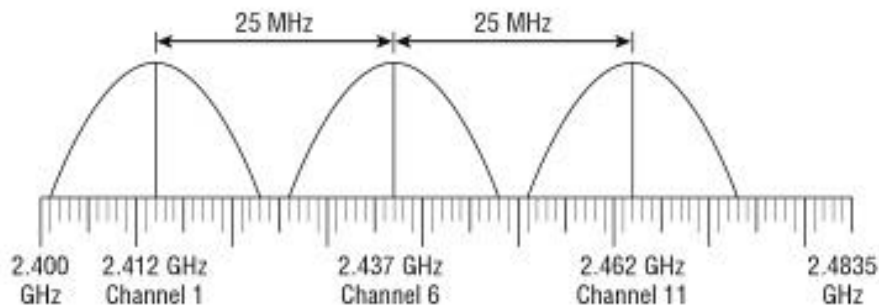


Рисунок 1.2 – прямий розширений спектр [6]

Частотні смуги та канали Wi-Fi у діапазоні 5 ГГц розподілені на три піддіапазони:

- UNII-1: 5150 – 5250 МГц (доступні 4 частотні канали Wi-Fi)
- UNII-2: 5250 – 5350 МГц (доступні 4 частотні канали Wi-Fi)
- UNII-2 Extended: 5470 – 5725 МГц (доступні 11 частотні канали Wi-Fi)
- UNII-3: 5725 – 5825 МГц (доступні 4 частотні канали Wi-Fi) [5]

У частотному діапазоні 5 ГГц частотні смуги каналів Wi-Fi не перекриваються. Схему розташування частотних смуг в окремих

піддіапазонах наведено далі:

Канал	36	40	44	48
Центральна частота, МГц	5180	5200	5220	5240
Смуга	UNII-1			

Канал	52	56	60	64	100	104	108	112	116	120	124	128	132	136	140
Центральна частота, МГц	5260	5280	5300	5320	5500	5520	5540	5560	5580	5600	5620	5640	5660	5680	5700
Смуга	UNII-2														

Канал	149	153	157	161
Центральна частота, МГц	5745	5765	5785	5805
Смуга	UNII-3			

Для обчислення центральної частоти каналу Wi-Fi можна користуватись формулу:

$$5000 + (5 * N) \text{ (МГц)},$$

де N – це номер каналу W-iFi, наприклад 36, 40 тощо.

На вищенаведеній діаграмі розподілу частот для каналів Wi-Fi в діапазоні 2,4 ГГц присутні 13 каналів. Суміжні канали цієї групи перекриваються на 3/4. Цю групу каналів використовують для мереж в усіх країнах. Додатковий канал №14 використовують тільки в Японії.

В неліцензованих частотних смугах діапазону 5 ГГц можливо організувати 23 частотних канали Wi-Fi без перекриття. Приклад розподілу каналів в діапазоні 5 МГц наведено на рис.1.3.

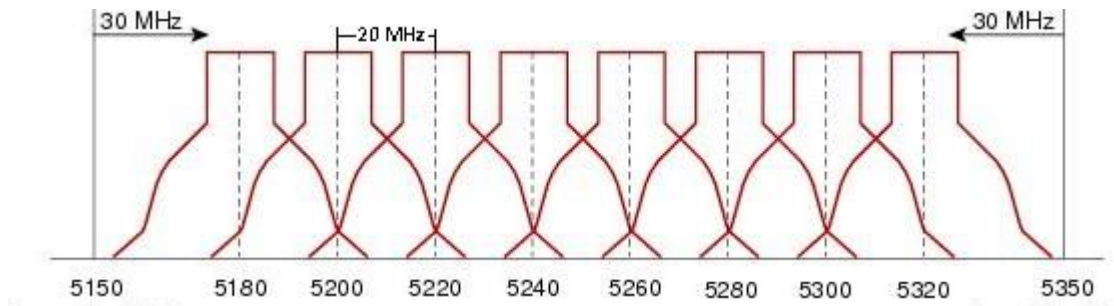


Рисунок 1.3 – Розподіл каналів WiFi у діапазоні 5 ГГц [7]

Відстань від країв діапазону дорівнює 30 МГц, а міжканальне рознесення становить 20 МГц.

1.2 Принципи використання середовища передавання сигналів в мережах IEEE 802.11

Існує два варіанти конфігурації мережі безпроводового доступу 802.11 – BSS, рис. 1.4, та IBSS, рис. 1.5.

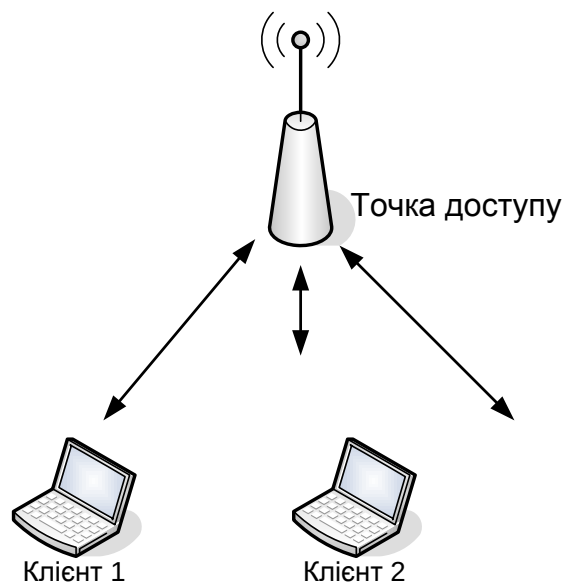


Рисунок 1.4 – Схема безпроводової локальної мережі з інфраструктурою, BSS

Стандарти IEEE 802.11 визначають базову зону обслуговування (BSS – Basic Service Set) як групу станцій, якою керує єдина функція координації. Функція координації – це термін, яким названо процедуру керування

доступом до середовища (MAC - media access control).

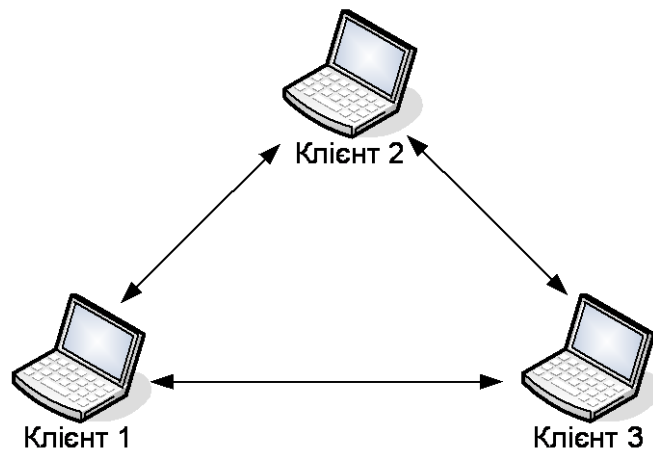


Рисунок 1.5 – Схема непланової (ad-hoc) мережі (IBSS)

Перший варіант конфігурації мережі – інфраструктурна зона базового обслуговування (BSS), другий – незалежна базова зона обслуговування (IBSS – Independent Basic Service Set).

Інфраструктурна BSS складається з однієї точки доступу (AP – Access Point, міст між проводовою мережею і безпроводовим каналом), і групи абонентських станцій зв'язаних з AP через радіоканал. У BSS мережах абонентська станція зв'язується тільки з її точкою доступу (AP), тобто безпосереднє передавання між двома абонентськими станціями, що належать до однієї BSS не передбачено. З іншого боку, в IBSS немає ніякої точки доступу (AP), і, отже, весь обмін даними відбувається між абонентськими станціями безпосередньо [8].

Для означення таких мереж в англomовній літературі часто використовують термін «ad-hoc мережа». У подальшому матеріалі для означення мереж даного типу будемо застосовувати інший поширений термін «непланова мережа».

У чинному MAC протоколі стандартів IEEE 802.11 використовують функції керування безпроводовою мережею, що отримали назву функцій координації, які визначають, коли станція, яка функціонує в даній мережі стандарту 802.11, може передавати кадри і коли вона отримає можливість

приймати кадри через безпроводовий канал. Блок даних, що надходить від більш високого рівня моделі OSI до MAC-рівня (рівень керування доступом до середовища передавання сигналів), називається сервісним елементом даних MAC (MSDU – MAC Service Data Unit), а кадр, який передає MSDU або його фрагмент, разом із заголовком MAC і контрольною сумою кадру (FCS – Frame Check Sequence), що формується за специфікацією CRC-32, називається протокольним елементом даних MAC (MPDU – MAC Protocol Data Unit). MPDU є кадром, який передається між станціями на MAC-рівні.

Виділяють два різновиди функції координації. Обов’язкова розподілена функція координації (DCF – Distributed Coordination Function) надає розподілений конкурентний доступ до каналу. Такий доступ організовано із застосуванням технології CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance) – множинний доступ з прослуховуванням носійної та запобіганням колізій. Додаткова функція координації за участі точки доступу (PCF – Point Coordination Function) забезпечує централізований неконкурентний доступ до каналу, в якому реалізовано механізм «опитування – відповідь» (RTS/CTS). Режим DCF є дуже поширеним і значна частина безпроводових мереж функціонує саме з використанням цього режиму.

У стандартах групи 802.11 у процесі реалізації DCF застосовано принцип FIFO (first-in-first-out) – “першим надійшов – першим на обслуговуванні”. Механізм CSMA/CA забезпечує реалізацію розподіленого MAC протоколу за умов використання моноканалу. Цим механізмом передбачено оцінку стану каналу: канал зайнято, коли якась станція мережі передає кадр, або канал вільний, якщо радіосигнал на частоті каналу відсутній. Основні принципи реалізації CSMA/CA у режимі DCF розглянуто нижче.

Розглянемо сценарій, за якого на станцію надходить для передавання певний інформаційний потік (навантаження станції). Розподіл часових інтервалів під час спроби доступу до безпроводового каналу в режимі DCF

наведено на рис. 1.6.

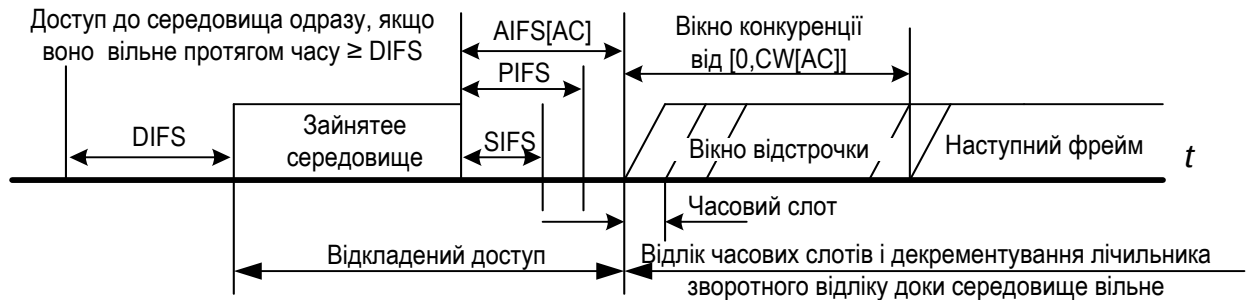


Рисунок 1.6. – Розподіл часових інтервалів у процесі доступу до каналу в режимі DCF за стандартом 802.11

Потік розбивається на окремі фрагменти, які разом зі службовою інформацією утворюють кадри. Нехай тепер певний кадр знаходиться першим у черзі на передавання. Якщо канал зайнято, станція чекає, доки середовище стане вільним, і затримує передавання на додатковий проміжок часу, що називається міжкадровим проміжком DCF (DIFS – DCF Interframe Space). Якщо канал залишається вільним протягом інтервалу DIFS, після його завершення станція має сформувати певний інтервал відстрочки квазівипадкової тривалості й тільки після того буде здійснювати передавання поточного кадру (першого в черзі). Для формування інтервалу відстрочки станція має спеціальний лічильник відстрочки (random backoff counter). Часові інтервали відстрочки передавання вимірюють в одиницях елементарного часового інтервалу – часового слоту. В подальшому, для зручності ідентифікації елементарного часового інтервалу будемо використовувати термін «часовий слот». Протягом кожного часового слоту, під час якого канал залишається вільним, значення лічильника відстрочки зменшується на одиницю, тобто, відбувається його декрементування. Коли значення лічильника досягає нуля, станція здійснює передавання кадру починаючи з наступного вільного слоту.

У разі, коли до завершення відліку лічильника відстрочки даної станції інша станція почне передавання свого інформаційного кадру, дана станція

призупиняє свій лічильник і відновлює його роботу тільки після завершення чергового інтервалу DIFS. Таким чином, кадр буде передано тільки тоді, коли відстрочка випадкової тривалості повністю завершилась. У разі, якщо кадр надходить для передавання, а черги нема (порожня черга) і канал вільний довше часового проміжку DIFS, кадр буде передано негайно.

Оскільки після завершення інтервалу міжкадрового проміжку DIFS будь-яка станція мережі може здійснити передавання свого інформаційного кадру. Для зменшення ймовірності одночасного передавання кількох або принаймні двома станціями формується квазівипадковий інтервал відстрочки для кожної станції, значення якого визначається цілим числом часових слотів.

Величину інтервалу задають цілим числом, яке обрано випадковим чином з інтервалу цілих чисел $[0, \dots, CW-1]$. Параметр CW (Contention Window) називається конкурентним вікном.

Мінімальне значення CW_{min} – це системний параметр, значення якого визначено відповідною специфікацією стандарту 802.11 та виробником мережного обладнання.

Після кожного успішного приймання кадру, приймальна станція одразу підтверджує прийом кадру і відсилає кадр підтвердження (ACK – acknowledgement). Кадр ACK передають після короткого міжкадрового інтервалу SIFS (Short Interframe Space), коротшого за DIFS. Інші станції зможуть продовжити процес підрахунку інтервалу відстрочки тільки після завершення інтервалу DIFS, рис. 1.6.

Завдяки інтервалу SIFS між передаванням даних і кадрами підтвердження ACK, часовий інтервал для передавання кадру ACK захищений від конкуренції з боку інших станцій. Якщо після передавання даних кадр ACK не прийнято протягом прогнозованого інтервалу, станцією, що здійснювала передавання попереднього кадру, буде здійснено повторну процедуру доступу до каналу для здійснення повторного передавання

втраченого кадру.

Під час першої спроби отримати доступ до каналу значення параметра CW , який визначає величину інтервалу відстрочки вибирається із мінімального числового інтервалу обмеженого значенням CW_{min} .

У разі невдалої спроби передати кадр даних, тобто, коли кадр підтвердження не надійшов, у лічильник відстрочки буде занесене нове значення з нового інтервалу цілих чисел $[0, \dots, CW-1]$, для якого верхнє значення визначається за формулою

$$CW := 2(CW + 1) - 1. \quad (1.1)$$

Тобто, усього такий інтервал містить CW однаково ймовірних значень, а ймовірність вибору одного з них буде $1/CW$.

Такий механізм оновлення лічильника відстрочки зменшує ймовірність колізії у разі, якщо кілька станцій намагаються отримати доступ до каналу передавання. Після кожного вдалого передавання значення параметра CW набуває значення CW_{min} , а станція, що вдало виконала передавання, після завершення інтервалу DIFS також формує чергову випадкову відстрочку, навіть у разі, якщо у черзі на передавання немає жодного кадру. Цей процес називають «пост-відстрочка» через те, що її здійснюють після передавання. Така пост-відстрочка забезпечує, принаймні, один часовий інтервал відстрочки між двома послідовними передаваннями MPDU. Найбільше значення вікна відстрочки обмежено верхньою межею CW_{max} .

За певних умов у безпроводовій локальній мережі може утворитись прихована станція. Прихованою станцією називають таку, що не може здійснювати обмін з усіма станціями мережі через фізичні обмеження розповсюдження радіохвиль. Оскільки DCF функціонує на основі алгоритму з контролем носійної частоти робочого каналу, існування таких прихованих станцій може суттєво знизити продуктивність мережі. Прихована станція

може почати передавання свого кадру оскільки не виявила активності якоїсь віддаленої станції. Для того, щоб зменшити проблему прихованої станції, у стандарті 802.11 передбачено механізм Запит-для-відправки/Дозвіл-відправки (Request-to-Send/Clear-to-Send - RTS/CTS), рис. 1.7. [9]

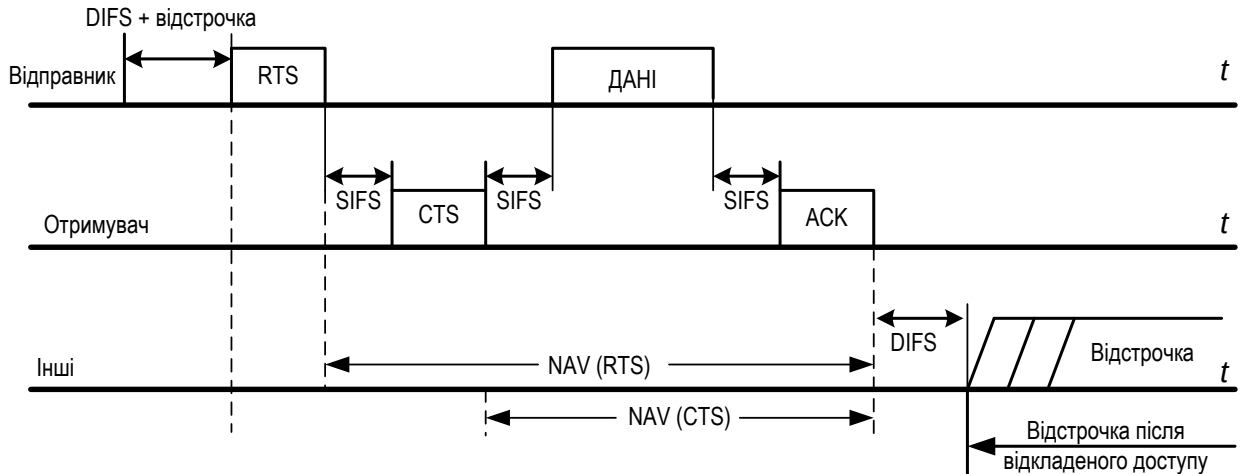


Рисунок 1.7 - Діаграми розподілу часових інтервалів у разі застосування режиму доступу до каналу RTS/CTS

Якщо в мережі використано механізм RTS/CTS, тоді, перед тим як передати кадр даних, станція надсилає короткий кадр RTS, у відповідь на який надходить кадр CTS, переданий приймальною станцією. RTS та CTS кадри містять інформацію про те, скільки часу знадобиться для передавання наступного кадру даних і отримання відповідного кадру підтвердження ACK або іншими словами – тривалість прогнозного інтервалу передавання кадру і супутньої службової інформації. Цей інтервал називають вектором розподілу мережі (Network Allocation Vector – NAV). Таким чином, інші станції, що сприймають сигнал передавальної станції, та приховані станції, що знаходяться близько від приймальної станції, не почнуть своє передавання через те, що у них буде встановлено таймер вектора розподілу мережі, і вони не будуть здійснювати зворотний відлік, доки NAV не досягне нуля. Тільки після цього станції знову можуть брати участь у конкуренції за доступ до каналу.

Між послідовними кадрами RTS, CTS, кадром даних і кадром ACK,

використовують інтервал SIFS, як це наведено на рисунку 1.7. Слід зауважити, що використання послідовності кадрів RTS/CTS може бути дуже корисним, навіть за умови відсутності прихованих станцій. Наприклад, коли багато станцій мережі конкурують за доступ до каналу, втрата пропускнуєї спроможності через колізії, що виникають під час кадру, RTS може бути меншою у порівнянні з втратами через колізії під час передавання значно більш довгих кадрів даних [28].

На відміну від розглянутого вище правила повторного передавання втраченого кадру в режимі RTS/CTS застосовано інший механізм. У цьому режимі, щоб запобігти конкуренції з боку інших станцій у випадку вимушеного повторного передавання кадру даною станцією, застосовано інтервал EIFS (Extended Interframe Space). Усі інші станції, як і у попередньому випадку будуть чекати завершення інтервалу DIFS.

У разі успішного передавання кадру, що підтверджено надходженням кадру ACK, дана станція переходить в стан, що передбачає можливість отримання доступу до каналу після часового проміжку DIFS, так само, як і інші станції мережі. Виділяють два різних випадки, що призводять до невдалого прийому кадру. У першому випадку від фізичного рівня (PHY) надходить повідомлення про надходження помилкового кадру, наприклад, через втрату носійної, у другому випадку помилка виявляється на MAC-рівні внаслідок неправильного значення контрольної суми (FCS).

Значення EIFS визначається сумою часу одного SIFS, одного DIFS і часу необхідного на передавання кадру підтвердження ACK на найнижчому обов'язковому рівні базового фізичного підрівня (PHY), для якого швидкість передавання службової інформації становить 1 Мбіт/с у випадку застосування специфікації 802.11b, тобто:

$$EIFS = SIFS + ACK + DIFS. \quad (1.2)$$

Усі параметри канального рівня, включаючи SIFS, DIFS, канальний

часовий слот, CW_{min} та CW_{max} обумовлені параметрами фізичного рівня. У табл. 1.2 наведено їх значення для специфікації 802.11b.

Таблиця 1.2 – Значення параметрів канального рівня для мережі 802.11b

Параметр	SIFS	DIFS	Часовий слот, ST	CW_{min}	CW_{max}
Тривалість, мкс	10	50	20	31	1023

Іще два параметр, один з яких визначає тривалість пріоритетного міжкадрового інтервалу PIFS (Priority Iterframe Space), а інший – міжкадровий інтервал відсутності передавання у режимі координованого доступу PCF IFS, незалежно від специфікації визначається співвідношеннями [10]

$$PIFS = SIFS + 2ST, \quad (1.3)$$

$$PCF = SIFS + ST. \quad (1.4)$$

Як вже було зазначено раніше, обладнання, що функціонує за новими специфікаціями є для сумісним з обладнанням попередніх поколінь. Для такої сумісності в нових специфікаціях передбачено використовувати відповідні типи преамбули і заголовку кадру. Розглянемо трохи інформації про це на прикладі специфікації 802.11n.

1.3 Особливості технічних рішень передбачених специфікацією IEEE 802.11 ac.

Специфікацією стандарту Wi-Fi 802.11ac впроваджено у 2013 році. Теоретична швидкість передавання даних такої мережі досягає 866 МБіт/с в каналі 160 МГц. Дану специфікацію характеризують такі особливості [9]:

1. Об'єднання каналів (Channel Bonding) - об'єднання двох каналів зі смугою пропускання кожного 20 МГц один зі смугою пропускання 40 МГц, що призводить до подвоєння пропускної здатності. Однак, враховуючи те,

що в діапазоні 2.4 ГГц всього 3 канали, що не перекриваються по частоті, використовувати канали зі смугою пропускання 40 МГц рекомендуються тільки в діапазоні 5 ГГц.

2. Співіснування каналів із шириною смуги 20/40 МГц (20/40 MHz Channels and Coexistence). При підключенні клієнт і точка доступу AP (Access Point) обмінюються інформацією (HT Information and Capabilities Elements), що включає ширину смуги пропускання каналу, номер первинного каналу та усунення вторинного каналу із шириною смуги пропускання 40 МГц. Для виключення конфліктів при одночасній роботі двох і більше точок доступу точка доступу стандарту 802.11n повинна переходити на інший канал або переключитися на використання каналу шириною смуги 20 МГц, якщо інша точка доступу починає передачу в смузі частот 20 МГц, що становить половину смуги каналу 40 МГц який використовується першою AP.

3. Використання технологій MIMO (Multiple Input, Multiple Output – багато входів, багато виходів) та SP (Spatial Multiplexing – просторового об'єднання). При використанні технології MIMO передача даних у бездротових мережах здійснюється із застосуванням двох і більшої кількості передаючих та приймальних антен. Передавальні та приймальні антени рознесені настільки, щоб забезпечити слабку кореляцію між сигналами сусідніх антен.

4. Використання STBC (Space-Time Block Coding – блокового просторово-часового кодування) підвищує надійність прийому даних. Спрощено принцип блокового кодування полягає в розбитті потоку даних на блоки та ретрансляції блоку в різні часові інтервали. Таким чином, дотримується принцип багаторазової посилки даних і покращується завадостійкість схеми MIMO як такої. Однак кодування за допомогою блокових кодів енергетичного виграшу не дає.

5. Використання SGI (Short Guard Interval – короткого захисного інтервалу) – затримки між символами, що передаються, для запобігання

інтерференції між ними. Стандартний час затримки становить 800 нс, мале – 400 нс. Використання інтервалу SGI може збільшити пропускну здатність на 10%.

Іще одним технічним рішенням, що дозволяє збільшити пропускну здатність системи є збільшена кількість просторових потоків. Попередній стандарт 802.11n передбачає можливість використання до 4 просторових потоків, а в 802.11ac їхня кількість була збільшена до 8. Коли одночасно з різних антен відбувається передача радіосигналу, щоб уникнути колізій, передача повинна здійснюватися через окремі просторові потоки (Spatial Streams) [10].

Підтримка нової модуляції високої густини 256-QAM. Застосування в стандарті 802.11ac нової та більш продуктивної системи модуляції сигналу 256-QAM забезпечує приріст пропускну спроможності бездротової мережі. Модуляція 256-QAM у порівнянні з 64-QAM (на стандарті 802.11n) значно (приблизно до 25%) збільшує швидкість передавання даних. Наприклад, на стандарті 802.11ac при ширині каналу 40 МГц, при використанні 1 просторового потоку і модуляції 256-QAM максимальна швидкість каналу становить 200 Мбіт/с, а на стандарті 802.11n при тих же параметрах, але на модуляції 64-QAM становить 1 Мбіт/с [13].

Нижче наведено таблицю максимальних швидкостей передавання даних (Data Rate) (рис.1.8) стандарту 802.11ac, залежно від різних параметрів: тип модуляції (Modulation), швидкість кодування (Coding Ratio), кількість просторових потоків (Spatial Stream), ширина каналу (20/40/80) / 160-MHz).

Стандарт 802.11n регламентує три режими роботи точки доступу [9]:

1. High Throughput (HT) або Greenfield Mode – режим з високою пропускну здатністю, в якому можуть працювати лише точки доступу (клієнти), які підтримують стандарт 802.11n.

2. Non-HT (Legacy) Mode – успадкований режим, всі кадри, надіслані точкою доступу, сформовані відповідно до специфікації стандартів 802.11b/g (допустима ширина смуги пропускання каналу лише 20 МГц).

802.11n		802.11ac										
HT MCS Index	VHT MCS Index	Special Streams	Modulation	Coding	20MHz		40MHz		80MHz		160MHz	
					Data Rate No SGI	Data Rate SGI	Data Rate No SGI	Data Rate SGI	Data Rate No SGI	Data Rate SGI	Data Rate No SGI	Data Rate SGI
0	0	1	BPSK	1/2	6.5	7.2	13.5	15	29.3	32.5	58.5	65
1	1	1	QPSK	1/2	13	14.4	27	30	58.5	65	117	130
2	2	1	QPSK	3/4	19.5	21.7	40.5	45	87.8	97.5	175.5	195
3	3	1	16-QAM	1/2	26	28.9	54	60	117	130	234	260
4	4	1	16-QAM	3/4	39	43.3	81	90	175.5	195	351	390
5	5	1	64-QAM	2/3	52	57.8	108	120	234	260	468	520
6	6	1	64-QAM	3/4	58.5	65	121.5	135	263.3	292.5	526.5	585
7	7	1	64-QAM	5/6	65	72.2	135	150	292.5	325	585	650
	8	1	256-QAM	3/4	78	86.7	162	180	351	390	702	780
	9	1	256-QAM	5/6	n/a	n/a	180	200	390	433.3	780	866.7
8	0	2	BPSK	1/2	13	14.4	27	30	58.5	65	117	130
9	1	2	QPSK	1/2	26	28.9	54	60	117	130	234	260
10	2	2	QPSK	3/4	39	43.3	81	90	175.5	195	351	390
11	3	2	16-QAM	1/2	52	57.8	108	120	234	260	468	520
12	4	2	16-QAM	3/4	78	86.7	162	180	351	390	702	780
13	5	2	64-QAM	2/3	104	115.6	216	240	468	520	936	1040
14	6	2	64-QAM	3/4	117	130.3	243	270	526.5	585	1053	1170
15	7	2	64-QAM	5/6	130	144.4	270	300	585	650	1170	1300
	8	2	256-QAM	3/4	156	173.3	324	360	702	780	1404	1560
	9	2	256-QAM	5/6	n/a	n/a	360	400	780	866.7	1560	1733.3
16	0	3	BPSK	1/2	19.5	21.7	40.5	45	87.8	97.5	175.5	195
17	1	3	QPSK	1/2	39	43.3	81	90	175.5	195	351	390
18	2	3	QPSK	3/4	58.5	65	121.5	135	263.3	292.5	526.5	585
19	3	3	16-QAM	1/2	78	86.7	162	180	351	390	702	780
20	4	3	16-QAM	3/4	117	130	243	270	526.5	585	1053	1170
21	5	3	64-QAM	2/3	156	173.3	324	360	702	780	1404	1560
22	6	3	64-QAM	3/4	175.5	195	364.5	405	n/a	n/a	1579.5	1755
23	7	3	64-QAM	5/6	195	216.7	405	450	877.5	975	1755	1950
	8	3	256-QAM	3/4	234	260	486	540	1053	1170	2106	2340
	9	3	256-QAM	5/6	260	288.9	540	600	1170	1300	n/a	n/a

Рисунок 1.8 – Таблиця максимальних швидкостей передавання даних (Data Rate) стандарту 802.11ac [14]

3. HT Mixed Mode – змішаний режим, при якому використовуються переваги режиму з високою пропускнуою здатністю спільно з механізмом, що реалізує можливість роботи з обладнанням, що відповідає стандартам 802.11b/g. Як мінус – для клієнтів, які користуються стандартами 802.11n, пропускна спроможність нижча, ніж у HT-режимі. Механізм спільної роботи полягає в тому, що на каналному рівні пристрою, що відповідають

стандартам 802.11n, передають кадр з преамбулою старого формату, що йде за преамбулою формату 802.11n. Преамбула старого формату дозволяє клієнтам протоколів 802.11b/g передавати та приймати дані від точки доступу [13].

Друга редакція стандарту 802.11ac (Wave 2).

Ця ревізія базується на попередній версії стандарту, але з деякими суттєвими змінами, а саме [10].:

1. Підвищена продуктивність з 1.3 Гбіт/с до 2.34 Гбіт/с (реалізовано у Ultra);
2. Додано підтримку Multi User MIMO (MU-MIMO) з можливістю чотирьох просторових потоків (реалізовано в Ultra);
3. Ширина каналу збільшена до 160 МГц (реалізовано у Ultra, Peak, Ultra SE), використовується одразу вісім стандартних каналів шириною 20 МГц. Даний режим займає в два рази більше діапазон, що для деяких пристроїв, які підтримують невеликий набір каналів, призводить до того, що в ефірі не можна буде організувати мережі, що не перетинаються. Канали 160 МГц насправді актуальні для клієнтів, які мають їх підтримку та працюють у чистому радіоефірі 5 ГГц;
4. Збільшено можливу кількість каналів у діапазоні 5 ГГц.

1.4 Особливості технічних рішень передбачених специфікацією IEEE 802.11 ax.

Специфікація IEEE 802.11ax спрямована на підвищення швидкості передавання даних у насиченому режимі точки доступу. У стандарті використовують декілька механізмів для можливості доступу до каналу передавання більшої кількості користувачів та для надійності обміну інформацією безпроводовою мережею [11].

Мережа 802.11ax забезпечує функціонування в діапазонах частот 2,4 та 5 ГГц, підтримує базові частотні смуги 20/40/80/160 МГц, роботу за

технологією MIMO 8×8 , що забезпечує одночасне передавання до 8 просторових потоків в двох напрямках (низхідному та висхідному каналах, DL та UL). Також в специфікації можлива підтримка модуляції 512- і 1024-QAM та змінений алгоритм передавання преамбули та повторного відправлення втрачених кадрів.

З використанням даних механізмів мережі 802.11ax теоретично можуть здійснювати обмін інформацією зі швидкістю 10 Гбіт/с.

У стандарті 802.11ax застосовують метод просторового кодування сигналу MU-MIMO і для передавання у висхідному каналі (Up-link Multi-user Multiple Input Multiple Output, ULMU MIMO), від користувачів до точки доступу. У технології 802.11ax застосовують множинний доступ з ортогональним частотним розподілом (OFDMA), що дозволяє ефективного використовувати частотний діапазон, усунути частотно-селективні завмирання та інтерференцією [12].

На фізичному рівні стандарт 802.11ax функціонує подібно специфікації 802.11ac. У технології передбачено мультиплексування з ортогональним частотним розподілом каналів (OFDM) та підтримується робота в частотних діапазонах частотою: 20, 40, 80, $80 + 80$ і 160 МГц.

Стандартом підтримується збільшення кількості носійних угруповання OFDM до 2048. У випадку такого типу модуляції скорочено інтервал рознесення ортогональних носійних (рис. 1.9, б). порівняно з інтервалом попередніх версій 802.11 (рис. 1.9, а).

В технології OFDMA збільшено тривалість OFDM-символів в чотири рази (12,8 мкс замість 3,2 мкс), що дозволяє збільшити кількість підносійних та забезпечити високу вибірковість мережі. Очікують, що надійність багатокористувацького передавання у висхідному каналі буде високою, оскільки в разі збільшення тривалості символу ймовірність виникнення помилок під час приймання зменшується.

Також у стандарті 802.11ax передбачено збільшення захисного інтервалу (Guard Interval, GI) між OFDM-символами, що дозволяє зменшити

інтерференцію між ними. Передбачено три варіанти тривалості захисного інтервалу: стандартний 0,8 мкс, а також збільшені 1,6 мкс та 3,2 мкс.

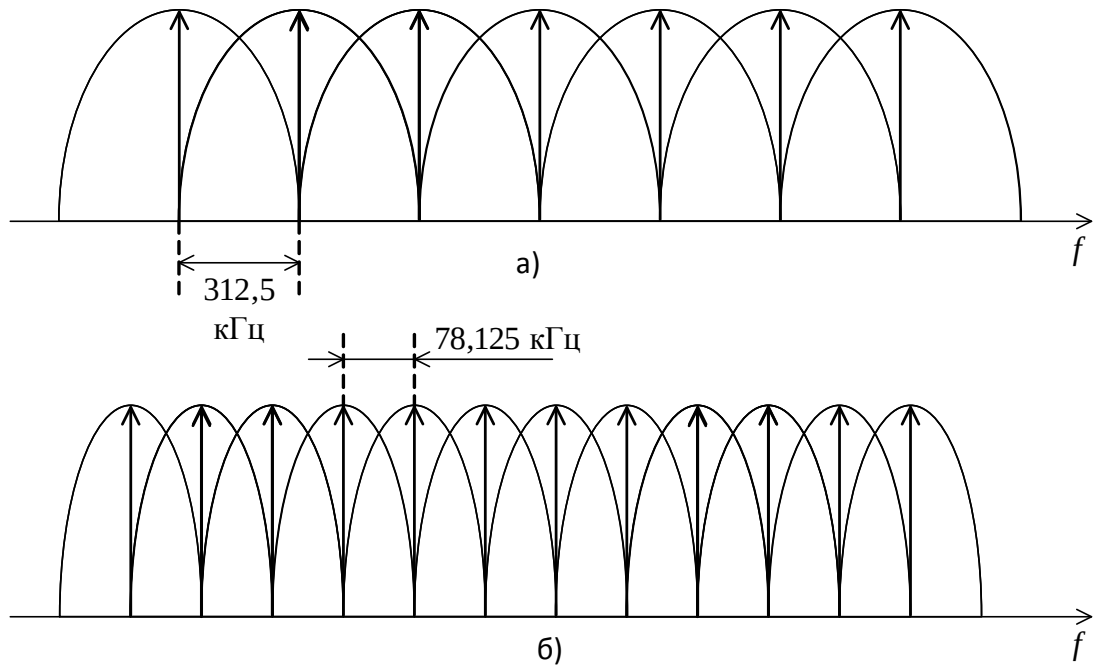


Рисунок 1.9 – Структура спектру OFDM-сигналів специфікацій 802.11a/g/n/ac (а) та 802.11ax (б)

У специфікації модифіковано формат кадрів. Преамбула кадру складається зі стандартної частини і преамбули специфікації 802.11ax. Стандартна частина преамбули може бути декодована станціями Wi-Fi попередніх специфікацій, що використовується для сумісності роботи мереж різних стандартів 802.11.

У стандарті IEEE 802.11ax можливе використання квадратурної модуляції 1024-QAM, але використання такого високого порядку модуляції вимагає високого відношення сигнал/шум для зменшення ймовірності виникнення помилок. Модуляція 1024-QAM збільшує пропускну здатність каналу передавання на 20 відсотків, але може застосовуватись лише у приміщеннях, де між передавачем і приймачем невелика відстань.

У специфікації 802.11ax використано технологію множинного доступу з ортогональним частотним розподілом (OFDMA).

Для передавання службових кадрів доводиться використовувати значну

частину каналного ресурсу, що зменшує пропускну здатність каналу. Для зменшення часу на передавання службового трафіку в стандарті 802.11ах заборонено передавати кадри, що містять ідентифікатор мережі WLAN: SSID, часові мітки (time stamp) та іншу інформацію про точку доступу в діапазоні 2,4 ГГц на швидкості передавання даних менших 5,5 Мбіт/с.

Для здійснення розрахованої на багато користувачів передавання в стандарті 802.11ах, крім технології MIMO, використовується також множинний доступ з ортогональним частотним поділом (OFDMA). Важливою особливістю технології OFDMA є те, що передача даних може здійснюватися на тих підносійних, які для даного користувача найменш схильні до частотно-селективної інтерференції. Для вибору таких піднесених кожна точка доступу надсилає звіти про якість передавання за допомогою різних підносійних. Вибір підносійних з урахуванням зворотного зв'язку про якість передавання дозволяє збільшити пропускну здатність до 50% порівняно з випадковим вибором підносійних. Для керування частотними ресурсами мережі кожна передача може займати один чи кілька ресурсних блоків. У частотній області кожен ресурсний блок може складатися з 26, 52, 106, 242, 484 або 996 підносійних (включаючи кілька службових підносійних). У часовій області тривалість ресурсного блоку дорівнює тривалості розрахованої на багато користувачів передавання і щоразу визначається точкою доступу. Таким чином, для розрахованої на багато користувачів передавання частотні діапазони шириною 20, 40, 80 і 160 МГц являють собою один ресурсний блок з 242 підносійних, два ресурсних блоку з 242 підносійних, два ресурсних блоку з 484 підносійних і два ресурсних блоку з 996 підносійних, відповідно. Кожен такий ресурсний блок, у свою чергу, може бути розділений на два вужчі ресурсні блоки, і т.д. Проте є низка винятків. Наприклад, у каналі шириною 20 МГц ресурсний блок з 242 підносійних може бути замінений на два ресурсних блоки, кожен з яких складається з 106 підносійних, а в каналі шириною ≥ 40 МГц ресурсний блок з 242 підносійних може бути замінений на два ресурсні блоки, кожен з яких

складається з 106 підносійних, і один ресурсний блок з 26 підносійних. Хоча технологія OFDMA може застосовуватися як при передаванні у висхідному, так і при передаванні у низхідному каналі, стандарт 802.11ax не дозволяє здійснювати передачу у висхідному та низхідному каналах одночасно [15].

Грунтуючись на потребах у розрахованому на багато користувачів трафіку, точка доступу вирішує, як розподіляти канал, завжди призначаючи всі доступні ресурси на низхідній лінії зв'язку. Вона може виділяти весь канал лише одному користувачеві (як це реалізується в 802.11ac) або може розбити його на одночасне обслуговування кількох користувачів (рис. 1.10) [15].

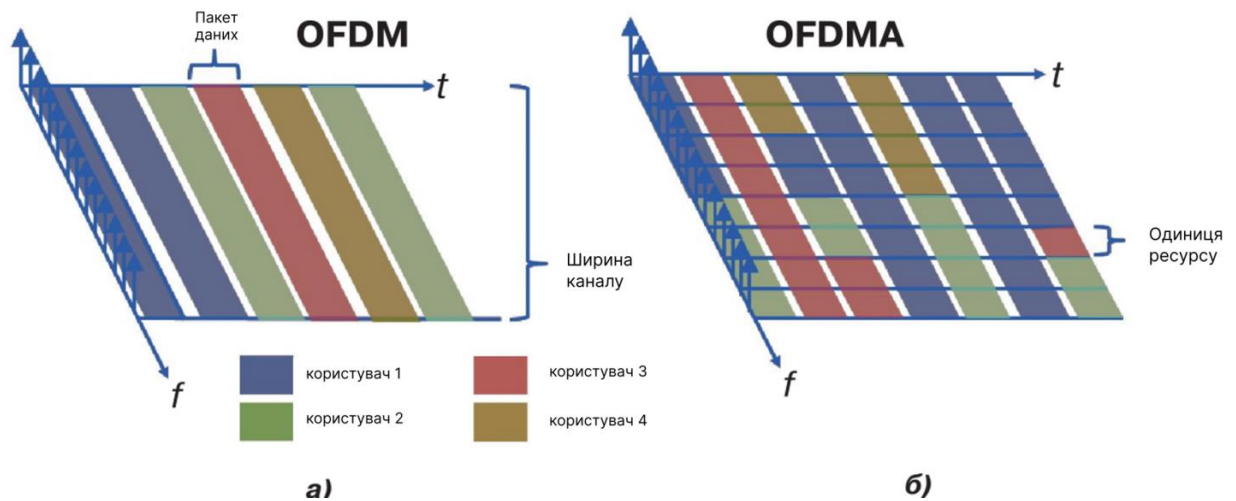


Рисунок 1.10 – Один користувач, який використовує канал з використанням OFDM (а) та мультиплексування різних користувачів в одному каналі з використанням OFDMA (б)

1.5 Проблеми, що впливають на ефективність функціонування мереж стандарту IEEE 802.11.

З виходом нових стандартів Wi-Fi, а також у зв'язку із загальним поширенням гаджетів, які функціонують в неліцензованому діапазоні частот, користувачі все частіше звертають увагу на те, що якість Wi-Fi мереж погіршується навіть за умови появи нових удосконалених специфікацій цього стандарту. Згідно зі статистикою, в усьому світі сьогодні використовують 6,4

мільярда безпроводових пристроїв. У 2022 році кількість безпроводових пристроїв становила в середньому 3,6 на одну людину. Але причина деградації експлуатаційних параметрів Wi-Fi мереж обумовлена не тільки збільшенням кількості пристроїв. На цю ситуацію впливає ще кількома причин [13].

По-перше, в кожному багатоповерховому житловому будинку або офісній споруді вже встановлено велику кількість безпроводових маршрутизаторів. В результаті в обмеженому просторі одночасно функціонує кілька мереж IEEE 802.11. Приклад наведено на рисунку 1.9. На скріншоті наведено результати вимірювання завантаження частотного діапазону 2,4 ГГц, на дув'ятому поверсі жилого будинку протягом 5 хв. У період 11 год 0 хв – 11 год 5 хв. Графічні залежності характеризують рівень потужності створюваний різними мережними засобами у точці вимірювання. Наведено лише частину джерел випромінювання та їх характеристики. Із наведених на рисунку 1.10 даних випливає, що всі мережі створюють одна одній доволі потужні завади оскільки частотні смуги каналів перекриваються.

По-друге, попит на швидкісне передавання даних неухильно зростає, а це означає, що потрібно збільшувати частотні смуги радіоканалів, і як наслідок це веде до того, що каналів буде менше, але з досить широкими смугами. І третій, важливий чинник – стільникові оператори "скидають" трафік з мобільних мереж у Wi-Fi мережі (Wi-Fi Offloading).

Зміни умов функціонування мереж у діапазоні 5ГГц. Перенесення Wi-Fi-комунікацій з частот 2,4 ГГц у діапазон 5 ГГц на якийсь час вирішило проблему з надмірним навантаженням каналів, але від цього постраждав радіус дії мереж, тому багато споживачів звернулися до простих рішень для збільшення зони охоплення (наприклад, до різних підсилювачів і ретрансляторів). Популярні стали і mesh-мережі, які стали використовувати для отримання рівномірного Wi-Fi покриття у всіх частинах будівлі.

Ситуація ускладнюється ще й тим, що мобільні оператори зв'язку вичерпали велику частину свого ексклюзивного спектра і планують протягом

наступних трьох років переносити передавання мобільних даних на 60% в неліцензійний спектр, який використовують для Wi-Fi мереж.

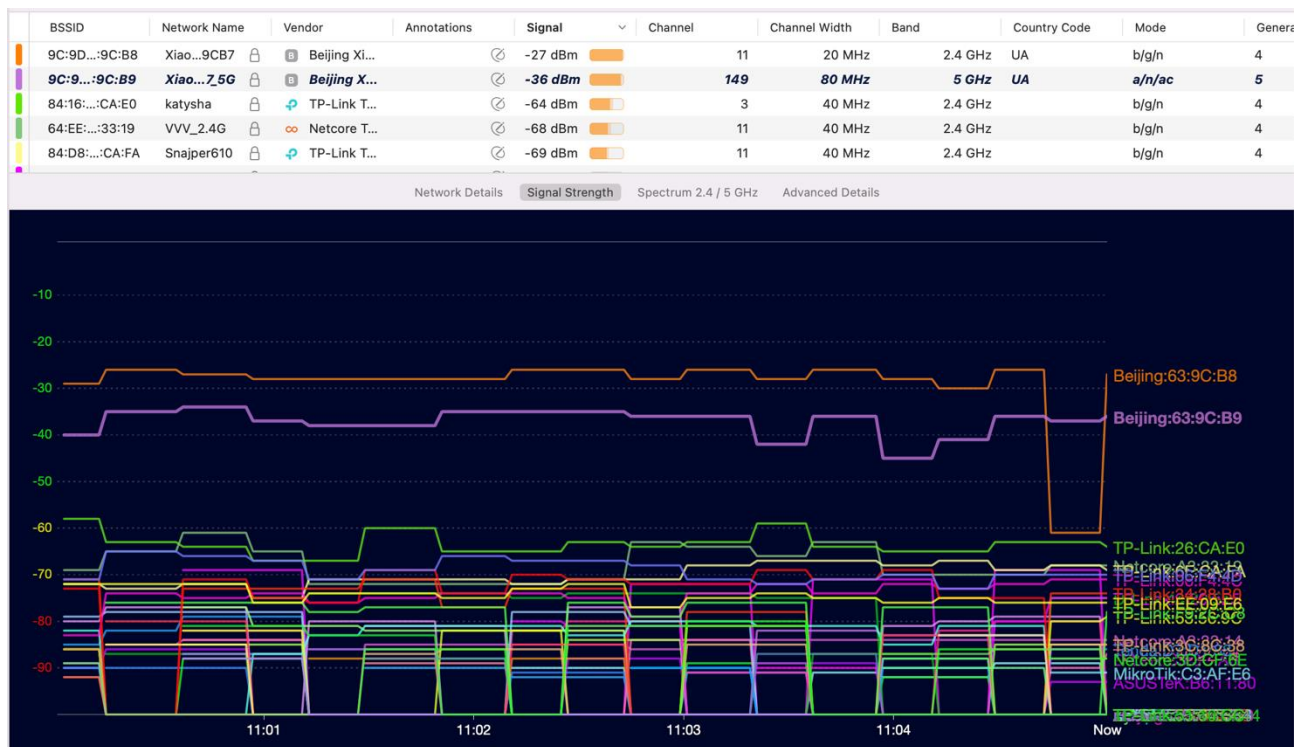


Рисунок 1.11 – Результати вимірювання рівнів сигналів у частотному діапазоні 2,4 ГГц, на дев'ятому поверсі жилого будинку

Зміни умов функціонування мереж у діапазоні 5 ГГц.

Технологія для цього рішення називається LTE-Unlicensed (LTE-U). Її використовують 4G LTE-базові станції для відправлення та приймання даних через ті ж частотні смуги 5 ГГц діапазону, що і Wi-Fi. Деякі організації, такі як Cable Television Laboratories, Google і Microsoft, відзначають, що LTE-U буде в цілому погіршувати роботу Wi-Fi мереж. У США Verizon і T-Mobile почали пробні розгортання LTE-U, щоб визначити його вплив на Wi-Fi. Оператори в Європі і Азії також планують подібні випробування.

Теоретично специфікація IEEE 802.11ac може забезпечити високу пропускну здатність безпроводового каналу, що дозволяє передавати відео високої якості. Ця специфікація Wi-Fi забезпечує гігабітні швидкості з'єднання. Але щоб можна було передавати дані з вказаною швидкістю, в

802.11ac передбачено об'єднання каналів. У разі реалізації найбільш високопродуктивної конфігурації IEEE 802.11ac Wave 3 передбачено об'єднувати весь доступний спектр Wi-Fi у два канали завширшки по 160 МГц. Це злиття означає, що тільки дві пари пристроїв можуть взаємодіяти із застосуванням найширшого каналу одночасно без взаємних завад. Тому, якщо у певному просторовому сегменті вже є дві точки доступу 802.11ac, то поява третьої призведе до значного зменшення швидкості передавання даних для всіх користувачів. В результаті ситуації, що склалася, всі ті додаткові переваги, які надавав діапазон 5 ГГц в порівнянні з 2,4 ГГц – зникли.

До певного поліпшення ситуації може призвести застосування технології динамічного вибору частоти (Dynamic Frequency Selection – DFS), яка полягає у використанні частотних каналів діапазону 5 ГГц, виділених для метеорологічних та військових радарів там де вони відсутні або в ті інтервали часу, коли радари не функціонують.

Висновки до розділу

За час існування технології передавання даних стандарту IEEE 802.11 зазнали значних змін. Удосконалені специфікації стандарту, що визначають правила функціонування мережі на каналному і фізичному рівні, мають позначення IEEE 802.11b/a/g/n/ac/ad/ax.

Значне збільшення швидкості передавання сигнальних потоків досягнуто застосуванням багаторівневої OFDM модуляції (КАМ-256 в специфікації IEEE 802.11ac), а також удосконаленою технологією доступу OFDMA (IEEE 802.11ax, КАМ-1024). Збільшення швидкості передавання здійснено також формуванням кількох просторових каналів (до трьох), а також застосуванням технології формування діаграми спрямованості в напрямку на абонента (до восьми променів).

Значне розповсюдження безпроводових мереж IEEE 802.11 призводить до зменшення ефективності їх використання через виникнення перехресних

завад в разі часткового перекриття частотних смуг радіоканалів. Зменшення ефективності функціонування мереж є характерним як для мереж, що функціонують в діапазоні частот 2,4 ГГц, так і для мереж, що функціонують в діапазоні частот 5 ГГц.

Для досягнення мети дисертаційної роботи необхідно виконати такі дослідження:

- обґрунтувати методики оцінювання ефективності застосування безпроводових мереж IEEE 802.11;
- дослідити особливості електромагнітної обстановки в зоні розгортання мережі IEEE 802.11 і особливості формування зони обслуговування точки доступу в багатоповерховій споруді;
- дослідити пропускну здатність конкретної безпроводової мережі IEEE 802.11 в різних точках зони обслуговування з урахуванням впливу інших безпроводових мереж.

2 ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДИКИ ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ МЕРЕЖ IEEE 802.11

2.1 Загальна характеристика методик оцінювання експлуатаційних характеристик безпроводової мережі IEEE802.11

Для оцінювання ефективності функціонування безпроводової мережі необхідно скористатись методикою, в якій найкращим чином враховано взаємозв'язок між системними параметрами і експлуатаційними характеристиками.

Як впливає безпосередньо із принципів функціонування безпроводової мережі IEEE802.11, наведених в першому розділі, обов'язковою технологією доступу до спільного безпроводового каналу для таких мереж є технологія конкурентного доступу. В перших специфікаціях стандарту IEEE802.11 було передбачено реалізацію режиму конкурентного доступу безпосередньо під час процедури передавання інформаційних кадрів. У специфікаціях IEEE802.11n, ас, ах режим конкурентного доступу передбачено здійснювати під час доступу до каналу із застосуванням спеціальних службових кадрів, що забезпечують збір інформації про характеристики середовища передавання і попереджають всіх користувачів мережі про заплановане передавання кадрів. Тобто конкурентний режим реалізовано за технологією «запит на передавання-відповідь про готовність».

За час існування технології безпроводових мереж IEEE 802.11 для аналізу функціонування мережі на канальному рівні та визначення його експлуатаційних характеристик різними фахівцями запропоновано кілька математичних моделей, що наведені, наприклад, в [16].

Особливістю цих моделей є те, що в них розглянуто процес передавання однорідних потоків даних і не враховано особливості передавання мультимедійної інформації. Найбільш поширеною моделлю для дослідження мереж стандарту IEEE 802.11 є модель, Джузеппе Біанкі [16]. Зазначену модель створено на підґрунті припущення щодо насиченого

навантаження каналу. В подальшому з розвитком стандарту IEEE 802.11 цю модель удосконалили для потреб аналізу процесів в мережі 802.11n та 802.11ac [18].

Серед альтернативних методів і, відповідно методик оцінювання експлуатаційних характеристик безпроводових мереж IEEE 802.11 є метод, що ґрунтується на «концепції віртуального конкурентного вікна», запропонований фахівцями КПІ ім. Ігоря Сікорського [19]. Для вибору методу для подальших досліджень в межах даної дисертації розглянемо два вищезгаданих методи.

2.2 Особливості методу насиченого навантаження

Проаналізуємо можливість оцінити граничні значення основних експлуатаційних характеристик для режиму DCF [20, 21] для однієї станції мережі за ідеальних умов із застосуванням моделі і методу, запропонованих Дж. Б'янкі.

Згідно з методикою, запропонованою Дж. Б'янкі визначення граничних значень мережних параметрів, розглядають мережу, в якій активно буде лише одна станція. Для спрощення розрахунків запропоновано не розглядати технологію передавання даних згідно з вищих рівнів а враховувати їх як звичайні дані, інтегровані з корисним навантаженням [16].

Максимальну пропускну здатність каналу в разі наявності в мережі лише однієї станції запропоновано визначати на підставі припущення, що в радіоканалі відсутні шуми і завади. У такому разі будуть відсутні втрати і затримки обумовлені колізіями і спотвореннями кадру даних. Тоді для визначення пропускну здатності розрахункове співвідношення набуває такого вигляду [20, 16]:

$$S = \frac{E[PL]}{E[T_{Fr_Tx}] + DIFS + ST \cdot CW_{\min} / 2}, \quad (2.1)$$

де $E[PL]$ – усереднене значення навантаження, передане в одному кадрі, $E[T_{Fr_Tx}]$ – усереднене значення часу передавання одного кадру даних, ST – тривалість часового слоту, $CW_{min}/2$ – усереднене значення лічильника зворотного відліку, $ST \cdot CW_{min}/2$ – це усереднений час затримки між інтервалами передавання двох послідовних кадрів.

Тривалість часового інтервалу, протягом якого передано кадр T_{Fr_Tx} , з урахуванням розглянутого вище розподілу часових інтервалів для режиму DCF можна визначити за співвідношенням

$$E[T_{Fr_Tx}] = T_{MPDU} + SIFS + T_{ACK}, \quad (2.2)$$

де T_{MPDU} – тривалість інтервалу часу безпосереднього передавання кадру даних, T_{ACK} – інтервал часу, необхідний для надходження кадру підтвердження ACK.

Значення наведених часових параметрів залежать від двох чинників, а саме:

- від швидкості передавання на фізичному рівні (модуляція та швидкість коду), згідно з відповідною специфікацією стандарту;
- від розміру кадру даних (величини навантаження).

Специфікаціями 802.11 передбачено великий перелік дискретних значень швидкостей, які можна використовувати у процесі функціонування мережі. Швидкість передавання корисних даних залежить від типу модуляції та параметрів згорткового коду.

Можливі швидкості передавання і відповідні їм системні налаштування наведено в табл.2.1 й табл.2.2.

Таблиця 2.1 – Розрахункові швидкості передавання каналу 802.11n

MCS-індекс	Кількість просторових потоків	Тип модуляції	Ефективність кодування	Швидкість передавання, Мбіт/с			
				ширина каналу 20 МГц		ширина каналу 40 МГц	
				GI = 800 нс	GI = 400 нс	GI = 800 нс	GI = 400 нс
0	1	BPSK	1/2	6.50	7.20	13.50	15.00
1	1	QPSK	1/2	13.00	14.40	27.00	30.00
2	1	QPSK	3/4	19.50	21.70	40.50	45.00

3	1	16-QAM	1/2	26.00	28.90	54.00	60.00
4	1	16-QAM	3/4	39.00	43.30	81.00	90.00
5	1	64-QAM	2/3	52.00	57.80	108.00	120.00
6	1	64-QAM	3/4	58.50	65.00	121.50	135.00
7	1	64-QAM	5/6	65.00	72.20	135.00	150.00
8	2	BPSK	1/2	13.00	14.40	27.00	30.00
9	2	QPSK	1/2	26.00	28.90	54.00	60.00
10	2	QPSK	3/4	39.00	43.30	81.00	90.00
11	2	16-QAM	1/2	52.00	57.80	108.00	120.00
12	2	16-QAM	3/4	78.00	86.70	162.00	180.00
13	2	64-QAM	2/3	104.00	115.60	216.00	240.00
14	2	64-QAM	3/4	117.00	130.00	243.00	270.00
15	2	64-QAM	5/6	130.00	144.40	270.00	300.00
16	3	BPSK	1/2	19.50	21.70	40.50	45.00
17	3	QPSK	1/2	39.00	43.30	81.00	90.00
18	3	QPSK	3/4	58.50	65.00	121.50	135.00
19	3	16-QAM	1/2	78.00	86.70	162.00	180.00
20	3	16-QAM	3/4	117.00	130.00	243.00	270.00
21	3	64-QAM	2/3	156.00	173.30	324.00	360.00
22	3	64-QAM	3/4	175.50	195.00	364.50	405.00
23	3	64-QAM	5/6	195.00	216.70	405.00	450.00
24	4	BPSK	1/2	26.00	28.80	54.00	60.00
25	4	QPSK	1/2	52.00	57.60	108.00	120.00
26	4	QPSK	3/4	78.00	86.80	162.00	180.00
27	4	16-QAM	1/2	104.00	115.60	216.00	240.00
28	4	16-QAM	3/4	156.00	173.20	324.00	360.00
29	4	64-QAM	2/3	208.00	231.20	432.00	480.00
30	4	64-QAM	3/4	234.00	260.00	486.00	540.00
31	4	64-QAM	5/6	260.00	288.80	540.00	600.00

З урахуванням формату кадру даних MPDU за умови сигнальної швидкості передавання R_{MPDU_Tx} і корисного навантаження одного кадру PL байтів тривалість T_{MPDU} визначають за співвідношенням

$$T_{MPDU} = T_{PLCP} + 8 \cdot (T_{mac} + PL) / R_{MPDU_Tx}, \quad (2.3)$$

де T_{PLCP} – це час передавання службової інформації, що супроводжує процес передавання на фізичному рівні, наприклад, преамбула та заголовок, що залежать від режиму функціонування мережі. Величина T_{mac} у формулі (2.3) враховує число байтів заголовка канального рівня MAC і поле контрольної суми FCS. Коефіцієнт «8» застосований для подання навантаження у бітах.

Час передавання кадру відповіді (ACK) залежить від структури цього

кадру і часових параметрів, передбачених відповідною специфікацією.

Таблиця 2.2 – Рекомендовані до застосування індекси MCS і відповідні значення пікової швидкості [25]

802.11n											802.11ac
HT MCS Index	Spatial Streams	Modulation & Coding	Data Rate (GI = 800ns) 20MHz	Data Rate (GI = 400ns) 20MHz	Data Rate (GI = 800ns) 40MHz	Data Rate (GI = 400ns) 40MHz	Data Rate (GI = 800ns) 80MHz	Data Rate (GI = 400ns) 80MHz	Data Rate (GI = 800ns) 160MHz	Data Rate (GI = 400ns) 160MHz	VHT MCS Index
0	1	BPSK 1/2	6.5	7.2	13.5	15	29.3	32.5	58.5	65	0
1	1	QPSK 1/2	13	14.4	27	30	58.5	65	117	130	1
2	1	QPSK 3/4	19.5	21.7	40.5	45	87.8	97.5	175.5	195	2
3	1	16-QAM 1/2	26	28.9	54	60	117	130	234	260	3
4	1	16-QAM 3/4	39	43.3	81	90	175.5	195	351	390	4
5	1	64-QAM 2/3	52	57.8	108	120	234	260	468	520	5
6	1	64-QAM 3/4	58.5	65	121.5	135	263.3	292.5	526.5	585	6
7	1	64-QAM 5/6	65	72.2	135	150	292.5	325	585	650	7
	1	256-QAM 3/4	78	86.7	162	180	351	390	702	780	8
	1	256-QAM 5/6	n/a	n/a	180	200	390	433.3	780	866.7	9

Якщо мережа функціонує в режимі «запит – відповідь» (*RTS/CTS*), тоді час передавання кадру даних треба визначати за співвідношенням

$$T_{Fr_Tx} = T_{RTS} + T_{CTS} + T_{MPDU} + 2SIFS + T_{ACK}. \quad (2.4)$$

Для розрахунку інтервалу передавання кадру запиту *RTS* і відповіді *CTS* треба брати до уваги згідно з якою специфікацією функціонує мережа і, який режим в ній налаштовано.

Для оцінювання впливу різних чинників на пропускну здатність мережі запропоновано використовувати відношення швидкості передавання корисних даних до швидкості передавання кадру (MPDU) [22].

У разі наявності у мережі кількох активних станцій розрахункова модель ускладнюється. За результатами досліджень виявлено таку закономірність, що із збільшення навантаження вузлів безпроводової мережі її пропускну здатність також збільшується і прямує до певного значення асимптотично [22].

З урахуванням такої закономірності запропоновано для дослідження безпроводових мереж використовувати поняття «насиченої пропускну здатності», якої мережа досягає у разі збільшення навантаження комунікаційного каналу.

Насичена пропускна здатність – це найбільша пропускна здатність безпроводової мережі, яку вона може забезпечити у разі одночасного функціонування певної кількості активних станцій [16].

Поняття насиченої пропускної здатності дозволяє визначити найбільше навантаження, яке може обслуговувати конкретна мережа.

На підґрунті цієї концепції запропоновано розрахункові співвідношення для визначення основних експлуатаційних характеристик.

Зазначені співвідношення утворюють математичну модель функціонування безпроводової мережі IEEE 802.11 в конкурентному режимі [16].

Основні математичні співвідношення цієї моделі наведено нижче.

За умови, що в безпроводовій мережі функціонує N активних станцій і кожна із них з однаковою ймовірністю може отримати доступ до середовища передавання зі ймовірністю τ , ймовірність P_{idle} що дана станція не буде передавати становитиме $(1 - \tau)$, а ймовірність того, що жодна станція не отримає доступу до каналу передавання протягом часового слоту (елементарний інтервал буде вільним – *idle*), буде визначатись співвідношенням

$$P_{idle} = (1 - \tau)^N. \quad (2.5)$$

Важливим моментом щодо формування моделі є те, що всі службові інтервали під час функціонування мережі є кратними певному мінімальному часовому інтервалу, який часовим слотом і позначають символом σ .

Ймовірність успішного передавання P_{scs} здійсненого станцією мережі можна визначити за співвідношенням

$$P_{scs} = N\tau(1 - \tau)^{N-1}. \quad (2.6)$$

Важливими часовими характеристиками моделі є інтервал успішного передавання T_s та інтервал колізії T_c . Інтервал T_s складається з часу передавання корисного навантаження (MPDU) й інтервалів DIFS та ACK.

Інтервал T_c дорівнює проміжку часу, протягом якого відбувається колізія.

Тривалість системного інтервалу $E[SS]$ (System Slot), що дорівнює часу передавання одного кадру даних з урахуванням всіх непродуктивних витрат, визначають як математичне сподівання $E[SS]$:

$$E[SS] = P_{idle}\sigma + P_{scs}T_s + (1 - P_{idle} - P_{scs})T_c. \quad (2.7)$$

Якщо усереднене навантаження мережі протягом системного інтервалу становить $E[PL]$, тоді пропускну здатність системи S запропоновано визначати за очевидним співвідношенням:

$$\begin{aligned} S &= \frac{P_{scs}E[PL]}{E[SS]} = \frac{P_{scs}E[PL]}{P_{idle}\sigma + P_{scs}T_s + (1 - P_{idle} - P_{scs})T_c} = \\ &= \frac{E[PL]}{T_s + \sigma \frac{P_{idle} + \overline{T_c}(1 - P_{idle} - P_{scs})}{P_{scs}}}. \end{aligned} \quad (2.8)$$

де $\overline{T_c} = T_c / \sigma$ – відносна тривалість інтервалу колізій, виміряна в одиницях часового слоту.

Для визначення ймовірності доступу до каналу з урахуванням вищенаведених співвідношень в роботі [23] отримано співвідношення

$$\tau = \frac{2(1 - 2p_c)(1 - p_c^{R+1})}{(1 - 2p_c)(1 - p_c^{R+1}) + W(1 - p_c)[1 - (2p_c)^{R+1}]}, \quad (2.9)$$

де W – початкове значення конкурентного вікна (системний параметр CW); R – максимальна кількість спроб доступу до каналу в разі виникнення колізії.

Згідно зі співвідношенням (2.9) за умови $p_c = 0,5$ ймовірність успішного передавання набуває нульового значення, що не має фізичного смислу.

Наявність в моделі співвідношення (2.9) говорить про обмежені можливості застосування моделі в цілому. В одній із робіт [24] зазначено, що

наявні моделі функціонування каналу можна використовувати для приблизної оцінки параметрів і характеристик безпроводової мережі. Такі моделі забезпечують прийнятну точність розрахунку для системних параметрів, що знаходяться в певному діапазоні значень.

2.3 Особливості удосконаленої методики розрахунку характеристик мережі, адаптованої для мережі стандарту IEEE 802.11ac

У роботі [18] запропоновано методику розрахунку пропускної здатності безпроводової мережі стандарту 802.11ac. Ця методика є удосконаленим варіантом розглянутої вище методики, що ґрунтується на методі насиченого навантаження мережі. Методику доопрацьовано з урахуванням можливості застосовувати для передавання інформаційних потоків кількох просторових потоків в одному радіопромені, а також можливості застосовувати кілька променів, спрямованих на окремих користувачів, як це наведено на рис.2.1.

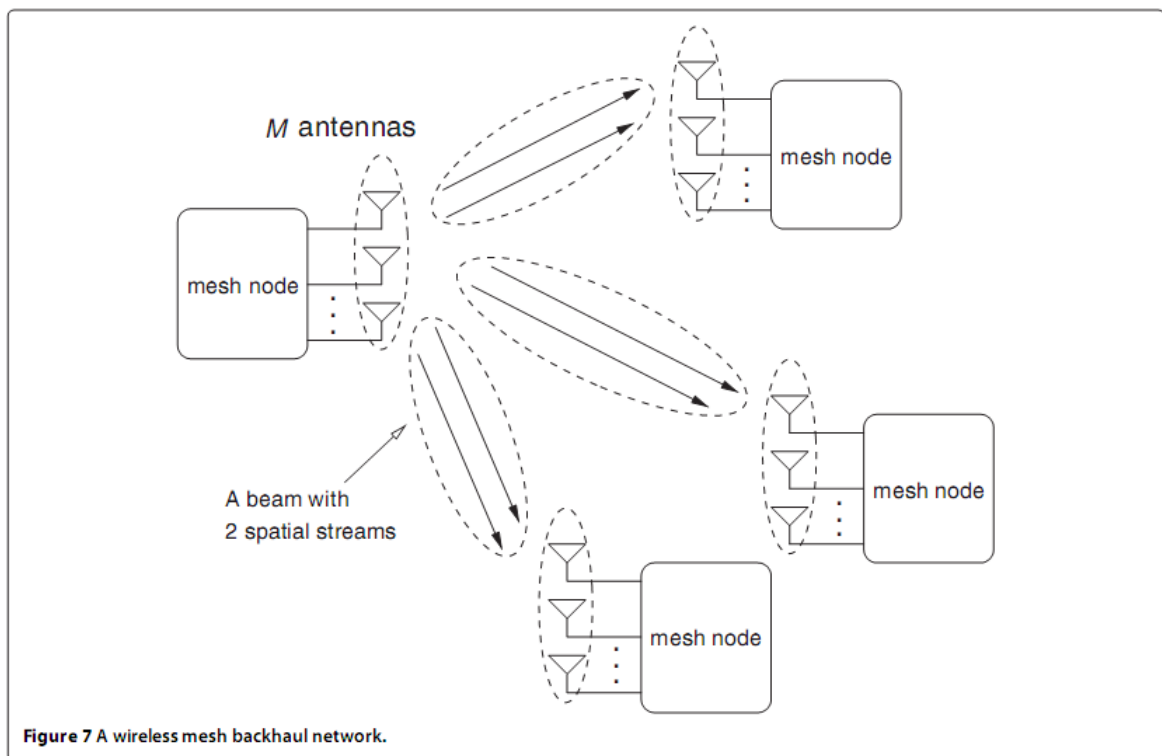


Рисунок 2.1 – Узагальнена схема мережі 802.11ac, запропонована для визначення пропускної здатності безпроводового каналу [18]

Під час доопрацювання зазначеної методики застосовано припущення, що у кожному промені сформовано однакову кількість просторових потоків. Це зроблено для того, щоб швидкість передавання даних кожним променем була однакою. Це припущення обумовлює також однаковий час передавання кожним променем кадрів з однаковим навантаженням..

Для різнобічного дослідження особливостей функціонування мережі 802.11ac запропоновано три можливих схеми розподілу потоків: потоко-орієнтований алгоритм, промене-орієнтований алгоритм, потоко-незалежний алгоритм. Зазначені алгоритми відрізняються кількістю використаних променів і кількістю просторових потоків, що передають в цих променях.

У разі використання базового режиму функціонування мережі 802.11ac (MU-Basic) часовий слот може бути призначено для оцінювання звучання (передаткової характеристики) каналу (explicit compressed feedback – ECFB) або безпосередньо для передавання даних. За таких обставин колізії в каналі можуть виникати під час передавання службових кадрів NDPA, а також під час передавання кадрів даних.

Щоб врахувати тип кадрів, що потрапили в колізію запропоновано використовувати новий ймовірнісний параметр – ймовірність передавання кадру ECFB, яку позначили γ . Альтернативною подією є колізія кадру даних, а ймовірність передавання кадру даних буде дорівнювати $(1-\gamma)$.

Незалежно від режиму функціонування мережі – основний (MU-Basic) чи режим MU-RTS/CTS, вузли отримують доступ до каналу за алгоритмом декременту лічильника зворотного відліку.

В удосконаленій методиці, призначеній для оцінювання пропускну здатності мережі 802.11ac використано такі параметри [18]:

T_s – інтервал часу, протягом якого здійснено успішне передавання кадру;

T_c – інтервал часу, протягом якого мала місце колізія;

σ – інтервал елементарного часового слоту (вільний від передавання);

τ - ймовірність того, що станція мережі буде передавати кадр під час випадково обраного часового слота;

n – кількість активних станцій мережі;

M – кількість антен станції мережі.

Удосконалена математична модель для оцінювання пропускної здатності мережі 802.11ac містить наведені нижче формули для визначення експлуатаційних параметрів та характеристик.

Ймовірність відсутності передавання в інтервалі випадково обраного часового слота:

$$p_e = (1 - \tau)^n. \quad (2.10)$$

Ймовірність успішного передавання кадру у випадково вибраному часовому слоті:

$$p_s = n \cdot \tau \cdot (1 - \tau)^{n-1}. \quad (2.11)$$

Ймовірність колізії у випадково вибраному часовому слоті

$$p_c = 1 - p_e - p_s. \quad (2.12)$$

Формула для визначення пропускної здатності безпроводового каналу

$$S = \frac{(1 - \gamma) \cdot p_s \cdot N_f \cdot N_b \cdot n_b \cdot L}{\gamma \cdot (p_s \cdot T_{sci.s} + p_c \cdot T_{sci.c}) + (1 - \gamma) \cdot (p_s \cdot T_{data.s} + p_c \cdot T_{data.c}) + p_e \cdot \sigma}, \quad (2.13)$$

де N_f – кількість кадрів в агрегованому блоці A-MPDU;

N_b – кількість одночасно використовуваних променів;

$T_{sci.s}$, $T_{sci.c}$, $T_{data.s}$, $T_{data.c}$ – тривалості інтервалів успішного передавання та інтервалів колізій, що мають місце при передаванні кадрів керування (*SCI*) або кадрів даних (*data*) A-MPDU відповідно.

Одним із висновків авторів удосконаленої методики є висновок про те, що в разі $\gamma=0$ (протокол *MU-RTS/CTS* не використовують) співвідношення для ймовірності успішного передавання кадру даних співпадає з рівнянням Дж. Б'янки (2.9), а саме:

$$\tau = \frac{2 \cdot (1 - 2p_c)}{(1 - 2p_c) \cdot (CW_{\min} + 1) + p_c \cdot CW_{\min} \cdot (1 - p_c) \cdot [1 - (2p_c)^m]}. \quad (2.14)$$

На підставі наведених результатів дослідження щодо особливостей удосконаленої методики оцінювання параметрів та характеристик безпроводової мережі 802.11ac можна зробити висновок, що її можна застосовувати тільки для обмеженого діапазону параметрів, оскільки так само, як і в базовій методиці, за умови $p_c = 0,5$ ймовірність успішного передавання дорівнює нулю, що в свою чергу суперечить практичним результатам.

2.4 Методика оцінювання параметрів безпроводової мережі на підґрунті концепції віртуального конкурентного вікна

Концепцію віртуального конкурентного вікна запропоновано фахівцями КПІ ім. Ігоря Сікорського [19].

Концепцію запропоновано для дослідження процесів у безпроводовій мережі стандарту IEEE 802.11 з конкурентним доступом до каналу. Концепція також ґрунтується на припущенні, що в мережі має місце насичене навантаження. Основна ідея концепції полягає в тому, що у насиченому режимі, коли кожна станція весь час намагається отримати доступ до каналу для передавання кадру даних, процес функціонування безпроводового каналу можна розглядати як квазістаціонарний.

Обговорювана методика розрахунку орієнтована на визначення параметрів мережі саме у процесі насиченого навантаження. Насичене навантаження безпроводової мережі може виникнути в разі передавання великих обсягів інформації кожною із активних станцій.

Насичене навантаження виникає в реальних умовах, коли передають, наприклад, аудіовізуальну потокову інформацію або великі файли даних. Кожен кадр несе невеликий блок інформації, але генерація цих блоків відбувається протягом тривалого часу. Кожен кадр буде передано з певною затримкою відносно його розміщення в черзі на передавання. Для приймача ця затримка має нерівномірний характер оскільки кожен вузол отримує доступ до каналу випадковим чином. У разі передавання дуже великої кількості кадрів сам процес можна характеризувати деякими усередненими величинами. Наприклад, усереднене значення затримки і нерівномірність затримки (джитер) буде хорошою характеристикою часових інтервалів.

Оскільки процес передавання кадрів пов'язаний з вибором випадкового числа, що обумовлює початок передавання, із певного діапазону чисел і вибір будь-якого із цих чисел є однаково ймовірним, запропоновано розглядати процес передавання блоків даних (кадрів) як квазістаціонарний випадковий процес.

Визначальним параметром цього процесу є деяке усереднене значення конкурентного вікна, що отримало назву віртуального конкурентного вікна.

Віртуальне конкурентне вікно VCW – це стохастичний параметр безпроводової мережі за стандартом 802.11, який чисельно дорівнює усередненому числу елементарних часових інтервалів (часових слотів), протягом яких лічильник зворотного відліку здійснює відлік інтервалу відстрочки після завершення передавання попереднього кадру до початку передавання наступного кадру даних в мережі з насиченим навантаженням.

Застосування зазначеної концепції для формування математичної моделі безпроводової мережі дало можливість сформулювати функціональні залежності для визначення експлуатаційних характеристик, як для однієї окремої станції, так і для всієї безпроводової мережі в цілому. Сформована модель містить рівняння, що встановлюють однозначний зв'язок між системними параметрами і експлуатаційними характеристиками мережі [19, 25].

Рівняння, що складають математичну модель функціонування безпроводової мережі на підґрунті концепції віртуального конкурентного вікна наведено в табл.2.3.

Таблиця 2.3 – Розрахункові співвідношення для безпроводової мережі IEEE802.11 в режимі конкурентного доступу

	Параметр мережі	Формула	Прим.
1	Ймовірність колізії для окремої станції мережі на початковій стадії	$p_c = 1 - (1 - p_{c1})^{N-1},$ $p_{c1} = 1/CW_{\min}$	
2	Кількість активних станцій з насиченим навантаженням, що конкурують за канал	$N^{(R)} = N^{(R-1)} - 0,5p_c^{(R-1)}N^{(R-1)} + 0,5p_c^{(R-2)}N^{(R-2)}$ $R - \text{кількість повторних спроб}$	
3	Ймовірність колізії для станції мережі в мережі з насиченим навантаженням	$p_c^{(R)} = 1 - (1 - p_{c1})^{N^{(R)}-1}$	
4	Ймовірність успішного передавання кадру даних з урахуванням усіх стадій	$P_s = 1 - [p_c^{(R)}]^R$	
5	Ймовірність виникнення колізії в мережі з N активними станціями, $W = CW_{\min}$	$P_c = \frac{\tilde{A}_W^N - A_W^N}{\tilde{A}_W^N} = 1 - \frac{W!}{(W - N)!W^N}$	
6	Величина віртуального конкурентного вікна (VCW)	$VCW = \frac{CW_1 \cdot (1 - p_c)}{2} \cdot \sum_{i=1}^{R+1} (2p_c)^{i-1}$	
7	Кількість вільних слотів за час реалізації VCW	$n_{idle} = VCW - N - N_c$	
8	Кількість колізій за час реалізації VCW	$N_c = p_c \cdot \frac{N}{2} \cdot \frac{1 - p_c^{R+1}}{1 - p_c}, p_c = p_c^{(R)}$	
9	Середня затримка передавання кадру	$\bar{\tau} = T_{VCW}$	
10	Час реалізації VCW	$T_{VCW} = N \cdot \bar{T}_{PL} + N_c \cdot \bar{T}_c + n_{id} \cdot \sigma$	
11	Нерівномірність середньої затримки (джитер)	$\sigma^{(\tau)} = \tau^{(max)} - \tau^{(min)} = 2\sqrt{D(\tau)},$ $D(\tau) = \frac{1}{N^{(b)}} \sum_{j=1}^{m+1} N_j \cdot (\tau_j^* - \bar{\tau})^2$	
12	Максимальна пропускна здатність безпроводового каналу	$S_{\max} = \frac{E[PL_1]}{E[T_s] + \sigma \cdot CW_{\min} / 2}$	
13	Розрахункова пропускна здатність безпроводового каналу	$S = \frac{N \cdot E[PL_1] \cdot P_s}{T_{VCW}}$	
14	Ймовірність втрати кадру даних	$P^{(rs)} = 1 - P_s$	

Наведена математична модель добре себе зарекомендувала під час теоретичного дослідження характеристик мереж IEEE 802.11a й IEEE 802.11n і подальшого порівняння з результатами натурних випробувань. Відмінність розрахованих значень параметрів (пропускної здатності, часу затримки, джитеру) і результатів натурних випробувань не перевищувала 5% [25].

Для оцінювання ефективності функціонування безпроводової мережі в роботі [25] запропоновано застосовувати коефіцієнта корисного навантаження мережі ($k_{\text{кн}}$).

Ефективність технологічна – властивість певного процесу, яка зумовлена його якістю та кількістю засобів, що беруть участь у процесі, а також конкретною ситуацією. Ефективність уможливорює виконання певного завдання; характеризується певним співвідношенням між отримуваним сумарним ефектом та сумарними витратами на створення і використання засобів, що беруть участь у процесі, його організацію та здійснення.

Коефіцієнт корисного навантаження мережі – це відношення прогнозованої або виміряної швидкості передавання корисної інформації до максимальної швидкості передавання кодованих даних (системна швидкість або інакше пікова швидкість).

Застосування коефіцієнта корисного навантаження надає можливість оцінити ефективність використання технологічних можливостей безпроводової мережі. Зокрема в роботі [25] наведено приклад застосування цього коефіцієнта для оцінювання функціонування мереж IEEE 802.11a й IEEE 802.11n. Зокрема « ... за результатами здійснених досліджень, за сприятливих умов для режиму з шириною частотної смуги безпроводового каналу 40 МГц і системної швидкості 150 Мбіт/с, $k_{\text{кн}}(2; 1500) = 0,366$, $k_{\text{кн}}(2; 64) = 0,0238$, а для режиму з шириною частотної смуги безпроводового каналу 20 МГц, 72 Мбіт/с $k_{\text{кн}}(2; 1500) = 0,308$, $k_{\text{кн}}(2; 1500) = 0,0232$. В дужках наведено кількість станцій (перша цифра) та приблизне значення обсягу корисного навантаження в одному кадрі даних (друга цифра)» [25].

Шляхом застосування цього коефіцієнта можна оцінити реальну

пропускну здатність безпроводового каналу, що має певні налаштування і, в якому передають дані певного типу.

Висновки до розділу

1. Для оцінювання граничних експлуатаційних характеристик безпроводової мережі стандарту IEEE 802.11 в режимі конкурентного доступу розроблено кілька методик, в яких використано різні моделі функціонування такої мережі. Найбільш поширеною методикою є методика, що ґрунтується на концепції насиченого навантаження, запропонована Дж. Б'янкі та її модифікації. Альтернативною методикою є методика, що ґрунтується на концепції віртуального конкурентного вікна.

2. Математична модель, побудована на підґрунті концепції насиченого навантаження та встановлює безпосередньо зв'язків між системними параметрами мережі, що визначають режим функціонування, і експлуатаційними характеристиками безпроводової мережі, що визначають якісні показники. Цю модель можна застосовувати для оцінювання експлуатаційних характеристик лише в певному діапазоні значень системних параметрів.

3. Для оцінювання експлуатаційних характеристик безпроводової мережі і зокрема мереж, що функціонують за специфікаціями IEEE 802.11ac та IEEE 802.11ah доцільно використовувати методику, сформовану на підґрунті концепції віртуального конкурентного вікна. Математична модель, створена на підґрунті концепції віртуального конкурентного вікна, встановлює однозначний зв'язок між системними параметрами мережі і її експлуатаційними характеристиками. Оціночні результати характеристик мережі отримані із застосуванням зазначеної моделі з високою точністю (в межах 5 %) співпадають з результатами практичного вимірювання цих характеристик.

4. Для оцінювання ефективності функціонування мережі доцільно використовувати коефіцієнта корисного навантаження, числове значення якого дорівнює відношенню швидкості передавання інформаційного потоку до пікової швидкості передбаченої в певній специфікації стандарту IEEE 802.11.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК СЕРЕДОВИЩА ПЕРЕДАВАННЯ МЕРЕЖ IEEE 802.11 НА ФІЗИЧНОМУ РІВНІ

3.1 Тестування електромагнітної обстановки в зоні розгортання Wi-Fi мережі

Важливим чинником для дослідження характеристик середовища передавання інформаційних потоків засобами безпроводових мереж є правильний вибір спеціалізованого апаратного та програмного забезпечення. Даний розділ присвячено обґрунтуванню вибору технічних засобів для здійснення досліджень в межах магістерської дисертації.

3.1.1 Програмні засоби для тестування електромагнітної обстановки

3.1.1.1 Сканер безпроводових локальних мереж Acrylic WiFi Home

Сканер безпроводових локальних мереж Acrylic WiFi Home призначений для виявлення мереж WiFi з підтримкою специфікацій 802.11 a/b/g/n/ac/ax, виявлення несанкціонованих точок доступу та відображення приєднаних клієнтів, сканування та аналізу використовуваних безпроводовими мережами каналів WiFi на частотах 2,4 ГГц та 5 ГГц, побудови графіків рівня сигналу та його потужності для точок доступу WiFi.

Користувацький графічний інтерфейс сканера наведено на рис. 3.1.

WiFi-сканер для Windows Acrylic WiFi Home дозволяє в режимі реального часу сканувати і переглядати доступні безпроводові мережі, надає інформацію про виявлені WiFi-мережі (SSID і BSSID), їх тип захисту та про безпроводові пристрої, підключені до мережі в даний момент, а також дозволяє отримати список WiFi паролів (встановлених за замовчуванням виробниками) завдяки вбудованій системі плагінів [30].

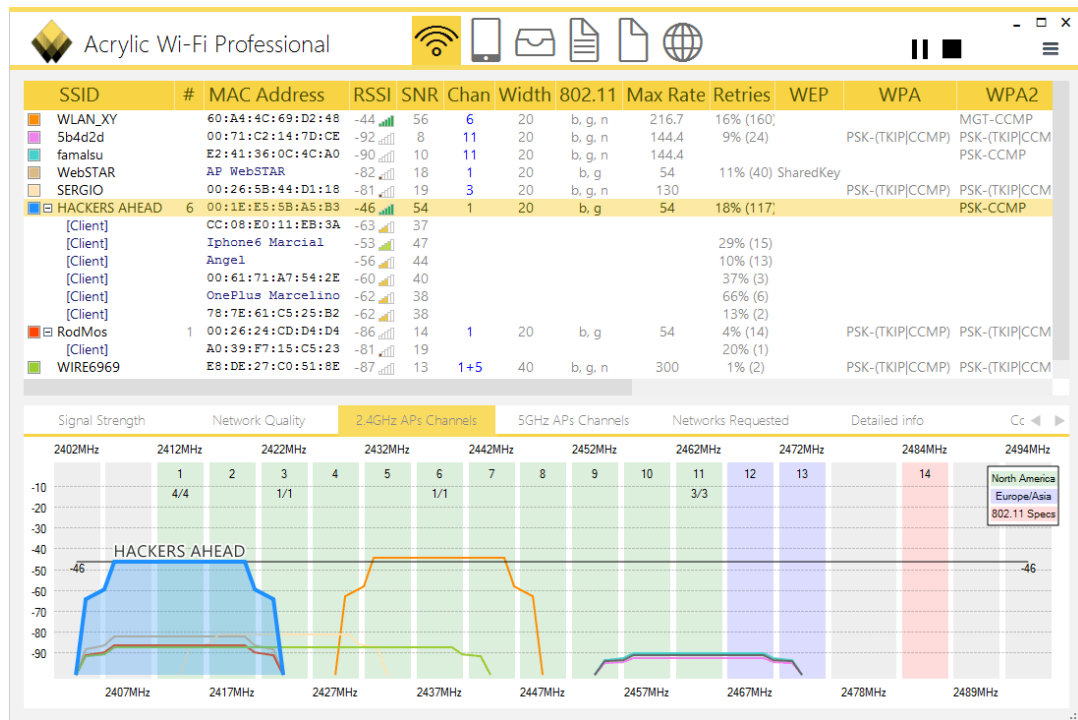


Рисунок 3.1 – Інтерфейс програми Acrylic WiFi Home

Acrylic WiFi Home має простий, але привабливий графічний інтерфейс. Детальний список SSID розташований у верхній частині програми. Тут, зокрема, можна знайти: негативні значення в дБм для показника рівня сигналу (Received Signal Strength Indicator, RSSI), що підтримується точками доступу або WiFi-маршрутизаторами стандарт 802.11 (в тому числі і 802.11ac), ім'я виробника, модель і MAC-адреса мережевих пристроїв. Рішення розпізнає ширину смуги пропускання, що використовується, і відображає всі задіяні для цього канали. Додаток не шукає приховані SSID, але може показати їх, якщо виявить мережеві дані, що говорять про наявність прихованих мереж. Також додаток має функціональність для інвентаризації роботи WiFi-мереж, дозволяючи призначати та зберігати імена виявлених SSID та/або клієнтів [30].

3.1.1.2 Сканер безпроводових локальних мереж AirScout Live (для Android)

AirScout live призначено для оцінювання характеристик виявлених у радіусі дії точок доступу: від рівня сигналу та протоколів безпеки до

можливостей обладнання. Цей сканер дозволяє визначити найменш завантажений канал, виміряти потужність сигналу в кожній точці WiFi-мережі та виявити місця з недостатнім рівнем сигналу. Його можна використати для визначення джерела завад шляхом аналізу параметрів використаних каналів у діапазонах частот 2,4 ГГц та 5 ГГц. Користувачський графічний інтерфейс сканера наведено на рис. 3.2. Використовуючи програму, можна вибрати оптимальне місце для розташування точок доступу, щоб забезпечити якісне покриття приміщень WiFi-мережею та налаштувати її на максимальну продуктивність. Крім того, програма AirScout дозволяє робити знімки мережі WiFi і зберігати локально або завантажувати їх у хмару.

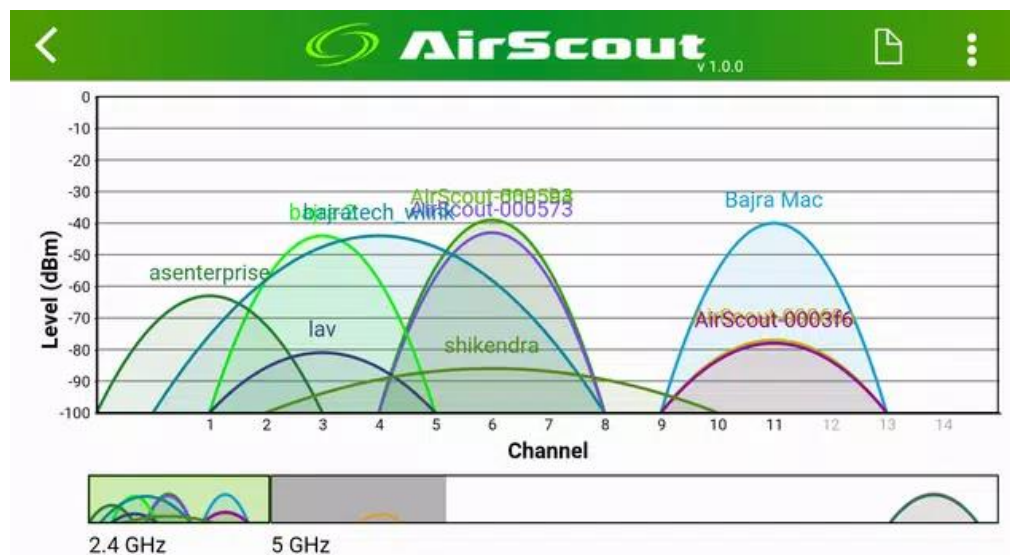


Рисунок 3.2 – Інтерфейс програми AirScout live

AirScout Live – це проста у використанні програма, для користування якою не потрібне додаткове навчання. Інтерфейс користувача виглядає привабливо і інтуїтивно зрозумілий. Перші два пункти меню – "Графік ТД" і "Таблиця ТД" – нададуть наочну та вичерпну інформацію про всі характеристики точок доступу, що знаходяться в зоні видимості. Графіки покриття точок доступу візуально продемонструють залежність рівня сигналу кожної з них та завантаженість каналів у смузі 2,4 ГГц та 5 ГГц.

Розширена інформація в табличному вигляді про кожну точку доступу (SSID, MAC-адреса, постачальник обладнання, використовуваний канал, ширина каналу, рівень сигналу в дБм і налаштування системи безпеки) доступні в другому по порядку пункті меню [31].

Пункт «Графік часу» надає можливість побачити всі точки доступу, які виявив Android-пристрій в місці спостереження і їх графік зміни рівня сигналу в дБм з прив'язкою до часу. Так, наприклад, якщо досліджувати мережу, що складається з декількох точок доступу, дана інформація допоможе зрозуміти, який рівень сигналу кожної з них буде в даному місці, і як клієнтський пристрій перемикатиметься між ними. Крім того, вибір конкретної точки доступу підсвічує рівень сигналу, що допомагає візуальному сприйняттю інформації.

Пункт «Потужність сигналу» дозволить наочно протестувати рівень сигналу кожної точки доступу протягом часу. Можна вибрати конкретний SSID та побачити поточний, а також мінімальний та максимальний рівень сигналу, зафіксований пристроєм для цієї точки доступу. Оригінальна інтерпретація отриманих результатів у вигляді червоно-жовто-зеленого спідометра дозволяє наочно переконатися, чи працюватиме та чи інша функція в даному конкретному місці чи ні. Наприклад, стабільне знаходження рівня сигналу в зеленій зоні скаже, що тут не виникне проблем із такими ресурсоемними технологіями, як передавання голосу через IP або передавання потокового відео у форматі Full HD. Знаходження у жовтій зоні є індикатором доступності лише веб-серфінгу. Червона зона є індикатором великих проблем щодо приймання сигналу від цієї точки доступу в даному місці [31].

3.1.1.3 Програмна утиліта Homedale

Програмна утиліта Homedale – це відносно простий і портативний (не вимагає установки) сканер безпроводових мереж для операційних систем

Windows та macOS з опціональним інтерфейсом командного рядка. Крім відображення базової інформації про безпроводові мережі та сигнали, ця утиліта також підтримує визначення розташування за допомогою GPS та інших технологій позиціонування. Користувацький графічний інтерфейс застосунку наведено на рис. 3.3.

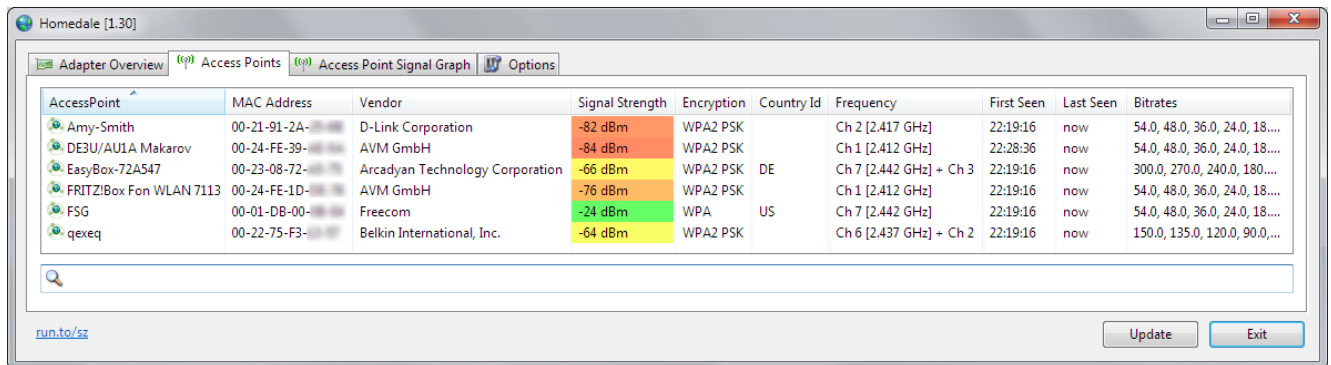


Рисунок 3.3 – Інтерфейс програми Homedale

Ця утиліта має простий графічний інтерфейс, що нагадує більше діалогове вікно з декількома вкладками, ніж повноцінна програма. На першій вкладці «Адаптери» відображається список всіх мережних адаптерів, а також їх IP-шлюзи та MAC-адреси. Вкладка «Точки доступу» містить багато важливих відомостей. У ній немає даних про стандарт 802.11 кожної SSID, але тут є швидкості передавання даних, що підтримуються, а також номери всіх каналів, що використовуються кожною SSID в даний момент часу, в тому числі і з більшою шириною каналу. Тут також немає переліку прихованих мереж, але демонструються інші мережеві дані, які вказують на наявність прихованих SSID. Також дуже корисною функцією є можливість зберігати нотатки для окремих SSID, які можуть бути включені в будь-який експорт даних [32].

У вкладці «Графік сигналу точки доступу» можна знайти зміну негативних значень в дБм для показника рівня сигналу протягом часу для всіх вибраних SSID. Реалізацію доступу до цієї функціональності не можна назвати дуже зручною та інтуїтивно зрозумілою – вибір безпроводових

мереж для спостереження та порівняння здійснюється за допомогою подвійного кліку на потрібній SSID зі списку попередньої вкладки «Точки доступу». Вкладка «Частота використання» ілюструє в реальному часі графічну залежність частот, що використовуються кожною SSID (для зручності розбитих на канали) і значень рівня сигналу. Візуалізація використання каналів відображається для діапазону 2,4 ГГц та кожного підмножини діапазону 5 ГГц.

3.1.1.4 Спеціалізований сканер WiFi Scanner від LizardSystems

Програма має сучасний графічний інтерфейс, інтуїтивно зрозумілий та легкий у використанні, рис. 3.4. На вкладці «Сканер» відображається список виявлених SSID. Крім стандартної детальної інформації, тут є значення рівня сигналу як у негативних значеннях дБм, так і у відсотках.

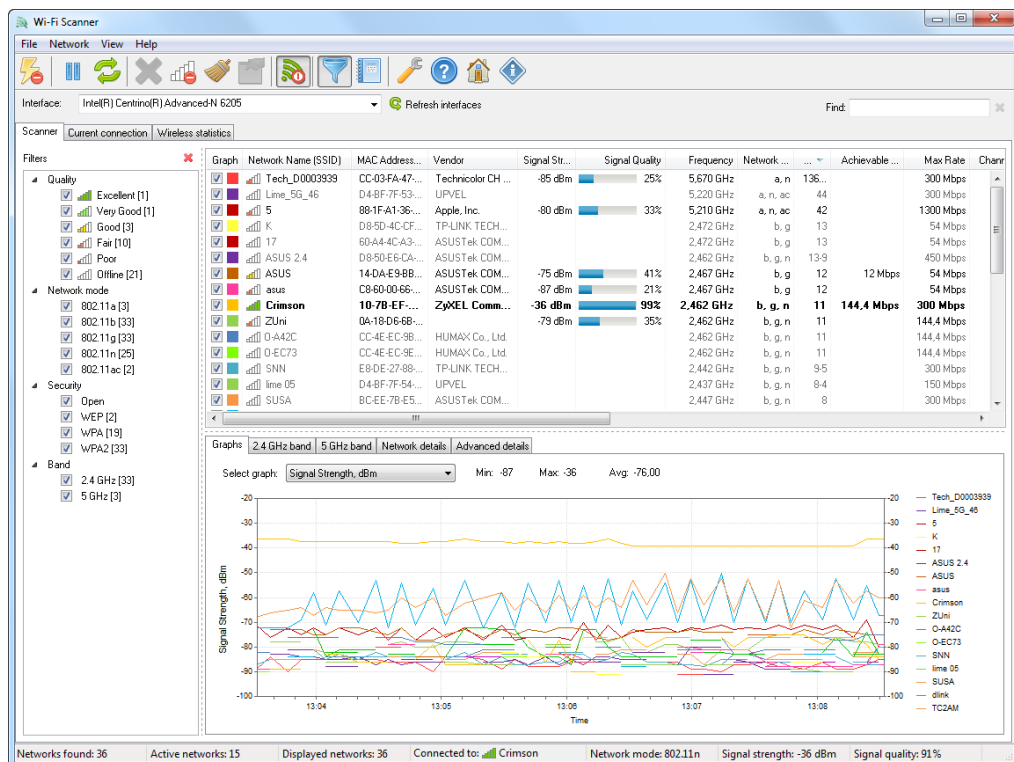


Рисунок 3.4 – Інтерфейс програми WiFi Scanner від LizardSystems

Тут навіть показано кількість клієнтів, підключених до кожного SSID. Також, поряд зі специфікацією стандартів 802.11, програма може визначати та повідомляти про декілька каналів, що використовуються будь-якими SSID з більшою шириною каналу.

Список видимих SSID можна використовувати для фільтрації введення за такими параметрами: рівень сигналу, підтримуваний стандарт 802.11, типи безпеки та використовувані смуги частот. У нижній частині вкладки «Сканер» розташовані графіки, між якими можна перемикатися. На додаток до типових графіків з даними про рівень сигналу та використовуваних каналів, також доступні візуалізовані дані про швидкість передавання даних, завантаженість каналів та кількість клієнтів. У нижній частині екрана відображаються відомості про поточне підключення. У вкладці "Розширені відомості" є різні дані про мережну активність, аж до кількості необроблених пакетів [33].

3.1.1.5 WiFi Explorer Pro 3

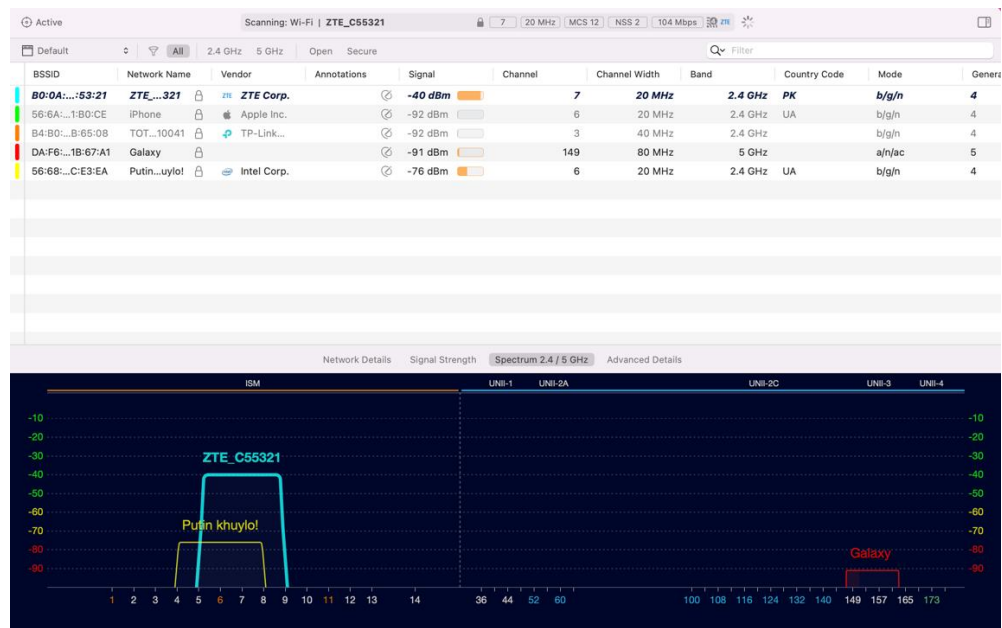


Рисунок 3.5 – Інтерфейс програми WiFi Explorer Pro

WiFi Explorer Pro бере базу коду Wi-Fi Explorer і додає набір функцій, які роблять його відповідним інструментом для WLAN та IT-фахівців. Можна використовувати WiFi Explorer Pro для попереднього оцінювання, щоб допомогти в розробці та перевірці установок безпроводових мереж, а також виявити конфлікти каналів, перекриття, погану якість сигналу та інші проблеми, які можуть вплинути на можливість підключення чи продуктивності безпроводової мережі.

Інтеграція спектрального аналізу WiFi Explorer Pro дозволяє візуалізувати радіочастотну інформацію та зіставляти її з даними Wi-Fi для ідентифікації джерел енергії, відмінних від 802.11, та краще розуміти вплив перешкод та використання каналів у безпроводовій мережі [28].

На нижній частині екрана програми за промовчанням демонструється наочна рейтингова інформація за характеристиками мережі обраної SSID. Також тут розташований графік рівня сигналу та потужності всіх виявлених точок доступу. При переході в розширений режим відображення стану безпроводових мереж з'являються два додаткові графіки - для смуги 2,4 ГГц і 5 ГГц, - де одночасно відображається як інформація про використовувані канали, у тому числі і об'єднані в один «широкий» канал, так і дані про рівень сигналу.

Особливості:

- Пасивні та спрямовані режими сканування
- Інтеграція аналізу спектру
- Користувальницькі фільтри
- Підтримка дистанційних датчиків
- Підтримка мереж із прихованими SSID
- Додаткові стовпці з розширеною інформацією
- Додаткові варіанти організації для результатів сканування
- Темні та світлі теми

З рис. 3.6 електромагнітної обстановки випливає, що сигнал коливається від 20 до 30 дБм, що є задовільним результатом для такої відстані. Також з рисунку видно велику кількість сусідніх точок доступу з різною кількістю каналів, що перекривають одна одну.

Кількість точок доступу: 60

2) Дослідження №2 о 12 годині дня на відстані 5 метрів та 3 бетонними стінами від точки доступу наведено на рис. 3.7.



Рисунок 3.7 – дослідження електромагнітної обстановки біля точки доступу

З рис. 3.7 електромагнітної обстановки видно що сигнал коливається від 60 до 70 дБм, що є задовільним результатом для такої відстані та

кількості перешкод. Також з рисунку видно велику кількість сусідніх точок доступу з різною кількістю каналів, що перекривають одна одну.

Кількість точок доступу: 62

3) Дослідження №3 о 17 годині дня безпосередньо біля точки доступу наведено на рисунку 3.8.



Рисунок 3.8 – дослідження електромагнітної обстановки біля точки доступу

З рисунку електромагнітної обстановки видно що сигнал коливається в межах від 20 до 30 дБм, що є задовільним результатом для такої відстані. Також з рисунку видно велику кількість сусідніх точок доступу з різною кількістю каналів, що перекривають одна одну.

Кількість точок доступу: 41

4) Дослідження №4 о 17 годині дня на відстані 5 метрів та 3 бетонними стінами від точки доступу наведено на рисунку 3.9.

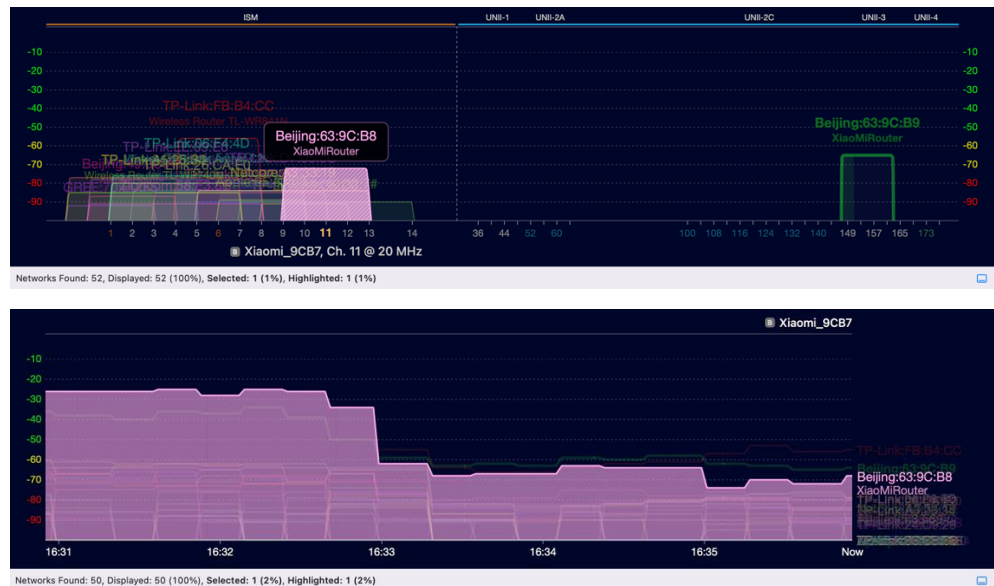


Рисунок 3.9 – дослідження електромагнітної обстановки біля точки доступу

З рисунку електромагнітної обстановки видно що сигнал коливається від 55 до 65 дБм, що є задовільним результатом для такої відстані. Також з рисунку видно велику кількість сусідніх точок доступу з різною кількістю каналів, що перекривають одна одну.

Кількість точок доступу: 50

Також з даних досліджень впливає те, що діапазон 2.4 ГГц перезавантажений, натомість коли в діапазоні 5 ГГц знаходяться до 4 точок доступу.

3.2 Програмні засоби для моделювання зони покриття точки доступу Wi-Fi

3.2.1 Картографічний програмний модуль Ekahau HeatMapper

Ekahau HeatMapper – це картографічний програмний інструмент для розгортання невеликих безпроводових мереж будинку та визначення оптимального розташування установки точки доступу. Цей програмний

продукт надає таку ж мережну інформацію, як і WiFi-сканер безпроводових мереж, але при цьому ще й генерує теплову WiFi-карту.

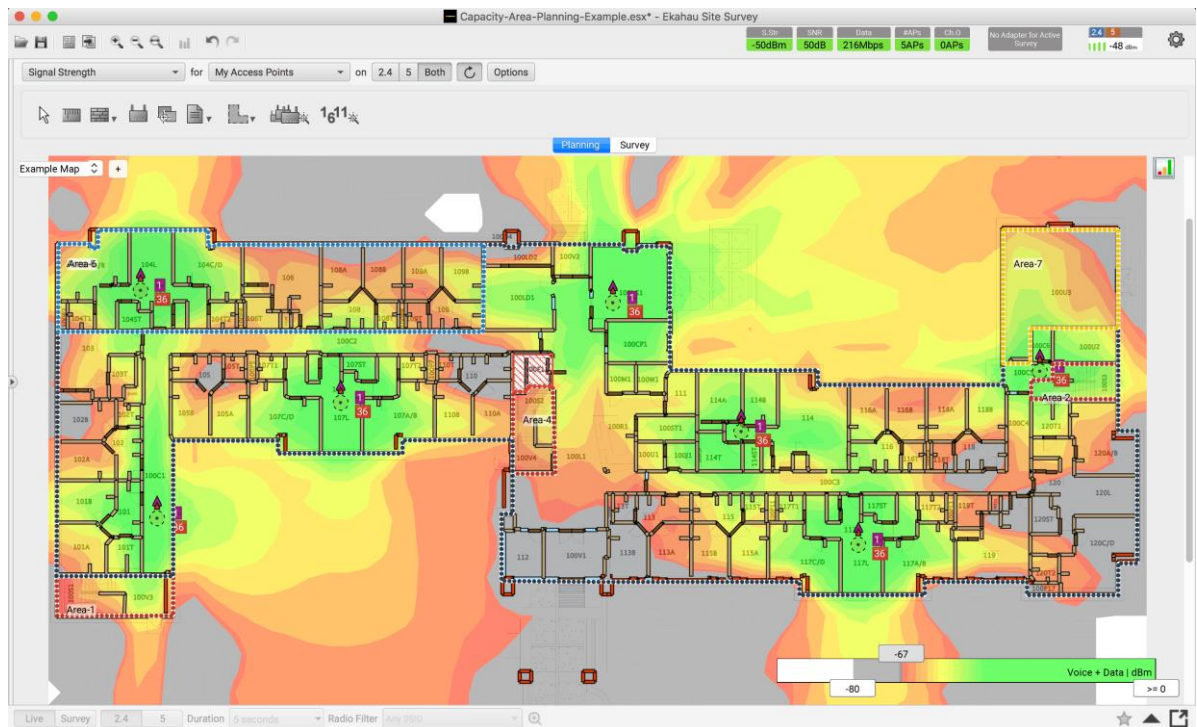


Рисунок 3.10 – Інтерфейс програми

Програмне забезпечення пропонує можливість створення плану або макету об'єкта, що досліджується, а також проектування топології безпроводової мережі координатною сіткою для приблизного орієнтування. На лівій стороні основного екрана інтерфейсу користувача відображається список безпроводових мереж та їх дані, які сортуються за сигналом, каналом, SSID, MAC-адресою та типом захисту. Цей список включає основну інформацію, але не містить значень рівня сигналу в дБм і відсотковому співвідношенні. Крім того, програма не розпізнає мережі з підтримкою стандарту 802.11ac, визначаючи їх як 802.11n [33].

Використовуючи Ekahau HeatMapper, як і при роботі з іншими картографічними інструментами, користувач позначає своє поточне місцезнаходження на карті та обходить будівлю, щоб згенерувати теплову картку покриття WiFi. Ekahau HeatMapper автоматично обчислить розташування точок доступу та розмістить їх на карті. Після того як всі дані

будуть зібрані, сформується інтерактивна теплова карта покриття WiFi. Так, наприклад, при наведенні курсору на іконку точки доступу окремо підсвічуватиметься її покриття; а при наведенні курсору на область теплової карти з'явиться спливаюче вікно підказки для показника рівня сигналу з негативним значенням дБм для цієї точки.

3.2.2 Планувальник безпроводової мережі Dlink Planner PRO

Моделювання зони покриття точки доступу Wi-Fi в цій роботі зроблено програмою Dlink Planner PRO. Планувальник безпроводової мережі Wi-Fi Planner PRO забезпечує комплексну візуалізацію покриття безпроводової мережі перед її фактичним розгортанням. Використання Wi-Fi Planner PRO значно спрощує процес проектування і побудови мережі WLAN. Основні етапи роботи з Wi-Fi Planner PRO [29]:

- Створення проекту
- Вказівка зон, перешкод і областей
- Розміщення точок доступу Майстром
- Розміщення точок доступу і двомірна колірنا карта
- Внесення коригувань (якщо потрібно)
- Результати

Планувальник безпроводових мереж WFP надає результати у вигляді файлу в двох форматах: PDF і Word. Інтерфейс симулятора Wi-Fi Planner PRO наведено на рис. 5.

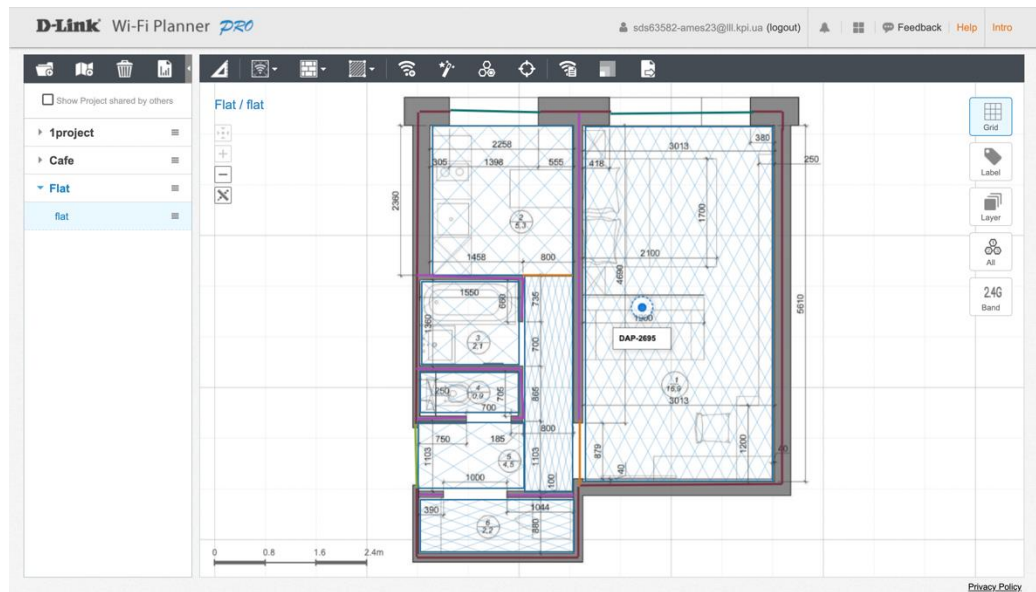


Рисунок 3.11 – Інтерфейс симулятора Dlink Wi-Fi Planner PRO

Висновки до розділу

Для роботи з безпроводовими мережами на ринку є доступними для застосування достатньо хороших багатофункціональних програмних рішень, що дозволяють здійснювати всебічне тестування WiFi-мереж. Більшість з них працюють на базі операційних систем Windows, інші – під macOS або Android, - які надають базову інформацію про існуючі WiFi-сигнали в зоні дії: ідентифікатори SSID, рівень сигналів, використовуваних каналах, MAC-адреси та типи захисту тієї чи іншої мережі. В даному розділі було оглянуто програмні забезпечення для тестування електромагнітної обстановки в зоні розгортання Wi-Fi мережі. Проаналізовано функції, особливості та переваги для кожної програми. Для даної роботи обрано програмне забезпечення WiFi Explorer Pro, яке працює на операційній системі MacOS та має потужні та функціональні рішення для тестування електромагнітної обстановки.

Наявні програмні засоби для моделювання зони покриття точки доступу Wi-Fi дозволяють змодельовати середовище розповсюдження сигналів з урахуванням геометрії приміщень і фізичних характеристик перешкод, що присутні в зоні обслуговування.

4 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ МЕРЕЖІ 802.11ac ЗА УМОВИ ПОТОКОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Метою дослідження є оцінити кількісно ефективність функціонування безпроводової мережі за умови перекриття кількох зон обслуговування точок доступу різних мереж.

Програма досліджень. Оцінювання ефективності функціонування безпроводової мережі здійснено для кількох приміщення кафедри АМЕС факультету електроніки КПІ ім. Ігоря Сікорського, а саме для аудиторій 223-12, 225-12, 227-12.

На першому етапі зроблено моделювання зон покриття трьох точок доступу. Точку доступу ТД1, розташовану в приміщенні 225-12 вважаємо основною. Ще одна точка ТД2 знаходяться на другому поверсі корпусу №12 також на території кафедри АМЕС. Точка доступу ТД3 знаходиться на території кафедри КЕОА і розташована на третьому поверсі..

На другому етапі визначено рівень сигналу і рівень відношення сигнал-шум в різних точках досліджуваного приміщення.

На третьому етапі зроблено розрахунок експлуатаційних характеристик безпроводової мережі і отримано оцінки ефективності її функціонування.

4.1 Оцінювання максимальної пропускної здатності безпроводового каналу IEEE 802.11

Визначимо максимально можливу пропускну здатність безпроводового каналу для основного багатокористувацького режиму (MU-Basic).

Діаграму розподілу часу для зазначеного режиму наведено на рис. 4.1.

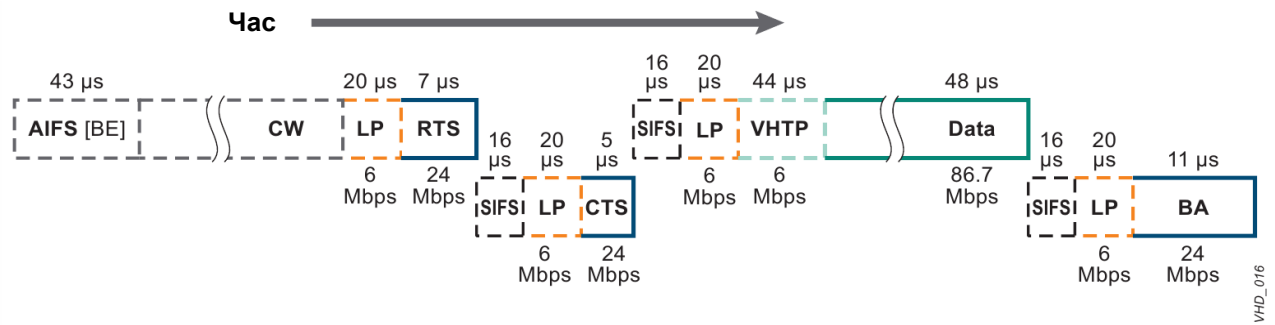


Рисунок 4.1 – Часова діаграма системного інтервалу передавання кадрів даних [26]

На діаграмі наведено такі позначення:

AIFS – арбітражний міжкадровий інтервал;

CW – конкурентне вікно;

LP – довга преамбула;

RTS – кадр «запит на передавання»;

SIFS – короткий міжкадровий інтервал;

CTS – кадр «готовий до передавання»;

VHTP – преамбула режиму дуже великої пропускної здатності;

Data – інформаційний блок корисних даних, що міститься в кадрі (тривалість цього блоку може бути різною, на даній діаграмі значення 48 мкс наведено для прикладу);

BA – повідомлення про завершення приймання.

На рис.4.1 над структурними елементами діаграми наведено тривалість відповідних інтервалів в мікросекундах, під структурними елементами наведено швидкість, з якою передають зміст відповідного структурного елемента.

Для початкового розрахунку тривалість інтервалу CW призначимо, як усереднену величину. За умови функціонування однієї станції в мережі числове значення CW може бути в межах 0 до 15. Це значення завантажують в лічильник зворотного відліку і потім відбувається його декремент через інтервали часового слоту $\sigma = 9$ мкс. Таким чином тривалість конкурентного вікна знаходиться і інтервалі від 0 до 135 мкс. За умови

передавання великої кількості кадрів усереднене значення цього інтервалу становитиме 67,5 мкс.

Визначимо пропускну здатність мережі, коли протягом тривалого часу в мережі безперервно передає одна станція блоками інформації $PL_1 = 1500$ байтів (максимальне навантаження кадрів Ethernet). Також оцінимо пропускну здатність для блоків корисної інформації 64 та 512 байтів.

Розрахунок робимо для таких налаштувань мережі:

- кількість просторових потоків – 1;
- кількість променів – 1;
- система модуляції та кодування – MCS9 (КАМ-256, $S_c=5/6$);
- ширина частотної смуги 20 МГц.

Вважаємо, що інформаційний потік передають за правилами протоколу UDP, що обумовлює застосування додаткових 20 байтів заголовку UDP для кожного інформаційного блоку.

Таким чином виражене в бітах навантаження одного кадру мережі 802.11ac для передавання 1500 байтів корисної інформації складе

$$PL_{1500} = (PL_1 + 20) * 8 * 6/5 = 14592 \text{ (бітів)}.$$

Для визначення тривалості системного інтервалу треба визначити кількість символів OFDM, які необхідно використати для передавання навантаження PL_{1500} .

В частотній смузі 20 МГц для передавання корисної інформації передбачено використовувати 52 носійні частоти (усього 56). У разі використання модуляції КАМ-256 (вісім бітів на носійну) кількість символів OFDM становитиме

$$N_{\text{OFDM}} = PL_{1500} : 8 : 52 = 14592 : 8 : 52 = 36.$$

Таким чином, час передавання блоку Data (рис. 4.1) становитиме

$$4 \text{ мкс} * N_{\text{OFDM}} = 144 \text{ мкс}.$$

З урахуванням вищенаведеного визначаємо, що тривалість системного інтервалу (сума всіх інтервалів, наведених на рис.4.1) становить $T_{\text{TXOP}} = 445,5$ мкс.

Пропускна здатність каналу становить

$$S_{1500} = PL : T_{\text{TXOP}} = 15000 \cdot 8 : 445,5 = 26,936 \text{ (Мбіт)}.$$

Аналогічним чином визначимо пропускну здатність каналу в разі передавання пакетів по 64 та 512 бітів.

У разі передавання інформаційних блоків по 64 байти розрахункові параметри мають такі значення: $PL_{64} = 807$ бітів; $N_{\text{OFDM}} = 2$; $T_{\text{TXOP}} = 309,5$ мкс і пропускна здатність каналу становить

$$S_{64} = PL : T_{\text{TXOP}} = 64 \cdot 8 : 309,5 = 1,448 \text{ (Мбіт/с)}.$$

У разі передавання інформаційних блоків по 512 байти розрахункові параметри мають такі значення: $PL_{512} = 5108$ бітів; $N_{\text{OFDM}} = 13$; $T_{\text{TXOP}} = 353,5$ і пропускна здатність каналу становить

$$S_{512} = PL : T_{\text{TXOP}} = 512 \cdot 8 : 353,5 = 11,587 \text{ (Мбіт)}.$$

Визначимо тепер коефіцієнт корисного навантаження для розглянутих вище режимів передавання. В разі застосування індексу модуляції MCS9 пікова швидкість в каналі з шириною частотної смуги 20 МГц становить 86,7 Мбіт/с. Тоді коефіцієнт корисного навантаження становитиме:

$$k_{\text{кн}1500} = S_{1500} : S_{\text{max}} = 26,936 : 86,7 = 0,3107$$

$$k_{\text{кн}512} = 0,1336$$

$$k_{\text{кн}64} = 0,0167.$$

Отримані значення коефіцієнта корисного навантаження характеризують ефективність використання безпроводового каналу за ідеальних умов функціонування мережі.

4.2 Дослідження впливу суміжних мереж на пропускну здатність безпроводового каналу

Визначимо тепер максимально можливу пропускну здатність мережі для абонентів, що знаходяться на різній відстані від точки доступу ТД1 за відсутності завад від інших мереж. Для цього скористаємось результатами

моделювання зони обслуговування точки доступу ТД1 в частотному діапазоні 2,4 МГц, рис.4.2.

Розподіл потужності сигналу, який сприймає еталонний приймач в зоні покриття ТД1 відповідає шкалі, наведеній на рис.4.2.

Для визначення максимально можливої пропускної здатності на різних відстанях від точки доступу скористаємось графіком максимальної чутливості приймача мережних сигналів, рис.4.3.

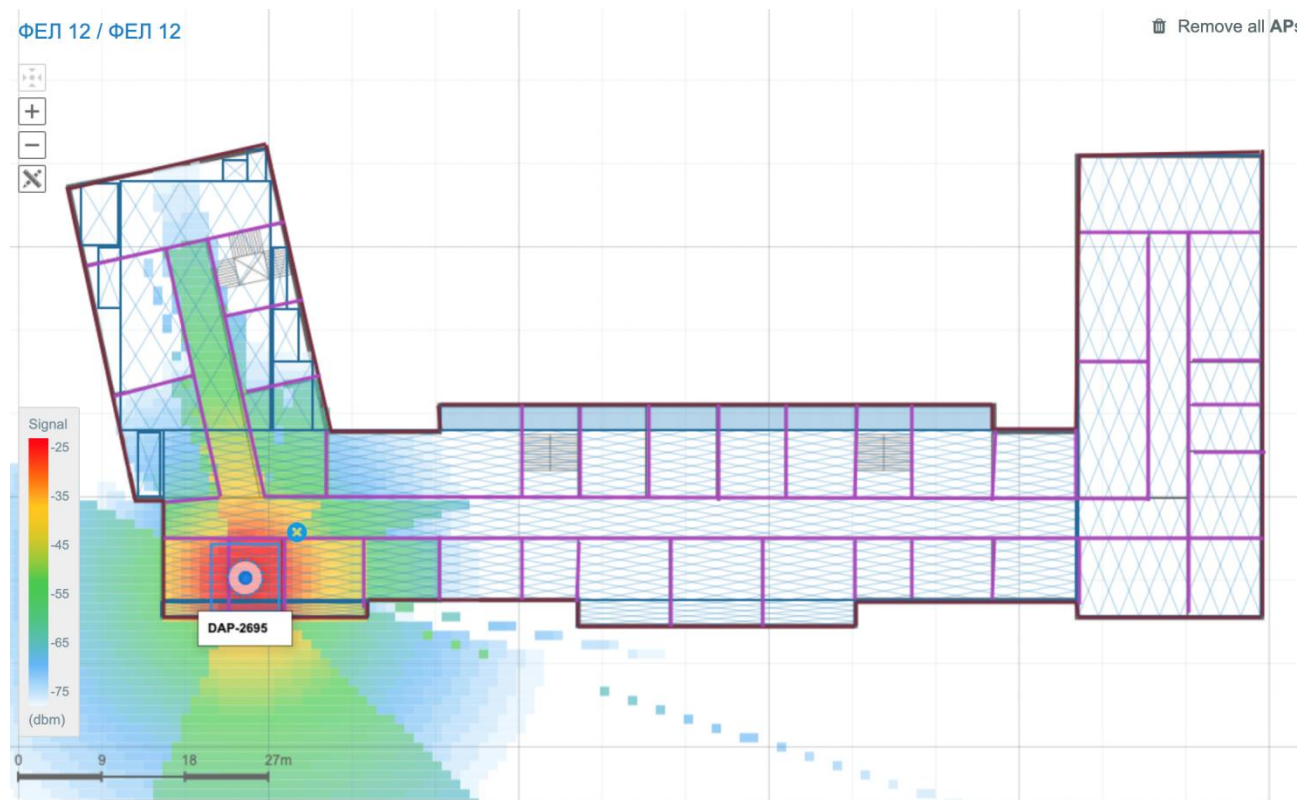


Рисунок 4.2 – Зона обслуговування точки доступу ТД1

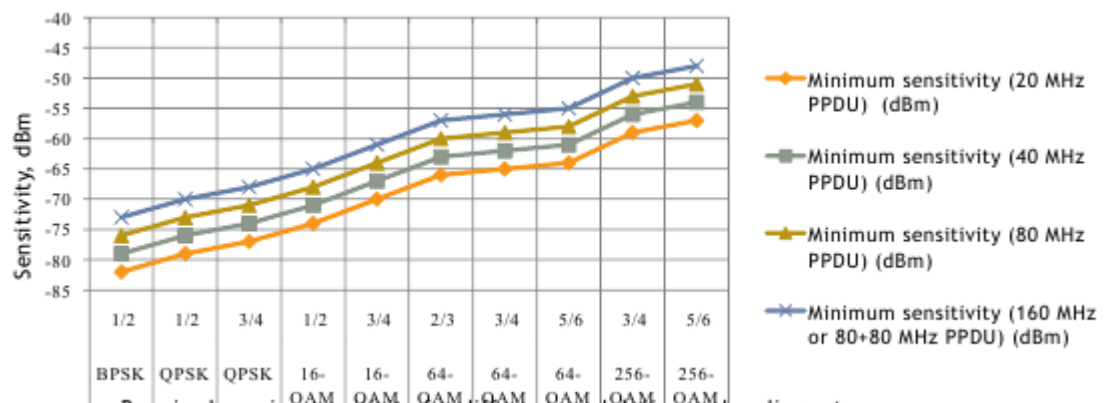


Рисунок 4.3 – Графік чутливості приймача сигналів мережі IEEE 802.11ac [27]

На графіку рис.4.3 наведено мінімальні значення потужності прийнятого сигналу, що забезпечує приймання сигналу OFDM сформованого за певною схемою MCS. Відповідність індексів MCS і параметрів модуляції й кодування наведено в табл.4.4.

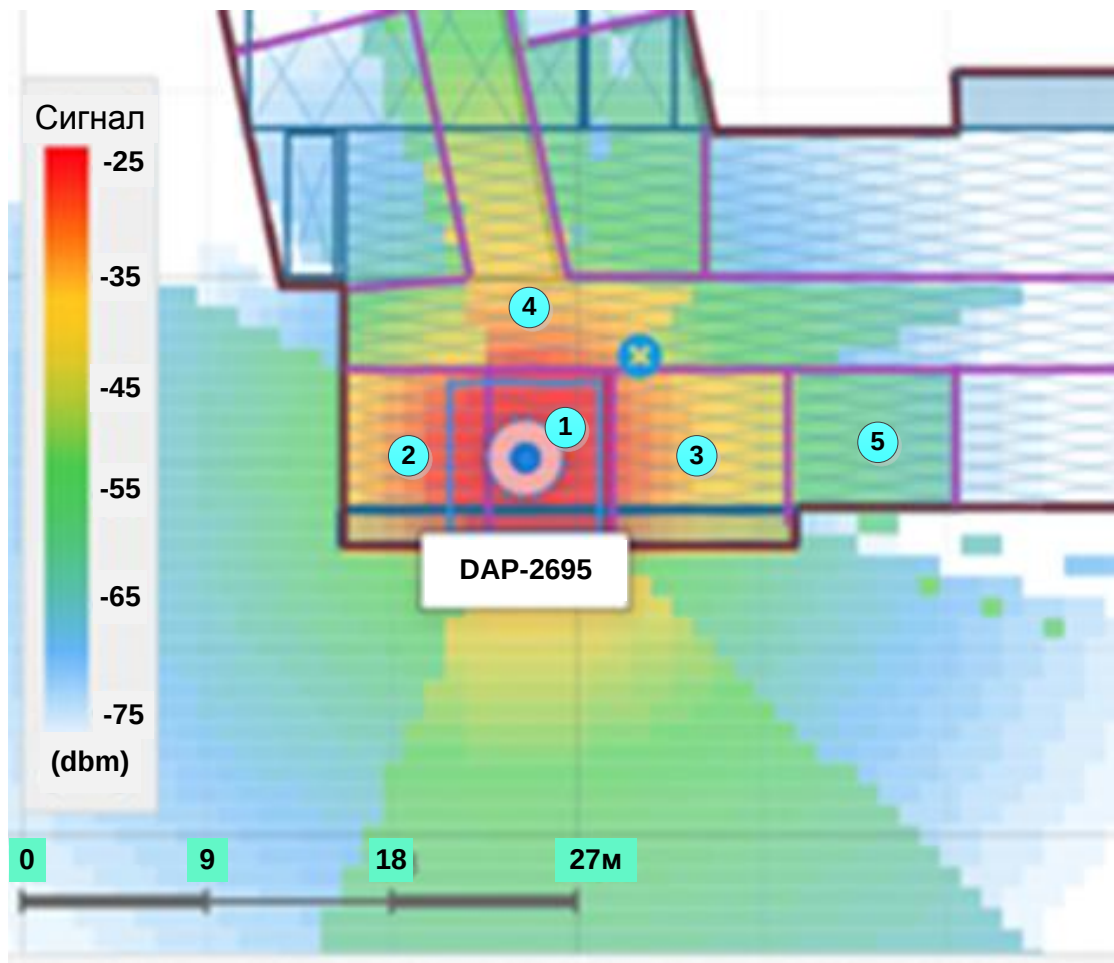


Рисунок 4.4 – Зона покриття точки доступу ДТ1

На рис.4.4 позначено приміщення, вибрані для оцінювання ефективності використання безпроводової мережі IEEE802.11ac: 1 – ауд.225-12; 2 – 227-12;

3 – 223-12; 4 – коридор поблизу ауд. 225-12; 5 – ауд. 221-12.

В усіх зазначених приміщеннях рівень сигналу від точки доступу ТД1 перевищує -48 дБм, а це, згідно з діаграмами, наведеними на рис. 4.3, означає, що для цих приміщень за відсутності завад буде забезпечено

максимально можливу пропускну здатність мережі для режимів з шириною каналу 20, 40, 80 та 160 МГц.

Тепер розглянемо вплив інших точок доступу, зони покриття яких перекриваються з зоною покриття ТД1.

На рис.4.5 наведено зону покриття точки доступу ТД2, а на рис. 4.6 – точки доступу ТД3.

Рівень сигналів, від різних точок доступу в локаціях позначених на рис.4.4 наведено в табл.4.1.

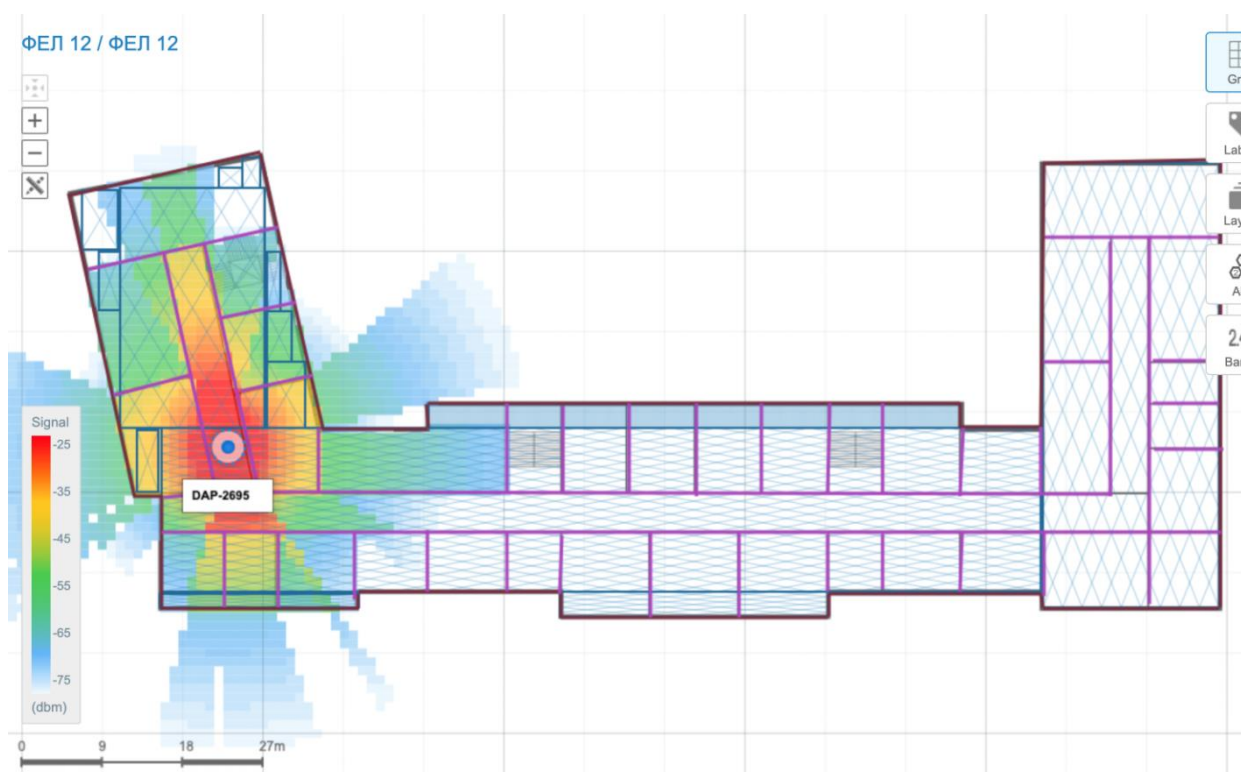


Рисунок 4.5 – Зона покриття точки доступу ТД2

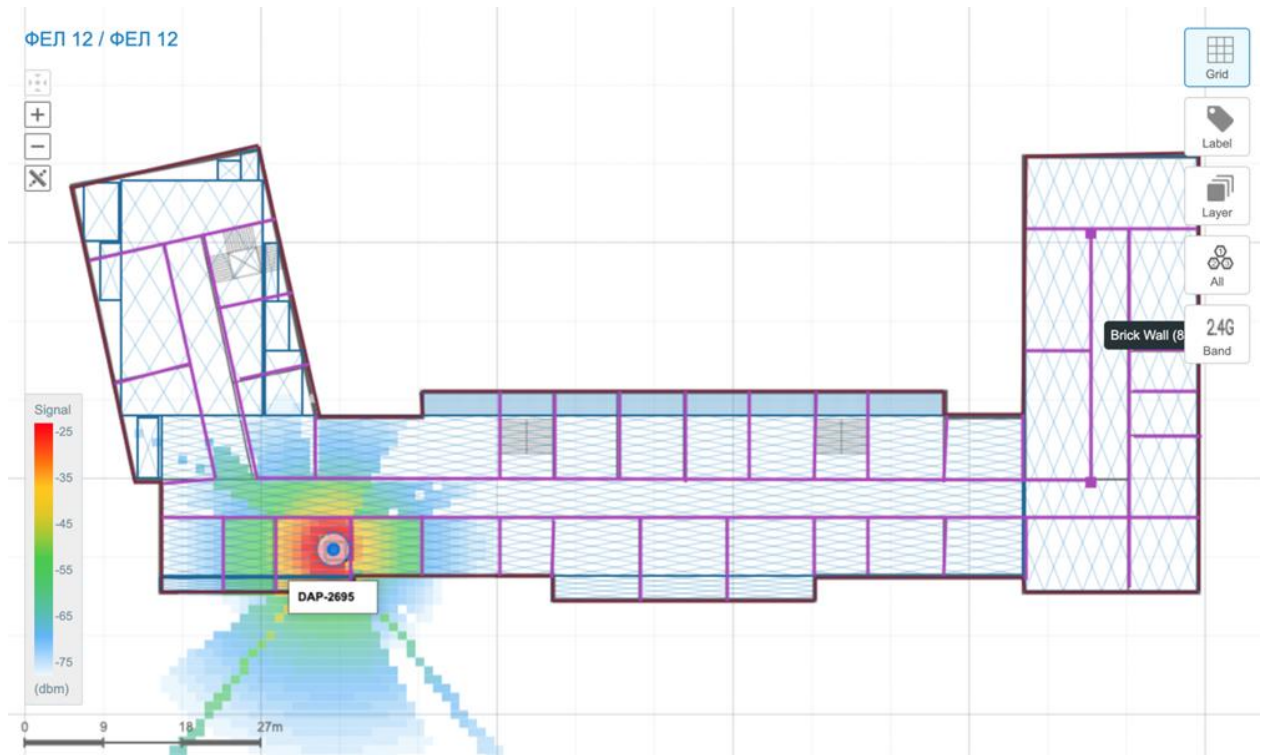


Рисунок 4.6 – Зона покриття точки доступу ТДЗ

Таблиця 4.1 – Рівень сигналів і завад в навчальних приміщеннях

	Рівень сигналу, дБм							
	Ауд.227-12		Ауд.225-12		Ауд.223-12		Ауд.221-12	
	Ліва частина	Права частина			Ліва частина	Права частина	Ліва частина	Права частина
ТД1	-40	-35	-25		-35	-40	-60	-65
ТД2	-70	-45	-40		-55	-70	-75	-75
ТД3	-75	-70	-55		-40	-30	-35	-60

За отриманими рівнями сигналів основної точки доступу ТД1 і точок доступу суміжних мереж можна визначити значення відношення сигнал-завада в досліджуваних приміщеннях і зробити оцінювання можливої максимальної пропускної здатності безпроводового каналу.

Зауважимо, що для функціонування мереж IEEE802.11 в діапазоні 2,4 ГГц (загальна ширина частотної смуги 100МГц) виділено частотну смугу 75 МГц. Таким чином в місцях функціонування кількох мереж IEEE802.11 з зонами обслуговування, що просторово перекриваються не доцільно й часто не можливо використовувати безпроводові канали більше 20 МГц оскільки вони будуть створювати значні взаємні завади.

Розглянемо вплив таких завад на функціонування мереж безпроводовим каналом 20 МГц.

Оскільки частотний спектр OFDM сигналу має шумоподібний характер з квазірівномірним спектром, можна розглядати таку заваду як рівно енергетичний шум. Розглянемо два сценарії перекриття частотних каналів. Перший сценарій, коли частотний канал завади перекривається з робочим каналом на 50% і другий, коли частотний канал завади перекривається з робочим каналом на 25%.

В разі перекриття частотних каналів на 50% рівень сигналу завади буде проявлятися на 3 дБ менше його абсолютного значення, а в разі перекриття на 25% – на 3 дБ менше його абсолютного значення.

Результати розрахунків відношення сигнал-завада для досліджуваних приміщень на підґрунті зроблених вище зауважень і результатів моделювання наведено в табл.4.2 й табл.4.3. Основним сигналом є сигнал ТД1. В табл.4.2 наведено розрахунок, коли сигнал завади створює ТД2. В табл.4.3 наведено розрахунок, коли сигнал завади створює ТД3.

Таблиця 4.2 – Відношення сигнал-завада в зоні обслуговування ТД1, сигнал завади ТД2

	Відношення сигнал-завада, дБм							
	Ауд.227-12		Ауд.225-12		Ауд.223-12		Ауд.221-12	
Перекриття	Ліва частина	Права частина			Ліва частина	Права частина	Ліва частина	Права частина
50%	33	13	18		23	33	18	13
25%	36	16	21		26	36	21	16

Таблиця 4.3 – Відношення сигнал-завада в зоні обслуговування ТД1, сигнал завади ТД3

	Відношення сигнал-завада, дБм							
	Ауд.227-12		Ауд.225-12		Ауд.223-12		Ауд.221-12	
Перекриття	Ліва частина	Права частина			Ліва частина	Права частина	Ліва частина	Права частина
50%	38	38	33		8	-7	-22	-2
25%	41	41	36		11	-4	-19	1

Із табл.4.4 випливає, що для відношення сигнал-завада більше 30 дБ в мережі, що функціонує з використанням частотної смуги 20 МГц буде використано найбільш ефективний спосіб модуляції MCS9 (КАМ-256, 5/6).

Зробимо розрахунок, як зміниться пропускна здатність безпроводового каналу ТД1 в ауд.225-12 під впливом сигналу ТД2. В разі половинного перекриття частотних каналів с/ш = 18 дБ, що обумовлює можливість застосувати MCS5 (КАМ-64, 2/3). В разі половинного перекриття частотних каналів с/ш = 18 дБ, що обумовлює можливість застосувати MCS6 (КАМ-64, 3/4).

За методикою наведеною вище визначаємо пропускну здатність каналу для MCS5:

$$PL_{1500} = (PL_1 + 20) * 8 * 3/2 = 18240 \text{ (бітів)};$$

$$N_{\text{OFDM}} = PL_{1500} : 6 : 52 = 18240 : 6 : 52 = 59;$$

$$T_{\text{Data}} = 4 \text{ мкс} * 59 = 236 \text{ мкс};$$

$$T_{\text{TXOP}} = 525,5 \text{ мкс};$$

$$S_{1500} = PL_{1500} : T_{\text{TXOP}} = 1500 * 8 : 535,5 = 22,409 \text{ (Мбіт/с)}.$$

Визначаємо пропускну здатність каналу для MCS6:

$$PL_{1500} = (PL_1 + 20) * 8 * 4/3 = 16000 \text{ (бітів)};$$

$$N_{\text{OFDM}} = PL_{1500} : 6 : 52 = 16000 : 6 : 52 = 52;$$

$$T_{\text{Data}} = 4 \text{ мкс} * 52 = 208 \text{ мкс};$$

$$T_{\text{TXOP}} = 501,5 \text{ мкс};$$

$$S_{1500} = PL_{1500} : T_{\text{TXOP}} = 1500 * 8 : 501,5 = 23,928 \text{ (Мбіт/с)}.$$

Визначимо, як змінились умови передавання інформаційних потоків в ауд. 227-12. В лівій частині аудиторії відношення сигнал-завада становить 33дБ й 36 дБ для 50% перекриття частотних смуг і 25% перекриття частотних смуг безпроводових каналів відповідно. В лівій частині аудиторії відношення сигнал-шум достатньо велике, щоб забезпечити максимально можливу швидкість передавання інформаційних потоків. В правій частині кімнати

відношення сигнал-завада значно менше і становить 13 дБ(50%) й 16 дБ (25%). Зробимо розрахунок можливої швидкості передавання даних для цієї частини аудиторії. Згідно з табл.4.4 в разі відношення сигнал-завада 13 дБ може бути використаний індекс модуляції MCS3 (КАМ-16, 1/2), а в разі відношення 13 дБ – MCS4 (КАМ-16, 3/4).

Визначаємо пропускну здатність каналу для MCS3:

$$PL_{1500} = (PL_1 + 20) * 8 * 2 = 24000 \text{ (бітів)};$$

$$N_{\text{OFDM}} = PL_{1500} : 4 : 52 = 24000 : 4 : 52 = 116;$$

$$T_{\text{Data}} = 4 \text{ мкс} * 116 = 464 \text{ мкс};$$

$$T_{\text{TXOP}} = 813,5 \text{ мкс};$$

$$S_{1500} = PL_{1500} : T_{\text{TXOP}} = 1500 * 8 : 813,5 = 14,751 \text{ (Мбіт/с)}.$$

Визначаємо пропускну здатність каналу для MCS4:

$$PL_{1500} = (PL_1 + 20) * 8 * 4/3 = 1600 \text{ (бітів)};$$

$$N_{\text{OFDM}} = PL_{1500} : 4 : 52 = 1600 : 4 : 52 = 77;$$

$$T_{\text{Data}} = 4 \text{ мкс} * 77 = 308 \text{ мкс};$$

$$T_{\text{TXOP}} = 657,5 \text{ мкс};$$

$$S_{1500} = PL_{1500} : T_{\text{TXOP}} = 1500 * 8 : 657,5 = 18,251 \text{ (Мбіт/с)}.$$

Згідно з даними наведеними в табл.4.3 точка доступу ТД3, що знаходиться на третьому поверсі і, частотна смуга якої частково перекривається з частотною смугою точки доступу ТД1, створює завади, рівень яких значно зменшує швидкість передавання даних для користувачів мережі ТД1 в ауд. 223-12, і повністю унеможлиблює користування мережею в ауд.221-12. В ауд. 223-12 рівень сигнал-завада становить 8 дБ(50%) й 11 дБ (25%), а в ауд.221-12 рівень завад в робочій частотній смузі перевищує рівень корисного сигналу.

Оцінимо тепер ефективність функціонування безпроводової мережі в разі виникнення завад за розглянутим вище сценарієм.

В разі повного перекриття частотних каналів мереж ТД1 і ТД2 пропускна здатність мережі в ауд. 225-12 становитиме 22,409 Мбіт/с, а в разі половинного перекриття робочих частотних смуг – 23,928 Мбіт/с, що становить відповідно 83,2% і 88,8% від максимально можливого значення. Тобто ефективність функціонування безпроводової мережі в безпосередній близькості від точки доступу ТД1 зменшується на в даному разі на 11-17%, що може бути критичним лише в разі насиченого навантаження.

Пропускна здатність мережі ТД1 за наявності завад від ТД2 становить 14,751 Мбіт/с в правій частині аудиторії і 18, 251 Мбіт/с в лівій частині аудиторії, що становить 54,76% і 67,76% від максимально можливої пропускної здатності відповідно. Таке зменшення пропускної здатності на 30-45% може призвести до порушення функціонування мережі в разі наявності в аудиторії великої кількості активних користувачів, наприклад, навчальної групи 20-25 осіб.

4.3 Моделювання зон обслуговування в діапазоні 5 ГГц

Результати моделювання зон обслуговування точок доступу ТД1, ТД2, ТД3 в діапазоні частот 5 ГГц, а також додаткової точки доступу, що знаходиться в ауд.213-12 наведено на рис.4.7.

Як впливає із наведеного на рис. 4.7. розподілу енергії електромагнітного випромінювання в зоні обслуговування цей розподіл характеризується більшою нерівномірністю порівняно з розподілом в зонах обслуговування мереж, що функціонують в діапазоні частот 2,4 МГц. Оскільки в діапазоні 5 ГГц частотні смуги робочих каналів не перекриваються їх одночасне функціонування в обмеженому просторі не призводить до виникнення перехресних завад. Проте, для забезпечення можливості користування безпроводовою мережею в усіх навчальних аудиторіях треба застосовувати більшу кількість точок доступу. Також треба взяти до уваги, що з переходом до діапазону 5 ГГц сумарну потужність

випромінюваної енергії зменшують до 65-70 мВт порівняно з максимально допустимою енергією для діапазону 2,4 ГГц (100 мВт), що призводить до додаткового обмеження зони обслуговування відповідної точки доступу.

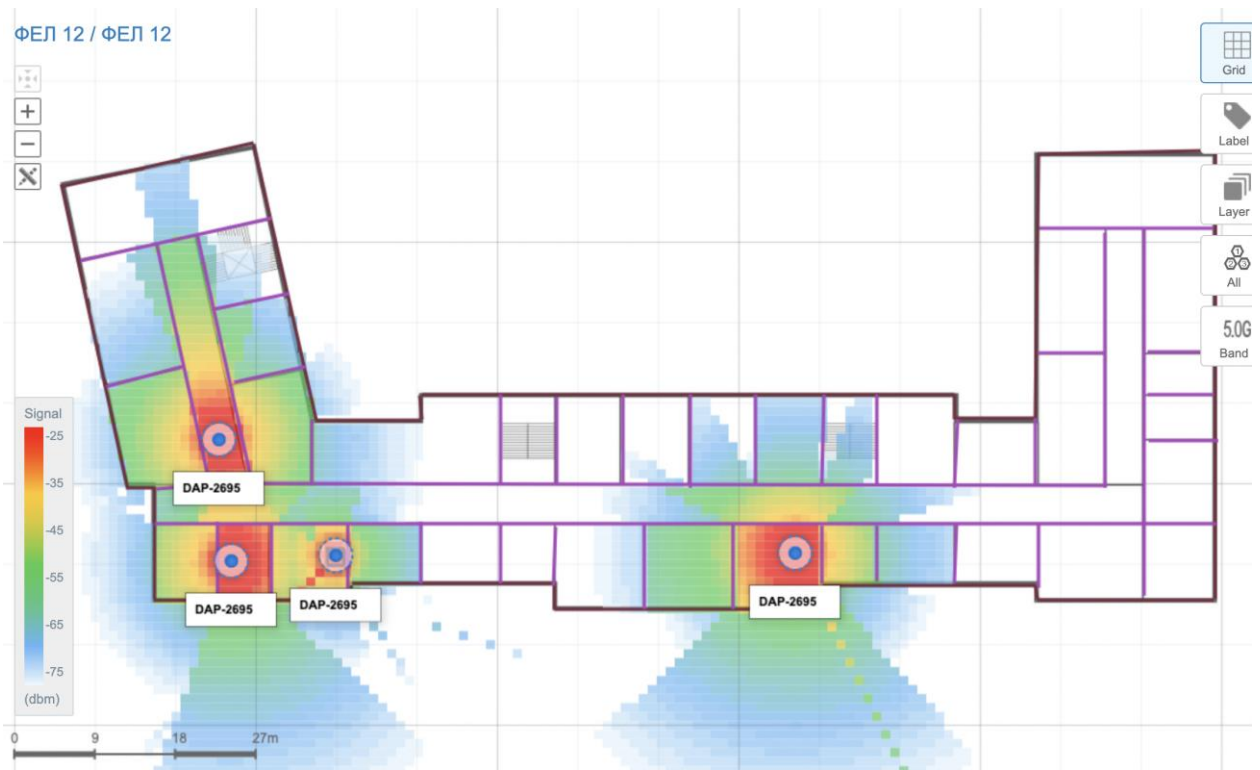


Рисунок 4.7 – Зони покриття досліджуваних точок доступу в діапазоні 5 ГГц

Висновки до розділу

1. В технології безпроводової мережі 802.11 пікова швидкість передавання сигналів не є вирішальним чинником, що визначає швидкість передавання інформаційних потоків, оскільки великі витрати часу пов'язані з передаванням службової інформації, необхідної для обслуговування базового режиму конкурентного доступу до каналу передавання (MU-Basic).

2. Для обслуговування кількох приміщень, розташованих в споруді з перегородками із цегли, треба використовувати режим роботи точки доступу в діапазоні частот 2,4 ГГц, оскільки використання діапазону 5 ГГц призводить до значного скорочення зони обслуговування через значне загасання електромагнітних хвиль робочого діапазону.

3. Інтенсивність сигналу в межах приміщення середнього розміру (40-60 кв. м) на різних відстанях від точки доступу є суттєво відмінною і може сягати 10 дБ, що призводить до зменшення пропускної здатності безпроводового каналу через необхідність застосовувати менш ефективні параметри модуляції і кодування (менші значення індексу MCS).

4. В разі часткового перекриття зон обслуговування безпроводових мереж IEEE 802.11ac пропускна здатність мережі значно зменшується через погіршення (зменшення) відношення сигнал / завада в радіоканалі. Так, наявність іншої точки доступу на відстані 12 м в разі часткового перекриття (50%) частотних смуг завширшки 20 МГц призводить до зменшення пропускної здатності в основній робочій зоні в 1,5 - 2 рази.

5. В разі організації безпроводової мережі для досягнення найбільш ефективного функціонування треба узгодити кілька суперечливих вимог:

- використовувати якомога меншу потужність передавачів для зменшення рівня перехресних завад;
- ретельно вибирати місце розташування точок доступу для зменшення взаємного впливу близько розташованих мереж і забезпечення більш рівномірного розподілу сигналу в зоні обслуговування;
- забезпечувати рознесення частотних смуг робочих каналів із забезпеченням мінімального перекриття або його відсутність.

6. Використання широкосмугових режимів функціонування за умови великої щільності безпроводових мереж є неможливим, а тому досягнення максимально можливої розрахункової швидкості передавання потокової інформації навіть за умови однієї активної станції в мережі є малоімовірною.

ВИСНОВКИ

Узагальнене завдання дисертаційної роботи щодо оцінювання умов функціонування безпроводових мереж стандарту IEEE 802.11 й визначення їх взаємного впливу на ефективність функціонування для потреб поліпшеного планування і експлуатації повністю виконано.

Під час здійснення досліджень з'ясовано нижче наведені особливості функціонування сучасних безпроводових мереж стандарту IEEE 802.11.

1. Значне збільшення швидкості передавання сигнальних потоків досягнуто застосуванням багаторівневої OFDM модуляції (КАМ-256 в специфікації IEEE 802.11ac), а також удосконаленою технологією доступу OFDMA (IEEE 802.11ax, КАМ-1024). Збільшення швидкості передавання здійснено також формуванням кількох просторових каналів (до трьох), а також застосуванням технології формування діаграми спрямованості в напрямку на абонента (до восьми променів).

2. Математична модель, побудована на підґрунті концепції насиченого навантаження та встановлює безпосередньо зв'язків між системними параметрами мережі, що визначають режим функціонування, і експлуатаційними характеристиками безпроводової мережі, що визначають якісні показники. Цю модель можна застосовувати для оцінювання експлуатаційних характеристик лише в певному діапазоні значень системних параметрів.

3. Для оцінювання ефективності функціонування мережі доцільно використовувати коефіцієнта корисного навантаження, числове значення якого дорівнює відношенню швидкості передавання інформаційного потоку до пікової швидкості передбаченої в певній специфікації стандарту IEEE 802.11.

4. Наявні програмні засоби для моделювання зони покриття точки доступу Wi-Fi дозволяють змодельовати середовище розповсюдження сигналів з урахуванням геометрії приміщень і фізичних характеристик перешкод, що присутні в зоні обслуговування.

5. В разі часткового перекриття зон обслуговування безпроводових мереж IEEE 802.11ac пропускна здатність мережі значно зменшується через погіршення (зменшення) відношення сигнал / завада в радіоканалі. Так, наявність іншої точки доступу на відстані 12 м в разі часткового перекриття (50%) частотних смуг завширшки 20 МГц призводить до зменшення пропускної здатності в основній робочій зоні в 1,5 - 2 рази.

6. Інтенсивність сигналу в межах приміщення середнього розміру (40-60 кв. м) на різних відстанях від точки доступу є суттєво відмінною і може сягати 10 дБ, що призводить до зменшення пропускної здатності безпроводового каналу через необхідність застосовувати менш ефективні параметри модуляції і кодування (менші значення індексу MCS).

7. Використання широкосмугових режимів функціонування за умови великої щільності безпроводових мереж є неможливим, а тому досягнення максимально можливої розрахункової швидкості передавання потокової інформації навіть за умови однієї активної станції в мережі є малоймовірною.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. 802.11 Wireless Standards. URL:
<https://www.pearsonitcertification.com/articles/article.aspx?p=1329709&seqNum=4> (дата звернення 20.09.2022)
2. 2.4 GHz Channel Planning. URL: <https://onmac.net/how-to-find-the-best-wifi-channel/> (дата звернення 24.09.2022)
3. Особливості використання частот у діапазоні 5 ГГц. URL:
https://mum.mikrotik.com/presentations/UA18/presentation_5528_1528830376.pdf (дата звернення 11.09.2022)
4. WiFi Radios and Modulation Techniques (Part 3 of 5). URL:
<https://www.clearcom.com/wifi-radios-and-modulation-techniques-part-3-of-5/> (дата звернення 20.10.2022)
5. Wireless LAN Deployment Guide. URL:
<https://www.voipinfo.net/docs/cisco/CiscoIPPhone8800SeriesWLANDeploymentGuide.pdf> (дата звернення 20.09.2022)
6. Basic Service Set. URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/basic-service-set> (дата звернення 04.09.2022)
7. Wireless Local Area Networks. URL:
<https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/clear-to-send> (дата звернення 22.09.2022)
8. Interframe Space Basics. URL: <https://waitbutwifi.com/interframe-space-basics/> (дата звернення 20.09.2022)
9. В. Макаренко Особливості стандарту безпроводного зв'язку IEEE 802.11ac (wi-fi) Київ. 2012. с.28-34.
10. IEEE 802.11ax: The Sixth Generation of Wi-Fi White Paper. URL:
<https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/wireless/white-paper-c11-740788.html> (дата звернення 20.11.2022)
11. Average number devices and connections per person worldwide in 2018 and 2023. URL: <https://www.statista.com/statistics/1190270/number-of->

- devices-and-connections-per-person-worldwide/ (дата звернення 20.11.2022)
- 12.802.11 Wireless Standards. URL:
<https://www.pearsonitcertification.com/articles/article.aspx?p=1329709&seqNum=5> (дата звернення 20.09.2022)
- 13.802.11 Wireless Standards. URL:
<https://help.keenetic.com/hc/ru/articles/213968949> (дата звернення 20.10.2022)
- 14.802.11 Basic Wireless Concepts. URL: https://www.tp-link.com/us/configuration-guides/q_a_basic_wireless_concepts/?configurationId=2958#_idTextAnchor001 (дата звернення 21.09.2022)
15. В. Макаренко 802.11ax – Нова версія стандарту високошвидкісної системи зв'язку Wi-Fi Київ. 2012. с.42-51.
- 16.Giuseppe B. Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function. IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2000. vol. 18. №. 3. С. 1055 – 1067.
- 17.Liao R., Bellalta B., Barcelo J. Performance analysis of IEEE 802.11ac 158 wireless backhaul networks in saturated conditions. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. URL: <https://jwcn-urasipjournals.springeropen.com/articles/10.1186/1687-1499-2013-226> (дата звернення: 10.10.2022).
- 18.Lazebnyy A. V., Lazebnyy V. S. The Details of Virtual Contention Window Concept for 802.11 IBSS Wireless Local Area Network Mathematic Modeling. International Journal of Wireless Communications and Mobile Computing. 2013. vol. 1. № 1. С. 7–13. URL: <http://doi.org/10.11648/j.wcmc.20130101.12> (дата звернення: 10.10.2022).
- 19.Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specification – 3 Park Avenue, New York, NY 10016-5997, USA:

- IEEE Std 802.11, 2007. – 1232 с. – (2007 Edition). <https://www.iith.ac.in/~tbr/teaching/docs/802.11-2007.pdf> (дата звернення: 10.02.2019).
20. Проценко М. Б., Рожковська І. Ю. Аналіз аналітичних моделей для MIMO систем. Наукові праці ОНАЗ ім. Попова. 2009. № 2. С. 3–9
21. Takuya S., Nobuyoshi K., Hiroo S. Maximum Throughput Analysis for RTS/CTS-used IEEE 802.11 DCF in Wireless Multi-hop Networks. URL: <https://www.researchgate.net/publication/251945320> (дата звернення: 10.02.2019).
22. Hadzi-Velkov Z., Spasenovski B. Saturation Throughput – Delay Analysis of IEEE 802.11 DCF in Fading Channels. In Proc. IEEE ICC'03, USA. Alaska. Anchorage. 2003. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1204154> (дата звернення: 10.02.2019).
23. Вишне夫斯基 В. М., Ляхов А. И., Якимов М. Ю. Оптимизация работы высокоскоростной беспроводной сети в условиях помех. Электросвязь. 2007. № 8. С. 16–19.
24. Лазебний В. С., Ін Ч. Оцінювання якісних показників бездротової мережі стандарту 802.11 з конкурентним доступом до каналу. Всеукраїнський науковий збірник Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Обчислювальна техніка та автоматизація». 2018. № 1(31). С.78-88.
25. Лазебний В. С., Ін Ч., Омелянець О. О. Дослідження реальної пропускної спроможності безпроводової інформаційної мережі специфікації 802.11n. Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І.Вернадського Серія: «Технічні науки». 2018. Т.29 (68) Ч. 1 № 5. С.155-160.
26. Very High-Density 802.11ac Networks. Theory Guide. Aruba Networks, Inc. URL: http://www.arubanetworks.com/assets/vrd/Aruba_VHD_VRD_Planning_Guide.pdf (дата звернення: 10.02.2022).

27. Gigabit Wi-Fi, 802.11ac in depth Peter Thornycroft March 2013. URL: https://www.arubanetworks.com/pdf/events/GigabitWifi_802.11ACInDepth_PeterThornycroft.pdf (дата звернення: 10.02.2022).
28. WiFi Explorer Pro 3. URL: <https://www.intuitibits.com/products/wifiexplorerpro3/> (дата звернення 20.11.2022).
29. Dlink Wi-Fi Planner PRO. URL: <https://www.dlink.com/tools/wi-fi/> (дата звернення 20.11.2022).
30. Acrylic WiFi Home URL: <https://www.acrylicwifi.com/wifi-scanner/> (дата звернення 20.10.2022).
31. AirScout Live URL: <https://m.apkpure.com/ru/airscout-live/com.greenlee.airscoutlive> (дата звернення 25.11.2022).
32. Homedale URL: <https://the-sz.com/products/homedale/> (дата звернення 12.11.2022).
33. Ekahau HeatMapper URL: <https://www.ekahau.com/solutions/wi-fi-heatmaps/> (дата звернення 20.11.2022).