

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інфокомунікації
(повна назва)

Кафедра Інформаційно-мережної інженерії
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

другий (магістерський)
(рівень вищої освіти)

(позначення документа)

Аналіз технологій побудови бездротових локальних мереж
(тема)

Виконав: студент 2 курсу, групи ІМІм-21-1
Спеціальності 172 Телекомунікації та
радіотехніка

(код і повна назва спеціальності)

Освітньо-професійної програми

Інформаційно-мережна інженерія

(повна назва освітньо-професійної програми)

Лапшин В. С.

(прізвище, ініціали)

Керівник доц. Омельченко А.В.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри

(підпис)

Безрук В.М.

(прізвище, ініціали)

2022 р.

Не містить відомостей, заборонених до відкритого публікування

Студент	_____	<u>Лапшин В.С.</u>
	(підпис)	(прізвище та ініціали)
Керівник	_____	<u>Омельченко А.В.</u>
	(підпис)	(прізвище та ініціали)

Харківський національний університет радіоелектроніки
(повна назва вищого навчального закладу)

Факультет Інфокомунікацій
Кафедра Інформаційно-мережної інженерії
Освітній рівень другий (магістерський)
Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка
Освітня програма Інформаційно-мережна інженерія
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІМІ

проф. Безрук В.М.

“ ” 2022 року

З А В Д А Н Н Я НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Лапшину Володимиру Сергійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Аналіз технологій побудови бездротових локальних мереж

керівник роботи Омельченко Анатолій Васильович, к.т.н., доц.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ВНЗ від « 21 » жовтня 2022 року № 1376 Ст

2. Строк подання студентом роботи 15 грудня 2022 р.

3. Вихідні дані до роботи Об'єкт дослідження – технології побудови бездротових локальних мереж.

Розглянути основні протоколи бездротового зв'язку. Проаналізувати наступні технології: wireless optical, spread spectrum, OFDM, MIMO, UWB, mmWave. Аналіз технологій OFDM і MIMO виконати з розрахунком пропускних здатностей при різних видах і індексах модуляції. Розглянути методи проектування мережевої топології з використанням сучасних програмних продуктів

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

Вступ

1. Класифікація і основні протоколи бездротового зв'язку

2. Огляд сучасних технологій побудови бездротових локальних мереж

3. Аналіз можливостей технологій OFDM і MIMO

4. Методи проектування мережевої топології та приклад проектування бездротової локальної мережі

Висновки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Слайди у форматі Power Point(назва, мета і актуальність атестаційної роботи, класифікація безпроводних мереж передачі інформації, сучасні технології побудови безпроводних локальних мереж, аналіз можливостей технологій OFDM і MIMO, особливості формування сигнально-кодових конструкцій на основі технології IEEE 802.11, розрахунок швидкості передачі даних, приклад проектування бездротової локальної мережі та висновок)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Ознайомлення із завданням. Уточнення ТЗ	01.11-4.11	Виконано
2	Підбір літератури за темою роботи	05.11-10.11	Виконано
3	Виконання розділу 1	05.11-10.11	Виконано
4	Виконання розділу 2	11.11-15.11	Виконано
5	Виконання розділу 3	16.11-20.11	Виконано
6	Виконання розділу 4	21.11-30.11	Виконано
8	Оформлення пояснювальної записки	01.12-11.12	Виконано
9	Оформлення презентаційного матеріалу, підготовка до захисту у ЕК	11.12-15.12	Виконано

Дата видачі завдання 01.11.2022 р.

Студент _____
 (підпис)

(Лапшин В.С.)
 (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
 (підпис)

(Омельченко А.В.)
 (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 72 с., 15 рис., 6 табл., 19 джерел, 1 додаток.

Об'єкт дослідження – технології побудови бездротових локальних мереж.

Розглянути основні протоколи бездротового зв'язку.

Мета роботи – проаналізувати наступні технології: бездротові оптичні, розширений спектр, OFDM, MIMO, UWB, mmWave.

Методи дослідження – емпіричний аналіз, порівняння, формалізація та моделювання.

Розглянути методи проектування мережевої топології з використанням сучасних програмних продуктів та обґрунтовані основні методи доступу до послуг та ресурсів корпоративної мережі та Інтернет, методологія проектування мережевої архітектури та основні методи моделювання мереж, виконано проектування корпоративної мережі з проводимим та безпроводним доступом.

БЕЗПРОВІДНИЙ ДОСТУП, АНАЛІЗ, МЕРЕЖА, ПОСЛУГИ,
ПРОЕКТУВАННЯ.

ABSTRACT

Explanatory note: 72 pages, 15 figures, 6 tables, 19 sources, 1 app.

The object of research is the technology of building wireless local networks.
Consider the main wireless communication protocols.

The purpose of the work is to analyze the following technologies: wireless optical, extended spectrum, OFDM, MIMO, UWB, mmWave.

Research methods – empirical analysis, comparison, formalization and modeling.

The methods of network topology design using modern software products and the basic methods of access to services and resources of the corporate network and the Internet are substantiated, the methodology of network architecture design and basic network modeling methods, the design of a corporate network with wired and wireless access is performed.

WIRELESS ACCESS, ANALYSIS, NETWORK, SERVICES, DESIGN.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ І ТЕРМІНІВ	9
ВСТУП.....	10
1 ПРИНЦИПИ ФУНКЦІОНУВАННЯ МЕРЕЖ БЕЗПРОВІДНОГО ДОСТУПУ СТАНДАРТІВ IEEE 802.11	11
1.1 Класифікація безпроводних мереж передачі інформації.....	11
1.2 Wi-Fi - безпроводна локальна мережа	13
1.2.1 Формування сімейства безпроводних мереж.....	13
1.2.2 Режими роботи стандарту IEEE 802.11	14
1.3 Огляд вже існуючих стандартів сімейства IEEE 802.11	14
1.3.1 Базовий стандарт IEEE 802.11	15
1.3.2 802.11a.....	16
1.3.3 802.11b.....	17
1.3.4 802.11g.....	17
1.3.5 802.11n.....	19
1.3.5.1 Багатоканальний вхід / вихід (MIMO).....	19
1.3.6 Mesh-мережі 802.11s.....	20
1.3.7 IEEE 802.11p	21
1.4 Механізм доступу до середовища	22
2. ОГЛЯД СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПОБУДОВИ БЕЗДРОТОВИХ ЛОКАЛЬНИХ МЕРЕЖ.....	23
2.1 Бездротові локальні мережі	23
2.2 Технологія Ultra Wideband: особливості та приклади використання	24
2.2.1 Технічні особливості uwb	25
2.2.2 Порівняння uwb з іншими технологіями.....	27
2.2.3 Переваги та недоліки технології ultra wideband	28
2.2.4 Сфери застосування технології uwb	28
2.3 Оптичний бездротовий зв'язок	30
2.4 Технологія Spread Spectrum	33
2.5 Технологія mmWave	34
3. АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ ТЕХНОЛОГІЙ OFDM І MIMO	37

3.1 MIMO.....	37
3.1.1 Потужність систем MIMO	39
3.1.2 Переваги мультиантенних систем.....	42
3.1.3 Адаптивні системи MIMO	43
3.1.4 Застосування систем MIMO.....	44
3.2 OFDM	44
3.3 Особливості формування сигнально-кодкових конструкцій на основі технології IEEE 802.11.....	46
4. МЕТОДИ ПРОЕКТУВАННЯ МЕРЕЖЕВОЇ ТОПОЛОГІЇ ТА ПРИКЛАД ПРОЕКТУВАННЯ БЕЗДРОВОЇ ЛОКАЛЬНОЇ МЕРЕЖІ.....	51
4.1 Методологія проектування мережі «згори-вниз» та «знизу-вгору»	51
4.2 Методи мережевого моделювання	53
4.3 Приклад проектування бездротової локальної мережі	55
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	63
ДОДАТОК А.....	Ошибка! Закладка не определена.

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ І
ТЕРМІНІВ

ЗШПФ — зворотне швидке перетворення Фур'є

ТД — точка доступу

DSSS — Direct Sequence Spread Spectrum

FEC — Forward Error Correction

FHSS — Frequency-hopping Spread Spectrum

IEEE — Institute of Electrical and Electronic Engineers

MIMO — Multiple Input Multiple Output

OFDM — Orthogonal frequency-division multiplexing

OSPF — Open Shortest Path First

SSH — Secure Shell

SSL — Secure Socket Layer

QoS — Quality of Service

VACL — Vlan Access List

VLAN — Virtual Local Area Network

Wi-Fi — Wireless Fidelity

WMM — Wi-Fi Multimedia™

WLAN — Wireless Local Area network

ВСТУП

В теперішньому світі пристрої безпроводної технології набирають швидкої популярності. Неминучим є те, що кількість безпроводних працюючих пристроїв пересягне число яке буде рівним кількості людей на землі, адже на кожну людину припадає приблизно 3-4 пристрої безпроводної мережі, такі як мобільний телефон, планшет, ноутбук і т. д. Ці пристрої вже на всі 100% пронизують наше життя і роблять нас залежними від них, адже в них знаходяться всі важливі документи:

- паспорт, водійське посвідчення і т. д. («Дія»);
- кредитні карточки та банківські рахунки. (Приватбанк, Монобанк);
- ЄЦП;
- інші важливі ресурси;

Злагоджена робота всіх пристроїв забезпечується за допомогою безпроводних мереж на базі стандарту IEEE 802.11, або як вони називаються у народі – Wi-Fi. Вона використовується для розгортання мереж як і в публічних місцях, так і для організації безпроводних локальних комп'ютерних мереж. Обмін, передача, скачування важливих для нас елементів проходить саме завдяки цим мережам. Як правило, технологія Wi-Fi використовується для організації бездротових локальних комп'ютерних мереж, а також створення так званих гарячих точок високошвидкісного доступу в Інтернет.

Головними перевагами бездротових мереж є велика швидкість розгортання і зручність при роботі з мобільними пристроями.

Метою даної роботи є проведення аналізу технологій побудови бездротових локальних мереж

Об'єктом дослідження є безпроводні локальні мережі, а предметом дослідження – аналіз технології побудови бездротових локальних мереж.

1 ПРИНЦИПИ ФУНКЦІОНУВАННЯ МЕРЕЖ БЕЗПРОВІДНОГО ДОСТУПУ СТАНДАРТІВ IEEE 802.11

За останні декілька років прогрес поширення безпроводних мереж Wi-Fi набирає великих обсягів, тому в розробників виникає думка про винайдення, виготовлення і впровадження нових стандартів зв'язку, які на відміну від своїх попередників будуть більш продуктивнішими, ефективнішими і захищеними. На початку свого існування безпроводні пристрої могли підтримувати швидкість передачі даних понад 1-2 Мбіт/с, яка у порівнянні з теперішньою швидкістю являється мізерною. В сучасному світі швидкість передачі інформації у безпроводних мережах може досягати до 1Гбіт/с, що не може не створювати конкуренцію для кабельних мереж. Є дуже багато видів безпроводних мереж, кожна з яких відрізняється від своїх попередників різними параметрами – швидкістю передачі, радіусом дії і типом кодування інформації.

1.1 Класифікація безпроводних мереж передачі інформації

В телекомунікації стрімкого розвитку набирають безпроводні мережі передачі інформації (БМІІ). Ринок має великий асортимент обладнання безпроводного доступу, а саме обладнання для побудови безпроводних мереж WiFi, GSM, WiMAX і глобальних мереж. Відомо три основні види використання таких мереж:

- робота в замкнутому просторі (офіс, концертні зали і т. д.);
- з'єднання віддалених локальних мереж;
- побудова територіально розподілених безпроводних мереж.

Для з'єднання мереж на великих відстанях, або великих самих по собі мереж можуть бути використанні обладнання з спрямованими антенами або підсилювачі і розміщення антен на великій висоті.

Якщо більш детально розглядати безпроводні мережі передачі інформації, то можна явно виділити чотири типи (рис. 1.1)[2]:

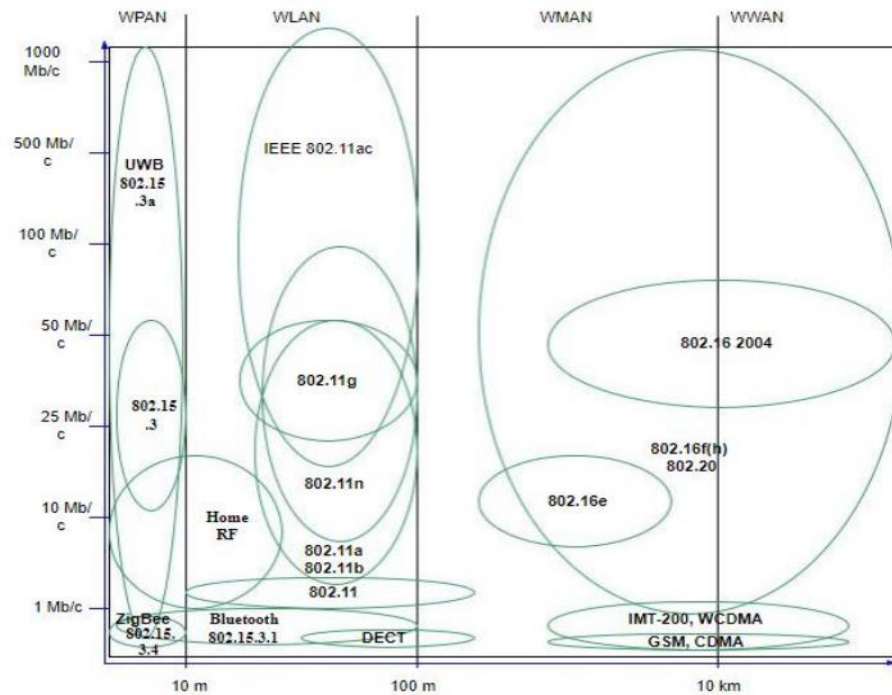


Рисунок 1.1 – Класифікація технологій БМПП

1. Безпроводні персональні мережі (WPAN - wireless personal area network) – мережа, радіус дії якої може сягати від декількох сантиметрів і до 10-15 м. Призначені для з'єднання обладнання в межах робочого місця, наприклад, зв'язку стільникового телефону і ноутбука або комп'ютера і принтера. Найбільш поширена технологія з цієї категорії - Bluetooth.

2. Безпроводні локальні мережі (WLAN - wireless local area network) – радіус дії до 100 метрів, але при розгортанні підсилювачів і напрямлених антен дальність дії зростає до понад декількох сотень метрів. Їх також називають WiFi мережами. Основне призначення таких систем - розгортання безпроводних мереж усередині приміщень, хоча є випадки їх використання на відкритих майданчиках. Базова послуга - доступ в Internet або корпоративну мережу.

3. Безпроводні міські мережі (WMAN - Wireless Metropolitan Area Network) - радіус дії базової станції - до 10 км. За допомогою обладнання, що належить до класу фіксованого широкосмугового безпроводного доступу (Fixed Broadband Wireless Access, FBWA) виконується побудова розподілених безпроводних операторських мереж масштабу міста або великих корпоративних мереж.

4. Безпроводні глобальні мережі WWAN. Глобальні бездротові мережі передачі інформації представлені в основному супутниковими системами зв'язку.

Хоч всі мережі безпроводного доступу мають широке застосування в теперішньому світі, найбільшого поширення має технологія Wi-Fi. Її функціоналом користуються як і проводові мережі, так і безпроводні. В основному забезпечується покриття території і заохочення нових користувачів в свою мережу.

1.2 Wi-Fi - безпроводна локальна мережа

Безпроводні локальні мережі, більш відомі під іменем Wireless Fidelity (WiFi), створенні на основі сімейства стандартів IEEE 802.11. На перших етапах свого існування термін «Wi-Fi» застосовували тільки щоб позначати технології, які забезпечують зв'язок в діапазоні частот понад 2.4ГГц, але в теперішньому часі його використовують для безпроводних мереж і інших технологій. Мережа Wi-Fi застосовується для зв'язку і обміну даними між вузлами, однак це гнучка система обміну інформацією, що працює подібно до альтернативної провідної мережі, яка знаходиться в приміщенні чи на певній відкритій території. Також ця мережа використовується для організації публічних точок доступу, таких як аеропорти, площі та інші багатолюдні місця і організація тимчасових безпроводних мереж на період проведення фестивалів, футбольних матчів чи виставок в музеях.

1.2.1 Формування сімейства безпроводних мереж

В 1990 році IEEE 802 створив групу для роботи по стандартам для безпроводних мереж Wi-Fi. Основним їх завданням було створення загального стандарту для мереж, які працюють в частотному діапазоні 2.4 ГГц з швидкістю з'єднання 1-2 Мбіт/с. В 1997 році розробка стандарту була завершеною і була ратифікована перша специфікація 802.11.

Цей стандарт вважався першим для пристроїв WLAN. Однак тоді початкова швидкість передачі інформації не відповідала бажанням користувачів. Саме тому, для того щоб задовільнити всіх користувачів і

зробити цю технологію популярною, розробники створили новий стандарт. І вже осінню 1999 року було схвалено удосконалення вже існуючого стандарту. Новий стандарт називався 802.11 High rate або скорочено IEEE 802.11b. За допомогою цього стандарту пристрої безпроводних мереж могли передавати і отримувати дані на швидкості понад 11 Мбіт/с. Ця швидкість дозволила використовувати пристрої в великих корпоративних організаціях.

1.2.2 Режими роботи стандарту IEEE 802.11

Стандарт IEEE 802.11 є популярним і використовується в різних галузях, тому для більшої ефективності мережі використовуються певні мережеві топології, які в тій чи іншій ситуації будуть найбільш підходящими. Стандарт IEEE 802.11 має декілька мережевих топологій:

- режим інфраструктури;
- режим Ad Hoc;
- топологія бездротової сітки;
- P2P мережева топологія.

1.3 Огляд вже існуючих стандартів сімейства IEEE 802.11

З теперішній час існує велика кількість стандартів групи IEEE 802.11. Розглянемо найбільш розповсюдженні і найбільш вживані:

1. базовий 802.11;
2. 802.11a;
3. 802.11b;
4. 802.11g;
5. 802.11n.
6. 802.11p;
7. Mesh-мережі 802.11s.

Всі стандарти IEEE 802.11 працюють на нижніх двох рівнях моделі ISO / OSI, фізично і канальному, тому будь-який мережевий додаток, мережева операційна система, або протокол (наприклад, TCP / IP), будуть так само добре працювати в мережі 802.11, як і в мережі Ethernet[3].

1.3.1 Базовий стандарт IEEE 802.11

В середині літа 1997 року був оприлюднений стандарт IEEE 802.11 який мав назву «Специфікація фізичного рівня і рівня контролю доступу до каналу передачі бездротових локальних мереж». Цей протокол ідентифікував архітектуру мережі, формати пакетів, способи захисту даних та автентифікацію, а також різні принципи доступу пристроїв до каналів зв'язку.

В початковому етапі свого існування стандарт 802.11 працював з обладнанням на частоті 2.4ГГц і максимальною швидкістю до 2 Мбіт/сек. Базовий протокол 802.11 на своєму фізичному рівні реалізує 2 методи передачі даних:

- метод частотних стрибків FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum);
- метод прямої послідовності DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum).

FHSS – Це технологія передачі в якій сигнал даних модулюється за допомогою вузькосмугового сигналу-носія, що «перескакує» у випадковій, але передбачуваній послідовності від частоти до частоти. Сигнал поширюється у часовій області. Ця технологія забезпечує менший рівень перешкод, адже сигнал з вузькосмугової системи буде мати вплив на сигнал розповсюдженого спектру лише в тому випадку, коли обидва сигнали мають однакову частоту.

Енергія сигналу поширюється у часовій області, а не подрібнюючи кожен біт невеликими шматочками в частотній області. Ця методика зменшує перешкоди, оскільки сигнал із вузькосмугової системи впливатиме на сигнал розповсюдженого спектру лише тоді, коли обидва передають однакову частоту. При правильній синхронізації підтримується єдиний логічний канал. Частоти на яких буде відбуватись передача обирається кодом, що розповсюджується чи «стрибає»[3].

(DSSS) - це техніка поширення спектру, за допомогою якої вихідний сигнал даних множиться на псевдо-випадковий код розповсюдження шуму. Цей розповсюджуючий код має більш високу швидкість чіпа (це бітрейт коду). DSSS значно покращує захист від непотрібних (або заклинюючих) сигналів, особливо вузькосмугових і робить сигнал менш помітним.

FHSS схожий до методу перескоку частоти, але в мережах GSM і EDGE. Пристрої цього методу працюють в частотному діапазоні від 2.402 до 2.480 ГГц і ділять його на 79 рівних неперервних каналів, шириною 1МГц. DSSS в

багатьох аспектах нагадує метод в системі кодового розділення CDMA. Ці дві технології забезпечують в мережі максимально можливу для них, але мізерну по теперішнім міркам, швидкість понад 2Мбіт/с. [3].

1.3.2 802.11a

Стандарт IEEE 802.11a був впроваджений в 1999 році. Основним завданням цього протоколу є робота в частотному діапазоні понад 5ГГц з максимальною швидкістю передачі 54Мбіт/с. Стандарт має технологію побудови радіоканалу на основі мультиплексування з ортогональним поділом частот (OFDM). Тобто, передача даних виконується за допомогою ряду незалежних радіосигналів. Такий метод призводить до зниження швидкості передачі на кожній «несучій», що безпосередньо забезпечує захист від завад зв'язку при досягненні високої пропускної здатності. Несучі модулюють за допомогою BPSK, QPSK, 16- і 64- позиційної квадратурної амплітудної модуляції (QAM). Стандарт має 8 швидкостей передачі, 3 з яких є обов'язковими, а інші додатковими. В табл. 1.1 наведено всі види швидкостей:

Таблиця 1.1 – Швидкість передачі для різних видів передачі стандарту 802.11a

Модуляція	Відносна швидкість кодування	Швидкість передачі Мбіт/с
BPSK(Обов'язкова)	1/2	6
BPSK(Додаткова)	3/4	9
QPSK(Обов'язкова)	1/2	12
QPSK(Додаткова)	3/4	18
QAM-16(Обов'язкова)	1/2	24
QAM-16(Додаткова)	3/4	36
QAM-64(Додаткова)	2/3	48
QAM-64(Додаткова)	3/4	54

Стандарт 802.11a розбитий на 3 піддіапазони, які відрізняються між собою обмеженнями по максимальній потужності випромінювання:

- нижній діапазон (5170 – 5330МГц) – потужність передачі до 100мВт;
- середній діапазон (5470–5730МГц) – потужність передачі до 250мВт;
- верхній діапазон (5715 – 5835МГц) – потужність передачі до 1Вт;

Недоліками цього стандарту є висока споживча потужність і менший радіус дії обладнання. Порівняно з обладнанням, які працюють на частоті 2.4ГГц, радіус дії менший приблизно в три рази.

1.3.3 802.11b

Стандарт IEEE 802.11b був представлений в після вдосконалення раніше прийнятого стандарту IEEE 802.11. Цей стандарт має максимальну швидкість передачі інформації понад 11Мбіт/с, однак за рахунок втрат протоколу CSMA / CA в дійсності швидкість передачі через TCP – 5.9Мбіт/с, а через UDP – 7.1Мбіт/с. Стандарт IEEE 802.11b працює в частотному діапазоні 2.4ГГц з широкосмуговим каналом 83.5МГц. Діапазон розбитий на 14 каналів, з інтервалом в 5МГц, окрім останнього в якого 10МГц

Однак одного каналу шириною в 5 МГц виявляється недостатньо, тому для передачі інформації використовується смуга частот шириною в 22МГц. Тобто об'єднуються декілька сусідніх каналів, щоб забезпечити безперешкодну передачу даних. За допомогою стандарту IEEE 802.11b на певній території можуть одночасно працювати декілька незалежних різних безпроводних мереж, через визначену комітетом спектральну маску. Вона ідентифікує спектр потужності передавача, який працює в одному з каналів.

1.3.4 802.11g

Стандарт IEEE 802.11g є удосконаленням стандарту IEEE 802.11b. Завдяки застосування ефективніших технологій модуляції сигналу було підвищено швидкість передачі інформації до 54Мбіт/с.

У таблиці 1.2 наведено швидкості передачі даних з різними модуляціями для стандарту IEEE 802.11g.

Таблиця 1.2 – Швидкість передачі даних в стандарті IEEE 802.11g

Стандарт передачі	Швидкість передачі	Вид модуляції
IEEE 802.11g (обов'язковий)	5,5/11 Мбіт/с	ССК
IEEE 802.11g (обов'язковий)	до 54 Мбіт/с	OFDM
IEEE 802.11g (опціональний)	до 33 Мбіт/с	PBCC
IEEE 802.11g (опціональний)	до 54 Мбіт/с	ССК-OFDM

Провівши аналіз чутливості системи стандарту 802.11g можна дійти до висновку, що системи стандарту IEEE 802.11g масштабуються вниз до відповідної межі, тому в перехідному діапазоні швидкість передачі змінюється плавно. (рис. 1.2.)

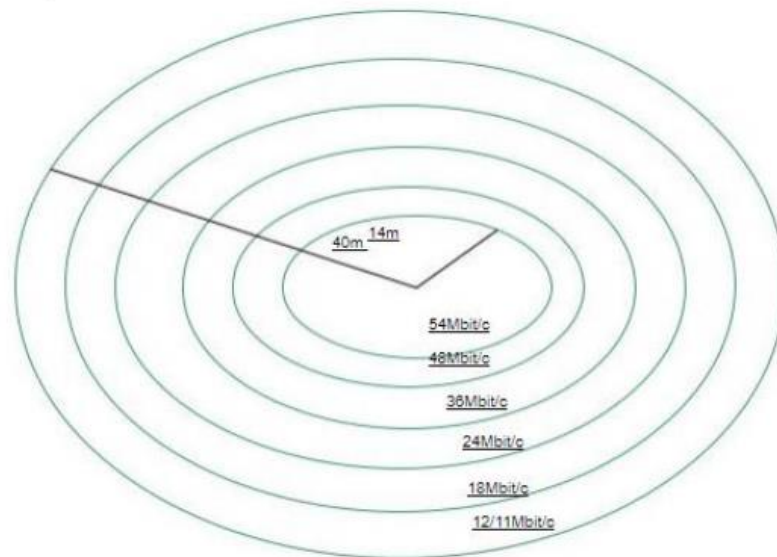


Рисунок 1.2 – Радіус дії в частотному діапазоні 2,4 ГГц (802.11g) при модуляції OFDM

Дивлячись на рис. 1.2 цей перехід представлений схематично. Швидкість передачі в 54 Мбіт/с досягається у відкритій офісному середовищі лише на відстані до 14 м.

1.3.5 802.11n

Стандарт 802.11n включає в себе безліч удосконалень у порівнянні з пристроями стандарту 802.11g. Удосконалення дозволяє працювати на одному із діапазонів 2.4ГГц або 5ГГц [3]. Була додана можливість одночасної передачі сигналу за допомогою чотирьох передаючих пристроїв, удосконалено модуляцію і обробку сигналу на фізичному рівні(РНУ). І каналний рівень не лишився в стороні, в ньому було реалізовано ефективніше застосування допустимої пропускної здатності. В сукупності ці удосконалення могли забезпечувати максимальну швидкість передачі даних майже в 10 разів більшу ніж в своїх попередників, приблизно до 600Мбіт/с. Основними покращеннями були:

1. Створення багатоканального входу/виходу(МІМО);
2. Збільшення ширини смуги пропускання від 20МГц до 40МГц;

1.3.5.1 Багатоканальний вхід / вихід (МІМО)

Стандарт 802.11n запровадив в мережу МІМО. Розшифровується воно як Multi-Input і Multiple-output. У 80-х та на початку 90-х років було проведено значні дослідження у галузі багатоканальної техніки передачі з метою використання багатоканального розповсюдження для передачі декількох потоків інформації через декілька антен одночасно. (рис 1.3.)

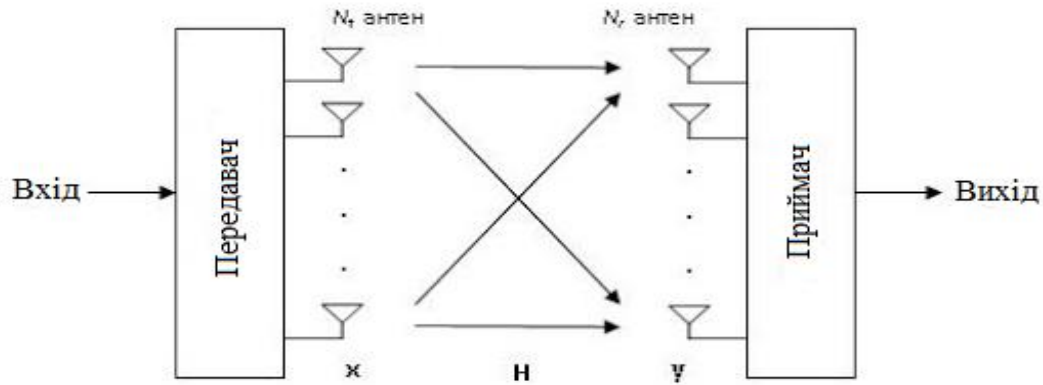


Рисунок 1.3 – Принцип роботи системи MIMO

В її основі лежала концепція багато шляхового поширення. Тобто кожен сигнал, який передається від антени, стикається і відскакує від непрозорих твердих предметів на шляху до приймача. Отриманий сигнал буде сумішшю переданого сигналу, що надходить на різні проміжки часу, а також під різними кутами прибуття. Теорія полягала в тому, що якщо кілька потоків були налаштовані таким чином, що передані ними сигнали були достатньо відокремленими, так що кожен з прийнятих сигналів може бути незалежно декодований на приймачі - це призвело б до збільшення пропускної здатності системи[7].

Кількість антен під час одночасної роботи прямо пропорційно відноситься величині максимальної швидкості передачі даних. Чим більше антен – тим більша швидкість передачі. Але нарахування тільки великої кількості антен не збільшує максимальну швидкість передачі і розширення діапазону, це буде працювати тільки з пристроями які підтримують стандарт IEEE 802.11n.

1.3.6 Mesh-мережі 802.11s

Стандарт IEEE 802.11s являється стандартом безпроводної мережі, який був створений для організації комерційних мереж, або ж відомих під іншою назвою мереж - mesh-мереж WMN (Wireless mesh network). Вони характеризуються надійністю і масштабованістю, а також мають властивості само конфігурування, відновлення і організації побудови мережі (рис. 1.4).

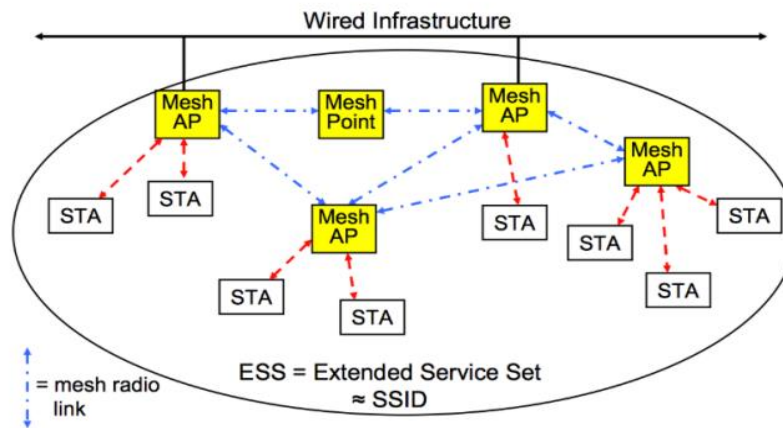


Рисунок 1.4 – Архітектура mesh-мережі 802.11s

WMN гарантує працездатність мережі при виходу з ладу певних елементів, розширення покриття мережі, рухому маршрутизацію трафіку, а також ретрансляцію кадрів між пристроями без прямої видимості. Всі нововведення введені тільки на MAC-рівні. Мережа стандарту визначена для невеликих розмірів з максимальною кількістю вузлів до 64.

1.3.7 IEEE 802.11p

IEEE 802.11p є одним з останніх затверджених поправок до стандарту IEEE 802.11 для додавання бездротового доступу в автомобільних умовах (WAVE). Він доклав деякі покращення в останню версію стандарту 802.11, який потрібно для підтримки додатків інтелектуальних транспортних систем (ІТС). Це включає в себе обмін даних між високошвидкісними транспортними засобами, а також між транспортними засобами та придорожньої інфраструктурою в ліцензованому діапазоні. IEEE Система радіочастотної 802.11p LAN націлена на 5.15-5.25, 5,25- 5,35 ГГц і 5.725-5.825 ГГц U-NII групою[1].

Система використовує 52 піднесучі, які модулюються з використанням двійкових або квадратурних фазових маніпуляцій (BPSK / QPSK), 16 квадратурно-амплітудної модуляції (16QAM), або 64-QAM. Пряме виправлення помилок кодування використовується з швидкістю кодування 1/2, 2/3, 3/4. IEEE 1609 є більш високим стандартом шару на основі IEEE 802.11p для підтримки

мережевих проблем безпеки в стандарті хвилі. Стандарт IEEE 802.11р працює на 7 каналів, кожен з яких має відповідну смугу частот.

1.4 Механізм доступу до середовища

Щоб створити всі умови для спільної роботи в мережі з великою кількістю пристроїв користувача без взаємних перешкод, було вирішено змінити стандартом спеціальний механізм їх переходу на режим передачі з попереднім повідомленням про передачу даних – множинний доступ з контролем несучої і запобіганням колізій (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance, CSMA / CA)[8]. CSMA розшифровується як множинний доступ з контролем несучої. Усі пристрої безпроводної мережі розпізнають, чи знаходиться мережа в режимі очікування. Тільки якщо середовище сприймається як недіюче, пристрій станції 802.11 може передавати кадр.

CA в CSMA / CA означає запобігання зіткнення. Пристрій WLAN не може одночасно передавати та приймати. Якщо середовище розпізнається як зайняте, то пристрій WLAN буде відключатись протягом деякого проміжку часу. Був розроблений алгоритм спеціального відключення, який визначає цей проміжок часу. Також до часу відключення, всі станції 802.11 ще використовують інший віртуальний механізм відключення, який називають векторним розподілом мережі (NAV). NAV – це тривалість часу. Ця тривалість отримується станцією 802.11 в останньому пакеті, який був виявлено станцією в ефірі. Тільки якщо тривалість NAV та таймер відключення відлічуються до нуля, а середовище можна вважати незайманим і може відбутись передача пакету в ефірі.

2. ОГЛЯД СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПОБУДОВИ БЕЗДРОТОВИХ ЛОКАЛЬНИХ МЕРЕЖ

2.1 Бездротові локальні мережі

У радіообласті загалом домінує робоча група 802.11 WLAN, яка у редакції 2003 р. описала лише порівняно низькі швидкості. Найшвидші технології, такі, наприклад, як 802.11g, специфіковані в окремих документах. Надалі були затверджені такі стандарти:

- 802.11e – якість послуг (Quality of Service, QoS);
- 802.11f – протокол взаємодії точок доступу (Inter-Access Point Protocol);
- 802.11h – керований спектр для 802.11a (Managed Spectrum for 802.11a);
- 802.11i – вдосконалений захист (Enhanced Security).

У групі 802.11 найактивніше обговорюється тема пропускної спроможності, а чи не мобільності: сьогодні майже кожен виробник компонентів стандарту 802.11 пропонує інтерфейси із підтримкою швидкості понад 100 Мбіт/с. На жаль, це нестандартні рішення, розроблені самостійно. Тепер вдалося знайти компроміс і всі зможуть рухатися в одному напрямку.

Завдяки йому поява стандарту в цій галузі не за горами, і вже цього року він буде готовий:

- 802.11n — Висока пропускна здатність (High Throughput).

Поряд із пропускною здатністю важливою темою для IEEE 802.11 є мобільність. У цій галузі групи працюють над такими проектами:

- 802.11p – доступ з транспорту (Vehicular Access);
- 802.11r – швидкий роумінг (Fast Roaming);
- 802.11s – пористі мережі (Meshed Networks).

Випуск нових стандартів слід очікувати від робочих груп 802.11u-802.11w: вони отримали завдання на стандартизацію і зараз знаходяться на шляху до своїх перших проектів:

- 802.11u – розробляє рішення для бездротової взаємодії із зовнішніми мережами (Wireless Interworking with External Networks);
- 802.11v – визначає функції мережевого керування для радіомереж (Wireless Network Management);
- 802.11w — займається захистом кадрів, що управляють (Protection of Management Frames).

2.2 Технологія Ultra Wideband: особливості та приклади використання

Технологія Ultra Wideband з'явилася понад 20 років тому, але тільки нещодавно набула поширення на підприємствах, що вимагають стандартизованого та єдиного бездротового засобу для підключення комп'ютерної техніки. З її допомогою можна вирішувати цілу низку важливих завдань:

- надійний захист інформації;
- підтримка високої швидкості передачі;
- обчислення розташування об'єктів;
- зниження витрат електроенергії.

UWB має великий потенціал, точність розташування становить від 10 до 30 см. Завдяки цьому можна забезпечити контроль периметра небезпечних зон і контроль виконання КРІ на робочих місцях[10].

Ultra Wideband - це надширокосмугова технологія, яка використовується для передачі високочастотних імпульсів на малі відстані. Сигнали UWB поширюються на частотах до кількох ГГц і досягають відносної ширини пропускної смуги від 25 до 100 %.

Комп'ютери та периферійні пристрої потребують високошвидкісного інтерфейсу, а застосування Bluetooth та стандарту 802.11 не завжди допомагає досягти поставленої мети. Головним мінусом таких протоколів є мала смуга пропускання (у середньому – до 19 Мбіт/сек), що є нераціональним для додатків, які потребують високої швидкості передачі.

2.2.1 Технічні особливості uwb

UWB-сигнали розпізнаються як будь-які сигнали з шириною спектра понад 500 МГц та діапазоном від 3,1 до 10,6 ГГц. Вони досить слабкі (41,5 дБм/МГц), тому вимагають ліцензування ДКРЧ.

Впровадження технології не вимагає дотримання умови прямої видимості та здійснюється з використанням лише кількох зовнішніх компонентів. UWB є дорогим технічним рішенням, що забезпечує встановлення трекерів з можливістю місцезнаходження до 10см.

Працює технологія таким чином, що при впровадженні в інфраструктуру підприємств на кожен актив, що відстежується, поміщається спеціальна мітка з вбудованим або акумулятором, що підключається. У процесі своєї роботи мітка приймає мільярди радіоімпульсів, які розсилаються з інтервалом у наносекунди у широкому частотному спектрі. Приймач або приймач приймає ці сигнали і перетворює їх в інформацію, яка дозволяє обчислювати місцезнаходження об'єкта. При визначенні розташування система використовує дуже короткі сигнали, які переміщуються зі швидкістю світла. Час їхнього прибуття обчислюється у широкій смузі пропускання, тому точність позиціонування об'єктів може становити від 10 до 30 см. Залежно від потреб компанії UWB трекінг можна використовувати з такими методиками розрахунку, як AoA (Angle of Arrival), TDoA (Time Difference of Arrival) , TWR (Two-way-ranging) або PDoA (Phase Difference of Arrival)[10].

TDoA

- Переваги: найбільш економне споживання енергії

- Принцип роботи: Датчик із певною періодичністю випромінює сигнали, які приймаються мітками за різні проміжки часу (виходячи з відстані). Розташування датчика обчислюється різницею між сигналами. TDoA часто називають гіперболічним позиціонуванням. Оскільки методика проводить розрахунки часу прибуття сигналів, вона вимагає чіткої синхронізації між базовими станціями.
- Область застосування: обчислення розташування великої кількості об'єктів у реальному часі

RDoA

- Переваги: може використовуватись при обмежених обсягах інфраструктури
- Принцип роботи: Щоб визначити місцезнаходження, датчик виконує оцінку різниці у фазах між сигналами на приймаючих антенах. Імпульс на антену, яка розташовується далі від пристрою, що приймає, приходиться із затримкою, що дозволяє обчислювати місцезнаходження шуканого об'єкта. Кут сигналу визначається щодо точки прив'язування.
- Область застосування: склади та інші об'єкти з великою кількістю майна

TWR

- Переваги: позиційна стабільність, висока точність
- Принцип роботи: Мітки розсилають короткі імпульси, які вловлюються пристроями, що зчитують. Відстань визначається за часом, який витрачається сигналами від відправлення до прийому. Більш удосконаленою є методика SDS-TWR, що застосовує подвійне вимір послідовно у 2-х різних напрямках.
- Область застосування: визначення місцезнаходження обладнання

AoA

- Переваги: висока точність при невеликих обсягах інфраструктури
- Принцип роботи: При використанні AoA об'єкти, що рухаються, розсилають сигнали, які вловлюються датчиками відстеження. Приймаючі пристрої одержують ці імпульси і дозволяють обчислити

місцезнаходження по куту приходу та напрямку щодо мітки. При розрахунках додатково враховується рівень сигналу.

- Область застосування: визначення місцезнаходження об'єктів у реальному часі.

2.2.2 Порівняння uwb з іншими технологіями

Надширокосмугове позиціонування не поступається іншим радіочастотним технологіям у плані переваг та універсальності у застосуванні. Однак система має деякі суттєві відмінності. Основна різниця полягає в ступені точності при позиціонуванні та широкому частотному спектрі. Висока точність дозволяє використовувати UWB у тих місцях, де розташування об'єктів у режимі реального часу має визначальне значення. Розглянемо, чим ще Ultra-Wideband відрізняється від Wi-Fi та iBeacon.

Wi-Fi є однією з найпоширеніших радіочастотних технологій для визначення розташування об'єктів. Однак вона суттєво поступається UWB у плані точності UWB. Якщо надширокосмугова технологія знаходить об'єкти з точністю до 10-30 см, Wi-Fi дає результати в діапазоні 3-5 м [10].

На відміну від Wi-Fi, Ultra-Wideband не боїться перешкод сигналів і має більш високий рівень гнучкості. Вона потребує менше витрат енергії, що знижує витрати на експлуатацію. Однак платформу на базі Wi-Fi можна реалізувати за допомогою існуючої інфраструктури, тоді як для впровадження UWB потрібно придбати необхідне обладнання.

iBeacon та UWB мають багато спільного. Обидві системи мають низьке енергоспоживання, високу точність, надійність у відстеженні об'єктів. Але між технологіями існує чимало відмінностей, які потрібно враховувати при організації RTLS. Так, iBeacon має менший діапазон і швидкість передачі даних, а Ultra-Wideband є більш точною в порівнянні з Bluetooth®.

Як говорилося вище, UWB позиціонування в приміщенні дозволяє виявляти об'єкти з точністю до 30 см, тоді як iBeacon знаходить їх з дальністю в 1 м. Причина полягає в тому, що надширокосмугова технологія використовує для розрахунків методику ToF, що виконує позиціонування часу проходження сигналу. Bluetooth® визначає розташування за допомогою методу RSSI, який здійснює обчислення на відстані і не може давати достатнього рівня точності.

2.2.3 Переваги та недоліки технології ultra wideband

На сьогодні надширокосмугова технологія UWB має великі перспективи розвитку. Передбачається, що вже найближчим часом вона активно застосовуватиметься на масовому ринку та допомагатиме в реалізації багатьох бізнес-рішень. Причина цього – безліч переваг, які виділяють цю систему на тлі аналогів[10]:

- відсутність обмежень у доступності ВЧ-спектру;
- завадостійкість;
- можливість одночасної підтримки сотень каналів;
- великий діапазон масштабування за критеріями швидкості;
- одноразова робота як глобальна, локальна та персональна мережа;
- глобальна сумісність пристроїв, які використовують радіочастотний спектр;
- високий захист даних за рахунок потужності сигналів на рівні шуму;
- спектральна гнучкість;
- високоточне визначення розташування та відстеження переміщення об'єктів;
- можливість створення окремої комунікаційної мережі, яка буде мирно сусідити з іншими бездротовими технологіями в офісі.

Технологія має не лише плюси, а й деякі недоліки. Так, за рахунок широкої смуги та високої потужності сверширокосмугові сигнали можуть заважати вже існуючим системам і лініям зв'язку. UWB відрізняється малою тривалістю сигналів. Для їх виявлення можна застосовувати узгоджений фільтр або корелятор, але в такій ситуації буде складно синхронізувати прийом.

2.2.4 Сфери застосування технології uwb

З кожним роком UWB позиціонування стає все більш популярним серед представників бізнесу. Якщо раніше технологія застосовувалася лише на

військових об'єктах, то зараз її використовують у промисловості, охороні здоров'я, торговельній, культурній та транспортній сфері.

Рітейл та торгові центри. У торговій галузі технологія Ultra Wideband забезпечує прозорість місцезнаходження товарів та обладнання. З її допомогою можна організувати зручну навігацію магазином, виконати побудову інтерактивних карток з візуалізацією місць інтересу, здійснити моніторинг персоналу в режимі реального часу. Завдяки використанню системи ритейлерам простіше підвищити продуктивність праці співробітників та значно збільшити лояльність покупців до торгової точки.

Охорона здоров'я. За рахунок того, що сигнали UWB не взаємодіють один з одним та іншими радіочастотними складовими, технологія може успішно використовуватися для створення стійких на заваді рішень. Так, у охороні здоров'я її застосовують для відстеження місцезнаходження апаратів ШВЛ або рентгенообладнання. Також вона може бути задіяна для швидкого пошуку та визначення розташування будь-яких медичних активів, у тому числі інвалідних візків або дорогого обладнання.

Логістика та складування. Впровадження UWB технології в інфраструктуру складів дозволяє ефективніше керувати підприємством. Вона є високо актуальною у відстеженні товарів, інвентарю чи транспортних засобів, особливо у випадках, коли потрібно знати точне місцезнаходження активів. Організації можуть застосовувати систему для аналітики трафіку навантажувачів чи транспорту, контролю персоналу, коригування повсякденних завдань, що забезпечує ефективну оптимізацію бізнес-процесів та допомагає негайно реагувати на позаштатні ситуації[10].

Промисловість. Найбільшого поширення технологія Ultra Wideband знаходить у промисловій сфері. При впровадженні в інфраструктуру заводу вона виконує широкий спектр функцій:

- побудова інтерактивних карток із зонами доступу;
- візуалізація людей та активів на карті;
- відстеження переміщення об'єктів у реальному часі;
- створення оптимальних маршрутів для транспортних засобів;
- попередження про можливе зіткнення транспорту або наїзд на працівників;

- контроль простою спецтехніки;
- відстеження контактів персоналу для підтримання нормативних вимог та підвищення безпеки праці.

Транспорт. Система може стати ефективним рішенням у навігації та позиціонуванні на території аеропортів або залізничних вокзалів. Вона допомагає пасажиром вибудовувати карти транспортного вузла, прокладати маршрути до місць інтересу, простіше орієнтуватися біля. Розміщення міток на устаткуванні дозволяє керівництву контролювати рух техніки. З їхньою допомогою можна визначати точне місцезнаходження самохідних пасажирських трапів, машин супроводу, тягачів, перонних автобусів. Також технологія забезпечує постійне відстеження потоків людей та допомагає уникнути заторів у місцях найбільшого скупчення пасажирів.

Музеї та заходи. У музеях UWB можна використовувати для створення інтелектуального мобільного гіда. Мітки встановлюються на експонати та допомагають відвідувачам швидко знаходити необхідні експозиції. При використанні платформи з'являється можливість моніторити потоки відвідувачів на виставках та різноманітних заходах. Завдяки цьому можна оцінювати успішність проведених подій та грамотно планувати нові. Контроль відвідувачів допомагає підвищувати безпеку, своєчасно знаходити «проблемні» місця та оптимізувати розміщення експонатів з урахуванням інтересів людей.

Протидія поширенню Covid-19. У 2020 році технологія Ultra Wideband зарекомендувала себе для вирішення завдань соціального дистанціювання та контролю за поширенням Covid-19. UWB використовується на пристроях, що носяться (годинник, бейджі та ін.), які при близькій відстані до іншої людини надсилають повідомлення про необхідність збереження дистанції. Також система дозволяє відстежувати контакти і у разі зараження людини, дозволить легко обчислити тих, хто з нею контактував.

2.3 Оптичний бездротовий зв'язок

Оптичний бездротовий зв'язок (OWC) - це форма оптичного зв'язку, в якому для передачі сигналу використовується некероване видиме, інфрачервоне (ІЧ) або ультрафіолетове (УФ) світло.

Системи OWC, що працюють у видимому діапазоні (390-750 нм), зазвичай називають зв'язком у видимому світлі (VLC). У системах VLC використовуються світловипромінюючі діоди (LED), які можуть випромінювати імпульси з дуже високою швидкістю без помітного впливу на світловіддачу та людське око. VLC може використовуватися в широкому спектрі додатків, включаючи бездротові локальні мережі, бездротові персональні мережі та автомобільні мережі. З іншого боку, наземні двоточкові системи OWC, також відомі як оптичні системи вільного простору (FSO), працюють на частотах ближнього ІЧ-діапазону (750-1600 нм).

Ці системи зазвичай використовують лазерні передавачі та пропонують рентабельну прозору для протоколу лінію зв'язку з високими швидкостями передачі даних, тобто 10 Гбіт/с на довжину хвилі, та надають потенційне рішення для вузьких місць у транспортній мережі. Також спостерігається зростання інтересу до ультрафіолетового зв'язку (УФС) внаслідок недавнього прогресу в галузі твердотільних оптичних джерел/детекторів, що працюють у сліпому від сонячного світла УФ-спектрі (200–280 нм)[9].

У цьому так званому глибокому УФ-діапазоні сонячне випромінювання незначне на рівні землі, і це уможливорює створення детекторів рахунку фотонів з приймачами з широким полем огляду, які збільшують енергію, що приймається, з невеликим додатковим фоновим шумом. Такі конструкції особливо корисні для зовнішніх конфігурацій поза зоною прямої видимості для підтримки малопотужного УФ-випромінювання малого радіусу дії, наприклад, бездротових датчиків і однорангових мережах.

Технології бездротового зв'язку поширився і дуже швидко став важливим протягом останніх кількох десятиліть 20-го століття та на початку 21-го століття. Широкомасштабне впровадження радіочастотних технологій стало ключовим чинником поширення бездротових пристроїв і систем. Однак частина електромагнітного спектру, використовувана бездротовими системами, обмежена ємністю, а ліцензії на використання частини спектру дороги. Зі зростанням обсягів бездротового зв'язку з великими обсягами даних попит на радіочастотний спектр перевищує пропозицію, що змушує компанії розглядати варіанти використання інших частин електромагнітного спектра, крім радіочастот.

Оптичний бездротовий зв'язок (OWC) відноситься до передачі в некерованому середовищі поширення з використанням оптичних носіїв: видимого, інфрачервоного (ІЧ) та ультрафіолетового (УФ) випромінювання. Передача сигналів через сигнальні вогні, дим, прапори корабельні і семафорний телеграф можна вважати історичними формами OWC. Сонячне світло також використовувалося передачі сигналів великі відстані з дуже ранніх часів. Найраніше використання сонячного світла для зв'язку приписується древнім грекам і римлянам, які використовували поліровані щити для відправки сигналів, відбиваючи сонячне світло під час битв. У 1810 році Карл Фрідріх Гаус винайшов геліограф, в якому використовується пара дзеркал для направлення сонячного світла, що керується, на віддалену станцію. Хоча оригінальний геліограф був розроблений для геодезичних зйомок, він широко використовувався у військових цілях наприкінці 19 – на початку 20 століття. В 1880 Олександр Грем Белл винайшов фотофон, першу в світі бездротову телефонну систему[9].

Військовий інтерес до фотофонів продовжився і після часів Белла. Наприклад, в 1935 році німецька армія розробила фотофон, в якому як джерело світла використовувалася вольфрамова лампа розжарювання з ІК-фільтром, що передає. Крім того, американські та німецькі військові лабораторії продовжували розробку дугових ламп високого тиску для оптичного зв'язку до 1950-х років. Сучасні OWC використовують як передавачі або лазери, або світловипромінюючі діоди (світлодіоди). У 1962 році MIT Lincoln Labs побудувала експериментальну лінію зв'язку OWC з використанням світловипромінюючого GaAs діода та змогла передавати телевізійні сигнали на відстань 30 миль.

Після винаходу лазера передбачалося, що OWC стане основною областю застосування лазерів і було проведено безліч випробувань з використанням різних типів лазерів і схем модуляції. Проте в цілому результати були розчаровують через велику розбіжність лазерних променів і нездатність впоратися з атмосферними ефектами. З розвитком волоконної оптики з низькими втратами у 1970-х роках вони стали очевидним вибором для оптичної передачі на великі відстані та змістили акцент із систем OWC.

Приклад можливого свердлового OWC у системі міжсупутникового європейського супутника передачі даних (EDRS)

Протягом десятиліть інтерес до OWC в основному обмежувався прихованими військовими програмами та космосом. програми, включаючи міжсупутникові зв'язки та канали далекого космосу. Проникнення OWC на масовий ринок поки що обмежене, за винятком IrDA, який є досить успішним рішенням для бездротової передачі на короткі відстані.

OWC можуть бути різними. потенційно може використовуватися в різноманітних комунікаційних додатках, починаючи від оптичних між'єднань усередині інтегральних схем через зовнішні лінії зв'язку між будинками та закінчуючи супутниковим зв'язком.

Ідея зв'язку OWC між будинками на великій відстані для Skyline

OWC може бути розділена на п'ять категорій залежно від дальності передачі:

1. Ультракоротка відстань: міжкристалічний зв'язок у стеках та щільно упаковані багаточіпові пакети.

2. Короткий діапазон: бездротова мережа для тіла (WBAN) та бездротова персональна мережа (WPAN) програми відповідно до стандарту IEEE 802.15.7, підводний зв'язок.

3. Середня дальність: внутрішня ІЧ та зв'язок у видимому світлі (VLC) для бездротових локальних мереж (WLAN), а також між транспортними засобами та транспортними засобами. -Інфраструктурні комунікації.

4. Далекий діапазон: з'єднання між будинками, також звані оптичним зв'язком у вільному просторі (FSO).

5. Наддальний діапазон: Лазер зв'язок у космосі, особливо для міжсупутникових ліній та створення супутникових угруповань.

2.4 Технологія Spread Spectrum

Розширення спектра (англ. Spread Spectrum) - один із способів підвищення ефективності передачі інформації за допомогою модульованих сигналів через канал з сильними лінійними спотвореннями (згасаннями). Розширення спектра приводить до збільшення бази сигналу.

В існуючих на сьогоднішній день системах для цієї мети використовуються три методи:

- псевдовипадкове перестроювання робочої частоти (англ. FHSS - Frequency Hopping Spread Spectrum). Суть методу полягає в періодичній стрибкоподібній зміні частоти опорного сигналу за певним алгоритмом, відомим приймачу і передавачу. Перевага методу — простота реалізації, недолік — затримка в потоці даних при кожному стрибку. Метод використовується в Bluetooth; GSM;
- розширення спектра методом прямої послідовності (англ. DSSS - Direct Sequence Spread Spectrum). Метод за ефективністю перевершує FHSS, але складніший для реалізації. Суть методу полягає в підвищенні тактової частоти модуляції, при цьому кожному символу переданого повідомлення ставиться у відповідність деяка досить довга псевдовипадкова послідовність. Метод використовується в таких системах як CDMA і системах стандарту IEEE 802.11;
- розширення спектра методом лінійної частотної модуляції (ЛЧМ) (англ. CSS - Chirp Spread Spectrum). Суть методу полягає в перебуванні частоти-носія за лінійним законом. Метод використовується в радіолокації і в деяких радіомодемах.

2.5 Технологія mmWave

5G mmWave - це інноваційна технологія стільникового зв'язку, яка забезпечує доступ до широкої смуги пропускання та пропускної спроможності, доступної в діапазоні частот вище 24 ГГц. Скептики вважали це за неможливе, але тепер міліметрові хвилі 5G використовуються в бездротових екосистемах і продовжують набирати обертів у всьому світі. Наприклад, у Сполучених Штатах всі основні оператори пропонують повний спектр найновіших і найпопулярніших флагманських телефонів міліметрового діапазону 5G та послуг міліметрового діапазону 5G. У Європі майже половина країн Європейського Союзу та Великобританії виділили чи планують виділити спектр міліметрових хвиль для 5G.

Перевага mmWave полягає в тому, що 5G mmWave пропонує найбільш економічний спосіб забезпечити загальнонаціональне покриття 5G. Низька пропускна здатність також допомагає іншим діапазонам дуплексу з тимчасовим поділом (TDD) покращити покриття за рахунок агрегації несучих. Він поєднує

в собі більш високу пропускну спроможність системи з Massive MIMO (кілька входів, кілька виходів), гарне покриття та вже доступний у всьому світі для простого масштабування.

Широка смуга пропускання вище 24 ГГц надає постачальникам послуг чудову можливість пропонувати безпрецедентні пікові швидкості, малу затримку та високу пропускну спроможність. Спектри ширококутового зв'язку 5G або mmWave є цінним ресурсом для спортивних арен, густонаселених міських районів із численними мобільними пристроями та критично важливими послугами.

Якщо структурно, то ці переваги роблять mmWave 5G одним з кращих кандидатів на роль майбутніх доменів мобільного бездротового зв'язку:

- забезпечує більшу пропускну здатність для розміщення більшої кількості передплатників.
- вузька смуга пропускання в міліметровому діапазоні робить її придатною для використання в невеликих стільниках.
- покриття не обмежується лінією прямої видимості, тому що можливий основний шлях розсіювання.
- функція зондування каналу використовується для врахування різних типів втрати частоти міліметрового діапазону, щоб 5G мережі працювали належним чином. Зондування каналу – це вимірювання або оцінка характеристик каналу, які допомагають успішно спроектувати, розробити та розгорнути мережу 5G з необхідними вимогами до якості.
- багато антен мають менші розміри через фізично менший розмір їх антен.
- мережа 5G mmWave підтримує мультигігабітну транспортну мережу на відстані до 400 метрів та стільниковий доступ на відстані до 200–300 метрів.

Смуга високих частот у спектрі вище 24 ГГц може підтримувати широку смугу пропускання та високі швидкості передачі даних, що робить її ідеальною для збільшення пропускну спроможності бездротових мереж. Ці високочастотні смуги часто називають "міліметровими хвилями" через короткі довжини хвиль, які можна виміряти в міліметрах. Діапазон міліметрових хвиль тягнеться до 300 ГГц, але очікується, що 5G використовуватиме діапазон від 24 до 100 ГГц. Діапазони міліметрових хвиль до 100 ГГц можуть підтримувати

смуги частот до 2 ГГц без поєднання діапазонів підвищення пропускної спроможності.

Високочастотний діапазон 5G (міліметрова хвиля також відома як FR2) знаходиться в діапазоні від 24 ГГц до 40 ГГц. Вони забезпечують великий спектр та ємність на найкоротшій відстані. Він також використовує Massive MIMO для збільшення пропускної здатності та розширення покриття. Крім того, він включає сегменти широкого спектру і низьку затримку, доступні в 5G. Використання нової смуги частот 5G буде об'єднано з існуючою смушкою частот, яку нині використовують постачальники послуг. Комбінований ефект поєднання низької, середньої та високої пропускної здатності важливий для покращення пропускної здатності та охоплення.

Приклади використання 5G mmWave:

- Фіксований бездротовий доступ до Інтернету: гігабітні швидкості передачі даних 5G mmWave можуть повністю замінити різні технології доступу до Інтернету гібридними оптоволоконними та бездротовими мережами, що з'єднують абонентів.
- зовнішня мала сота для міського/приміського середовища: багатообіцяючий сценарій розгортання 5G mmWaves полягає у збільшенні пропускної спроможності у громадських місцях та місцях з високими вимогами.
- критично важливий додаток для керування: безпілотні автомобілі, зв'язок між транспортними засобами та зв'язок з дронами забезпечують аналогічні сценарії розгортання для 5G mmWave з прогнозованими затримками мережі менше 1 мілісекунди.
- внутрішні стільники з точками доступу: в офісах, торгових центрах та інших приміщеннях потрібні мікростільники високої щільності 5G mmWave. Ці невеликі стільники можуть підтримувати швидкість завантаження до 20 Гбіт/с, забезпечуючи безперешкодний доступ до хмарних даних та можливість підтримки кількох програм та різних форм розваг та мультимедіа.
- інтернет речей: потенційно він охоплює програми для розумного будинку, безпеку, управління енергоспоживанням, логістику та відстеження, охорону здоров'я тощо.

3. АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ ТЕХНОЛОГІЙ OFDM І MIMO

Системи, в яких використовується кілька передавальних і приймальних антен, широко відомі як системи з кількома входами і багатьма виходами (MIMO). Ця технологія бездротової мережі значно покращує радіус дії та пропускну здатність системи бездротового зв'язку. Системи MIMO створюють нові виклики для цифрової обробки сигналів, оскільки алгоритми обробки стають більш складними з кількома антенами на обох кінцях каналу зв'язку.

3.1 MIMO

Системи MIMO конструктивно досліджують багатошляхове розповсюдження з використанням різних шляхів передачі до приймача. Ці шляхи можна використовувати для забезпечення надлишковості переданих даних, таким чином підвищуючи надійність передачі (виграш від різноманітності) або збільшуючи кількість одночасно переданих потоків даних і збільшуючи швидкість передачі даних системи (виграш від мультиплексування). Кілька просторових сигнатур також можна

використовувати для боротьби з перешкодами в системі (зменшення перешкод). Загальна модель системи MIMO показана на рис. 3.1.

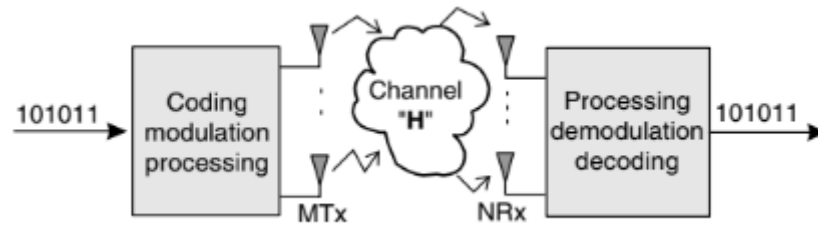


Рисунок 3.1 – Загальна блок-схема множинного входу вихід системи бездротового зв'язку

Фундаментальна стаття з теорії інформації Фоскіні та Ганса з Lucent Technologies показує, що пропускна здатність цих систем може зростати лінійно з кількістю передавальних антен, якщо кількість приймальних антен більше або дорівнює кількості передавальних антен. Оскільки збільшення ємності означає можливість швидшого зв'язку, це неперевершене підвищення ємності порівняно зі звичайними системами з однією антеною викликало величезний інтерес до методів MIMO, що призвело до розробки багатьох форм систем MIMO[4].

Традиційні системи бездротового зв'язку з однією передавальною та однією приймальною антеною позначаються як системи з одним входом і одним виходом (SISO), тоді як системи з однією передавальною та декількома приймальними антенами позначаються як системи з одним входом і багатьма виходами (SIMO), а системи з кількома передавальними та одна приймальна антена називається системами з кількома входами і одним виходом (MISO). Звичайні інтелектуальні антенні системи мають лише передавальну або лише приймальну сторону, оснащені декількома антенами, тому вони належать до однієї з останніх двох категорій. Зазвичай базова станція має антенну решітку, оскільки місця достатньо, а також дешевше встановити кілька антен на базових станціях, ніж встановлювати їх на кожній мобільній станції. Строго кажучи, лише системи з декількома антенами на обох кінцях можна класифікувати як системи MIMO. Хоча іноді можна зазначити, що системи SIMO та MISO

називаються системами MIMO. У термінології розумних антен системи SIMO та MISO також називаються антенними решітками.

3.1.1 Потужність систем MIMO

З математичної точки зору зв'язок MIMO виконується через матричний, а не просто векторний канал, тому можна одночасно передавати кілька паралельних потоків сигналів в одній смузі частот і таким чином підвищувати спектральну ефективність. Ця техніка називається просторовим мультиплексуванням і показана на рис. 3.2.

Потік даних кодується векторним кодувальником і передається одночасно M передавачами. Радіоканал MIMO вносить спотворення в сигнал. Приймач має N антен. Кожна антена приймає сигнали від усіх M передавальних антен, і, отже, отримані сигнали виявляють міжканальні перешкоди. Отримані сигнали перетворюються в базову смугу і дискретизуються один раз на інтервал символу. Блок обробки MIMO оцінює передані потоки даних із дискретизованих сигналів базової смуги. Векторний декодер — це паралельно-послідовний перетворювач, який об'єднує паралельні вхідні потоки даних в один вихідний потік даних[4].

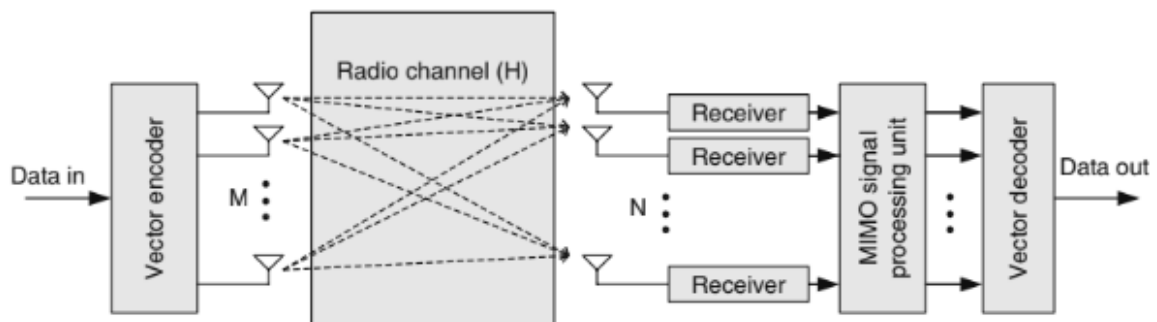


Рисунок 3.2 – Блок-схема системи MIMO, яка використовує просторове мультиплексування для максимізації пропускної здатності

У системі з M передавальними та N приймальними антенами існує $M \cdot N$ підканалів між передавачем і приймачем. Загалом, кожен підканал демонструє вибіркоче завмирання, і, отже, він моделюється як лінійний дискретний фільтр

кінцевої імпульсної характеристики (FIR) із комплексними коефіцієнтами. У разі рівного завмирання сигнал у кожному підканалі лише ослаблюється та зсувається по фазі через різний час поширення між кожною приймальною та передавальною антеною. Підканал зводиться до одного відводного КІХ-фільтра, тобто до одного комплексного коефіцієнта. Коли канал постійний протягом усього часового інтервалу, канал є квазістатичним. Для дослідження пропускної спроможності ми припустили, що радіоканал є квазістатичним і рівномірним[4].

У вищезгаданому випадку прийнятий сигнал на j -й приймальній антені можна виразити як:

$$y_j = \sum_{i=1}^M h_{ij} x_i + n_j, \quad (1)$$

де x_i - переданий сигнал від i -ї антени, а y_j - отриманий сигнал від j -ї антени. Змінна n_j позначає вибірки кругово-симетричного комплексного гаусового шуму з дисперсією σ_n^2 на j -му приймачі. Канал із завмиранням описується як сума складних шляхів h_{ij} між приймальною та передавальною антенами. Комплексний коефіцієнт посилення h_{ij} відповідає розподілу Гауса. Матрична форма рівняння 1 це:

$$y = Hx + n, \quad (2)$$

де y — вектор-стовпець прийнятих сигналів, H — матриця каналу, x — вектор-стовпець переданого сигналу, а n — вектор-стовпець адитивного білого шуму Гауса.

Пропускна здатність системи залежить тільки від потужності переданого сигналу, шумів і характеристик каналу. Пропускна здатність каналу для детермінованого каналу з рівним завмиранням може бути виражена як:

$$C = \log_2 \left[\det \left(I + \frac{\rho}{M} H H^* \right) \right], \quad (3)$$

Де $\rho = P/\sigma_n^2$ – кумулятивна потужність, що передається всіма антенами, а σ_n^2 – потужність шуму на кожній приймальній антені. H — це матриця, що описує квазістатичний відгук каналу, а верхній індекс * позначає транспонований кон'югат матриці каналу H [5].

У крайньому випадку, коли ми можемо припустити некорельовані шляхи, усі власні значення добутку $H H^*$ відмінні від нуля та приблизно рівні. Тоді ємність виражається як:

$$C = \sum_{i=1}^M \log_2 \left(1 + \frac{\lambda_i}{M} \rho \right) \approx A_{\min} \log_2 \left(1 + \frac{N}{A_{\min}} \rho \right), \quad (4)$$

де $A_{\min} = \min(M, N)$

Обсяг доступної ємності в ідеалізованому каналі МІМО збільшується лінійно з A_{\min} без збільшення потужності передачі. Якщо канал є часовим варіантом, наведений вище вираз справедливий лише для одного екземпляра каналу. Telatar [5] розширив вираз для ергодичної (середньої) ємності у випадковому змінному в часі каналі Гауса. Він виявив, що ергодична пропускна здатність зростає лінійно зі збільшенням кількості приймальних антен для великої кількості передавальних антен. Однак, якщо кількість приймальних і передавальних антен порівнянна, користь від додавання однієї антени буде набагато меншою.

Збільшення пропускної здатності системи МІМО може бути досягнуто шляхом мультиплексування потоків даних у паралельні підканали (канали) в тому самому діапазоні частот. Труби можна розглядати як самостійні радіоканали. Вектори-стовпці матриці H каналу з плоским завмиранням зазвичай неортогональні. Однак за допомогою сингулярного розкладання (SVD) матрицю каналу можна розкласти на діагональну матрицю $\Lambda^{1/2}$ і дві унітарні матриці U і V .

Діагональні елементи $\Lambda^{1/2}$ насправді є невід'ємними квадратними коренями з власних значень HH^* . Кількість ненульових власних значень $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k$ HH^* дорівнює рангу матриці каналу, а також кількості незалежних підканалів. Глобальну пропускну здатність можна виразити як суму потужностей підканалів. Фактично, сингулярні значення матриці каналів визначають коефіцієнти посилення незалежних паралельних каналів.

Знаючи коефіцієнт посилення незалежних каналів передавача, ми можемо визначити оптимальний розподіл потужності на кожній передавальній антені для досягнення максимальної пропускної здатності. Пропускна здатність каналу МІМО визначається теоремою про заповнення водою:

$$C = \sum_i^K \log_2 \left(1 + \lambda_i \frac{P_i}{\sigma^2/n} \right), \quad (5)$$

де P_i - потужність, виділена каналу i , розрахована шляхом розподілу потужності заповнення водою[5].

Якщо матриця каналу на передавачі невідома, для розрахунку пропускної здатності каналу передбачається рівномірний розподіл потужності між передавачами:

$$C = \sum_{i=1}^K \log_2 \left(1 + \frac{\lambda_i}{M} \rho \right). \quad (6)$$

Якщо немає інформації про стан каналу на стороні передачі, пропускна здатність описується рівнянням. 5, тоді як пропускна здатність із ідеальним знанням каналу на стороні передачі може бути розрахована згідно з рівнянням. 6. У каналі ідеального багатого розсіювання (Релея) знання на стороні передачі є корисними при низькому SNR, тоді як при високому SNR немає суттєвої різниці в рівняннях пропускної здатності. 5 і 6.

Однак знання каналу на стороні передачі може допомогти значно підвищити надійність практичних систем, оскільки ми не повинні забувати, що пропускна здатність є лише теоретичною верхньою межею, яка може бути досягнута лише за допомогою кодів нескінченної довжини.

Аналіз пропускної здатності різних реалістичних середовищ розповсюдження має значний вплив на проектування систем зв'язку. Було показано, що для каналів низького рангу або низького SNR використання кількох передавальних і приймальних антен має набагато нижчий коефіцієнт посилення. В каналах низького рангу пропускна здатність зростає лише логарифмічно зі збільшенням кількості приймальних антен. У цих випадках рекомендується використання методів різноманітності.

3.1.2 Переваги мультиантенних систем

Найважливішими перевагами багатоантенних систем є посилення решітки, зменшення перешкод і посилення рознесення. Системи MIMO можуть використовувати не тільки переваги одночасної передачі та прийому з декількома антенами, але вони також пропонують щось нове порівняно з традиційними системами антенних решіток, тобто посилення мультиплексування. Однак необхідно знайти компроміс між рознесенням і мультиплексуванням, оскільки неможливо одночасно використати як

максимальний приріст рознесення, так і максимальний приріст мультиплексування[6]. В ідеалі адаптивні системи адаптували б використання кількох антен до поточних умов і, таким чином, одночасно збільшували як пропускну здатність, так і надійність системи зв'язку.

3.1.3 Адаптивні системи MIMO

Системи зв'язку можуть адаптувати пропускну здатність до поточних умов каналу, якщо інформація про канал доступна на стороні передачі. Це відомо як методи адаптивного кодування-модуляції (АСМ). У системі MIMO АСМ можна розширити до вибору режиму роботи. Загальновідомо, що адаптивні системи зв'язку є більш надійними та стійкими.

Знати стан каналу в передавача набагато складніше, ніж знати стан каналу в приймачі, де канал можна оцінити за послідовністю навчання. Необхідна інформація зворотного зв'язку від приймача до передавача, за винятком випадків взаємного каналу, як-от дуплексних систем з розділенням часу, де однакові параметри можуть використовуватися для обох сторін, але для цього потрібне точно відкаліброване обладнання. У літературі було запропоновано кілька схем адаптації, про одну з них уже згадувалося – формування променя. Оскільки CSI в системах MIMO є досить значним, доцільно вибрати лише з набору попередньо визначених режимів роботи. В системах просторового мультиплексування кількість просторово мультиплексованих потоків можна вибрати на основі SNR і кореляції між антенами. Вибір передавальної антени можна виконати, щоб вибрати набір передавальних антен, які будуть використовуватися для відповідності певним умовам.

В адаптивних системах MIMO було б ідеально мати можливість досягти будь-якого компромісу між швидкістю та надійністю. Приклад такого коду, який включає V-BLAST і STBC ортогонального дизайну як особливі випадки, був запропонований Hassibi [17] і називається кодом лінійної дисперсії (LDC). LDC можна використовувати для будь-якої кількості передавальних і приймальних антен і декодувати за допомогою алгоритмів, подібних до V-BLAST.

Найважливішою властивістю НРС є те, що вони задовольняють інформаційно-теоретичний критерій оптимальності.

3.1.4 Застосування систем МІМО

Як показано, системи МІМО можуть значно підвищити надійність і/або пропускну здатність систем зв'язку, але доведеться зіткнутися з багатьма проблемами. Пропускна здатність у реальному середовищі значно нижча, ніж пропускна здатність, отримана на початку цього розділу, оскільки антени не завжди некорельовані, оцінка каналу не завжди точна, можливий доплерівський зсув частоти та можуть виникнути проблеми із синхронізацією.

Важливо визначити, скільки антен потрібно використовувати і наскільки великою має бути відстань між ними. Обмеженнями є фізичні розміри обладнання, можливості обробки та, у випадку мобільних станцій, енергоспоживання. Ціна обладнання зростає зі збільшенням кількості використовуваних антен, оскільки потрібні додаткові підсилювачі, фільтри та обчислювальна потужність; тому краще використовувати декілька антен лише на стороні базової станції.

З іншого боку, базові станції розташовані вище, ніж абонентські станції; отже, властивості розповсюдження каналу менш сприятливі для експлуатації систем МІМО. Щоб забезпечити задовільний рівень незалежності, вони повинні бути розділені приблизно на десять довжин хвиль сигналу. Наприклад, на частоті 2 ГГц ця відстань становить приблизно 1,5 м.

Для абонентських станцій, які зазвичай розташовані досить низько і в багатьох випадках немає прямої видимості базової станції, зазвичай достатньо відстані в половину довжини хвилі.

Очікується, що в більшості сучасних стандартів бездротового зв'язку будуть увімкнені методи використання кількох антен, принаймні як додаткова функція[11].

3.2 OFDM

У низхідному каналі застосовується принцип мультиплексування з ортогональним частотним поділом сигналів (OFDM). Він полягає в тому, що

весь доступний частотний діапазон ділиться на кілька тисяч піднесучих, за якими дані передаються паралельно. Ортогональність частот забезпечує відсутність межсимвольної інтерференції. За рахунок поділу каналу на вузькі смуги сигнал, який передається загасає плавно, що дозволяє відмовитися від використання складних частотних коректорів. Системи зв'язку, засновані на OFDM, повинні бути строго лінійними, щоб не порушувалася ортогональність переданих сигналів.

Кожному передавачу виділяються певні смуги спектра так, щоб знизити рівень шумів і уникнути виникнення інтерференційних перешкод. Вихідний потік послідовних даних перетворюється в паралельний, причому швидкість передачі в кожному каналі зменшується пропорційно кількості каналів. У результаті швидкість передачі всього потоку не змінюється, проте збільшується час передачі кожного біта, за рахунок чого зменшується ймовірність появи помилки і спотворень.

Інформаційні символи модулюються та комбінуються в передавачі блоком зворотнього швидкого перетворення Фур'є (ШПФ). У приймачі виробляється відновлення потоку даних (пряме ШПФ).

Зазвичай у каналі присутня тимчасова дисперсія - частини переданого сигналу приймаються з різними затримками через багатопроміневість поширення і відображень. У результаті ортогональність частково втрачається, з'являється інтерференція як між бітами всередині символу, так і між символами. Для запобігання перекриття в початок OFDM-символу вставляється циклічний префікс T_g , що містить кінцеві біти попереднього символу. При цьому загальна довжина символу дорівнює $T_s = T_u + T_g$, де T_u – «корисна» довжина OFDM-символу.

Переваги технології OFDM:

1. Нечутливість до багатопроміневісті поширення сигналу та слабка інтерференція в каналі.
2. Відсутність інтерференції між осередками мережі.
3. Гнучке використання частотного спектру.
4. Ефективне використання спектра за рахунок ортогональності піднесучих.
5. Оптимальна швидкість передачі даних для всіх абонентів осередку (для передачі вибирається найбільш підходяща піднесуча зі слабким завмиранням).

3.3 Особливості формування сигнально-кодових конструкцій на основі технології IEEE 802.11

Серед сучасних тенденцій розвитку інфокомунікацій переважають такі напрямки як 5G, когнітивні мережі, біг-дейта, оптичні мережі, грін-комунікації, телекомунікаційні системи терагерцового діапазону, розподільчі транспортні мережі мобільного зв'язку тощо. Побудова значної частки пристроїв безпроводового зв'язку в межах цих тенденцій здійснюється на основі концепції SDR - Software-defined radio. Відомими на сьогоднішній день прикладами реалізації концепції SDR є пристрої для мереж GSM, UMTS, Wi-Fi, WiMAX тощо [18]. Важливо відзначити, що області застосування технології Wi-Fi надзвичайно активно розвиваються, причому пристрої мереж Wi-Fi здатні працювати як в режимі точки доступу для покриття певної зони, так і в режимі ретрансляції сигналів в mesh-мережі. Це дозволяє створювати повноцінні інфокомунікаційні мережі. Задачею будь-якої телекомунікаційної системи є досягнення в рамках виділених ресурсів каналу зв'язку високої швидкості та необхідної достовірності передачі інформації. Одним з відомих засобів реалізації цього завдання є звернення до багатопозиційних видів модуляції та завадостійкого кодування. Комбінацію певного виду багатопозиційної модуляції та завадостійкого кодування із визначеними параметрами завадостійкості називають сигнально-ковою конструкцією (СКК). Якщо пристрій зв'язку обирає відповідну структуру СКК автоматично за відповідною програмою та алгоритмом, слід вважати такий пристрій відповідним концепції SDR. Опису доцільних для цього критеріїв та алгоритмів і реалізації концепції створення програмно-визначених радіосистем терагерцового діапазону на основі технології Wi-Fi[13]. Сучасні телекомунікаційні системи використовують багато видів сигнальних конструкцій, і при цьому вибір певної сигнальної конструкції має вибиратися заздалегідь для використання, або ж на основі алгоритму для динамічного вибору виду сигнальної конструкції на основі певних критеріїв.

Актуальною є задача вибору оптимальних СКК для досягнення максимальної швидкості передачі із задоволенням необхідної достовірності передачі у заданому каналі та виділених ресурсах каналу зв'язку. В той же час, актуальним є порівняння оптимальних СКК із рекомендованими в стандартах

Wi-Fi та надання оцінки щодо доречності вибору тієї чи іншої СКК. Як показав огляд доступних Wi-Fi пристроїв на телекомунікаційному ринку, виробники не розголошують алгоритми і критерії для вибору виду сигнальної конструкції, що реалізовані в пристроях, і тому важко зазначити, наскільки раціональні в цих пристроях способи вибору сигнальної конструкції та наскільки вони ефективні.(рис. 3.3)

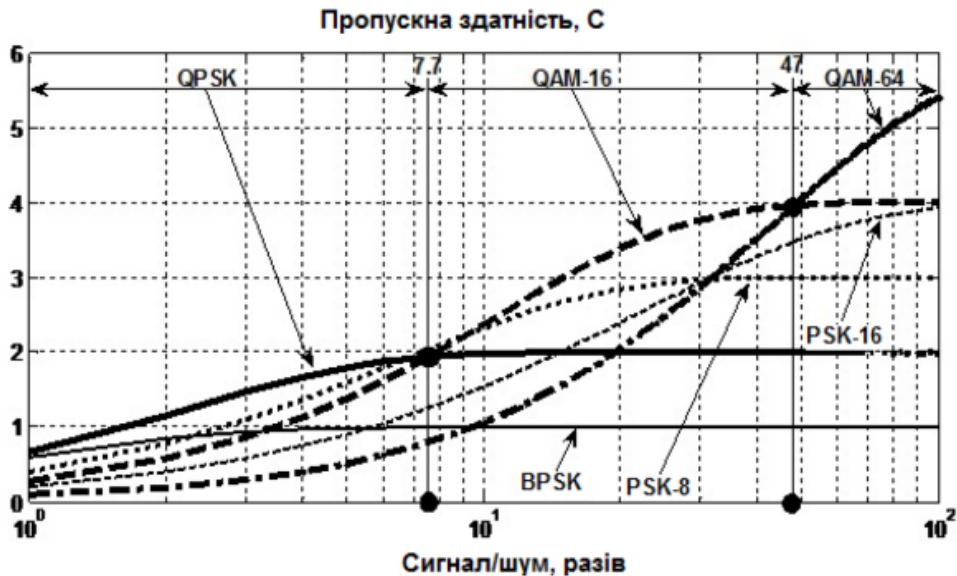


Рисунок 3.3 – Залежність пропускної здатності каналу зв'язку від відношення рівня сигналу до рівня шуму для різних видів багатопозиційної модуляції

Згідно з рис. 3.3, виходячи з набору модуляцій BPSK, QPSK, PSK-8, PSK-16, QAM16, QAM-64, доцільно використовувати наступні види модуляцій за критерієм максимальної пропускної здатності в залежності від відношення рівня енергії сигналу до спектральної потужності шуму в точці прийому (табл. 3.1):

Таблиця 3.1 Граничні значення відношення сигнал/шум для вибраних оптимальних видів багатопозиційної модуляції

Відношення сигнал/шум (h^2), разів	Оптимальний вид багатопозиційної модуляції за критерієм максимальної пропускної здатності
$0 < h^2 < 7,7$	QPSK

	$7,7 < h_2 < 47$	QAM-16
	$47 < h_2 < 100$	QAM-64

Для оцінки ефективності вибору СКК пропонується використовувати шкалу ефективності використання ресурсів каналу зв'язку, де показниками є: енергетична β , частотна γ та інформаційна η (рис.3.4) ефективність. Дослідження показують, що використання СКК дає значний вигравш у порівнянні із випадком при використанні модуляції низького рівня без завадостійкого кодування. Також рекомендується використання способу розподілу частотного ресурсу OFDM, завдяки якому ефективніше вдається розподіляти доступ до ресурсів каналу зв'язку, а також працювати в умовах багатопроменевого розповсюдження.

Як показує огляд продукції провідних виробників телекомунікаційного обладнання Wi-Fi, наприклад, Mikrotik чи Ubiquity, в документації на обладнання не описуються методи адаптивного перемикання видів модуляції та параметрів завадостійкого кодування, а також умови для здійснення такого перемикання видів СКК. Проте існують рекомендації в стандартах 802.11 a/b/g/n/ac щодо рівнів сигналу, за яких рекомендується перемикати вид СКК на основі значень потужності сигналу на вході приймача (табл. 3.2).

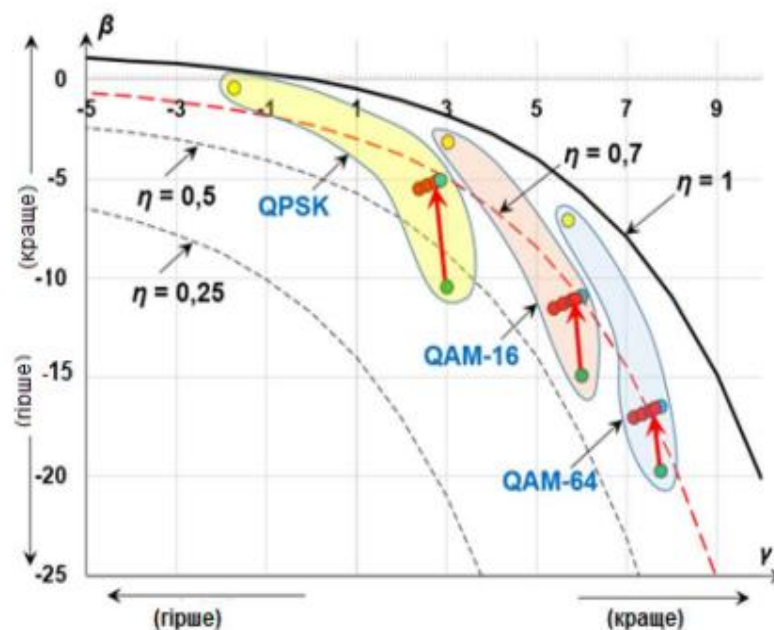


Рисунок 3.4 – Шкала ефективності використання ресурсів каналу зв'язку

Таблиця 3.2 – Швидкість передачі даних при різних типах модуляції

Індекс сигнально-кодової конструкції MCS	Модуляція/відносна швидкість кодування	Число каналів	Швидкість передачі даних ((Мбіт/с))		Чутливість приймача, дБм	
			20 МГц	40 МГц	20 МГц	40 МГц
0	BPSK/1:2	1	6,5	13,5	-82	-79
1	QPSK/1:2	1	13	27	-79	-76
2	QPSK/3:4	1	19,5	40,5	-77	-74
3	16-QAM/1:2	1	26	54	-74	-71
4	16-QAM/3:4	1	39	81	-70	-67
5	64-QAM/2:3	1	52	108	-66	-63
6	64-QAM/3:4	1	58,5	121,5	-65	-62
7	64-QAM/5:6	1	65	135	-64	-61
8	BPSK/1:2	2	13	27	-82	-79
9	QPSK/1:2	2	26	54	-79	-76
10	QPSK/3:4	2	39	81	-77	-74
11	16-QAM/1:2	2	52	108	-74	-71
12	16-QAM/3:4	2	78	162	-70	-67

Продовження таблиці 3.2 – Швидкість передачі даних при різних типах модуляції

Індекс сигнально-кодової конструкції MCS	Модуляція/відносна швидкість кодування	Число каналів	Швидкість передачі даних ((Мбіт/с))		Чутливість приймача, дБм	
			20 МГц	40 МГц	20 МГц	40 МГц
13	64-QAM/2:3	2	104	216	-66	-63
14	64-QAM/3:4	2	117	243	-65	-62
15	64-QAM/5:6	2	130	270	-64	-61
16	BPSK/1:2	3	19,5	40,5	-82	-79
17	QPSK/1:2	3	39	81	-79	-76
18	QPSK/3:4	3	58,5	121,5	-77	-74
19	16-QAM/1:2	3	78	162	-74	-71
20	16-QAM/3:4	3	117	243	-70	-67
21	64-QAM/2:3	3	156	324	-66	-63
22	64-QAM/3:4	3	175,5	364,5	-65	-62

23	64-QAM/5:6	3	195	405	-64	-61
----	------------	---	-----	-----	-----	-----

Розрахунок швидкості передачі даних можна здійснити за допомогою формули:

$$R_b = \frac{r_c \sum_{k=0}^{K-1} \log_2(M_k)}{T_s} . \quad (7)$$

При однакових модуляціях на усіх носіях вона має вигляд:

$$R_b = r_c * \frac{K(\log_2 M)}{T_s} . \quad (8)$$

Як приклад: розглянемо стандарт WLAN IEEE 802.11n. У цій системі OFDM використовується з $K = 117$, $f\Delta = 312,5$ кГц і $T_s = 4$ мкс (нормальний). З 117 піднесучих 3 центральні піднесучі встановлені на нуль, 108 піднесучих використовуються для передачі даних, а 6 піднесучих використовуються як пілотні. У випадку $r_c = 5/6$ і 64-QAM на кожній із 108 піднесучих інформаційна швидкість дорівнює 135 Мбіт/с. Крім того, для цієї схеми $W_{\text{OFDM}} \approx 36,6$ МГц (номінальна смуга пропускання 40 МГц)[12].

Маємо що для 64-QAM/5:6 для 40 МГц то частоти каналів в 1. Розраховується це за формулою (8), де $r_c = 5/6$; $K=108$; $M=64$; $T_s=4$ мкс.

$$R_b = \left(\frac{5}{6}\right) * \frac{108(\log_2 64)}{4} = 135 \text{ Мбіт/с}$$

Для 64-QAM/3:4 для 40 МГц:

$$R_b = \left(\frac{3}{4}\right) * \frac{108(\log_2 64)}{4} = 121.5 \text{ Мбіт/с}$$

Для 64-QAM/2:3 для 20 МГц:

$$R_b = \left(\frac{2}{3}\right) * \frac{52(\log_2 64)}{4} = 52 \text{ Мбіт/с}$$

Для 16-QAM/1:2 для 40 МГц:

$$R_b = \left(\frac{1}{2}\right) * \frac{108(\log_2 16)}{4} = 54 \text{ Мбіт/с}$$

Для 16-QAM/3:4 для 20 МГц:

$$R_b = \left(\frac{3}{4}\right) * \frac{52(\log_2 16)}{4} = 39 \text{ Мбіт/с}$$

Для BPSK/1:2 для 20 МГц то частоти каналів в 2. Розраховується це за формулою (8), де $r_c = 1/2$; $K = 52$; $M = 2$; $T_s = 4/2 = 2$ мкс.:

$$R_b = \left(\frac{1}{2}\right) * \frac{52(\log_2 2)}{2} = 13 \text{ Мбіт/с}$$

Для QPSK/3:4 для 40 МГц то частоти каналів в 3. Розрахується це за формулою (8), де $r_c = 3/4$; $K = 108$; $M = 4$; $T_s = 4/3 = 1.333$ мкс.:

$$R_b = \left(\frac{3}{4}\right) * \frac{108(\log_2 4)}{1.333} = 121.5 \text{ Мбіт/с}$$

4. МЕТОДИ ПРОЕКТУВАННЯ МЕРЕЖЕВОЇ ТОПОЛОГІЇ ТА ПРИКЛАД ПРОЕКТУВАННЯ БЕЗДРОВОЇ ЛОКАЛЬНОЇ МЕРЕЖІ

4.1 Методологія проектування мережі «згори-вниз» та «знизу-вгору»

Спочатку розглянемо спадний підхід до проектування мережі.

Спадний підхід, який починається вимогами організації та може завершуватися розглядом всіх можливих технологій. Перед переходом до етапу вправдження проекти мережі тестуються з використанням пілотної або прототипної мережі.

Підхід проектування мережі «згори-вниз» наведений на рис. 4.1.

Дизайн зверху-вниз просто означає що потрібно розробку починати з верхнього рівня моделі OSI та згодом просуватися нижче. Спадний дизайн адаптує фізичну інфраструктуру та мережу до потреб мережевих додатків. При

низхідному підході до проектуванні мережі, технології та мережеві пристрої вибираються після проходження аналізу до вимог додатків.

Щоб завершити проектування мережі спадним підходом потрібно дотримуватися наступного порядку:

- проектування за еталонною моделлю OSI;
- аналіз вимог до додатків і організації;
- визначення вимог для перших рівнів починаючи згори (додаток, презентація, сеанс);
- визначення інфраструктури для нижніх рівнів OSI (транспорт, мережа, канал передачі даних, фізичний рівень);
- збір даних про мережу.

Процес проектування починається з додатків і переходить в мережу. Потім додаються логічні елементи зі специфікою[14].

Підхід «знизу-вгору» зводиться к наступному. При підході знизу-вгору окремі елементи системи вказуються детально у самому початку проектування Після чого ці базові елементи зв'язуються між собою, утворюючи великі підсистеми, які згодом, зв'язуються, іноді на більшості рівнях, поки не буде сформована повна система для верхнього рівня. Цей метод проектування мережі заснований на попередньому досвіді розробників що і дозволяє доволі швидко знайти рішення, але це може привести до неправильного дизайну. Як правило, організаційні вимоги не включені.



Рисунок 4.1 – Підхід «згори-вниз» проектування архітектури мережі

Враховуючи складність проектування мережі, CCDA повинні розуміти мережеві моделі, які використовуються для спрощення процесу проектування. Ієрархічна мережева модель була однією з перших моделей Cisco, яка розділила мережу на рівні ядра, розподілу та доступу.

Модель корпоративної архітектури Cisco забезпечує функціональний модульний підхід до проектування мережі. Окрім ієрархії, модулі використовуються для організації ферм серверів, керування мережею, мережами кампусу, глобальними мережами та Інтернетом.

4.2 Методи мережевого моделювання

Моделювання поділяється на фізичне і математичне. Перевага фізичного моделювання перед повномасштабним експериментом очевидна через економію часу та грошей, але воно має більш обмежене застосування порівняно з математичним моделюванням.

Під математичним моделюванням розуміють спосіб дослідження різноманітних процесів шляхом вивчення явищ, які мають різний фізичний зміст, але описуються однаковими математичними співвідношеннями. Важливо, що при дослідженні будь-якого процесу методом математичного моделювання спочатку необхідно побудувати його математичний опис, тобто математичну модель. Під математичною моделлю реальної системи розуміють набір співвідношень (наприклад, формул, рівнянь, нерівностей, логічних умов, операторів тощо), які визначають характеристики станів системи (а через них і вихідні характеристики} залежно від його параметри, вхідні характеристики, початкові умови та час.

По-перше, розглянемо аналітичне моделювання, наприклад, на основі систем масового обслуговування.

В аналітичному моделюванні вивчення процесів або об'єктів замінюється побудовою їх математичних моделей і дослідженням цих моделей. В основі методу лежить ідентичність форми рівнянь і однозначний зв'язок між змінними в рівняннях, що описують оригінал і модель. Оскільки події, що відбуваються в локальних комп'ютерних мережах, мають випадковий характер, для їх вивчення найбільш придатними є ймовірнісні математичні моделі теорії масового обслуговування.

Аналітична модель мережі - це набір математичних співвідношень, які пов'язують вхідні та вихідні характеристики мережі. При виведенні таких коефіцієнтів необхідно знехтувати деякими другорядними деталями або обставинами.

Телекомунікаційну мережу з деяким спрощенням можна представити як набір процесорів (вузлів), з'єднаних між собою каналами зв'язку. Повідомлення, яке надійшло до вузла, чекає деякий час, перш ніж воно буде оброблено. При цьому може формуватися черга таких повідомлень, які мають обробку.

Імітаційне моделювання — це метод, який дозволяє будувати моделі, які описують процеси, як вони мали б відбуватися в реальності. Така модель може бути «втрачена» в часі як для одного тесту, так і для даного її набору. При цьому результати визначатимуться випадковістю процесів. На основі цих даних можна отримати досить стабільну статистику.

Імітаційне моделювання можна розглядати як різновид експериментальних випробувань.

На відміну від прототипу системи, вона:

- менш затратні;
- має вміння проводити експерименти, змінюючи ключові параметри;
- динамічний (може описати поведінку в часі).

Розглянемо види імітаційного моделювання.

Моделювання функціонування використовується переважно на етапі розробки концепції для формування вимог до призначення та вимог до показників функціонування, а також для дослідження альтернативних концепцій і вибору найкращої концепції.

Моделювання ефективності системи є основним інструментом при прийнятті рішень щодо вибору найкращої концепції системи. Для оцінки ефективності також необхідно спроектувати і побудувати модель операційного середовища. Обидві моделі повинні дозволяти варіації параметрів для вивчення як різних операційних параметрів, так і різних можливостей системи.

Моделювання умов застосування орієнтовано на розробку режимів роботи системи. На таких моделях розробляються статичні та динамічні характеристики компонентів і суттєві особливості середовища. Оператор імітаційної моделі може поставити експерименти «що, якщо», щоб знайти найкраще рішення. Фізичне моделювання створено для вивчення фізичної

поведінки елементів системи. Застосовується переважно на етапі інженерної розробки системи. Програмно-апаратне забезпечення (Hardware-in-the-loop Simulation) - вид фізичного моделювання, коли апаратне забезпечення системи використовується в поєднанні з комп'ютерним моделюванням.

Симуляція навколишнього середовища – це різновид фізичного моделювання, коли середовище моделюється не як система, а як елементи середовища.

Існує багато мережевих симуляторів даних, таких як Cisco Packet Tracer, GNS, NetSim і т. д. Було вирішено проектувати мережу в симуляторі Cisco Packet Tracer, завдяки тому, що він має більш звичний і зручний інтерфейс, більш зрозумілу взаємодію з фізичні пристрої, використовуючи такі поняття, як місто, будівля, стелаж тощо. Користувач може моделювати побудову не лише логічної, а й фізичної моделі мережі і, отже, набути навичок проектування, уміння транслювати це програмне забезпечення. продукт практично на будь-яку мову, необхідну користувачеві, покращений образ мережевого обладнання з можливістю додавання / видалення різних компонентів.

4.3 Приклад проектування бездротової локальної мережі

Бездротова мережа, яку планується впровадити, базуватиметься на стандарті IEEE 802.11n.

Мережа буде керуватися сервером за допомогою комутатора. Оскільки комутатор і точки доступу поширюють сигнал сферично, комутатор планується встановити в першу. Схема бездротової мережі наведена на рис. 4.2

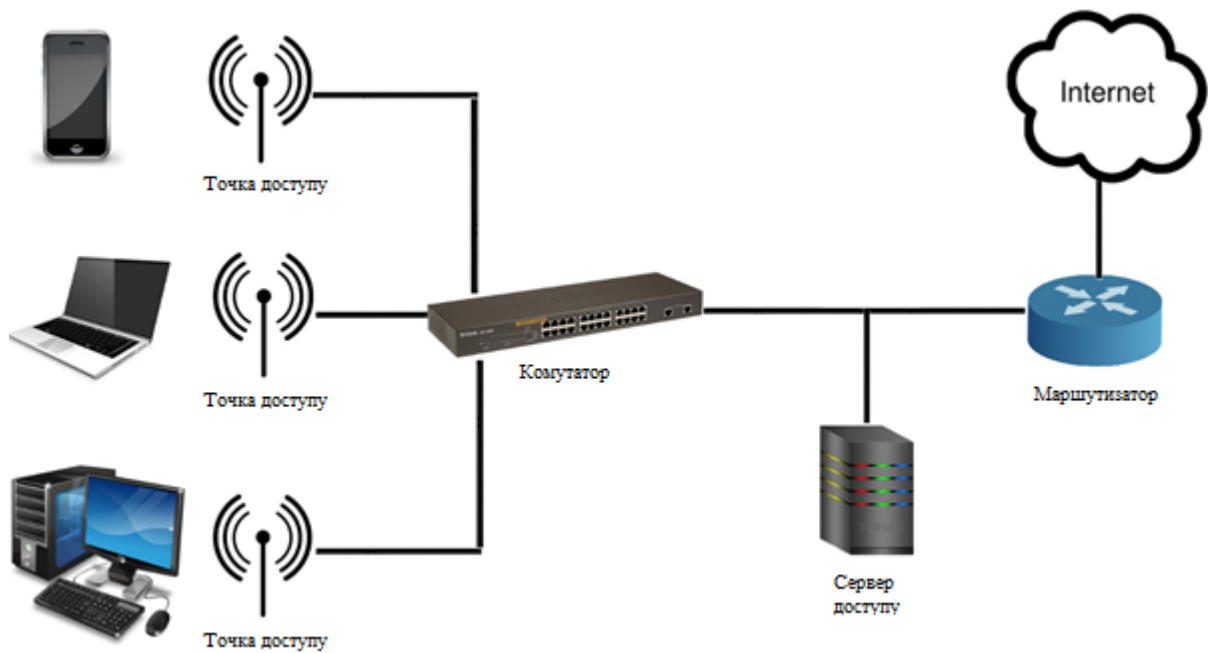


Рисунок 4.2 – Схема бездротової мережі

Використовуємо Cisco Packet Tracer [19]

Налаштовуємо ПК

Маску підмережі виставимо на 255.255.255.0.

DNS Server виставляємо на 20.0.1.3.

Налаштований ПК в першому відділі показаний на рис. 4.3, а в другому відділі - на рис. 4.4

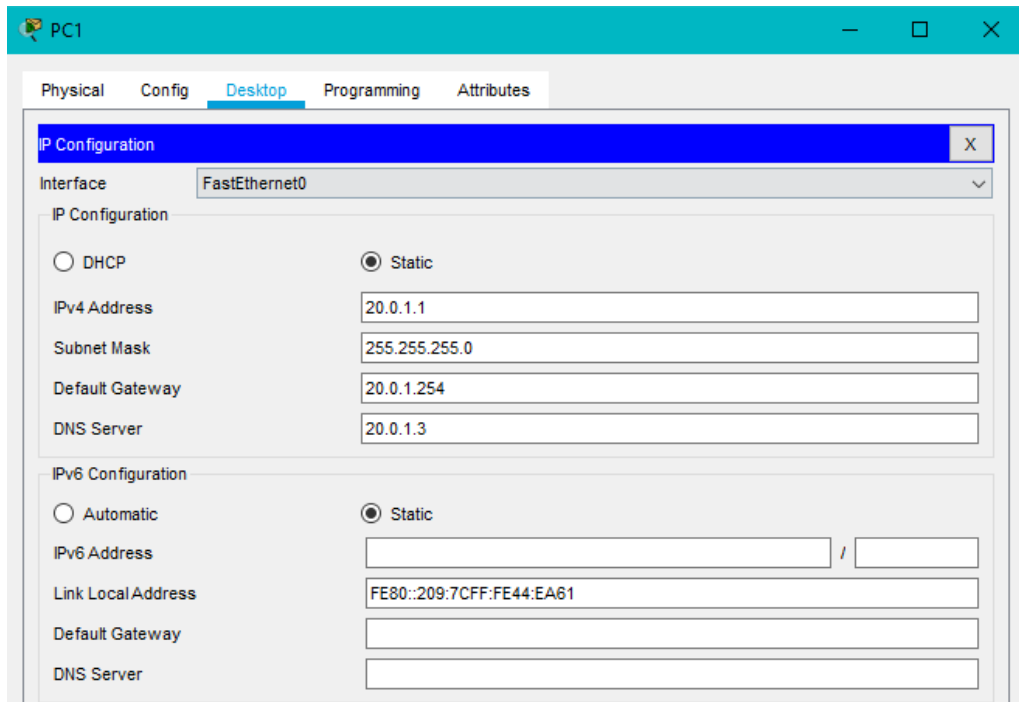


Рисунок 4.3 – Налаштований правильно ПК в першому відділі

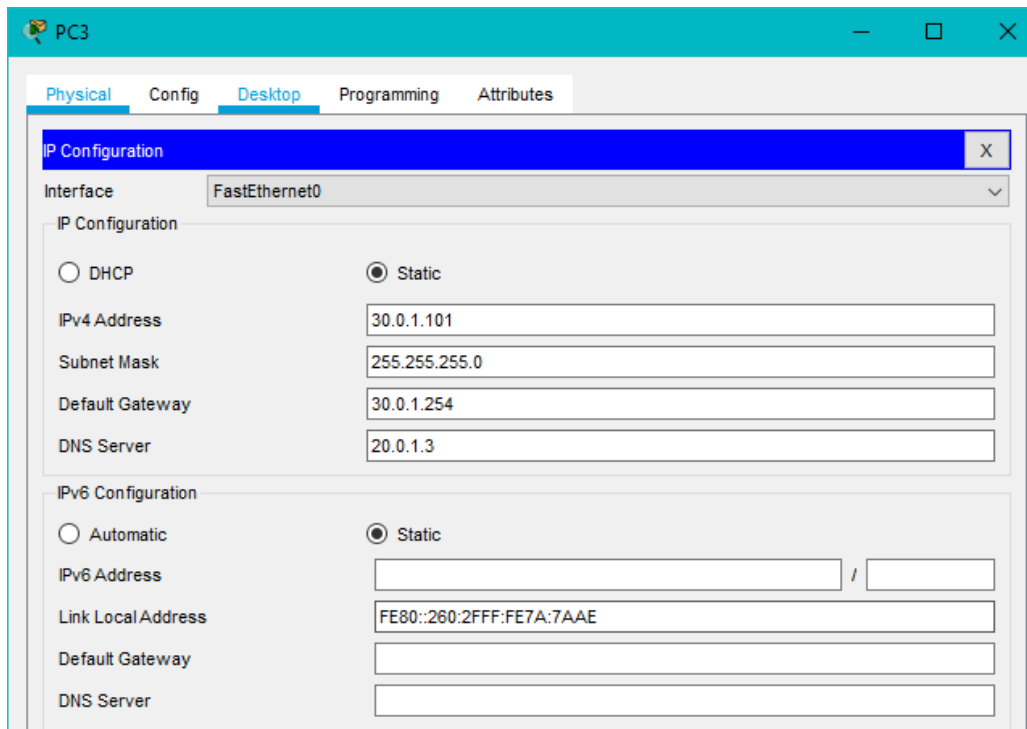


Рисунок 4.4 – Налаштований правильно ПК у другому відділі

На сервері виставимо налаштування, які представлені на рис 4.5

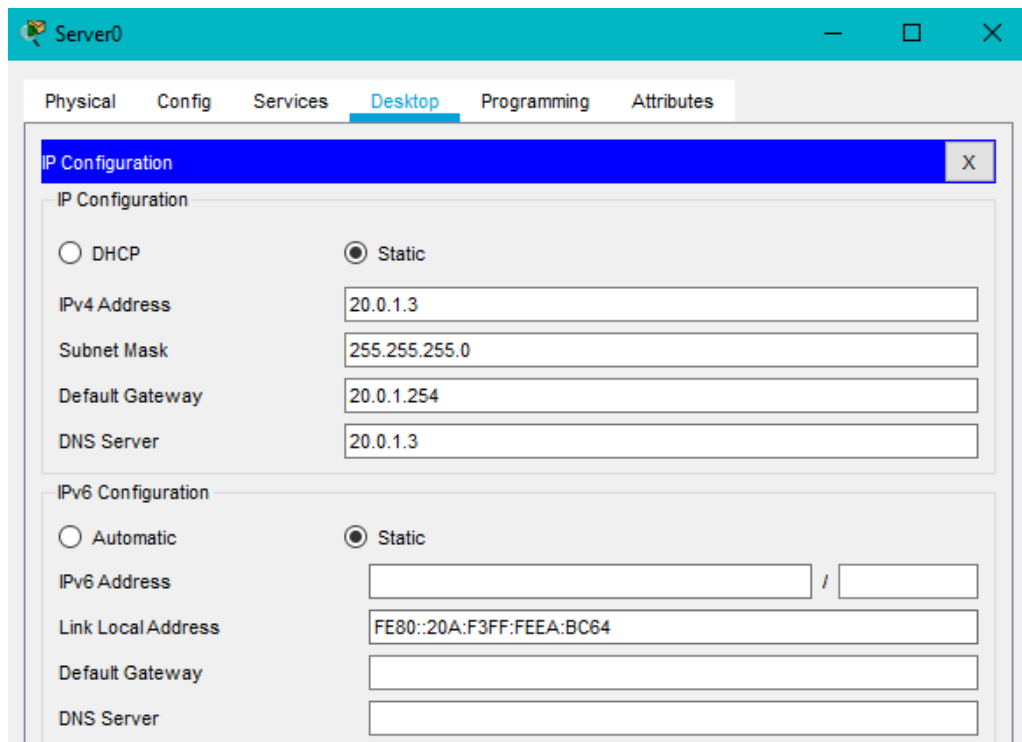


Рисунок 4.5 – Приклад настройки параметрів серверу

Продовжимо налаштування ПК. Перший IP – 30.0.1.101, а останній – 30.0.1.110. Звертаємо увагу на необхідність встановити Default Gateway (шлюз за замовчуванням для взаємодії VLAN) на 30.0.1.254 на всіх ПК, а DNS-сервер встановити на 20.0.1.3.

Тепер необхідно з'єднати кабелі і об'єднати обладнання різних відділів. Підключаємо ПК витою парою. У всіх комутаторах підключаємо кабелі до FastEthernet за годинниковою стрілкою. У роутері будемо підключатися до гігабітної розетки, попередньо включивши її. Варіант підключення обладнання представлений на рис. 4.6.

Щоб підключити комутатор до ПК, виберіть тип підключення *Copper Straight-Through* у розділі *Connections*, клацніть лівою кнопкою миші на першому комутаторі та виберіть номер порту, до якого буде підключено наш ПК, а потім виберіть ПК, який підключено за вказаним підключенням і натисніть на ньому ліву кнопку миші, вибравши підключення *FastEthernet*.

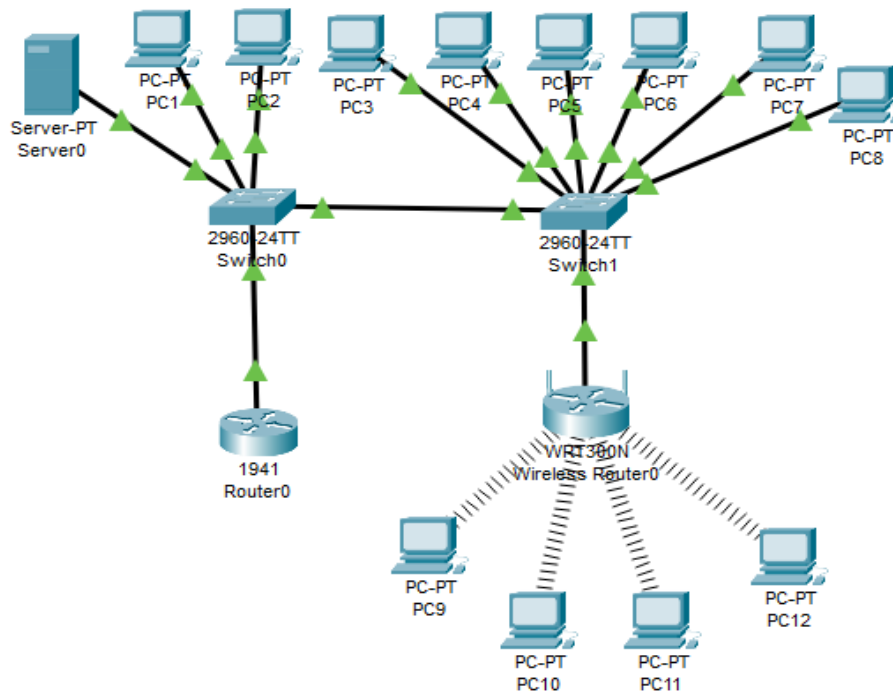


Рисунок 4.6 – Варіант з'єднання обладнання

Далі знову виберіть тип підключення Copper Straight-Through, виберіть наступний порт на комутаторі (FastEthernet 0/3) та підключіть його до наступного ПК. За заданим алгоритмом налаштовуємо решту комп'ютерів всіх відділів. З'єднання доцільно організувати так як у таблицях (див. таблиці 4.1 і 4.2).

Таблиця 4.1 – Характеристика зв'язків першого комутатора (Switch 0)

Тип інтерфейсу Комутатора Switch 0	Тип пристрою	Інтерфейс пристрою	Номер vlan та ім'я	IP адреса
FastEthernet 0/1	Switch 2	Fast Ethernet 0/1	vlan 10, office1	
FastEthernet 0/2	Router 1941	FastEthernet	trunk, office2	40.0.1.1
FastEthernet 0/3	Switch 1	FastEthernet	vlan 30, office3	
FastEthernet 0/4	PC1	FastEthernet	vlan 20, office2	20.0.1.1
FastEthernet 0/5	PC3	FastEthernet	vlan 20, office2	20.0.1.2
FastEthernet 0/6	DNS сервер	FastEthernet	vlan 20, office2	20.0.1.3

Таблиця 4.2 – Характеристика зв'язків другого комутатора (Switch 1)

Тип інтерфейсу Комутатора Switch 1	Тип пристрою	Інтерфейс пристрою	Номер vlan та ім'я	IP адреса
FastEthernet 0/1	Switch 0	Fast Ethernet 0/3	vlan 20, office2	
FastEthernet 0/2	Router WRT300N	Gigabit	vlan 30, office3	30.0.1.253
FastEthernet 0/3	PC1	FastEthernet	vlan 30, office3	30.0.1.101
FastEthernet 0/4	PC2	FastEthernet	vlan 30, office3	30.0.1.102
FastEthernet 0/5	PC3	FastEthernet	vlan 30, office3	30.0.1.103
FastEthernet 0/6	PC4	FastEthernet	vlan 30, office3	30.0.1.104
FastEthernet 0/7	PC5	FastEthernet	vlan 30, office3	30.0.1.105
FastEthernet 0/8	PC6	FastEthernet	vlan 30, office3	30.0.1.106

Зверніть увагу на шлюз за замовчуванням для ПК (шлюз за замовчуванням для взаємодії VLAN) 30.0.1.254, а також встановіть DNS-сервер на 20.0.1.3. Перевіряємо підключення до ПК за допомогою команди ping.

Тепер переходимо до налаштування маршрутизатора Cisco WRT300N. Встановіть такі параметри на маршрутизаторі Cisco WRT300N:

IP-адреса 30.0.1.253

Маска 255.255.255.0

Початкова IP-адреса - 30.0.1.100

Максимальна кількість користувачів – 20

Статичний DNS 1 - 20.0.1.3

Назва мережі – Cisco2107

Трансляція SSID – вимкнено

Режим безпеки – WPA2-Personal

Парольна фраза – junior17

Налаштування бездротових ПК. Встановлюємо ім'я мережі (SSID) Cisco2107 і пароль WPA2-Personal junior17 (див. рис. 4.7).

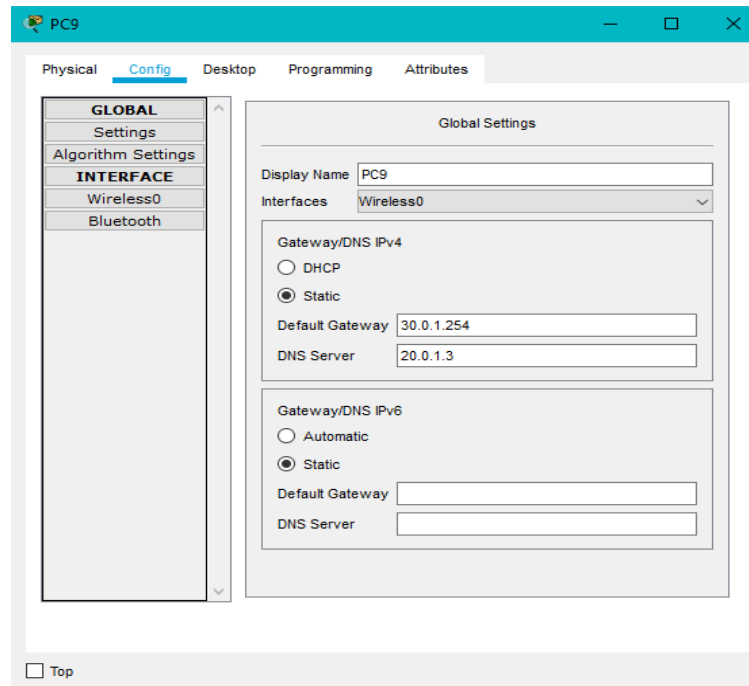


Рисунок 4.7 –Налаштувань одного з ПК

На комп'ютерах PC9-PC12 перевіряємо заміну роз'єму RJ-45 на антену Wi-Fi і призначення всієї адресної інформації (Робочий стіл, вкладка IP Configuration). Далі увімкніть Wi-Fi на кожному ПК (вкладка «Робочий стіл», «Бездротовий зв'язок ПК»). ПК підключено до роутера.

Далі ми виконаємо пінгування ПК для office3.

Зверніть увагу, що між різними офісними приміщеннями немає комп'ютерного зв'язку. Налаштовуємо роутер office2 Cisco 1941 та потім виконуємо пінгування з другого офісного ПК третього офісу.

З'явився комп'ютерний зв'язок між різними офісними приміщеннями.

Для авторизації в мережі передбачається використовувати веб-авторизацію на базі SartivePortal, а також ключ WPA/PSK2 для доступу до бездротової мережі.

Доступ до мережі на основі ключа забезпечить безпеку мережі від сторонніх осіб, а веб-авторизація дозволить однозначно ідентифікувати кожного підключеного клієнта. Відвідувачам офісного центру можна надавати тимчасово згенеровані паролі або використовувати той самий пароль за замовчуванням.

Перевагою веб-авторизації перед усіма іншими є її доступність на великій кількості пристроїв, будь то ноутбуки, КПК або смартфони.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі була розглянута класифікація технологій безпроводних мереж передачі інформації (БМПП). Було виявлено, що найпопулярнішою є безпроводних локальні мережах (WLAN - wireless local areanetwork), тобто з Wi-Fi мережі, тому було розглянуто основні параметри та принципи роботи мережі, що в свою чергу привело до висновку:

- Основне призначення таких систем - розгортання безпроводних мереж усередині приміщень, хоча є випадки їх використання на відкритих майданчиках. Базова послуга - доступ в Internet або корпоративну мережу.

Ще було розглянуто чотири топології мереж безпроводного доступу WiFi. А також було ознайомлено з стандартами безпроводних локальних мереж Wi-Fi, та був проведений аналіз деяких з них.

Був проведений аналіз сучасних технологій побудови бездротових локальних мереж таких як: бездротові оптичні, розширений спектр, OFDM, MIMO, UWB, mmWave.

Був проведений аналіз можливостей технологій OFDM і MIMO та особливості формування сигнально-кодових конструкцій на основі технології IEEE 802.11.

Після чого виявилось, що:

- Стандарт IEEE 802.11n є найбільш вживаним і найпопулярнішим.

Він має безліч переваг над своїми попередниками, і саме тому застосовується для організації доступу до мережі в жилих домах та на відкритій території.

Було розглянуто основний механізм та рівні доступу до мережі та класи на цих рівнях. Вивчена інформація допоможе зрозуміти основні принципи роботи цих мереж і визначити правильний підхід до подальшого розкриття теми.

У технічній частині проекту розглянуто варіант побудови мережі бездротового доступу з встановленням роутеру.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Щербаков В. Б. БЕЗОПАСНОСТЬ БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ: СТАНДАРТ IEEE 802.11 / В. Б. Щербаков, С. А. Ермаков. – Москва: РадиоСофт, 2010. – 255 с.
2. Берлин А.Н. Телекоммуникационные сети и устройства: Учебное пособие / А.Н. Берлин — М.: Интернет-Университет Информационных Технологий; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. — 319 с.:
3. Стандарт локальных сетей ieee 802.11 wi fi. [Электронный ресурс]. – 2018. – Режим доступа до ресурсу: <https://beloshop.ru/uk/ethernetstandard-ieee-80211-wi-fi/>
4. Sreco Plevel, Saso Tomazic, Tornaz Javornik, Gorazd Kandus MIMO: Wireless Communications. 2008,10.
5. Telatar, E. Capacity of multi-antenna Gaussian channels. Eur. Trans. Telecommun. 1999, 10, 585–596.
6. Zheng, L.; Tse, D. Diversity and multiplexing: a fundamental tradeoff in multiple antenna channels. IEEE Trans. Inf. Theory. 2003, 49 (5), 1073–1096.
7. Сергей Пахомов, Стандарт беспроводной связи IEEE 802.11n / КомпьютерПресс, 8, 2007.
8. Tanenbaum A. Computer Networks / A. Tanenbaum, D. Wetherall. – New Jersey: Pearson, 2012. – 959 с. – (5th Edition).
9. <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsta.2020.0051>
10. <https://nvgn.ru/blog/uwb-vs-wi-fi-kakaya-tekhnologiya-luchshe-dlya-pozicionirovaniya-vnutri-pomeshchenij/>
11. Уривський Л.А., Т.М.Наритник, Осипчук С.О. Особливості формування сигнально-кодкових конструкцій на основі технології Wi-Fi для побудови телекомунікаційних систем терагерцового діапазону / Електронне наукове фахове видання – журнал «Проблеми телекомунікацій». – 2015. - No2(17). – С.37-53.

12. Göran Lindell An introduction to OFDM Lecture notes in the course Digital communications, advanced course (ETTN01), Version 161115
13. Кравчук С.О., Наритник Т.М. Телекомунікаційні системи терагерцового діапазону. Монографія. – Житомир : ФОП «Євенок О.О.», 2015
14. Бруно А. CCDA 640-864. Официальное руководство по сертификации / А. Бруно, С. Джордан – Инди.: Cisco Press, 2011. – 690 с.
15. Хасібі, Б.; Вікало Г. Про алгоритм декодування сфери. I. Очікувана складність. IEEE Trans. Сигінальний процес. 2005, 53 (8), 2806–2818.
16. Плевел, С.; Яворник Т.; Кандус, Г.; Jelovcan, I. Алгоритм вибору схеми передачі для систем просторового мультиплексування МІМО з лінійним виявленням. WSEAS Trans. Комун. 2006, 5 (6), 1169–1176.
17. Хасібі, Б.; Hochwald, В. Лінійні у просторі та часі коди з високою швидкістю. IEEE Trans. Інф. Теорія. 2002, 48, 1804–1824.
18. Хоттінен, А.; Куусела, М.; Хугл, К.; Чжан, Дж.; Raghathan, В. Промислові обійми розумних антен і МІМО. IEEE Wirel. Комун. 2006, 13 (4), 8–16.
19. Cisco Packet Tracer [Електронний ресурс] – <https://www.netacad.com/courses/packet-tracer>