

## АНОТАЦІЯ

В даній бакалаврській дипломній роботі проводиться дослідження технології MIMO в мережах стандарту 802.11 Wi-Fi. В технічній частині роботи розглядаються основні напрямки та характеристики цієї технології, частоти, швидкість та інші параметри передачі даних стандарту 802.11. Також визначається яким саме чином вдається підвищити швидкість передачі і розширити зону покриття. Проводяться розрахунки безпроводного каналу передачі стандарту 802.11ac та моделювання MIMO системи за допомогою методу zero forcing (ZF).

## ANNOTATION

In this bachelor thesis work studies the MIMO technology in 802.11Wi-Fi networks. In the technical part examines the main trends and characteristics of this technology, the frequency, speed and other parametes. There is also determines ways what can improve the speed and expand coverage too. Calculations wireless transmission channel 802.11as standard and MIMO simulation system using the method of zero forcing (ZF).

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ACK (AC Knowledge) – короткий кадр підтвердження.

AP (Access Point) – точка доступу.

BSS (Basic Service Set) – базова зона обслуговування.

ССК (complementary code keying) – модуляція комплементарним кодом.

CSMA / CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) - множинний доступ з виявленням несучої і запобіганням колізій.

DCF (Distributed Coordination Function) - функції управління розподілені між усіма пристроями мережі.

DS (Distribution System) – розподільча система.

IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) - інститут інженерів з електротехніки та електроніки.

ISO (International Organization for Standardization) - Міжнародна організація зі стандартизації.

LLS (Logical Link Control) - підрівень управління логічного ланки.

L-LTF (Legacy Long Training Field) - довга підстроювальна послідовність.

L-SIG (Legacy OFDM Signal field) – сигнал.

L-STF (Legacy Short Training Field) - коротка підстроювальна послідовність.

MAC (Media Access Control) - управління доступом до носія.

MCS (Modulation and Coding Scheme) – кодово-модуляційна схема.

MIMO (Multiple Input Multiple Output) - множина входів множина виходів.

MISO (Multiple Input Single Output) - множина входів єдиний вихід.

MU-MIMO (Multi-user MIMO) – багато множинний доступ.

OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) - мультиплексування з ортогональним частотним розділенням каналів.

OSI (Open Systems Interconnection) - модель взаємодії відкритих систем.

PBCH (Physical Broadcast Channel) – фізичний канал передачі мовної інформації.

PCF (Point Coordination Function) – функції управління, зосереджені в одній певній точці доступу.

PCFICH (Physical Control Format Indicator Channel) - фізичний канал передачі формату, який використовується для каналу PDCCH.

PDCCH (Physical Downlink Control Channel) - фізичний канал керування "вниз".

PHICH (Physical Hybrid ARQ Indicator Channel) – фізичний канал для передачі HARQ ACK/NACK в відповідь при передачі інформації "вверх".

SISO (Single Input Single Output) – єдиний вхід єдиний вихід.

S / N (signal/ noise) – сигнал/шум.

SU-MIMO (Single User-MIMO) – одно-користувацький MIMO.

STBC (space-time block codes) - просторово-часові блокові коди.

TCP/IP (Transmission Control Protocol / Internet Protocol) - протокол керування передачею / міжмережевий протокол.

QAM (Quadrature Amplitude Modulation) - квадратурно-амплітудна модуляція.

VHT (Very High Throughput) - дуже велика пропускна здатність.

Wi-Fi (Wireless Fidelity) - загальноживана назва для стандарту IEEE 802.11 передачі цифрових потоків даних по радіоканалах.

ZF (Zero Forcing) – нульовий примус.

WLAN (wireless local area network) - безпроводні локальні мережі.

БМПП – безпроводні мережі передачі інформації.

ЛЗ – лінія зв'язку.

## ВСТУП

Зростання об'ємів пакетного мультимедійного трафіка в системах мобільного зв'язку вимагає більш надійної підтримки високих швидкостей передачі даних, тому на сучасному етапі розвитку телекомунікаційних систем все більшого поширення набувають безпроводні технології передачі інформації. Виділяють кілька рівнів бездротових мереж зв'язку: персональні, локальні, мережі масштабу міста і глобальні мережі.

Вибір даної теми бакалаврської роботи є актуальним, адже вони мають ряд переваг, таких як [1] :

- необмежене переміщення в області покриття безпроводних локальних мереж, зберігаючи доступ до корпоративних інформаційних ресурсів;
- інсталяція безпроводної локальної мережі у випадках, коли встановлення звичайної кабельної мережі є ускладненим або взагалі неможливим процесом;
- створення мобільних пересувних локальних відкритих мереж;
- висока швидкість розгортання безпроводних локальних мереж;
- близька до нуля вартість експлуатації безпроводних локальних мереж;
- об'єднання територіально віддалених комп'ютерів.

Найпоширенішим стандартом безпроводної передачі інформації є стандарт 802.11 Wi-Fi, а саме три основні його специфікації: 802.11b(до 11 Мбіт/с), 802.11g(до 54 Мбіт/с) та 802.11n (до 300 Мбіт/с). Однією з останніх розробок робочої групи IEEE 802.11 став стандарт IEEE 802.11ac . Даний стандарт покликаний не тільки знайти способи збільшення пропускної здатності WLAN, а й надати користувачам більше можливостей у порівнянні з попередньою версією стандарту - IEEE 802.11n. В результаті розробникам вдалося підвищити швидкість передачі і розширити зону покриття за допомогою технології MIMO, завдяки збільшенню ширини каналу в два і чотири рази, а також суттєвих змін на рівні управління доступом до середовища передачі (MAC).

Тому метою виконання бакалаврської роботи є дослідження технології MIMO в мережах стандарту 802.11ac Wi-Fi. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- виконати аналіз безпроводних мереж сімейства стандартів 802.11 Wi-Fi;
- виконати аналіз технології MIMO у стандарті 802.11ac;
- виконати дослідження побудови мережі стандарту 802.11 і навести структурні схеми приймально-передавального пристрою 802.11;

- виконати розрахунки основних параметрів безпроводного каналу стандарту 802.11ac;

- виконати моделювання технології MIMO для стандарту 802.11ac.

Для вирішення цих завдань бакалаврська дипломна робота була структурно розділена на три розділи. Перший розділ присвячений аналізу безпроводних мереж сімейства стандартів 802.11x Wi-Fi. У другому розділі виконується аналіз технології MIMO у стандарті 802.11ac. У третьому розділі проводяться розрахунки основних параметрів безпроводного каналу стандарту 802.11ac, моделювання MIMO системи та опис проведення експерименту. А також виконаний четвертий розділ з охорони праці.

Об'єктом дослідження в бакалаврській дипломній роботі є методи та засоби підвищення швидкості передачі і розширення зони покриття.

Предметом дослідження в бакалаврській дипломній роботі є передача інформації по безпроводному каналі стандарту 802.11ac із використанням технології MIMO.

# 1 АНАЛІЗ БЕЗПРОВІДНИХ МЕРЕЖ СІМЕЙСТВА СТАНДАРТІВ 802.11x Wi-Fi

## 1.1 Аналіз розвитку безпроводних мереж

Комітет зі стандартів IEEE 802 сформував робочу групу з стандартів для безпроводних локальних мереж 802.11 в 1990 році. Ця група зайнялася розробкою загального стандарту для радіообладнання і мереж, що працюють на частоті 2,4 ГГц, зі швидкостями доступу 1 і 2 Мбіт/с. Роботи зі створення стандарту були завершені через 7 років, і в червні 1997 року була ратифікована перша специфікація 802.11. Стандарт IEEE 802.11 був першим стандартом для продуктів WLAN від незалежної міжнародної організації, що розробляє більшість стандартів для проводних мереж. Однак на той час закладена спочатку швидкість передачі даних в безпроводній мережі вже не задовольняла потреби користувачів. Для того щоб зробити технологію Wireless LAN популярною, дешевою, а головне, такою, що задовольняє сучасним жорстким вимогам бізнес- додатків, розробники були змушені створити новий стандарт.

У вересні 1999 року IEEE ратифікував розширення попереднього 7 стандарту. Назване IEEE 802.11b (також відоме, як 802.11 High rate), воно визначає стандарт для продуктів безпроводних мереж, які працюють на швидкості 11 Mbps (подібно Ethernet), що дозволяє успішно застосовувати ці пристрої в великих організаціях. Сумісність продуктів різних виробників гарантується незалежною організацією, яка називається Wireless Ethernet Compatibility Alliance (WECA). Ця організація була створена лідерами індустрії безпроводного зв'язку в 1999 році. В даний час членами WECA є більше 80 компаній, в тому числі такі відомі виробники, як Cisco, Lucent, 3Com, IBM, Intel, Apple, Compaq, Dell, Fujitsu, Siemens, Sony, AMD і ін. [2].

Потреба в безпроводному доступі до локальних мереж росте по мірі збільшення числа мобільних пристроїв, таких як ноутбуки і PDA, а також із зростанням бажання користувачів бути підключеними до мережі без необхідності підмикання шнура до комп'ютера.

В даний час особливо швидко розвивається така галузь телекомунікаційної індустрії обладнання і послуг як безпроводні мережі передачі інформації (БМІІ). При цьому, на ринку пропонується досить широкий спектр обладнання безпроводного доступу, в номенклатурі і призначення якого необізаному користувачеві розібратися не так вже й легко, від найпростішого обладнання для організації локального безпроводного інтерфейсу (Bluetooth, Home RF, UWB) до обладнання для

доступу в глобальні мережі і побудови безпроводних комп'ютерних мереж (Wi-Fi, WiMAX, DECT, GSM). В цілому існують три основних напрямки застосування безпроводних мереж: робота в замкнутому просторі (офіс, виставковий зал і т. п.), з'єднання віддалених локальних мереж (або віддалених сегментів локальної мережі) і побудова територіально розподілених безпроводних мереж передачі інформації. Для з'єднання віддалених локальних мереж (або сильно розподілених в просторі сегментів локальної мережі) може використовуватися обладнання з спрямованими антенами, спеціальними підсилювачами і великою висотою розміщення антен.

Існують чотири типи БМПП (рис. 1.1) [3]:

а) Безпроводні персональні мережі (WPAN - wireless personal area network) - мережі з радіусом дії від сантиметрів до кількох метрів (до 10-15 м).

б) Безпроводні локальні мережі (WLAN - wireless local area network) мають на увазі взаємну віддаленість пристроїв на відстані до сотень метрів і потужності передавачів до 100 мВт.

в) Безпроводні міські мережі (WMAN - Wireless Metropolitan Area Network) – безпроводні мережі для організації зв'язку в масштабах міста.

г) Безпроводні глобальні мережі WWAN. Глобальні безпроводні мережі передачі інформації представлені в основному супутниковими системами зв'язку.

Мережа WLAN - вид локальної обчислювальної мережі (LAN), використовує для зв'язку і передачі даних між вузлами високочастотні радіохвилі, а не кабельні з'єднання. Це гнучка система передачі даних, яка застосовується як розширення - чи альтернатива – кабельної локальної мережі всередині однієї будівлі або в межах певної території.

Переваги використання WLAN замість провідної локальної мережі:

1) Підвищення продуктивності. Мережа WLAN забезпечує не прив'язану до окремих приміщень мережу і доступ в Інтернет. Мережа WLAN дає користувачам можливість переміщатися по території підприємства або організації, залишаючись підключеними до мережі. Просту і швидко побудову локальної мережі. Не потрібно тягнути і зміцнювати кабелі.

2) Гнучкість установки. Безпроводну мережу можна побудувати там, де не можна протягнути кабелі; технологія WLAN полегшує тимчасову установку мережі і її переміщення. Зниження вартості експлуатації. Безпроводні мережі знижують вартість установки, оскільки не потрібні кабельні з'єднання (в результаті досягається економія).

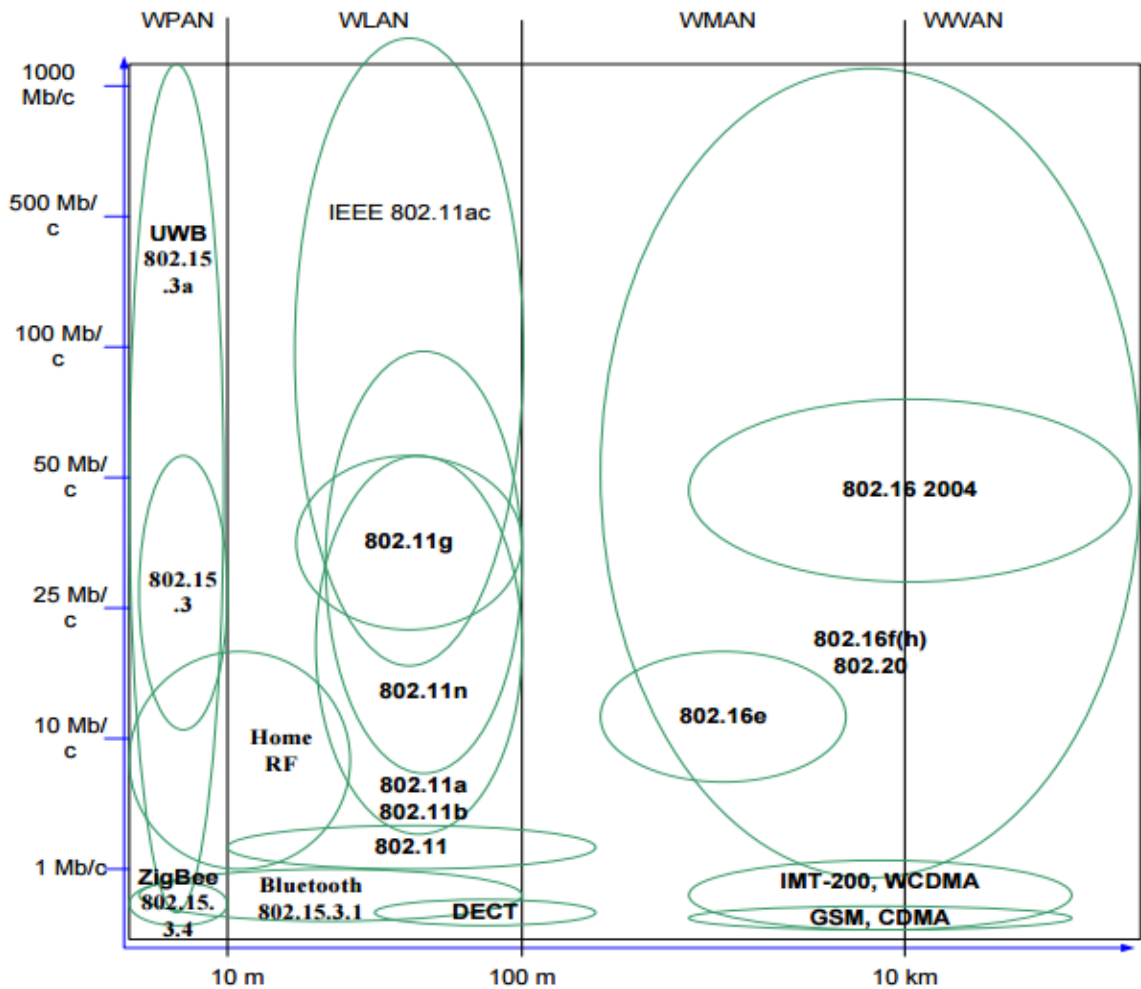


Рисунок 1.1 – Класифікація технологій безпроводних мереж передачі інформації

3) Масштабованість. Розширення і реконфігурація мережі для WLAN не є складним завданням: призначені для користувача пристрої можна інтегрувати в мережу, встановивши на них безпроводні мережеві адаптери.

4) Сумісність. Різні марки сумісних клієнтських і мережевих пристроїв будуть взаємодіяти між собою.

Безпроводні системи передачі даних будуються на моделі взаємодії відкритих систем (OSI) і класифікуються за:

- способом обробки первинної інформації (аналогові та цифрові);
- шириною смуги передачі (вузькосмугові, широкосмугові, надширокосмугові);
- локалізацією абонентів (рухомі та стаціонарні);
- географічною протяжністю (персональні, локальні, регіональні, глобальні);
- видом інформації, що передається (голос, відео, передача даних).



Створення системи наземного радіозв'язку на основі новітніх телекомунікаційних технологій, в яких знаходять широке застосування способів передачі інформації (даних, мови) за допомогою TCP/IP-протоколів (транкінгові системи, стільникові системи зв'язку, DECT-системи, мережі стандарту IEEE 802.11 (комерційна назва Wi-Fi) та IEEE 802.16 (комерційна назва WiMAX) необхідно здійснювати таким чином, щоб реалізувати можливість адаптивного поєднання кореспондентів з одночасним чітким визначенням прав їх доступу до системи та забезпеченням безпеки зв'язку [1].

Сукупність стандартів 802.11x (поєднуються аббревіатурою Wi-Fi – Wireless Fidelity) включає в себе ряд ратифікованих стандартів передачі даних (802.11a/b/g/n), і ряд документів, що описують додаткові функції [4].

Стандарт 802.11 описує протокол організації безпроводних мереж в діапазоні 2,4 ГГц із швидкостями 1 і 2 Мбіт/с. У зв'язку із невеликою пропускнуною спроможністю він не набув широкого розповсюдження.

Стандарт 802.11a описує передачу даних на швидкості до 54 Мбіт/с в частотному діапазоні UNII 5ГГц. У зв'язку із високою частотою і як наслідок – сильним загасанням сигналу, ефективний радіус дії цього стандарту досить малий. Перевагою використання стандарту 802.11a є можливість використання 12 каналів (по чотири на кожний з трьох діапазонів UNII в 100 МГц), що дозволяє організувати безпроводну мережу із пропускнуною здатністю більше ніж в безпроводній мережі, які підтримують стандарти 802.11b/g.

Стандарт 802.11b використовує метод прямої послідовності (Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS) передачі широкосмугового сигналу з використанням кодування і модуляції. Працює в частотному діапазоні базового стандарту. Основна ідея технології розширення спектру полягає в тому, щоб від вузькосмугового спектру сигналу, що виникає при звичайному потенціальному кодуванні, перейти до широкосмугового спектру. Саме це дозволяє значно підвищити завадостійкість даних, що передаються. Максимальна швидкість передачі даних, що передбачена стандартом 11 Мбіт/с.

Стандарт 802.11g – розширення стандарту 802.11b, забезпечує швидкість передачі до 54 Мбіт/с. Пристрої 802.11g сумісні з 802.11b, можуть працювати в режимі 802.11g only, що дозволяє максимально використовувати пропускну здатність безпроводних мереж. Стандарти 802.11b/g розподіляють весь частотний діапазон ISM (Industry, Science and Medicine, частотний діапазон від 2,4 до 2,4835 ГГц, що призначений для безліцензійного використання в промисловості, науці і медицині) на чотирнадцять каналів,

що розділені проміжком у 5 МГц (2412, 2417,...,2477). Кожен канал займає 22 МГц, тому поряд розташовані точки доступу повинні працювати на каналах, що відрізняються на 5 позицій (наприклад 1, 6 і 11 канали), щоб не здійснювати взаємний вплив.

Одним з останніх з розроблених є стандарт 802.11n. Цей стандарт має забезпечувати швидкість передачі даних до 540 Мбіт/с. Такий стрибок швидкості забезпечується за рахунок розділення приймального і передавального трактів (технологія MIMO – Multiple Input Multiple Output – множина входів множина виходів, технологія що дозволяє значно підвищити спектральну ефективність системи, максимальну швидкість передачі даних і ємність) і вдосконалення технік кодування.

Логічним продовженням розвитку технології є версія стандарту 802.11ac, який ще називають VHT (Very High Throughput — дуже велика пропускна спроможність), що представляє собою поправки до версії 802.11-2007. IEEE 802.11ac – стандарт безпроводних мереж, які повинні забезпечувати високу пропускну здатність безпроводних локальних мереж (WLAN) в діапазоні частот 5 ГГц. Збільшення пропускну здатності і відповідно швидкості передачі інформації в стандарті IEEE 802.11ac досягається шляхом:

- збільшення смуги пропускання каналів до 80/160 МГц, що дозволяє збільшити в два і чотири рази швидкість передачі порівняно з стандартом IEEE 802.11n;
- збільшення максимального числа потоків до 8, що дозволяє подвоїти швидкість передачі інформації;
- використання модуляції 256 QAM з ефективністю кодування 3/4 і 5/6, що дозволяє збільшити швидкість передачі;
- використання багатомножинного доступу (MU-MIMO – Multi-user MIMO) і алгоритму STA (Spanning Tree Algorithm- алгоритм зв'язуючого дерева мережі);
- використання доступу з просторовим розділенням каналів (SDMA – Space Division Multiple Access), при якому потоки розділені не по частоті, а в просторі.

Таблиця 1.1 – Характеристики основних стандартів групи IEEE 802.11x

Стандарт	Частота, ГГц	Максимальна швидкість,	Ширина каналу(МГц)	Модуляція
IEEE 802.11a	2,4	54 Мбіт/с	20	ССК,OFDM
IEEE 802.11b	2,4	11 Мбіт/с	20	ССК
IEEE 802.11g	5	54 Мбіт/с	20	OFDM
IEEE 802.11n	2,4	600 Мбіт/с	20,40	OFDM(до 64 QAM)
IEEE 802.11ac	5	6,76 Гбіт/с	40,80,160	OFDM(до 256 QAM)

В таблиці 1. 1 наведено дані щодо основних стандартів групи 802.11x. Всі стандарти підтримують автоматичний вибір швидкості передачі залежно від співвідношення сигнал/шум і можуть працювати на великих відстанях, але з меншою швидкістю. При використанні підсилювачів і спрямованих антен стандарти 802.11x можуть забезпечити передачу даних на відстані в декілька десятків кілометрів.

## 1.2 Основні принципи побудови мереж базового стандарту 802.11

Для стандартів IEEE 802.11b та IEEE 802.11g доступно використання всенаправлених і вузьконаправлених антен. Всенаправлена антена гарантує зв'язок для відстаней до 50 метрів, а вузьконаправлена – до 45 км. При швидкості 1 Мбіт/с відстань надійного зв'язку може досягати декілька сотень метрів. Гранично можлива швидкість обміну визначається автоматично. Одночасно може обслуговуватись до декількох сотень клієнтів. Швидкість, яка буде доступна абонентам буде обернено-пропорційна їх кількості. Важливою особливістю є можливість роботи з мобільними клієнтами [5].

Типологічно локальні мережі IEEE 802.11b/g будуються навколо базової станції. Але можливі і схеми з декількома базовими станціями. Базові станції можуть працювати на одних і тих же або на різних частотних діапазонах. Для організації сумісної роботи базових станцій використовуються сигнальні кадри (beacon), які слугують для цілей синхронізації.

Якщо для організації хот-споту або безпроводної мережі в малому офісі достатньо встановити одну безпроводну точку доступу, то при створенні крупних корпоративних мереж з великою кількістю клієнтів і базових станцій виникає необхідність у використанні більш складного обладнання.

Перераховані проблеми легко розв'язуються використанням безпроводних комутаторів або маршрутизаторів. В мережі, де встановлюється безпроводний комутатор, функції шифрування і аутентифікації переходять від точок доступу до комутатора і адмініструються централізовано. У підсумку задача точки доступу обмежується транзитом даних до користувача і від нього.

Ще одна важлива перевага мережі на базі безпроводного комутатора у тому, що користувач, знаходячись у ній, при переході від однієї точки доступу до іншої не втрачає з'єднання з мережею і аутентифікацію заново не проходить.

Внаслідок того, що більша частина точок доступу підтримує режим живлення PoE (Power over Ethernet), безпроводний комутатор, який може стати для них джерелом живлення, здатний виконувати ще й функції відслідковування ділянок мережі, що відмовили. Таким чином, він компенсує несправність ділянки мережі розширенням числа користувачів точок доступу шляхом збільшення їх потужності. В ідеалі безпроводний комутатор може ефективно розподіляти ще і завантаження каналів, виходячи з інформації про кількість користувачів, пропонуючи більш широку пропускну здатність сегментам мережі, де кількість користувачів у даний момент більша.

Для організації хот-споту або безпроводної мережі в малому офісі достатньо встановити одну безпроводну точку доступу. На рисунку 1.2 зображено архітектуру мережі з однією точкою доступу (AP).



Рисунок 1.2 – Архітектура мережі з однією точкою доступу

При створенні крупних корпоративних мереж з великою кількістю клієнтів і базових станцій виникає необхідність у використанні більш складного обладнання [5,6]. Кількість точок доступу необхідно збільшувати,

для того щоб забезпечувати швидкість передачі даних не нижче 1 Мбіт/с. На рисунку 1.3 зображено архітектуру мережі з “n” точками доступу.

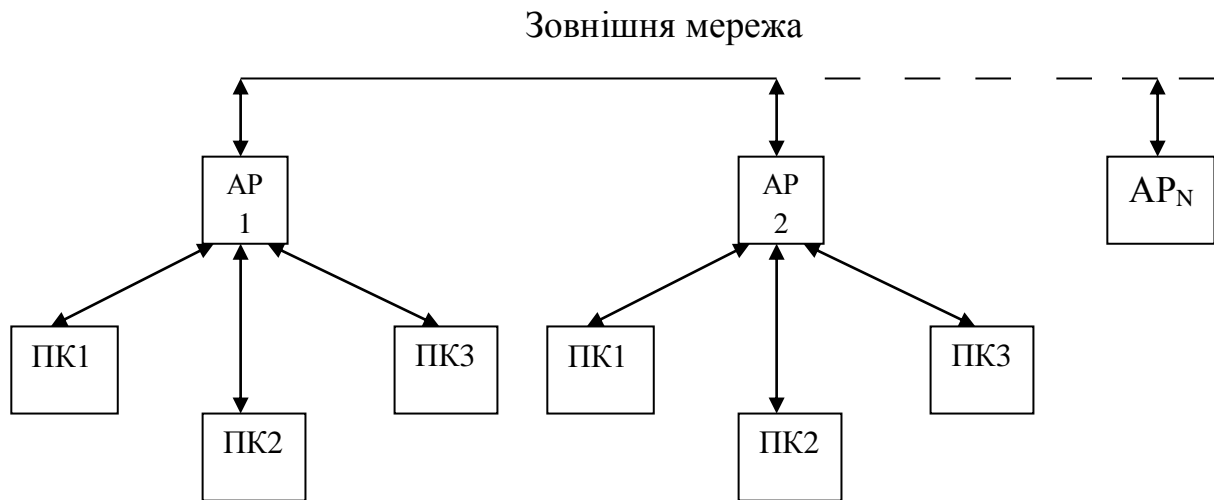


Рисунок 1.3 – Архітектура мережі з “n” точками доступу

Існують такі типи та різновиди з'єднань[1,7]:

а) З'єднання Ad-Нос (точка-точка).

Wi-Fi мережа типу Ad-hoc аналогічна звичайній провідній локальній мережі з топологією "лінія", тобто одноранговій мережі, в якій перший комп'ютер сполучений з другим, другий з третім і так далі. Для організації з'єднання безпроводної мережі такого типу застосовуються вбудовані або встановлювані адаптери Wi-Fi, наявність якого необхідна кожному вхідному в мережу пристрою.

б) Інфраструктурне з'єднання (Infrastructure Mode).

У режимі Infrastructure Mode станції взаємодіють одна з одною не напряму, а через точку доступу (Access Point), яка виконує в безпроводній мережі роль своєрідного концентратора (аналогічно тому, як це відбувається у традиційних кабельних мережах).

в) Клієнтська точка.

У цьому режимі точка доступу працює як клієнт і може з'єднуватися з точкою доступу, яка працює в інфраструктурному режимі. Але до неї можна підключити тільки одну MAC-адресу. Тут завдання полягає в тому, щоб об'єднати тільки два комп'ютери. Два Wi-Fi-адаптера можуть працювати один з одним безпосередньо без центральних антен.

г) Мостове з'єднання.

Комп'ютери об'єднані в провідну мережу. До кожної групи мереж підключені точки доступу, які з'єднуються один з одним по радіо каналу. Цей режим призначений для об'єднання двох і більше провідних мереж.

Підключення безпроводних клієнтів до точки доступу, що працює в режимі моста неможливе.

д) Репітер.

Точка доступу просто розширює радіус дії іншої точки доступу, що працює в інфраструктурному режимі.

### 1.3 Аналіз базового стандарту IEEE 802.11 і його специфікацій

Всі стандарти IEEE 802.11 працюють на нижніх двох рівнях моделі ISO / OSI, фізичному і каналному. Будь-яка мережева програма, мережева операційна система, або протокол (наприклад, TCP / IP), будуть так само добре працювати в мережі 802.11, як і в мережі Ethernet. Роботи в області створення безпроводних ЛЗ почалися в 1989 році, коли була організована робоча група 11-го комітету IEEE 802. У липні 1997 року в результаті роботи цієї групи був опублікований стандарт IEEE 802.11 «Технічна специфікація фізичного рівня і рівня контролю доступу до каналу передачі безпроводних локальних мереж» (Wireless LAN Medium Access Control and Physical Layer Specifications) (рис. 1.4). Він визначав архітектуру мережі, принципи доступу пристроїв до каналів зв'язку, формати пакетів, способи аутентифікації і захисту даних [8].

В інфрачервоному діапазоні передбачалася імпульсно-позиційна модуляція, в діапазоні 2,400-2,4835 ГГц - режими модуляції з розширенням спектра методом частотних стрибків (FHSS) і методом прямої послідовності (DSSS). Швидкості обміну встановлювалися на рівні 1 і 2 Мбіт / с. Однак пристрої, відповідні вихідної специфікації IEEE 802.11, так і не були створені з огляду на те, що за період розробки стандарту пропускна здатність провідних мереж Ethernet сильно зросла, і максимальна швидкість передачі 2 Мбіт / с, передбачена в IEEE 802.11, вже не задовольняла користувачів. Проблему вирішило поява стандартів IEEE 802.11b, 802.11a і 802.11g. Разом з тим стандарт IEEE 802.11 є базовим і визначає протоколи, необхідні для організації безпроводних локальних мереж (WLAN). Основні з них - протокол управління доступом до середовища MAC (Medium Access Control - нижній підрівень рівня ланки даних) і протокол PHY передачі сигналів у фізичному середовищі. Це викликано прагненням підвищити ефективну пропускну здатність системи завдяки зниженню накладних витрат на повторну передачу пакетів.

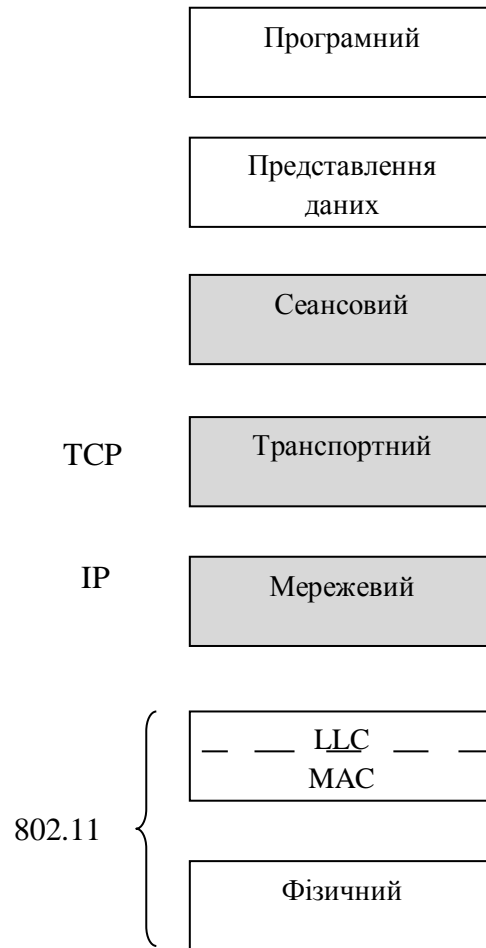


Рисунок 1.4 – Рівні моделі ISO / OSI і їх відповідність стандарту 802.11

Як основний метод доступу до середовища стандартом 802.11 визначено механізм CSMA / CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance - множинний доступ з виявленням несучої і запобіганням колізій).

В основу стандарту 802.11 покладена стільникова архітектура, причому мережа може складатися як з однієї, так і декількох осередків (сот). Кожна сота управляється базовою станцією, званою точкою доступу (Access Point, AP), яка разом з розташованими в межах радіусу її дії робочими станціями користувачів утворює базову зону обслуговування (Basic Service Set, BSS). Точки доступу багатостільникової мережі взаємодіють між собою через розподільчу систему (Distribution System, DS), що є еквівалентом магістрального сегменту кабельних ЛЗ.

Вся інфраструктура, що включає точки доступу і розподільчу систему утворює розширену зону обслуговування (Extended Service Set). Стандартом передбачений також односотовий варіант безпроводової мережі, який може бути реалізований і без точки доступу, при цьому частина її функцій виконується безпосередньо робочими станціями.

Для забезпечення переходу мобільних робочих станцій із зони дії однієї точки доступу до іншої в багатосотових системах передбачені спеціальні процедури сканування (активного і пасивного прослуховування ефіру) і приєднання (Association), проте строгих специфікацій по реалізації роумінгу стандарт 802.11 не передбачає.

Для захисту WLAN стандартом IEEE 802.11 передбачено цілий комплекс заходів безпеки передачі даних під загальною назвою Wired Equivalent Privacy (WEP). Він включає засоби протидії несанкціонованого доступу до мережі (механізми і процедури аутентифікації), а також запобігання перехоплення інформації (шифрування).

На фізичному рівні визначені два широкосмугових радіочастотних методи передачі і один - в інфрачервоному діапазоні. Радіочастотні методи працюють в ISM-діапазоні 2,4 ГГц і зазвичай використовують смугу 83 МГц від 2,400 ГГц до 2,483 ГГц. Технології широкосмугового сигналу, що використовуються в радіочастотних методах, збільшують надійність, пропускну здатність, дозволяють багатьом непов'язаним один з одним пристроям розділяти одну смугу частот з мінімальними перешкодами один для одного. Стандарт 802.11 використовує метод прямої послідовності (Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS) і метод частотних стрибків (Frequency Hopping Spread Spectrum, FHSS). Ці методи кардинально відрізняються, і несумісні один з одним.

MAC рівень отримує блок даних від рівня LLC і відповідає за виконання функцій, пов'язаних з доступом до середовища, і за передачу даних.

Стандарт IEEE 802.11 передбачає два режими управління мережею: DCF (Distributed Coordination Function), коли функції управління розподілені між усіма пристроями мережі IEEE 802.11 і режим PCF (Point Coordination Function), коли вони зосереджені в одній певній точці доступу.

У режимі DCF всі пристрої працюють за принципом конкурентного доступу до каналу передачі, тобто пріоритетів не існує. Робота в режимі PCF може відбуватися тільки під управлінням спеціальної точки доступу, званої точкою координації (PC). Необхідність в режимі централізованого управління PCF може виникнути при передачі чутливої до затримок інформації (наприклад, відеопотоків), коли необхідно вводити пріоритети доступу.

Коли мережа переходить в режим PCF, в певні, періодично повторювані інтервали, конкурентний доступ скасований, і весь обмін відбувається під управлінням координуючого пристрою (PC) (рис.1.5).



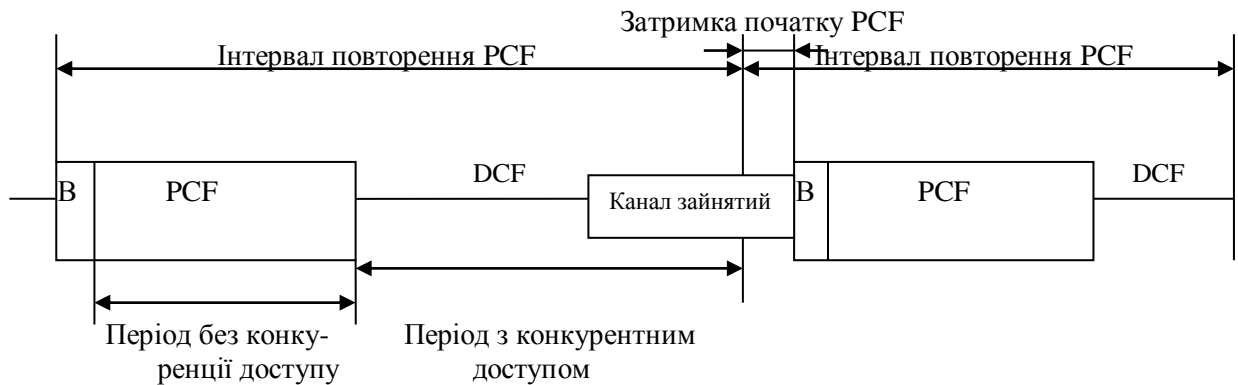


Рисунок 1.5 – Цикли роботи мережі в режимах з концентрованим (PCF) і розподіленим керуванням (DCF)

В – сигнальний пакет (Beacon).

По завершенні такого інтервалу мережа повертається в режим DCF. Інтервали під керуванням PC слідуєть через строго певний період, на початку кожного інтервалу PC передається особливий сигнальний кадр (Beacon). PC не може передати черговий сигнальний кадр до тих пір, поки канал не звільниться, тобто черговий "вільний від конкуренції" інтервал може початися із затримкою.

Однак основний принцип мереж Ethernet - це все ж довільний конкурентний доступ, що і робить їх настільки простими в експлуатації і реалізації. У провідних мережах Ethernet використовується механізм множинного доступу до каналу зв'язку з контролем несучої і виявленням колізій (CSMA / CD - Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection). Станція починає передачу, тільки якщо канал вільний. Якщо станції виявляють, що на одному каналі намагаються працювати кілька станцій, всі вони припиняють передачу і намагаються відновити її через випадковий проміжок часу. Таким чином, при передачі пристрій повинен контролювати канал - працювати на прийом.

Це відносно просто при провідному зв'язку, але проблематично в безпроводних комунікаціях - загасання сигналу в ефірі набагато сильніше, ніж в проводі. З цієї причини виникають дві основні проблеми.

По-перше, дуже складне, якщо взагалі можна вирішити, завдання контролю несучої передавальним пристроєм (коли воно мовить, то власний сигнал набагато сильніший, ніж сигнал віддаленого пристрою). По-друге, можлива ситуація, коли два пристрої (А і В) видалені і не чують один одного, але обидва потрапляють в зону охоплення третього пристрою (рис. 1.6) так звана проблема прихованих станцій.

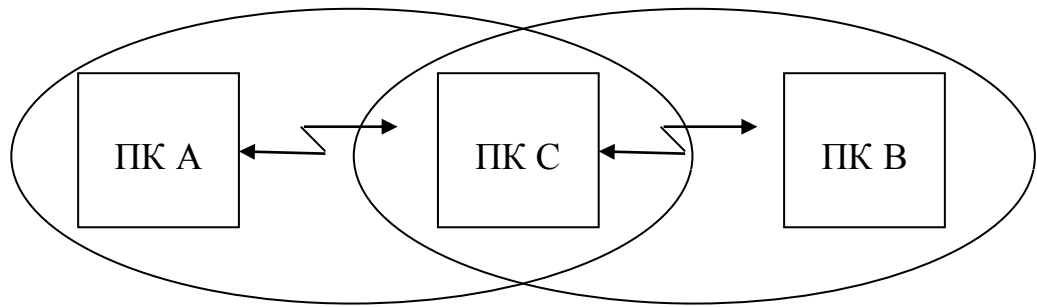


Рисунок 1.6 – Ілюстрація проблеми прихованої точки

Якщо обидва пристрої А і В, почнуть передачу, то вони принципово не зможуть виявити конфліктну ситуацію і визначити, чому пакети не проходять. Для усунення подібних проблем в специфікації IEEE 802.11 прийнятий механізм CSMA / CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) - множинний доступ з контролем несучої і запобіганням колізій. Перед початком передачі, пристрій слухає ефір і чекає, коли канал звільниться. Канал вважається вільним за умови, що не виявлено активності протягом певного проміжку часу - міжкадрового інтервалу (IFS) певного типу. Якщо протягом цього проміжку канал залишався вільним, пристрій очікує ще протягом випадкового тайм-ауту, і якщо канал ще не зайнятий, передає пакет. Якщо пакет призначений конкретному пристрою (неширокомовна або багатоадресна передача), то приймач, успішно прийнявши пакет, посилає передавачу короткий кадр підтвердження отримання АСК (AC Knowledge).

Якщо передавач не прийняв АСК, він вважає посланий пакет загубленим і повторює процедуру його передачі. Якщо пристрій повторно передає пакет, для визначення незайнятості каналу йому слід розглядати збільшений міжпакетний інтервал (EIFS). Крім того, час відстрочки вибирається випадковим чином на деякому інтервалі. При першій спробі передачі цей інтервал мінімальний. При кожній наступній він подвоюється до тих пір, поки не досягне заданого граничного значення. Ці заходи введені для того, щоб пристрій, що успішно передав пакет, мав переваги в захопленні каналу.

Однак описані процедури доступу не позбавляють від проблеми прихованих станцій. Для її вирішення використовуються два додаткових кадри: RTS (Request to Send - запит на передачу) і CTS (Clear to Send - підтвердження готовності). Пристрій, який бажає відправити пакет даних, передає адресатові короткий кадр RTS. Якщо приймальний пристрій готовий до прийому, воно виставляє передавачу відповідь кадр - CTS. Далі, відповідно до описаної вище процедури, передавачу пристрій відправляє кадр з даними і чекає підтвердження АСК.



На рисунку 1.8 зображено структуру передавальної частини адаптеру IEEE 802.11b/g [10].

Згідно даної структури, сигнал надходить на контролер USB (К USB) від пристрою шиною USB (Universal Serial Bus) і поступає на блок ПОС (процесор обробки сигналів), де здійснюється цифрова обробка сигналів (ЦОС). Далі сигнал надходить у радіокомутатор (РК), який комутує частотні канали. Пристрій керування (ПК), в загальному, виконує функцію керування та слідкує за роботою РК та антенного комутатора (АК). Далі, в блоці ПКБ (попередній кодер Баркера) відбувається кодування на основі коду Баркера.

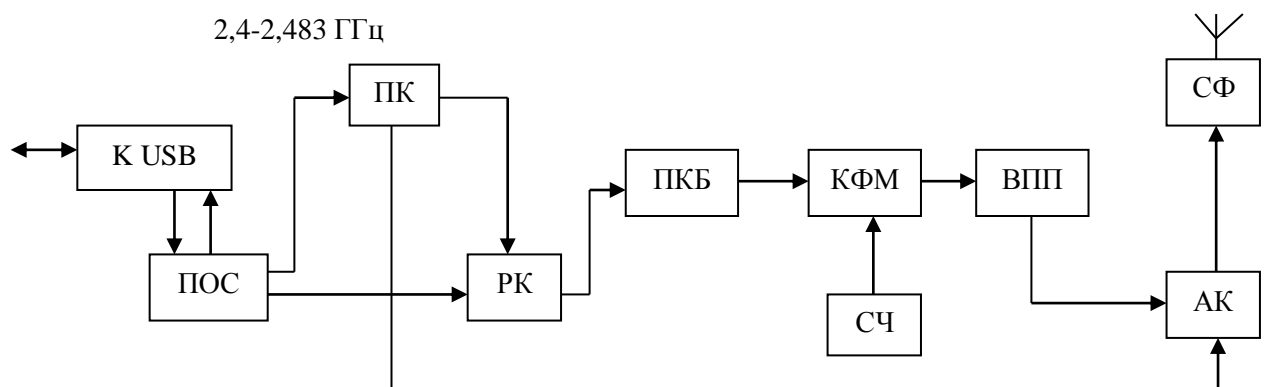


Рисунок 1.8 – Структура передавальної частини мобільного апарату стандарту IEEE 802.11

Синтезатор частот (СЧ) є джерелом коливань носійної частоти і утворює дуплексне розділення по частоті. У блоці КФМ відбувається квадратурна фазова модуляція (КФМ). Завершується перетворення сигналів підсиленням сигналу у вихідному підсилювачі потужності (ВПП). Ці сигнали надходять до антенного комутатора (АК), де вони комутуються і, проходячи через смуговий фільтр, поступають у ефір на частотах 2,4 – 2,483 ГГц.

На рисунку 1.9 зображено структуру приймальної частини адаптера IEEE 802.11.

У приймальній частині виконується зворотне перетворення сигналів. Сигнали, які надходять з ефіру на приймальний антенний підсилювач (АП), де здійснюється попереднє підсилення сигналу, поступають у смуговий фільтр зі смугою 2,4 – 2,483 ГГц.

Послаблені сигнали спочатку підсилюються високочастотним підсилювачем (ВПЧ). У першому і другому трактах проміжної частоти (ПЧ) відбувається перенесення сигналів з високочастотного діапазону на проміжні частоти з підсиленням.

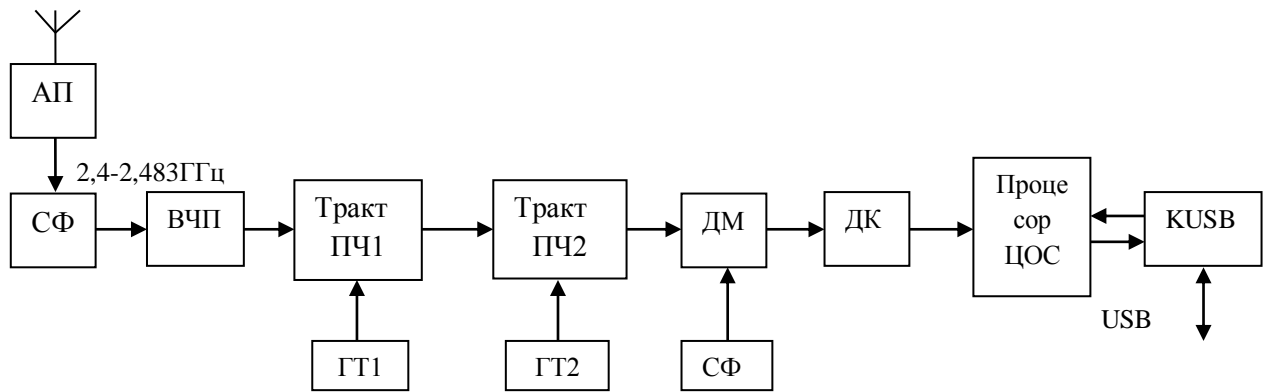


Рисунок 1.9 – Структура приймальної частини мобільного апарату стандарту IEEE 802.11

Супергетеродинна схема приймача з вхідним підсилювачем та двійним перетворенням частоти забезпечує високу чутливість та вибірність за сусіднім і дзеркальним каналами. Далі отриманий сигнал демодулюється в демодуляторі (ДМ) та декодується відповідно у квадратурно-фазовому демодуляторі та у декодері Баркера (ДК). Отримані сигнали підлягають обробці за алгоритмами ЦОС і через контролер USB (K USB) надходять до пристрою абонента [10].

Звичайно, як і будь-якому пристрої оснащеним Wi-Fi модулем, необхідною умовою використання Wi-Fi на мобільному телефоні є точка доступу. Якщо ж говорити про кількість хот-спотів у світі, то цифри надзвичайно відрізняються і залежать часто навіть не від рівня життя тієї чи іншої країни, а від рівня її відвідуваності іноземцями. На сьогоднішній день у світі налічується майже 200 тисяч хот-спотів, в зоні дії яких ви з упевненістю зможете скористатися своїм мобільним Wi-Fi модулем. Лідером за кількістю хот-спотів в світі є Лондон і Токіо. Тут їх кількість вже кілька років тому перевищила 1500, в Москві більше 500. А ось в Україні всього приблизно нараховується 500-600 хот-спотів. Проте, зростання кількості хот-спотів настільки велике, що ці дані вже завтра можуть стати неактуальними. Варто зауважити, що мова тут йшла про загальну кількість хот-спотів, а не тільки про точки доступу для мобільної мережі Wi-Fi.

## 2 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЇ МІМО У СТАНДАРТІ 802.11ac

### 2.1 Аналіз стандарту IEEE 802.11ac

Стандарт 802.11 ac прийнято в 2014 році, а пристрої з його підтримкою, як відомо, з'явилися раніше. В даному стандарті значно збільшена швидкість передачі даних (теоретично, до 6.7 Гбіт/с). Досягається це завдяки збільшеній ширині каналів (до 160 МГц), кількості потоків (до 8) і новою покращеною модуляції (256-QAM). Звичайно, не всі нововведення стандарту стали доступні відразу. Реалізація на точках доступу і клієнтських станціях відбувається поетапно. Перша хвиля (wave 1) пристроїв підтримує канали 80 МГц, модуляцію 256-QAM і два-три просторових потоки. Корпоративні точки доступу другої хвилі (wave 2), що з'явилися в 2015 році, підтримують ширину каналу до 80 МГц і до чотирьох просторових потоків, що дає швидкість 1.7 Гбіт/с. Також, для другої хвилі пристроїв додана підтримка багатокористувацького просторового мультиплексування MultiUser-MIMO (MU-MIMO). Ця технологія дозволяє передати кілька потоків інформації декільком користувачам одночасно. Зараз практично будь-який новий пристрій з безпроводною Wi-Fi мережею підтримує як мінімум першу хвилю стандарту [11].

Крім швидкості, у 802.11ac є дві ключові переваги:

1) Beamforming - можливість динамічно змінювати діаграму спрямованості антен. Ця функція дозволяє зоні покриття точки доступу оптимально підлаштовувати зону покриття під поточне розташування клієнтів. Beamforming є частиною стандарту 802.11n. Але частиною опціональною. У 802.11ac дана функція є обов'язковою;

2) MU-MIMO. Більшість Wi-Fi мереж - напівдуплексні. пакети передаються послідовно - в один момент часу передається один пакет. Якщо в каналі 120Мбіт йде потік в 1Мбіт - використовується 1/120 смуги пропускання. Якщо при цьому прибувають дані для іншого клієнта - використовувати незадіяну смугу пропускання не вдасться. В результаті користі від надвисоких швидкостей 802.11n в мережах з великою кількістю нешвидких клієнтів (тобто корпоративних) дуже мало. MU-MIMO дозволяє розбити канал на кілька дрібніших каналів і передавати дані по ним паралельно.

У 802.11ac реалізований explicit beamforming (явне формування діаграми направленості) вже безпосередньо в стандарті. 802.11ac explicit beamforming працює тільки для 11ac клієнтів і не сумісний з іншими стандартами. При цьому сам клієнт також повинен підтримувати explicit

beamforming, так як саме він буде повідомляти точки доступу про те, як варто йому передавати інформацію.

Процес калібрування виглядає наступним чином:

Точка доступу формує і відправляє спеціалізований кадр (Null Data Packet Announcement - NDPA) для оповіщення клієнта. У ньому міститься інформація про кількість передавачів, кількості потоків та інші супутні дані.

Далі клієнту відправляється Null Data Packet (NDP). Це робиться для того, щоб клієнт, аналізуючи інформацію в заголовках на фізичному рівні, зміг сформуванати звіт про здобутий сигнал і відправити його назад точки доступу.

Клієнт аналізує отриманий (на всіх антенах) сигнал по кожній піднесійній і формує матрицю спрямованості з певною амплітудою і фазою. Дана матриця займає досить великий обсяг (особливо з урахуванням ширини каналів в 11ас), тому відповідь відправляється в стисломому вигляді.

Одержувач (точка доступу) на підставі отриманої від клієнта інформації формує діаграму спрямованості.

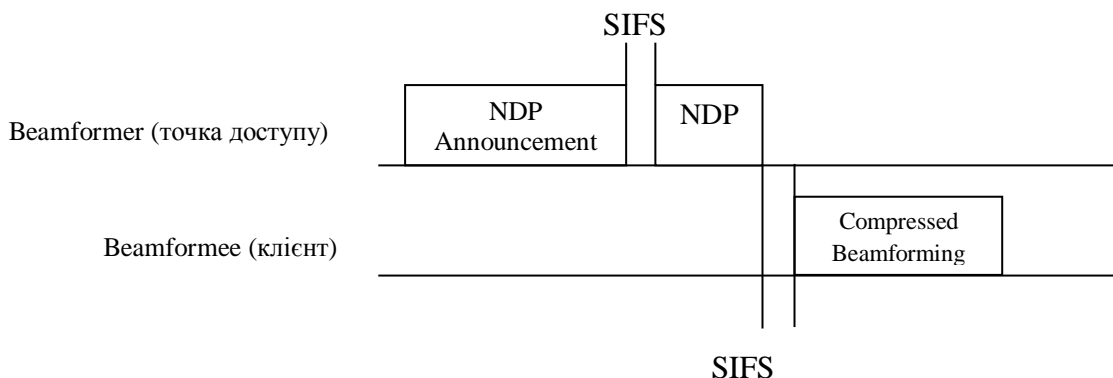


Рисунок 2.1 – Процес калібрування

Формування діаграми спрямованості відбувається наступним чином: кожна антенна починає передавати якусь суперпозицію всіх просторових потоків з певними коефіцієнтами (фаза, амплітуда). Причому коефіцієнти для кожного потоку на кожній антені будуть свої.

Варто звернути увагу, що реальний вииграш від технології формування діаграми спрямованості ми отримуємо тільки в тому випадку, якщо кількість антен на передачу у нас перевершує кількість переданих просторових потоків.

Для багатокористувацької передачі (multi-user beamforming), процес схожий, проте калібрування відбувається для кожного клієнта окремо.

У стандарті 802.11ac немає аналога преамбули «Зеленого поля» 802.11n. Стандарт 802.11ac визначає преамбулу тільки одного формату

(рис. 2.2), яка буде доступна для розшифровки, в тому числі, пристроїв попередніх стандартів 802.11a / n. Зроблено це для того, щоб такі пристрої могли витягти з преамбули інформацію про тривалість передачі, і не намагалися передавати під час передачі пристрою 802.11ac.

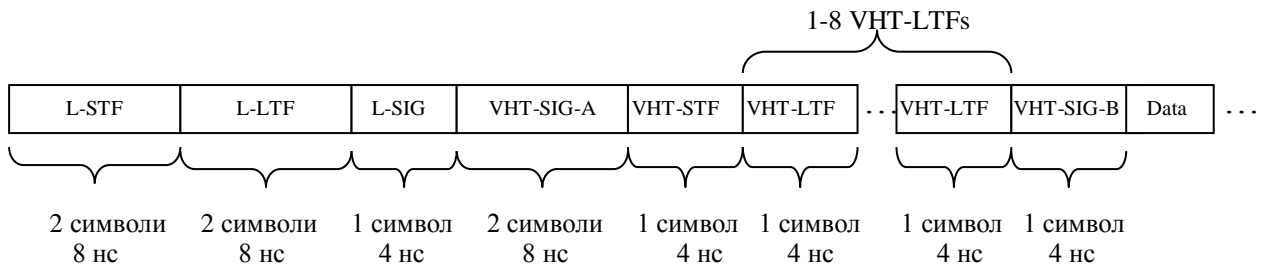


Рисунок 2.2 – Формат кадру 802.11ac

Вся преамбула складається з двох частин:

- Перша частина – це традиційна преамбула, її призначення – забезпечити зворотну сумісність, дозволити пристроям a / n синхронізуватися з сигналом.

Традиційна частина преамбули складається з 3-х полів: L-STF (коротка підстроювальна послідовність), L-LTF (довга підстроювальна послідовність) і L-SIG (сигнал). Поля L-STF і L-LTF містять інформацію, яка дозволяє пристрою виявити сигнал, виконати оцінку частотного зсуву, час синхронізації, і т.д. Поле L-SIG містить інформацію про довжину іншої частини пакета. Це означає, що всі пристрої, в тому числі застарілі зможуть знати час передачі пакета.

- Друга частина преамбули, наступна за традиційною частиною – це нова преамбула стандарту 802.11ac. Вона називається VHT-преамбула, в неї входять нижче описані поля.

Традиційні поля і поле VHT-SIG-A дублюються в кожних 20 МГц смуги пропускання, із застосуванням відповідного обертання фази. Також обертання фази застосовується до кожного піддіапазону 20 МГц в VHTSTF, VHT-LTF, і VHT-SIG-B.

Після преамбули передаються символи даних. Тут також, реалізовується обертання фази в верхніх піддіапазонах 20 МГц.

#### VHT-SIG-A

Поле VHT-SIG-A містить два символи OFDM, які слідує відразу за спадковою частиною преамбули. Символи використовують довгий захисний інтервал і є ВСС-кодованими зі швидкістю  $r = 1/2$ .



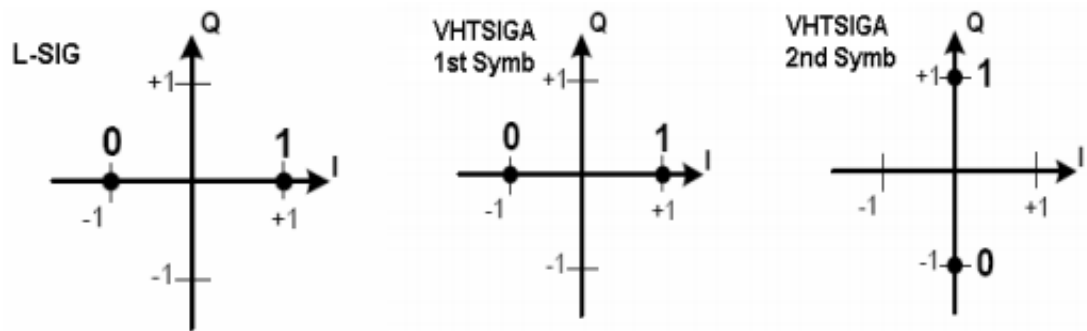


Рисунок 2.3 – Сигнальні сузір'я полів для модуляції полів L-SIG і VHT-SIG-A

Перший символ BPSK-модульований. Отримавши його, пристрій 11n буде думати, що пакет є пакетом 11a і буде його ігнорувати. Другий символ використовує QPSK, зміщену на 90 градусів (рис. 2.3), що дозволяє пристрою 11ac автоматично виявити пакет 11ac.

Символи VHT-SIG-A містять кожен 24 біта. 8 біт використовуються для CRC і 6 біт є хвостовими для кодера. Інформація, представлена в останніх 34 бітах VHT-SIG-A необхідна VHT-пристрою для читання пакета VHT. В бітах міститься інформація, що дозволяє пристроям 11ac декодувати решту пакету: смугу пропускання, STBC (просторово-тимчасове блокове кодування), кількість потоків, MCS, формування променя і т.д. Призначення конкретних полів буде залежати від режиму одного або декількох користувачів (SU- або MU-MIMO).

У разі декількох користувачів (можливо до 4), деякі з VHT-SIG-A полів модифікуються, щоб сигналізувати конкретному користувачу певну інформацію.

#### *VHT-STF*

VHT-STF використовується для поліпшення автоматичного регулювання посилення в MIMO передачі. За даними цього поля можна визначити на аналізаторі спектра підносійні, які мають нульове /ненульове значення. VHT-STF завжди використовує довгий захисний інтервал.

#### *VHT-LTF*

Наступні 8 полів пакету - це поля VHT-LTF. Вони використовуються для оцінки MIMO каналу і подальшої корекції сигналу. Пілот-сигнали вставляються в символи VHT-LTF для відстеження фази, компенсації частотного зсуву і фазового шуму, які можуть погіршити сигнал OFDM і привести до помилки оцінки каналу в приймачі. Кількість символів LTF, відправлених в пакеті залежить від кількості просторово-часових потоків: один LTF для одного просторово-часового потоку, два LTF для двох просторово тимчасових потоків, чотири LTF для трьох або чотирьох потоків,

шість LTF для п'яти або шести потоків, вісім LTF для семи або восьми потоків. Так як кількість відправлених полів LTF більше або дорівнює кількості потоків для кожного користувача, вони називаються «розв'язні LTF». Символи VHT-LTF також завжди використовують довгий захисний інтервал.

### *VH-SIG-B*

Поле VHT-SIG-B є останнім полем в преамбулі перед полем даних. Це один символ, BPSK модульований, надає інформацію про довжину корисних даних в пакеті і в разі MU-MIMO забезпечує інформацію про MCS (в разі одного користувача інформація про MCS передається в VHT-SIG-A). Формат поля VHT-SIG-B залежить від того, чи є пакет SU-MIMO або MU-MIMO.

До речі, в 802.11n (HT) є різні формати кадрів (і режими роботи точки доступу): mixed - для сумісності з 802.11a / g / n пристроями або greenfield для роботи тільки 11n пристроїв. У 802.11ac використовується один універсальний формат, що включає заголовки 802.11a / ac.

Для передачі інформації одночасно всім користувачам нам необхідні властивості beamforming-а [12]. Після калібрування, кожен потік (або декілька потоків) надсилається кожному користувачеві зі своєю діаграмою спрямованості. Для запобігання інтерференції сигналу, що передається при багатокористувацькій передачі, діаграма спрямованості для кожного клієнта будується таким чином, що сигнал для сусідніх клієнтів приходить в протифазі. Це важливо, тому що клієнт повинен «чути» тільки той просторовий потік, який адресований саме йому. Інакше просторові потоки будуть один на одного впливати, і клієнт нічого не розбере. Логічно припустити, що технологія не працює, якщо клієнти знаходяться на досить близькій відстані один до одного.

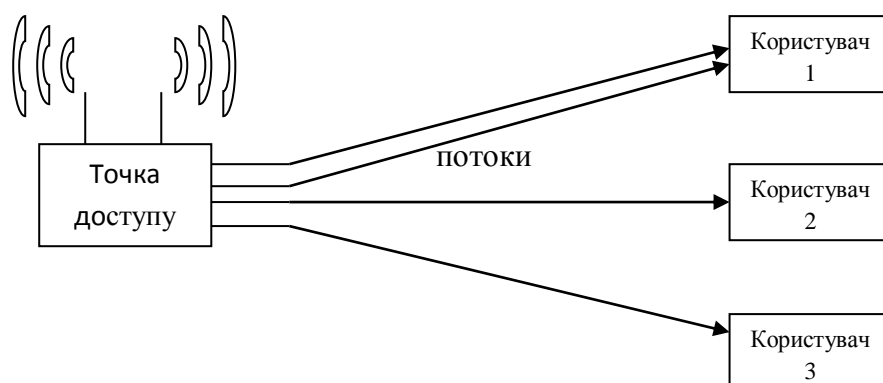


Рисунок 2.4 – Передача інформації одночасно всім користувачам за допомогою beamforming-а

Точне калібрування вкрай важливе для такої передачі, тому воно відбувається в кілька разів частіше, ніж для single-user передачі.

Для стандартів IEEE 802.11b та IEEE 802.11g доступно використання всенаправлених і вузьконаправлених антен. Всенаправлена антена гарантує зв'язок для відстаней до 50 метрів, а вузьконаправлена – до 45 км. При швидкості 1 Мбіт/с відстань надійного зв'язку може досягати декілька сотень метрів. Гранично можлива швидкість обміну визначається автоматично. Одночасно може обслуговуватись до декількох сотень клієнтів. Швидкість, яка буде доступна абонентам буде обернено-пропорційна їх кількості. Важливою особливістю є можливість роботи з мобільними клієнтами [9].

Типологічно локальні мережі IEEE 802.11b/g будуються навколо базової станції. Але можливі і схеми з декількома базовими станціями. Базові станції можуть працювати на одних і тих же або на різних частотних діапазонах. Для організації сумісної роботи базових станцій використовуються сигнальні кадри (beacon), які слугують для цілей синхронізації.

Якщо для організації хот-спота або безпроводної мережі в малому офісі достатньо встановити одну безпроводну точку доступу, то при створенні крупних корпоративних мереж з великою кількістю клієнтів і базових станцій виникає необхідність у використанні більш складного обладнання.

Перераховані проблеми легко розв'язуються використанням безпроводних комутаторів або маршрутизаторів. В мережі, де встановлюється безпроводний комутатор, функції шифрування і аутентифікації переходять від точок доступу до комутатора і адмініструються централізовано. У підсумку задача точки доступу обмежується транзитом даних до користувача і від нього.

Ще одна важлива перевага мережі на базі безпроводного комутатора у тому, що користувач, знаходячись у ній, при переході від однієї точки доступу до іншої не втрачає з'єднання з мережею і аутентифікацію заново не проходить.

Внаслідок того, що більша частина точок доступу підтримує режим живлення PoE (Power over Ethernet), безпроводний комутатор, який може стати для них джерелом живлення, здатний виконувати ще й функції відслідковування ділянок мережі, що відмовили. Таким чином, він компенсує несправність ділянки мережі розширенням числа користувачів точок доступу шляхом збільшення їх потужності. В ідеалі безпроводний комутатор може ефективно розподіляти ще і завантаження каналів, виходячи з інформації про кількість користувачів, пропонуючи більш широку пропускну здатність сегментам мережі, де кількість користувачів у даний момент більша.

Стандарт 802.11ac розроблений, з метою максимально прямою і зворотньою сумісності з пристроями стандартів 802.11a / n. На ділі, сумісність 802.11ac розроблена ще простіше і ретельніше, ніж сумісність 802.11n з пристроями 802.11a (табл. 2.1) [13].

Пристрій 802.11ac має підтримувати всі обов'язкові режими 802.11a / n. Так точка доступу 802.11ac може спілкуватися з клієнтами 802.11a / n, використовуючи пакети відповідних форматів. Для цього вона працює, так як ніби вона є точкою доступу стандарту 802.11n. Подібним чином пристрій-клієнт 802.11ac може спілкуватися з точкою доступу 802.11a / n, використовуючи пакети формату 802.11a / n. З цієї причини, поява клієнтів 802.11ac не створить проблем в існуючій інфраструктурі.

Крім того, преамбула пакету формату 802.11ac ідентична формату 802.11a, так що механізм виявлення несучої працює для сторонніх пристроїв обох стандартів 802.11a / n. Як тільки ці сторонні пристрої бачать преамбулу 802.11ac, вони можуть визначити тривалість передачі пакету і знають, що в цей час їм не можна передавати. Крім того, оскільки за пакетом зазвичай йдуть кадри АСК або Block АСК, що передаються в форматі 802.11a, сторонні пристрої можуть правильно прийняти АСК або Block АСК, а потім продовжувати спроби передачі як зазвичай. У гіршому випадку, сторонній пристрій чує кадр 802.11ac, але знаходиться поза зоною дії передавача АСК або Block АСК. Але навіть тут третя сторона повинна чекати протягом тривалого часу (інтервал EIFS), щоб дати час кадрам АСК або Block АСК, бути переданим, не побоюючись колізії.

Види неефективності, пов'язані з передачею пакетів 802.11b / g повністю виключені, тому що використовується діапазон 5ГГц.

Стандарт 802.11ac продовжує розвивати деякі з найбільш цінних можливостей 802.11n, в їх числі можливість застосування короткого захисного інтервалу (дає збільшення швидкості до 10%) і поступове поліпшення швидкості на відстані з використанням кодів LDPC, що виправляють помилки. Ці LDPC коди розроблені як еволюційне продовження LDPC кодів 802.11n.

Стандарт 802.11n включав в себе безліч «малоцінних» доповнень. Стандарт 802.11ac займає по відношенню до них прагматичний підхід. Якщо «малоцінна» опція використовується і впливає на сторонні пристрої, то зазвичай стандарт 802.11ac забороняє пристрою, працюючи в режимі 802.11ac, її використовувати. Якщо «малоцінна» опція не використовується в пристроях 802.11n або впливає тільки на пристрої, які активували опцію, то ця можливість не оновлюється для 802.11ac, але «залишається помирати».

Таблиця 2.1 – Сумісність і співіснування пристроїв 802.11a / n / ac

Роль приймального пристрою	Приймач		802.11a	802.11n	802.11ac
	Передавач				
Цільовий отримувач	802.11a		Так	Так. Пристрій 802.11n використовує PPDU 802.11a	Так. Пристрій 802.11ac використовує PPDU 802.11a
	802.11n		Так	Так	Так. Пристрій 802.11ac використовує PPDU 802.11n
	802.11ac		Так	Так	Так
Сторонні пристрої	802.11a		Так	Так (режим HT_MM) сторонні пристрої чекають дані про довжину пакету в спадковій частині преамбули, вичікуючи EIFS (щоб уникнути колізії).  Ні (режим HT_GF) Преамбула повинна бути передана, тільки якщо їй передують MAC-захист (наприклад, RTS / CTS) відправлена в PPDU 802.11a (щоб уникнути колізії).	Так Сторонні пристрої чекають дані про довжину пакета в спадковій частині преамбули, вичікуючи EIFS (щоб уникнути колізії).
	802.11n		Так	Так	Так Сторонні пристрої чекають дані про довжину пакета в спадковій частині преамбули, вичікуючи EIFS (щоб уникнути колізії).
	802.11ac		Так	Так	Так

Можливості 802.11n, що не оновлювалися для 802.11ac (або прямо заборонені для пристроїв, що працюють в режимі 802.11ac) включають в себе всі зондувальні опції 802.11n, розширення LTF, процедуру калібрування, вибір антени, несиметричні види модуляції і режими STBC  $4 \times 3$  і  $3 \times 2$  і MCS32.

Різні просторово-часові блокові коди (space-time block codes, STBC) допускаються, але цей список урізаний, в порівнянні з широким списком, пропонуваним 802.11n, так STBC в значній мірі дублюють технологію формування променя. Стандарт 802.11n визначав базовими режимам і STBC:  $2 \times 1$  і  $4 \times 2$ , а також  $3 \times 2$  і  $4 \times 3$ , як розширені, але розширені режими пропонують невеликий вииграш через їх складності в реалізації, тому вони не знайшли застосування в пристроях. Тільки найпростіший режим  $2 \times 1$ , був сертифікований.

З урахуванням цього досвіду, 802.11ac визначає базовими режимами STBC  $2 \times 1$ ,  $4 \times 2$ ,  $6 \times 3$  і  $8 \times 4$ . Але тільки режим  $2 \times 1$  включений в пристрої, що випускаються.

## 2.2 Особливості побудови та використання технології MIMO

MIMO (англ. Multiple Input Multiple Output) - метод просторового кодування сигналу, що дозволяє збільшити смугу пропускання каналу, при якому передача даних здійснюється за допомогою  $N$  антен і їх прийому  $M$  антенами. Передавальні і приймальні антени рознесені так, щоб досягти слабкої кореляції між сусідніми антенами.

Історія систем MIMO як об'єкта бездротового зв'язку поки не тривала. Перший патент на використання MIMO-принципу в радіозв'язку був зареєстрований в 1984 році від імені співробітника Bell Laboratories Джека Вінтерса (Jack Winters). Грунтуючись на його дослідженнях, Джек Селз (Jack Salz) з тієї ж компанії опублікував в 1985 році першу статтю по MIMO-рішень. Розвиток даного напрямку тривало фахівцями Bell Laboratories і іншими дослідниками аж до 1995 року. У 1996 році Грег Ралей (Greg Raleigh) і Джеральд Дж. Фошина (Gerald J. Foschini) запропонували новий варіант реалізації MIMO-системи, збільшивши тим самим її ефективність. Згодом Грег Ралей, якому присвоюють авторство OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing - мультиплексування за допомогою ортогональних несучих) для MIMO, заснував компанію Airgo Networks, яка розробила перший MIMO-чіпсет під назвою True MIMO.

Однак, незважаючи на досить короткий проміжок часу з моменту своєї появи, MIMO-напрямок розвивається досить багатопланово і включає в себе

різномірне сімейство методів, які можна класифікувати за принципом поділу сигналів в приймальному пристрої. При цьому в МІМО-системах використовуються як уже ввійшли в практику підходи до поділу сигналів, так і нові. До них відносяться, наприклад, просторово-тимчасове, просторово-частотне, просторово-поляризаційне кодування, а також дозвіл у напрямку приходу сигналу в приймач. Завдяки великій кількості підходів до поділу сигналів вдалося забезпечити настільки довгу розробку стандартів на використання систем МІМО в засобах зв'язку. Однак всі різновиди МІМО спрямовані на досягнення однієї мети - збільшення пікової швидкості передачі даних в мережах зв'язку за рахунок поліпшення завадостійкості.

Найпростіша антена МІМО - це система з двох несиметричних вібраторів (монополів), орієнтованих під кутом  $\pm 45^\circ$  щодо вертикальної осі (рис.2.5) [14].

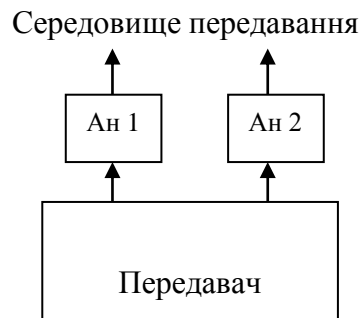


Рисунок 2.5 – Найпростіша антена МІМО

Такий кут поляризації дозволяє каналам перебувати в рівних умовах, оскільки при горизонтально-вертикальній орієнтації випромінювачів одна з поляризаційних складових неминуче отримала б більше загасання при поширенні уздовж земної поверхні. Сигнали, які випромінюються незалежно кожною монополією, поляризовані взаємно ортогонально з досить високою взаємною розв'язкою по крос-поляризаційній складовій (не менше 20 дБ). Аналогічна антена використовується і на приймальній стороні. Такий підхід дозволяє одночасно передавати сигнали з однаковими несучими, модульованими різним чином. Принцип поляризаційного поділу забезпечує подвоєння пропускної здатності лінії радіозв'язку в порівнянні з випадком одиночного монополя (в ідеальних умовах прямої видимості при ідентичній орієнтації приймальних і передавальних антен). Таким чином, по суті будь-яку систему з подвійною поляризацією можна вважати системою МІМО.

МІМО використовує переваги багатоканальності (коли різні сигнали приходять в приймач в різний час). Для організації технології МІМО

необхідна установка декількох антен на передавальній і на приймальній стороні (рис.2.6).

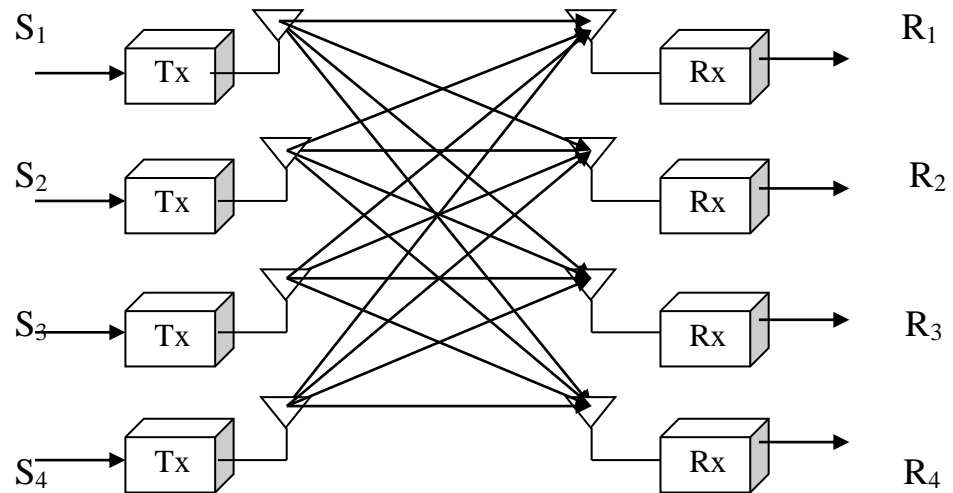


Рисунок 2.6 – Організація технології MIMO

Для роботи потрібні зміни в структурі передавача. Розглянемо один із способів організації технології MIMO. На передавальній стороні необхідний дільник потоків, який буде розділяти дані, призначені для передачі на кілька низькошвидкісних субпотоків, число яких залежить від числа антен. Надалі кожен їх даних потоків повинен бути переданий через свою антену.

Анени на передачі встановлюються з просторовим рознесенням, щоб забезпечити більше число побічних сигналів, які виникають в результаті перевіддзеркалень.

Один із способів організації технології MIMO сигнал передається від кожної антени з різною поляризацією, що дозволяє при прийомі його ідентифікувати (рис.2.7).

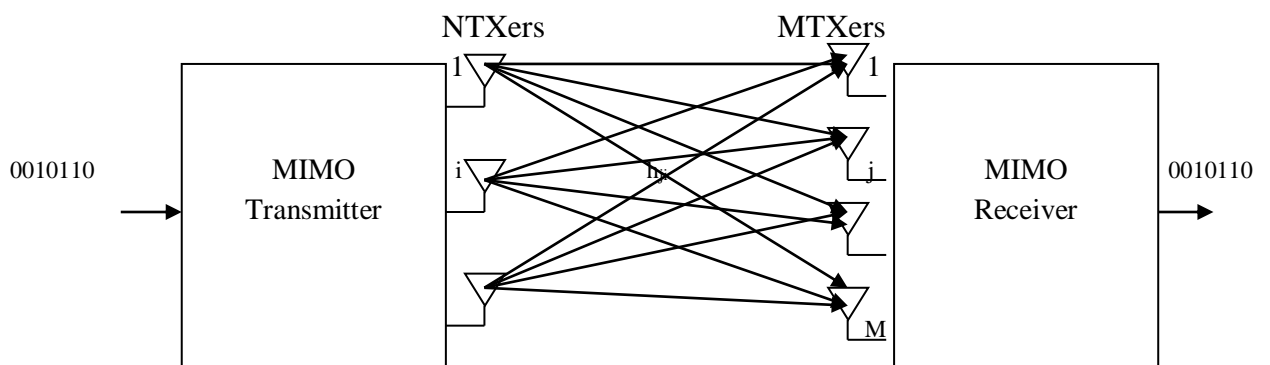


Рисунок 2.7 – Принцип організації передачі сигналу

Приклад системи: Кількість просторових потоків  $(N) < x_v (M, N)$ .



$N$  - кількість антен на передавальній стороні,  $M$  - кількість антен на приймальній стороні.

Матриця комплексних чисел:

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \\ h_{41} & h_{42} & h_{43} \end{bmatrix}.$$

У матриці  $H$  кожен  $h_{ij}$  є комплексним числом:  $a + jb$  (амплітуди і фази) .

Але в простому випадку кожен з переданих сигналів виявляється зміненим самим середовищем передачі (затримкою в часі, загасанням і іншими спотвореннями). У міському середовищі сигнали будуть відбиватися від дерев, будівель тощо. Об'єктів і продовжувати свої шляхи не тільки до точки прийому, але і в інших напрямках. На приймальній стороні антени приймають сигнал з радіоефіру з шумами.

Приклад для системи 3x3:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} + \text{Шум}.$$

$$\begin{bmatrix} \hat{b}_1 \\ \hat{b}_2 \\ \hat{b}_3 \end{bmatrix} = H^{-1} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}.$$

Також антени встановлюються з просторовим рознесенням, за рахунок чого забезпечується рознесений прийом. На кожен з приймачів сигнали надходять від усіх антен системи. Кожен суматор бере із загального потоку енергію сигналу тільки того тракту, за який він відповідає. Він виділяє або за передбаченою ознакою, яким був забезпечений кожен з сигналів, або за допомогою аналізу затримки, загасання, зсуву фази, тобто набору спотворень або середовища поширення. Залежно від принципу роботи системи переданий сигнал може повторюватися через певний час, або передаватися з невеликою затримкою через інші антени.

MIMO включає в себе просторове тимчасове рознесення передачі, просторове мультиплексування, суміщення ліній MIMO.

- Просторове тимчасове рознесення передачі (STTD) - одні й ті ж дані закодовані передані різними антенами які подвоюють енергію в каналі. Це покращує стабільність сигналу.

Просторове мультиплексування (Spatial Multiplexing) - паралельні потоки даних за допомогою використання багатоканальні. Дозволять збільшити швидкість в 2 рази (2x2 MIMO) і до 4раза (4x4 MIMO) і т.д.

MIMO збільшує пропускну здатність за допомогою просторового мультиплексування - кілька передач в одному каналі (рис.2.8).

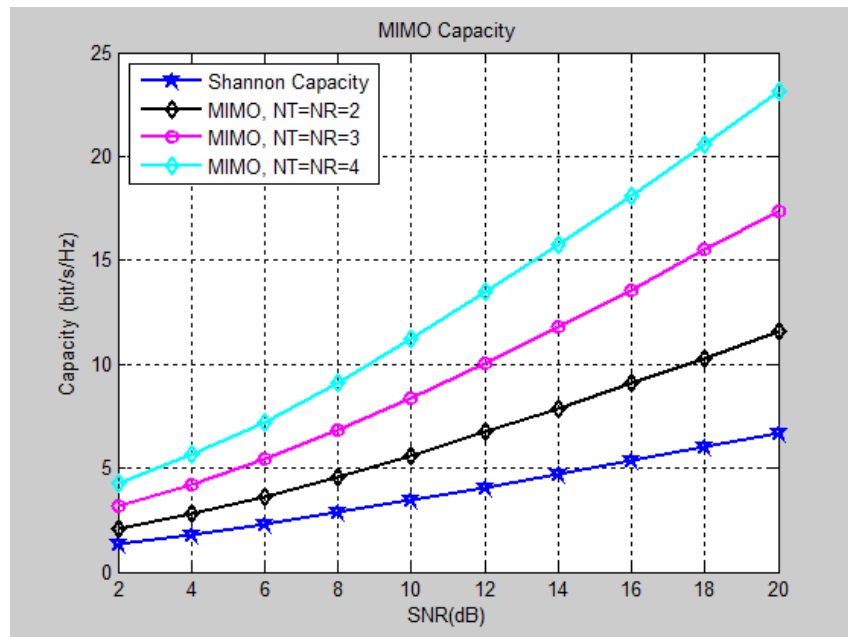


Рисунок 2.8 - Переваги просторового мультиплексування MIMO

- Поєднання ліній - підсилює сигнали в пристрої. Два пристрої можуть спільно передавати на одному суб-каналі, в якому подвоюється швидкість передачі даних.

### 2.3 Різновиди реалізації технології MIMO

На наведеному нижче малюнку представлені варіанти реалізації різних варіантів технології MIMO. Залежно від кількості передавачів і приймачів з протилежних сторін каналу зв'язку розрізняють режим кілька передавачів - кілька приймачів (це власне MIMO), кілька передавачів - один приймач (MISO), один передавач - кілька приймачів (SIMO). Можливі варіанти MIMO 2x2, 2x3, 4x4, MISO 2x1, SIMO 1x2, 1x3.

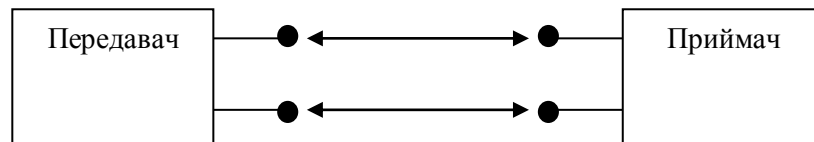


Рисунок 2.9 – Реалізація MIMO 2×2

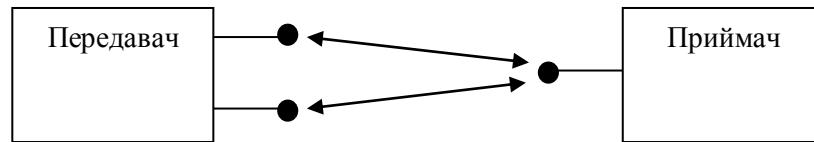


Рисунок 2.10 – Реалізація MISO 2×1

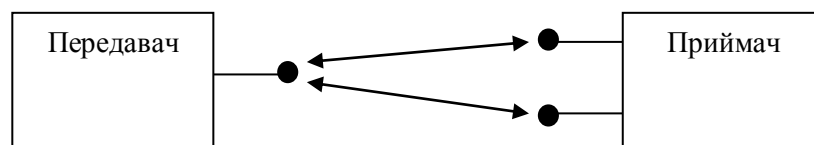


Рисунок 2.11 – Реалізація SIMO 1×2

Варіанти реалізації MISO і SIMO самі по собі не збільшують пропускну здатність радіоканалу, але істотно підвищують стійкість і протистояння багатопроменевої інтерференції. Це в кінцевому рахунку також може підвищити пропускну здатність радіоканалу за рахунок кращого рівня сигналу, меншого рівня помилок і, як наслідок, використання OFDM модуляції більш високого рівня.

На даний момент відомо два варіанти реалізації MU-MIMO в 802.11ac [15]:

1) SDMA (Space Division Multiple Access) дозволяє передавати дані різним клієнтам з різних просторових потоків (для цього потрібен Beamforming);

2) Downlink MIMO дозволяє розбити підносійні OFDM на групи, і динамічно виділяти кожного клієнта потрібне число тих, що піднесуть.

Таким чином, навіть якщо на точці доступу будуть клієнти 2x2: 2 MIMO - все одно можна буде використовувати весь потенціал каналу.

Навіть якщо обмежити максимальну швидкість мережі одним Гбайт, стандарт 802.11ac дає істотні вигоди як для домашніх (високі швидкості), так і для корпоративних мереж (ефективна утилізація цих найвищих швидкостей в мережах з великим числом клієнтів) [15].

Розробляючи стандарт 802.11ac, група TGac побудувала на можливості формування променя зі стандарту 802.11n новий механізм, який дозволяє точці доступу спілкуватися з декількома клієнтськими пристроями в різних

напрямаках одночасно, використовуючи один і той же канал, кілька антен і просторове мультиплексування. Ця технологія була названа MU-MIMO (розрахована на багато користувачів MIMO). Вона додана в 802.11ac для того, щоб забезпечити вимогу сумарної пропускної здатності 1 Гбіт / с при роботі з декількома пристроями.

У стандарті 802.11n, точка доступу повинна використовувати тимчасовий поділ для мультиплексування декількох станцій і обслуговувати їх по черзі один за одним, таким чином, скорочуючи їх ефективну пропускну здатність. Стандарт 802.11n допускав використання максимально чотирьох просторових потоків, призначених одному пристрою в один момент часу (режим SU-MIMO). У стандарті 802.11ac в режимі MU-MIMO точка доступу (або інша станція) передає незалежні потоки даних декільком станціям в один і той же час в одному і тому ж частотному діапазоні (Рис. 2. 12).

Передбачається використання до восьми просторових потоків, які можуть бути розділені максимально між чотирма станціями, кожна з цих станцій може виділяти різну кількість просторових потоків (але не більше чотирьох на один пристрій). При цьому підтримка більше одного просторового потоку клієнтською станцією за стандартом не обов'язкова. Збільшення кількості просторових потоків дозволило подвоїти максимальну теоретичну пропускну здатність всієї мережі 802.11ac в порівнянні з 802.11n [16].

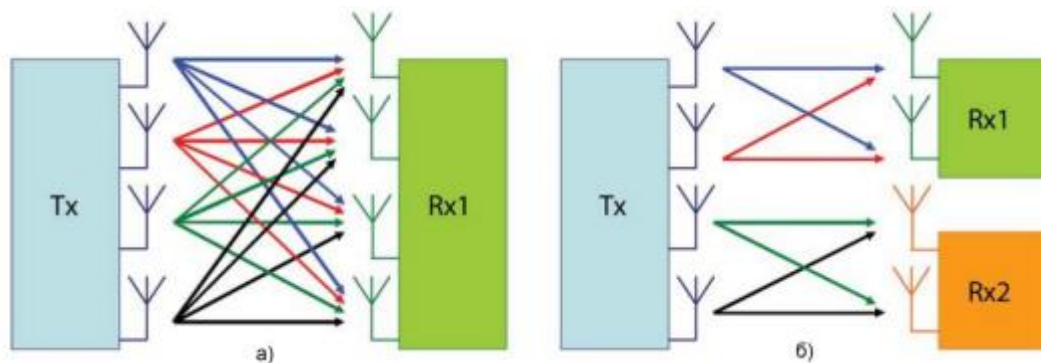


Рисунок 2.12 – Режими SU- і MU-MIMO

- а) Режим SU-MIMO, один користувач, 4 просторових потоки;
- б) Режим MU-MIMO, два користувача, два просторових потоки до кожного.

Якщо точку доступу 802.11n можна розглядати як аналог концентратора Ethernet (hub), то точку доступу 802.11ac можна розглядати в якості бездротового комутатора (на низхідному каналі).

При проходженні через бездротовий канал, потоки об'єднуються, і

задача приймача розділити їх і розшифрувати. Шляхом попередньої обробки потоків даних в передавачі (аналогічно, як і при формуванні променя), перешкоди від накладення різних потоків, призначених для різних станцій, усуваються в приймачі кожної станції. Таким чином, кожна станція отримує свої необхідні дані, вільні від перешкод паралельних передач. Однак використання модуляцій високого порядку, наприклад 256 QAM, небажане, так як вони більш чутливі до спотворень.

На рисунку 2.13 показаний приклад роботи з трьома станціями в режимі формування променя. Для передачі даних користувачеві 1, точка доступу формує до нього потужний промінь, це показує верхня пелюстка кривої. У той же час точка доступу зменшує до мінімуму енергію променя до користувача 1 в напрямку користувачів 2 і 3. Це називається «нульове управління» (управління становищем нуля діаграми спрямованості антени) і показано на кривій користувачів 2 і 3.

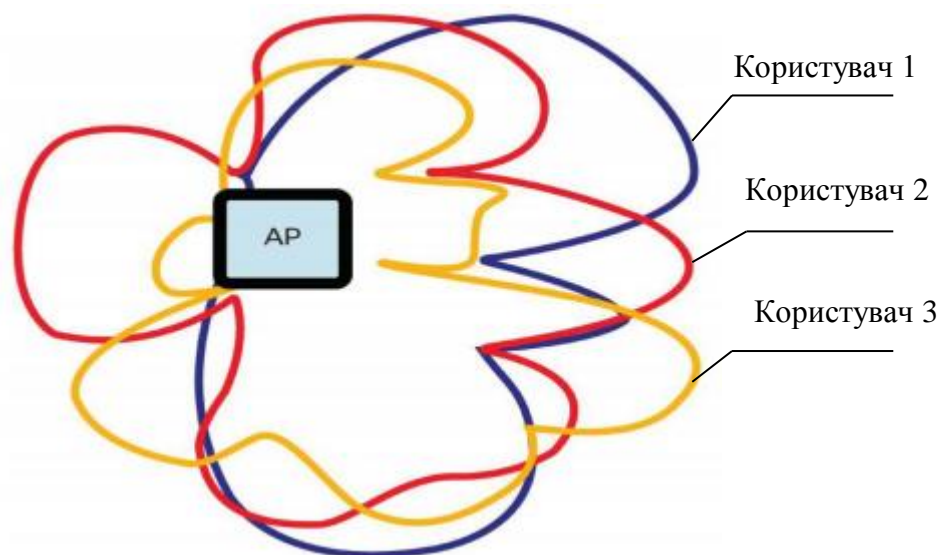


Рисунок 2.13 – MU-MIMO використовує поєднання формування променя і «нульового управління» для кількох користувачів одночасно

Аналогічно в той же час, точка доступу посилає дані користувачам 2 і 3, формуючи промінь і утворюючи «вирізи», як показано на кривих користувачів 2 і 3. Таким чином, кожен з користувачів 1, 2 і 3 приймає сильний сигнал переданих саме йому даних, лише в незначній мірі пошкоджений накладенням даних для інших користувачів.

Складність реалізації MU-MIMO лягає головним чином на точку доступу, де і відбувається попередня обробка. Точка доступу повинна дуже точно знати характеристики бездротового каналу між собою і усіма станціями. Так як характеристики каналу змінюються з плином часу, вона

повинна вести постійні вимірювання, які додають накладні витрати. Приймаючі станції повинні мати можливість повідомляти інформацію про канал точки доступу. Необхідна інформація про канал дуже схожа на ту, що потрібно для формування променя в режимі явного зворотного зв'язку.

В технології SU-MIMO просторова надмірність (додаткові антени) використовуються в основному в цілях підвищення достовірності передачі і збільшення пропускної здатності в напрямку від точки доступу до станції. У MU-MIMO до них додалася і вийшла на перший план ще одна - створення незалежних передач різним станціям.

При однаковій пропускній здатності систем SU-MIMO і MU-MIMO, остання дозволяє знизити вимоги до кількості антен клієнтів, що в свою чергу веде до зниження вартості пристрою і його розмірів.

Недолік MU-MIMO в тому, що кількість часу, в якому середовище зайняте, визначається найповільнішим каналом серед усіх пар «точка доступу-станція» (або каналом, який вимагає найбільше часу для завершення його передачі). Нові дані не можуть бути передані кожній зі станцій доти, поки всі передачі станціям в багатокористувацькій групі не будуть закінчені. Якщо існує велика різниця в кількості переданих даних або пропускній здатності до різних станцій, це може привести до неефективного використання бездротового середовища.

MU-MIMO є складною технологією і вимагає часу для правильної реалізації, тому вона не буде доступна в пристроях першої хвилі стандартизації. По суті, розширення можливостей системи досягається за рахунок значно більш дорогої обробки сигналу і її підвищеної складності. З цієї причини, технологія MU-MIMO включена в стандарт 802.11ac як додаткова.

## 2.4 Технологія формування променя

Технологія формування променя сама по собі не має права продовжувати максимальний радіус дії і не збільшує максимальну швидкість, це метод, що дозволяє використовувати більш високі схеми модуляції і кодування в межах заданого радіусу дії.

У стандарті 802.11n формування променя (transmit beam forming) є не обов'язковою функцією. Він не знайшов широкого застосування через несумісність застосовуваних постачальниками методів. Значною мірою це обумовлено безліччю варіантів протоколу, доступних в оригінальному стандарті 802.11n, які допускали занадто багато варіантів зондування, методів і форматів зворотного зв'язку.

Стандарт 802.11ac визначає єдиний метод формування променя, який сприятиме функціональну сумісність. Цей метод - зондування нульовим пакетом даних (null data packet, NDP) з прямим явним стислим зворотним зв'язком. Обраний протокол схожий на протокол 802.11n і є його наступником. Він, як відомо, забезпечує найбільш точну оцінку каналу, яка враховує всі недоліки передавача і приймача.

У цьому методі точка доступу передає спеціальний зондуючий сигнал всім станціям, які оцінюють канал між ними і точкою доступу і повідомляють їй інформацію про стан каналу (матриці стану). Зворотній зв'язок стандартизується, тому точки доступу та станції різних постачальників будуть взаємодіяти правильно.

Пристрій, зазвичай точка доступу, передає кадр Very High Throughput Null Data Packet Announcement (VHT NDP Announcement). Його єдина мета: містити адресу точки доступу та цільової станції. За кадром VHTNDP Announcement відразу слідує кадр VHTNDP, призначений для тієї ж станції. Кожна станція вимірює радіочастотний канал між точкою доступу і собою, використовуючи преамбулу кадру VHTNDP, і розраховує інформацію про канал. Перший цільовий одержувач негайно відповідає інформацією про канал в кадрі VHT Compressed Beam forming, інші одержувачі відповідають, коли їх опитає точка доступу. Кадри VHTNDP Announcement, VHT NDP, VHT Compressed Beam forming подібні до функцій с 802.11n, однак через деякі тонкі відмінності, зондування 802.11ac не володіє зворотною сумісністю з пристроями 802.11n.

Незважаючи на перевагу в оцінці каналу, цей механізм вносить досить великі накладні витрати на кадри VHT NDP Announcement, VHT NDP і кадр VHT Compressed Beam forming, що несе дані явною стислий зворотного зв'язку. Для точки доступу з чотирма антенами, розмір даних зворотного зв'язку може змінюватися від 180 до 1800 байт, в залежності від кількості антен клієнтів і рівня стиснення. Зондування тільки одного одноантенного клієнта в діапазоні 80 МГц займає близько 250 мкс. З огляду на те, що пристрої можуть передавати, наприклад, на швидкості 433 Мбіт / с, це дороге задоволення, так як за цей же час можна передати додатково 13 кбайт. Тому, формування променя - це додаткова функція в стандарті 802.11ac, яка є опціональною. Вона була реалізована підтримка технології формування спрямованого сигналу Beamforming (іноді її називають технологією адаптивного формування діаграми спрямованості Transmit Beamforming або Tx Beamforming).

Дана технологія вирішує проблему падіння потужності сигналу, викликану його відображенням від різних предметів і поверхонь.

Технологія формування спрямованого сигналу могла застосовуватися ще в рамках стандарту 802.11n, однак на той момент вона не була стандартизована, і при використанні пристроїв різних виробників вона, як правило, працювала некоректно.

Технологія Beamforming працює наступним чином [12]:

Радіосигнали, прийняті від клієнтів, допомагають точці доступу визначити їх місце розташування, і ця інформація використовується в подальшому для розрахунку і формування вузьконаправленого сигналу (в звичайному режимі роботи сигнал від приймача розходить рівномірно у всі боки, а при Beamforming направляється в строго визначеному напрямку, що досягається за допомогою декількох антен).

Застосування технології Beamforming дозволяє більш ефективно використовувати смугу пропускання, що позитивно відбивається при роботі з потоковою музикою і відео, іграми або додатками, які дуже чутливі до пропускної спроможності і затримок в мережі.

Також була реалізована сумісність пристроїв з підтримкою даної технології. Тепер, якщо один пристрій підтримує Beamforming, а інше немає, вони все одно зможуть працювати разом.

Формування діаграми спрямованості антени с допомогою технології "Beamforming" збільшує швидкість передачі в безпроводних мережах на середніх відстанях між точкою доступу і користувачем завдяки збільшенню відношення сигналу / шум, що в свою чергу дає можливість використовувати більш ефективні методи модуляції. На малих відстанях потужність сигналу досить висока, що забезпечує велике відношення сигнал / шум і, відповідно, максимальну швидкість передачі даних. На великих відстанях формування діаграми спрямованості не дасть істотного виграшу в порівнянні з всенаправленою антеною, і швидкість передачі даних буде ідентична у випадку, коли "Beamforming" не використовується.

Ефективність використання технології "Beamforming" ілюструє рис. 2.14 [12]:

Формування діаграми спрямованості дозволяє збільшити відношення сигнал / шум на 2.5 дБ, що дає можливість використовувати більш високі значення MCS (більш високому значенню MCS відповідає більш висока швидкість передачі даних) при порівняних з першою діаграмою відстанях.



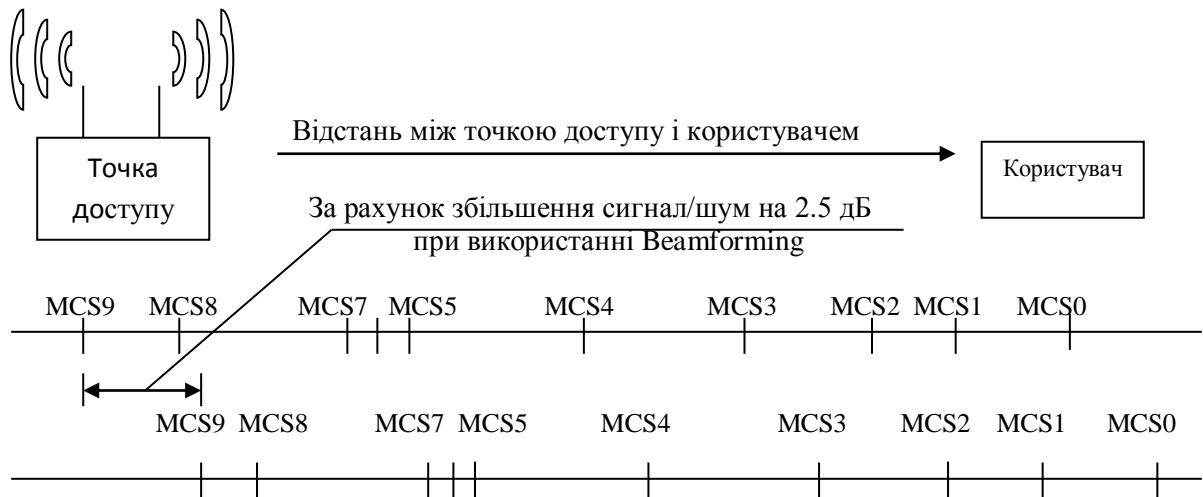


Рисунок 2.14 - Ілюстрація ефективності використання технології Beamforming

На рис. 2.14 відстань від точки доступу до користувача збільшується вправо. Верхня діаграма показує значення MCS при використанні ненаправленої антени, а нижня - при використанні технології "Beamforming".

## 3 РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ БЕЗПРОВІДНОГО КАНАЛУ СТАНДАРТУ 802.11ac

### 3.1 Визначення взаємних перешкод

Згідно специфікації 802.11ac мінімальна допустима чутливість будь-якої радіостанції Wi-Fi працює на даному стандарті не повинна перевищувати -65 dBm, (для прикладу Wi-Fi бездротовий адаптер PCI модель HW-2454 має чутливість -70dBm), придушення перехресних перешкод 15 дБ і -1 дБ придушення перешкоди від сусіднього каналу працюючого на тій же частоті, при швидкості передачі даних 6,76 Гбіт / с. Зауважимо, що обладнання Wi-Fi проектується таким чином щоб його спектральна маска відповідала відповідним вимогам за рівнем перехресних перешкод.

При розгляді джерел перешкод для приладів, що працюють в діапазоні 5 ГГц, необхідно враховувати пристрої Bluetooth, інші Wi-Fi пристрої, що працюють на тих же каналах. На цій хвилі створюються перешкоди радіотелефонами та мікрохвильовками.

### 3.2 Розрахунок зони покриття мереж стандарту 802.11

Фірма виробник Wi-Fi обладнання, як правило, вказує зону стійкої роботи Wi-Fi радіостанції. Так для обладнання Wi-Fi при потужності передавача 16-18 dBm зона стійкої роботи становить 200 м (HW-2 454), виходячи з цього та враховуючи те що, потужність сигналу падає пропорційно квадрату відстані можна розрахувати необхідну додаткову потужність сигналу для передачі на будь-яку відстань.

$$\Delta P = 20 (\text{Log}_{10}L - 2,3) , \quad (3.1)$$

де  $\Delta P$  - додаткова потужність [dBm] необхідна системі;

$L$  - відстань [м].

Необхідну додаткову потужність  $\Delta P$  можна отримати, використовуючи антенну техніку. Так як маркування антен, що продаються йде як правило в dBi (коефіцієнт посилення по відношенню до ізотропної антени), то його необхідно перевести в dBd (коефіцієнт посилення по відношенню до дипольної антени).

$$\text{dBd} = \text{dBi} - 2,2. \quad (3.2)$$

В цілому при використанні антен на коефіцієнт посилення системи впливатиме:

- втрати в фідерах;
- коефіцієнт підсилення антени передавача;
- коефіцієнт підсилення антени приймача.

Втрати в фідерах (кабельних збірках) можна розрахувати виходячи з наступних характеристик:

- втрати в піктейлах - 2 dBm / м;
- втрати в кабелі RJ-8U - 0,3 dBm / м;
- втрати в конекторах- 1-2 dBm / м.

Активне обладнання Wi-Fi стандартизується трьома основними органами стандартизації Wi-Fi Alliance, IEEE, ETSI.

Згідно Code of Federal Regulation 47 (USA), неліцензійне використання Wi-Fi допускається при рівнях потужності менших ніж дозволених для первинного користувача (є ліцензія). Що цілком розумно, враховуючи, що на даній частоті працює ряд медичних приладів і введення Wi-Fi мережі не повинен призводити до збоїв.

Радіостанції стандарту Wi-Fi 802.11 мають потужність передавачів від 30- 100 мВт, тому можуть бути використані без ліцензії.

Крім того CFR обумовлює і самі рівні потужності передачі. Допустима пікова потужність 1 Вт (30 dBm) з антеною, що має коефіцієнт посилення 6 dBi. Іншими словами якщо радіостанція не бере участі в формуванні моста, то її EIRP (еквівалентна ізотропно випромінювана потужність) не повинен перевищувати 36 dBi.

Для мостів діє правило, згідно з яким потужність передавача повинна знижуватися на 1 дБ при кожній збільшенні посилення антени на 3 дВ вище рівня 6 dBi.

Використовуючи вище сказане можна оцінити максимально допустимий радіус охоплення точки доступу для випадку коли вона не працює в якості моста:

$$L_{\max} \sim 1230 \text{ (м)}.$$

На радіус дії Wi-Fi зв'язку так же істотний вплив роблять предмети, що знаходяться в зоні дії Wi-Fi передачі.

Дані предмети можуть відображати мікрохвилі і приводити до багатопроменевого завмирання або поглинати їх (тканини, папір).

### 3.3 Розрахунок зони дії сигналу та зони Френеля

Розрахунок дальності роботи бездротового каналу зв'язку. Без виводу наведемо формулу розрахунку дальності. Вона береться з інженерної формули розрахунку втрат у вільному просторі:

$$FSL = 33 + 20 (1gF + 1gD) , \quad (3.3)$$

де FSL (Free Space Loss) - втрати у вільному просторі (дБ);

F-центральна частота каналу, на якому працює система зв'язку (МГц);

D -відстань між двома точками (км).

FSL визначається сумарним посиленням системи. Воно обраховується таким чином:

$$Y_{дБ} - P_t, дБмВт + G_t, дБи + G_T, дБи - P_{min}, дБмВт - L_t, дБ - L_T, дБ , \quad (3.4)$$

де  $P_t, дБмВт$  - потужність передавача;

$G_t, дБи$  - коефіцієнт підсилення передавальної антени;

$G_T, дБи$  - коефіцієнт посилення приймальної антени;

$P_{min}, дБмВт$  - чутливість приймача на даній швидкості,

$L_t, дБ$  - втрати сигналу в коаксіальному кабелі і роз'ємах передавального тракту;

$L_T, дБ$  - втрати сигналу в коаксіальному кабелі і роз'ємах приймального тракту.

Залежність чутливості від швидкості передачі Фірма Майкрософт включила в свої продукти деяку подобу криптозахисту. Але це вельми законослухняна фірма, яка чітко дотримується всіх експортні обмеження США, та ще й перестраховується. Це не дозволяє сподіватися на стійкість такого захисту. До того ж, алгоритм шифровки не описаний, що, як було показано вище, є показником ненадійності.

Для кожної швидкості приймач має певну чутливість. Як приклад в таблиці наведено параметри приймачів, які відповідають стандарту 802.11ac. По-перше, проводиться аналіз на мінімальну чутливість по входу, щоб гарантувати, що приймач може демодулювати мінімально допустимий сигнал, тобто кількість помилкових пакетів не повинна перевищувати 10%. Для 11ac мінімальний вхідний рівень сигналу визначається типом модуляції, швидкістю кодування і смугою (див. табл. 3.1) [17].

Таблиця 3. 1 - Параметри даних

Модуляція	Мінімальна чутливість, дБм			
	20 МГц	40 МГц	80 МГц	160 МГц або 80+80 МГц
BPSK	-82	-79	-76	-73
QPSK	-79	-76	-73	-70
QPSK	-77	-74	-71	-68
16QAM	-74	-71	-68	-65
16QAM	-70	-67	-64	-61
64QAM	-66	-63	-60	-57
64QAM	-65	-62	-59	-56
64QAM	-64	-61	-58	-55
256QAM	-59	-56	-53	-50
256QAM	-57	-54	-51	-48

Для кожної швидкості приймач має певну чутливість. Як приклад в таблиці наведено параметри приймачів, які відповідають стандарту 802.11ac. По-перше, проводиться аналіз на мінімальну чутливість по входу, щоб гарантувати, що приймач може демодулювати мінімально допустимий сигнал, тобто кількість помилкових пакетів не повинна перевищувати 10%. Для 11ac мінімальний вхідний рівень сигналу визначається типом модуляції, швидкістю кодування і смугою (див. табл. 3.1) [17]. При тестуванні накладаються наступні обмеження: довжина пакета не менше 4096 байт, захисні інтервали 800 нс, BCC і кодування без використання STB.

В залежності від марки радіо модулів максимальна чутливість може трохи змінюватись. Ясно, що для різних швидкостей максимальна дальність буде різною. FSL обчислюється за формулою:

$$FSL = Y_{дБ} - SOM, \quad (3.5)$$

де SOM (System Operating Margin) - запас в енергетиці радіозв'язку (дБ).

Враховуються можливі чинники, що негативно впливають на дальність зв'язку, такі як:

- температурний дрейф чутливості приймача і вихідної потужності передавача;
- атмосферні явища: туман, сніг, дощ;
- неузгодженість антени, приймача, передавача з антенно-фідерних трактом.

Параметр SOM зазвичай береться рівним 10 дБ. Вважається, що 10-децибельний запас щодо посилення достатній для інженерного розрахунку.

Центральна частота каналу F береться з таблиці 3.2 [18].

UNII -1: 5150 -250 МГц (доступно 4 частотних канала WiFi).

UNII-2: 5250 – 5350 МГц (доступно 4 частотних канала WiFi).

UNII-2 Extended: 5470 – 5725 МГц (доступно 11 частотних каналів WiFi).

UNII-3: 5725 – 5825 МГц(доступно 4 частотних канала WiFi).

UNII (Unlicensed National Information Infrastructure).

Таблиця 3. 2 - Обчислення центральної частоти

Канал	36	40	44	48									
Центральна частота, МГц	5180	5200	5220	5240									
Смуга	UNII -1												
Канал	52	56	60	64	100	104	108	112	116	120	124	128	132
Центральна частота, МГц	5260	5280	5300	5320	5500	5520	5540	5560	5580	5600	5620	5640	5660
Смуга	UNII -2												
Канал	149	153	157	161									
Центральна частота, МГц	5745	5765	5785	5805									
Смуга	UNII -3												

У підсумку отримаємо формулу дальність зв'язку:

$$D = 10^{\left(\frac{FSL}{20} - \frac{33}{20} - \lg F\right)}. \quad (3.6)$$

Знайдемо відстань, на якому буде стабільно працювати зв'язок на швидкостях 56 Мбіт / с і 6 Мбіт / с при частоті 80 МГц для точки доступу DAP-2660 і безпроводного адаптера AC1200. Їх паспортні характеристики [19]:

- потужність передавачів DAP-2660 і AC1200: 20 дБм для 5 ГГц;
- чутливість DWL-2100AP на швидкості 54 Мбіт / с: -58 дБмВт;
- чутливість DWL-2100AP на швидкості 6 Мбіт / с: -76 дБмВт;
- чутливість DWL-G132 на швидкості 54 Мбіт / с: -58 дБмВт;
- чутливість DWL-G132 на швидкості 6 Мбіт / с: -76 дБмВт;

- коефіцієнт посилення штатної антени DAP-2660: 2 дБі;
- коефіцієнт посилення штатної антени AC1200: 0 дБі.

Втрат в антенно-фідерному тракті, тобто між бездротовими точками і їх антенами, немає.

Знайдемо відстань на швидкості 54 Мбіт / с. Параметр FSL дорівнює :

$$FSL = 20 + 2 - (-58) - 10 = 70(\text{дБ}). \quad (3.7)$$

Знаходимо дальність роботи бездротового обладнання на даній швидкості (як приклад візьмемо 36 канал):

$$D_{54} = 10^{\left(\frac{70}{20} - \frac{33}{20} - \lg 5180\right)} = 0,014 \approx 14 (\text{м}). \quad (3.8)$$

Знайдемо відстань на швидкості 6 Мбіт / с. FSL дорівнює:

$$FSL = 20 + 2 - (-76) - 10 = 88 (\text{дБ}). \quad (3.9)$$

Визначимо дальність роботи бездротового обладнання на даній швидкості:

$$D_6 = 10^{\left(\frac{88}{20} - \frac{33}{20} - \lg 5180\right)} = 0,109 \approx 109 (\text{м}). \quad (3.10)$$

Радіохвиля в процесі розповсюдження в просторі займає об'єм в вигляді еліпсоїда обертання з максимальним радіусом в середині прольоту, який називають зоною Френеля (рис.3.1). Природні (земля, горби, дерева) і штучні (будівлі, стовпи) перешкоди, що потрапляють в це простір, послаблюють сигнал.

Радіус першої зони Френеля над передбачуваною перешкодою може бути розрахований за допомогою формули:

$$R = 17,3 \sqrt{\frac{1}{f} \frac{SD}{S+D}}, \quad (3.11)$$

де R - радіус зони Френеля (м);

S, D - відстань від антен до найвищої точки передбачуваного перешкоди (км);

f - частота (ГГц).

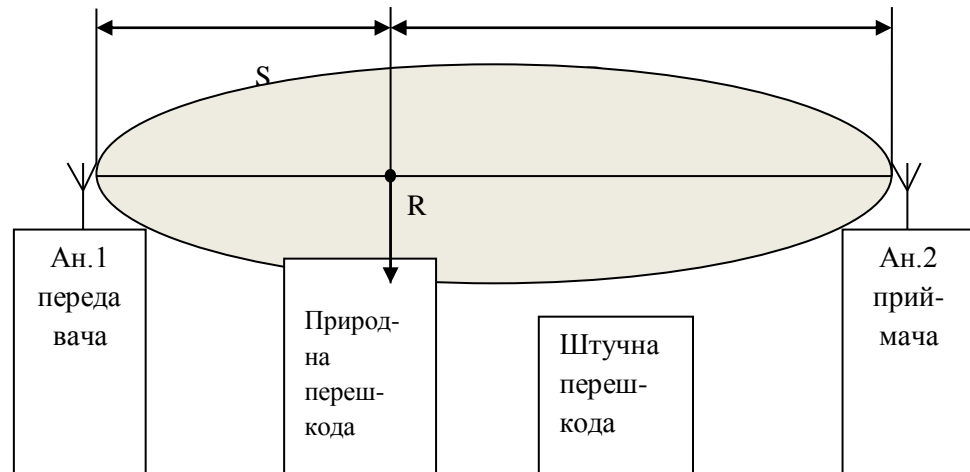


Рисунок 3.1 – Зона Френеля

Зазвичай блокування 20% зони Френеля вносить незначне загасання в канал. При блокуванні понад 40% загасання сигналу буде вже значним, слід уникати попадання перешкод на шляху розповсюдження.

Цей розрахунок зроблений у припущенні, що земля плоска. Він не враховує кривизну земної поверхні. Для протяжних каналів слід проводити сукупний розрахунок, який враховує рельєф місцевості та природні перешкоди на шляху поширення. У разі великих відстаней між антенами слід намагатися збільшувати висоту підвісу антен, беручи до уваги кривизну земної поверхні. Обчислення центральної частоти вказано в таблиці 3.2.

Нехай відстань між антенами складає 10 м., завада від правої антени знаходиться на відстані 7 м. Тоді підставивши дані з таблиці 3.2 для 36,40,44,48 каналів у формулу 3.11 отримаємо дані радіусу зони Френеля у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 - Обчислення центральної частоти

Канал	Частота	Радіус зони Френеля
36	5180	11
100	5500	10,6
132	5660	10,5
161	5805	10,4

### 3.4 Розрахунок просторових потоків МІМО

В кінці 1940-х років американський інженер Клод Шеннон Дж. запропонував наукове обґрунтування теорії інформації. Насправді, він показав, що здатність (с) каналу зв'язку - це число бітів інформації в секунду, які теоретично можуть бути передані по каналу зв'язку зі як завгодно низької



частоти появи помилок по бітам. Пропускна здатність є функцією пропускної здатності каналу зв'язку і співвідношення  $S / N$ .

Розвинена Шенноном теорія інформації допомогла вирішити головні проблеми, пов'язані з передачею повідомлень, а саме: усунути надмірність переданих повідомлень, зробити кодування і передачу повідомлень по каналах зв'язку з перешкодами. Рішення проблеми надмірності повідомлення дозволяє максимально ефективно використовувати канал зв'язку.

Шеннон показав, що для будь-яких швидкостей  $R < C$ , існує швидкість кодування каналів  $R$ , при якій ймовірність появи символних помилок дуже мала. Таким чином, для будь-яких  $R < C$  і будь-яких які нульових ймовірностей помилок  $P_e$ , існує швидкість кодування  $R$ , яка досягає  $P_e$ . Однак такий код може мати велику довжину блоку, і складність кодування і декодування також буде досить високою.

Необхідна довжина блоку може збільшитися у міру того як  $P_e$  зменшується і / або швидкість  $R$  зростає в бік  $C$ . До того ж, Шеннон показав, що кодування на швидкостях  $R > C$  не зможе досягти як завгодно малого відсотка помилок, і, таким чином, вірогідність помилок на швидкостях вище пропускної здатності буде далека від 0. Тому, пропускна здатність каналу дійсно є межею для передачі інформації [9].

Теорема Шеннона стверджує, що ємність каналу  $C$ , що означає теоретичну верхню межу швидкості передачі даних, які можна передати з даною середньою потужністю сигналу  $S$ , схильна до адитивного білого гаусовського шуму потужності  $N$  дорівнює:

$$\frac{C}{B} = \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right), \quad (3.12)$$

де  $C$  - ємність (пропускна здатність) каналу, біт / с;

$B$  - смуга пропускання каналу, Гц;

$S$  - повна потужність сигналу над смугою пропускання, Вт або  $B^2$ ;

$N$  - повна шумова потужність над смугою пропускання, Вт;

$S / N$  - відношення середньоквадратичної потужності сигналу до середньоквадратичної потужності гаусовського шуму на виході системи передачі, виражене як відношення потужностей (відношення сигнал / шум).

У загальному випадку, вираз  $\log_2 (1 + x)$  пропорційно  $x$  для малого значення  $x$ , що означає, що для малого відношення сигнал шум  $S / N$  пропускна здатність зростає приблизно пропорційно відношенню  $S / N$ . Однак, для великих  $x$ ,  $\log_2 (1 + x) \approx \log_2 (x)$ , що означає, що для більшого

відношення  $S / N$  пропускна здатність зростає логарифмічно з збільшенням  $S / N$ .

Однією з переваг використання MIMO-антен є збільшення пропускної здатності при незмінних ширині смуги і рівні потужності. Пропускна здатність зростає пропорційно мінімальній кількості антен:

$$C = B \cdot \min\{N_T, N_R\} \cdot \log_2 \left( 1 + N_R \min\{N_T, N_R\} \cdot \frac{S}{N} \right). \quad (3.13)$$

При використанні технології MIMO пікова швидкість передачі даних визначається виразом:

$$C_{MIMO} = M \cdot f_d \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right). \quad (3.14)$$

Параметр  $M$  залежить від конфігурації MIMO:

$$M = \min\{M_{\text{прд}}, M_{\text{пр}}\}, \quad (3.15)$$

де  $M_{\text{прд}}$  - число передавальних антен;

$M_{\text{пр}}$  - число приймальних антен.

Швидкість передачі даних збільшується лінійно зі збільшенням числа антен.

Для несиметричних антенних конфігурацій MIMO швидкість передачі даних:

$$C_{\text{прд/пр}} = f_d \cdot \log_2 \left( 1 + M \left( \frac{S}{N} \right) \right). \quad (3.16)$$

Розрахуємо пропускну здатність для нашого випадку на лінії вниз: ширина смуги 20 МГц, циклічний префікс звичайний, MIMO 2×2.

Для того щоб оцінити швидкість передачі даних в низхідному каналі (downlink), спочатку обчислимо, скільки ресурсних елементів (або OFDM-символів) передається в мілісекундному кадрі в залежності від наявної смуги частот. Таким чином, число ресурсних елементів в кадрі дорівнюватиме:

$$N = 12 \cdot 7 \cdot N_{RB} \cdot 2, \quad (3.17)$$

де  $N_{RB}$  - число ресурсних блоків РБ;

7 - OFDMA- символів;

12 - число підносійних в ресурсному блоці;

2 - слоти.

1) Знайдемо кількість ресурсних елементів в підкадрі:

$$N=12 \cdot 7 \cdot 100 \cdot 2 = 16800 \text{ (ресурсних елементів).}$$

2) Розрахуємо швидкість, з огляду на модуляцію 64-QAM:

$$V_1 = (6 \cdot 16800) / 0,001 = 100,8 \text{ (Мбіт / с).}$$

3) З огляду на технологію MIMO 2x2, швидкість буде дорівнювати:

$$V_2 = 2 \cdot 100,8 = 201,6 \text{ (Мбіт / с).}$$

4) PDCCH канал займає від 1 до 3 символів з 14 в субкадрі. Допускаючи, що в середньому це 2,5 символи, загальне число символів витрачених в каналі PDCCH буде:

$$N_{\text{симв.}} = (2,5 / 14) \cdot 100\% = 17,86 \text{ \%}.$$

5) 6,66% займається циклічним префіксом, 10% йде під захисний інтервал, 14,29% займається пілот-сигналами (2 передавальні антени). Решта каналів (PSS, SSS, PBCH, PCFICH, PHICH) займають 2,6% від загального числа символів. Загальна кількість витрат на 20 МГц:

$$N_{\text{витр.}} = 17,86 + 6,66 + 10 + 14,29 + 2,6 = 51\%.$$

6) Максимальна швидкість:

$$V_{\text{max}} = (1-0,51) \cdot 201,6 = 98,8 \text{ (Мбіт / с).}$$

### 3.5 Моделювання технології MIMO в MATLAB

Розглянемо той випадок, коли є кілька (дві) передавальних антен і кілька (дві) приймальних антен, що призводять до утворення множинних вихідних каналу Multiple Input 2x2 (MIMO). Будемо вважати, що канал є плоским замиранням Релея багатопроменевого каналу і модуляція BPSK.

Схема вирівнювання використовується Zero Forcing. [20]

Для цього методу щоб оцінити систему, необхідно знайти матрицю  $W$ , яка задовольняє умові:  $WH=I$ . Методом (ZF) для прийнятих припущень матриця може бути знайдена :  $W = (H^H H)^{-1} H^H$ .

Ця матриця наливається псевдо-інверсною матрицею для матриці розміром  $M \times N$ .

$$H^H H = \begin{bmatrix} h_{11}^* & h_{21}^* \\ h_{12}^* & h_{22}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_{11} & h_{21} \\ h_{12} & h_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |h_{11}|^2 + |h_{21}|^2 & h_{11}^* h_{12} + h_{21}^* h_{22} \\ h_{12}^* h_{11} + h_{22}^* h_{21} & |h_{12}|^2 + |h_{22}|^2 \end{bmatrix}.$$

Використовуючи даний метод, по двом прийнятим послідовностям  $y_1$  і  $y_2$  можуть бути оцінені інформаційні послідовності  $\hat{x}_1$  і  $\hat{x}_2$ .

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \end{bmatrix} = (H^H H)^{-1} H^H \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix}.$$

Код програми:

```
>> % Script for computing the BER for 64 QAM modulation in a
% Rayleigh fading channel with 2 Tx, 2Rx MIMO channel
% Zero Forcing equalization
>> clear
>> M=64;
>> N=2^6; %number of bits or symbols
>> Eb_N0_dB=[0:25]; % multiple Eb/N0 values
>> nTx=2;
>> nRx=2;
>> for ii= 1:length(Eb_N0_dB)
% Transmitter
ip=rand(1,N)>0.5;
s=2*ip*10/nRx;
sMod = kron(s,ones(nRx,1)); %
sMod = reshape(sMod,[nRx,nTx,N/nTx]); % grouping in [nRx,nTx,N/nTx ] matrix
h = 1/sqrt(2)*[randn(nRx,nTx,N/nTx) + j*randn(nRx,nTx,N/nTx)]; % Rayleigh channel
n = 1/sqrt(2)*[randn(nRx,N/nTx) + j*randn(nRx,N/nTx)]; % white gaussian noise, 0dB
variance
% Channel and noise Noise addition
y = squeeze(sum(h.*sMod,2)) + 10^(-Eb_N0_dB(ii)/20)*n;

% Receiver

% Forming the Zero Forcing equalization matrix W = inv(H^H*H)*H^H
% H^H*H is of dimension [nTx x nTx]. In this case [2 x 2]
% Inverse of a [2x2] matrix [a b; c d] = 1/(ad-bc)[d -b;-c a]
hCof = zeros(2,2,N/nTx) ;
hCof(1,1,:) = sum(h(:,2,:).*conj(h(:,2,:)),1); % d term
```

```

hCof(2,2,:) = sum(h(:,1,:).*conj(h(:,1:)),1); % a term
hCof(2,1,:) = -sum(h(:,2,:).*conj(h(:,1:)),1); % c term
hCof(1,2,:) = -sum(h(:,1,:).*conj(h(:,2:)),1); % b term
hDen = ((hCof(1,1,:).*hCof(2,2,:)) - (hCof(1,2,:).*hCof(2,1,:))); % ad-bc term
hDen = reshape(kron(reshape(hDen,1,N/nTx),ones(2,2)),2,2,N/nTx); % formatting for
division
hInv = hCof./hDen; % inv(H^H*H)
hMod = reshape(conj(h),nRx,N); % H^H operation

yMod = kron(y,ones(1,2)); % formatting the received symbol for equalization
yMod = sum(hMod.*yMod,1); % H^H * y
yMod = kron(reshape(yMod,2,N/nTx),ones(1,2)); % formatting
yHat = sum(reshape(hInv,2,N).*yMod,1); % inv(H^H*H)*H^H*y

% receiver - hard decision decoding
ipHat = real(yHat)>0;
% counting the errors
nErr(ii) = size(find([ip- ipHat]),2);

end
simBer = nErr/N; % simulated ber
EbNOLin = 10.^(Eb_NO_dB/10);
theoryBer_nRx1 = 0.5.*(1-1*(1+1./EbNOLin).^(-0.5));
p = 1/2 - 1/2*(1+1./EbNOLin).^(-1/2);
theoryBerMRC_nRx2 = p.^2.*(1+2*(1-p));
close all
figure
semilogy(Eb_NO_dB,theoryBer_nRx1,'bp-', 'LineWidth',2);
hold on
semilogy(Eb_NO_dB,theoryBerMRC_nRx2,'kd-', 'LineWidth',2);
semilogy(Eb_NO_dB,simBer,'mo-', 'LineWidth',2);
axis([0 25 10^-5 0.5])
grid on
legend('theory (nTx=1,nRx=1)', 'theory (nTx=1,nRx=2, MRC)', 'sim (nTx=2, nRx=2,
ZF)');
xlabel('Average Eb/No,dB');
ylabel('Bit Error Rate');
title('BER for 64 QAM modulation with 2x2 MIMO and ZF equalizer (Rayleigh
channel)').

```

Результатом моделювання є:

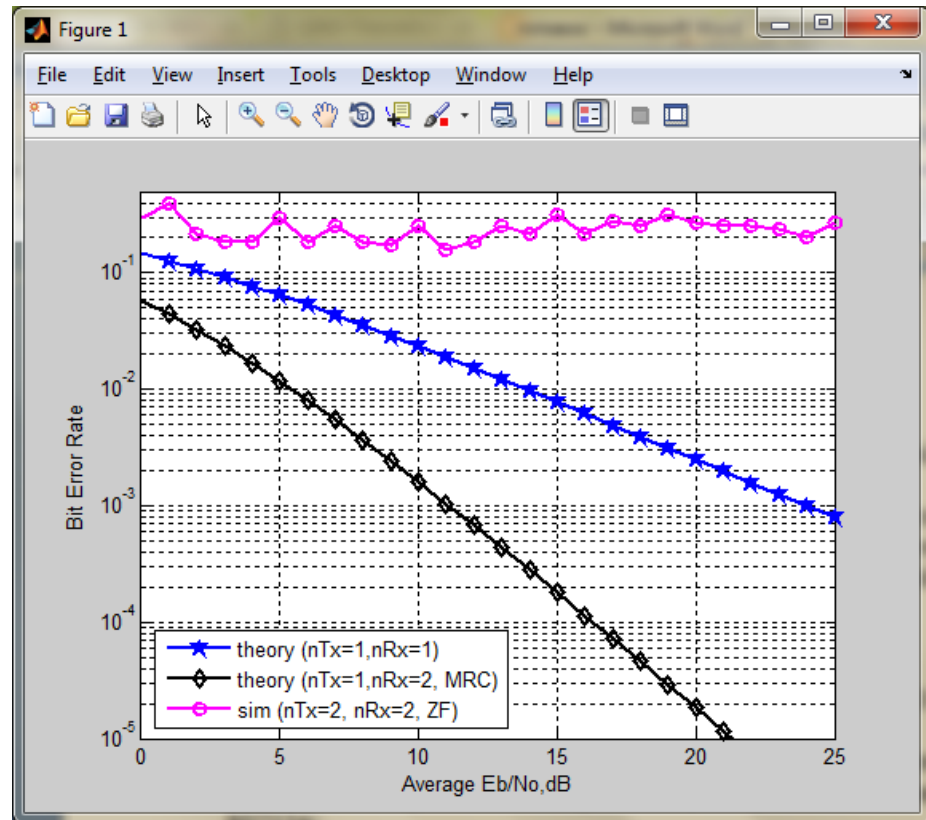


Рисунок 3.2 – Залежність відношення сигнал/шум від коефіцієнта помилкових бітів при 64 QAM

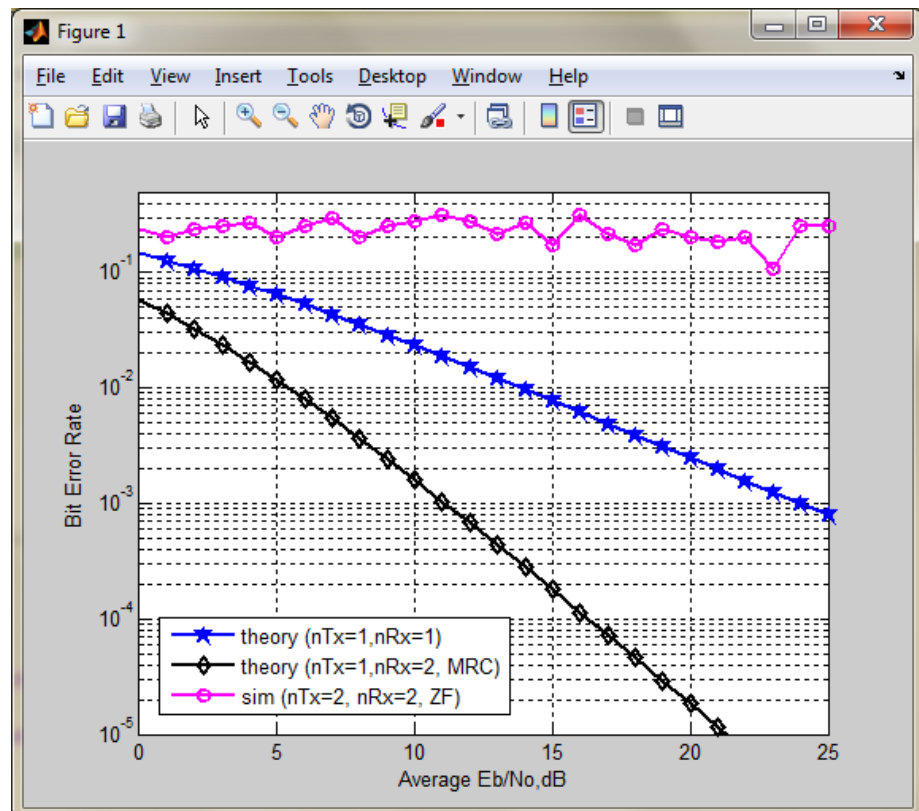


Рисунок 3.3 – Залежність відношення сигнал/шум від коефіцієнта помилкових бітів при 256 QAM

З рисунків 3.2 видно, що для MIMO 1×1 і 1×2 зі збільшенням відношення сигнал/шум зменшується коефіцієнт помилкових бітів, а для MIMO 2×2 залежність майже не значна. Залежність відношення сигнал/шум при 64 QAM і при 256 QAM змінюється не суттєво.

### 3.6 Експериментальний аналіз 802.11ac, 3x3: 3 MIMO

Для аналізу роботи стандарту 802.11ac було проведено експеримент для порівняння роботи Wi-Fi приймачів, що працюють в стандарті 802.11ac і 802.11n:

Для проведення експерименту була зібрана тестова схема з однією точкою доступу і двома Wi-Fi приймачами:

- Wi-Fi адаптер Asus (802.11ac, 3x3: 3 MIMO, 80 MHz);
- Wi-Fi адаптер Buffalo (802.11n, 3x3: 3 MIMO, 40 MHz).

В якості джерела сигналу була обрана точка доступу D-Link DAP 2695. Дана точка доступу підтримує обидва стандарти. Експеримент проводився шляхом почергового тестування кожного приймача. Для кожного приймача точка доступу налаштовувалася на необхідний стандарт (рисунк 3.3).

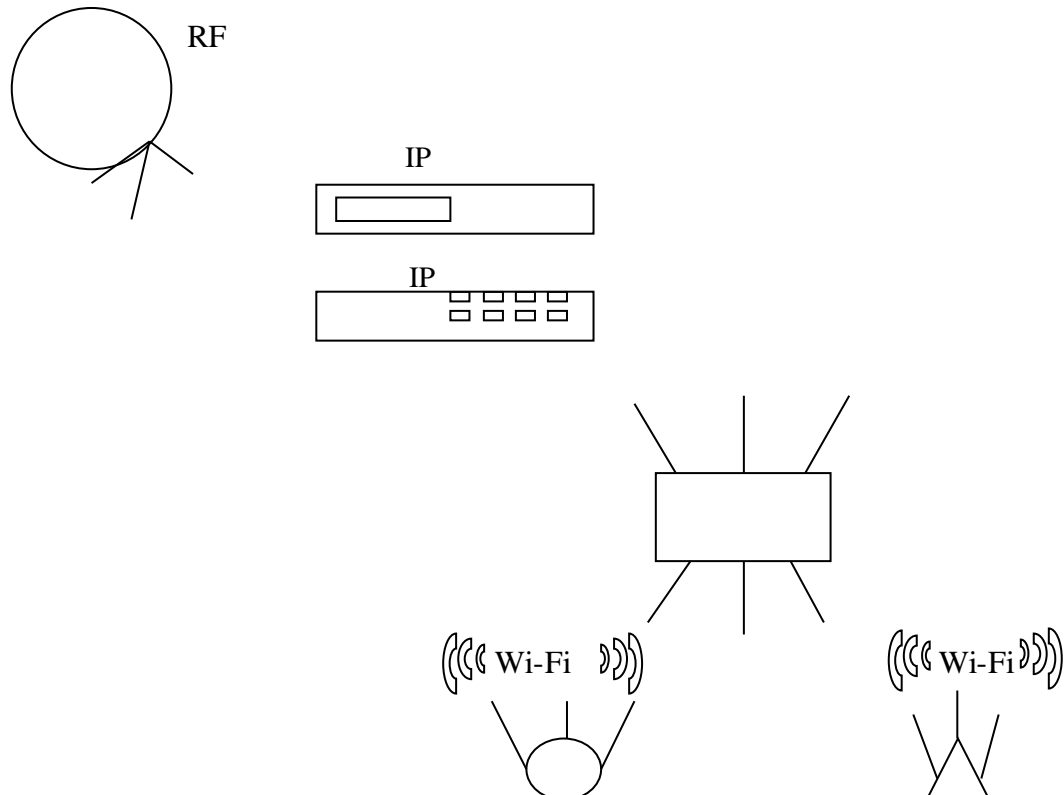


Рисунок 3.3 – Схема тестової площадки

Результати дослідження роботи Wi-Fi адаптерів при декількох потоках даних наведені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Порівняльна таблиця продуктивності 802.11ac і 802.11n

Роутер/Кількість потоків	1	2	3	4	5	6	7	8
802.11ac	169.937	295.007	352.229	386.338	416.477	427.836	438.516	440.311
802.11n	111.039	145.571	164.583	165.517	160.824			

При передачі одного потоку даних реалізація 802.11ac особлива перевага 802.11ac не спостерігається: 802.11n досягає 110Мбіт на 40МГц, 802.11ac - 170Мбіт на 80МГц. Однак при збільшенні кількості потоків Wi-Fi адаптер 802.11n перестає збільшувати швидкість прийому вже на трьох потоках, впираючись в максимум 165Мбіт. У той час як 802.11ac продовжує збільшувати швидкість аж до семи потоків. Зрозуміло, що показник питомої швидкості на потік падає, але все одно залишається в розумних межах:  $438/7 = \sim 62$ Мбіт ефективної пропускної здатності навіть вище ніж  $165/3 = 55$ Мбіт, у 802.11n.

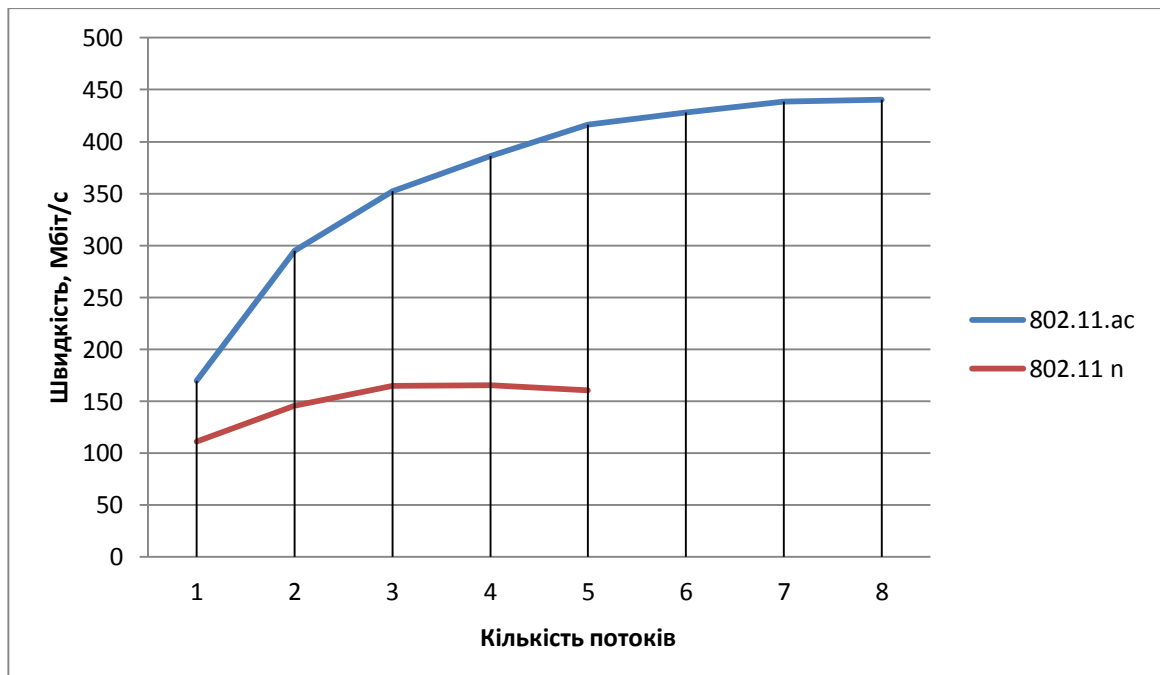


Рисунок 3.4 – Порівняння продуктивності 802.11ac і 802.11n

Тут наочно видно потенціал нової технології, яка показала майже в три рази більшу швидкість, і забезпечує більшу ємність і масштабованість потоку (рисунок 3.4).



## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ

Таблиця 4.1 – Вихідні дані до розділу охорони праці

Призначення приміщення		дослідження
Склад повітря робочої зони		
Шкідлива речовина	ПДК	пил зерновий
Концентрація шкідливої речовини в повітрі робочої зони, мг/м <sup>3</sup>	4617-88	7,49
Віброакустичні коливання		
Вид вібрації	ДСН 3.3.	локальна
Еквівалентний рівень віброприскорення, дБ	6.039-99	58
Вид шуму	ДСН	непостійний
Еквівалентний рівень шуму, дБА	3.3.6	57
Загальний рівень інфразвуку, дБ	037-99	56
Рівень ультразвуку, дБ		75
Неіонізуючі випромінювання		
Частота електричного поля радіочастотного діапазону, МГц	ДСанПіН	45,409
Напруженість електричного поля радіочастотного діапазону, В/м	3.3.6-096	80
Напруженість електричного поля промислової частоти, кВ/м	2002	5,64
Довжина хвилі випромінювання оптичного діапазону, нм	СанПіН	0
Тривалість впливу випромінювання оптичного діапазону, с	5804-91	0
Доза опромінення оптичного діапазону, мкДж		0
Мікроклімат		
Енерговитрати, Вт	ДСН 3.3.6.042-	233
Період року	99	теплий
Температура повітря для постійних робочих місць,		31
Відносна вологість повітря, %		94
Швидкість руху повітря, м/с		ІД
Інтенсивність теплового випромінювання, Вт/м <sup>2</sup>		232
Виробниче освітлення		
Найменший розмір об'єкта розрізнення, мм	ДБН В2.5-28-	0,45
Контраст об'єкта розрізнення з фоном	2006	великий
Характеристика фону		світлий
Азимут розташування вікон, °		154
КПО для природного бокового освітлення, %		1
Освітленість для загального штучного освітлення,		308
Варіант розрахункового завдання		80
Ступінь вогнестійкості будівлі		4

#### 4.1 Аналіз шкідливих та небезпечних виробничих факторів у виробничому приміщенні

Під час роботи в даному приміщенні, виникає низка небезпечних та шкідливих виробничих чинників, що регламентуються [21].

Як правило, всі несприятливі виробничі фактори об'єднують в єдине поняття - небезпечний та шкідливий виробничий фактор.

Вказане приміщення характеризується небезпечними та шкідливими виробничими факторами фізичної, хімічної, біологічної та психофізіологічної груп [21], які класифікуються так:

- 1) Фізичні небезпечні і шкідливі виробничі фактори:
  - високий рівень інфразвуку, шуму, ультразвуку та вібрації;
  - високий рівень електромагнітних випромінювань;
  - підвищене значення напруги в електричній мережі;
  - понижена або підвищена температура, вологість і швидкість руху повітря робочої зони;
  - підвищена інтенсивність теплового випромінювання;
  - відсутність або недостатність природного освітлення;
  - недостатня освітленість робочої зони;
  - пряма або відбита блискучість.
- 2) Хімічні небезпечні і шкідливі фактори - шкідливі хімічні речовини.
- 3) Біологічні небезпечні і шкідливі виробничі фактори - немає.
- 4) Психофізіологічні небезпечні і шкідливі виробничі фактори:
  - а) фізичні перевантаження - немає.
  - б) нервово-психічні перевантаження:
    - перенапруження аналізаторів;
    - монотонність праці.

Вкажемо імовірні причини появи вказаних факторів та стисло опишемо їхню дію на організм працівника.

Високий рівень шуму і вібрації робочої зони може бути спричинений роботою таких елементів комп'ютерів, як жорсткий диск, вентилятор блоку живлення, охолодження мікропроцесора, швидкісні CD-ROM (DVD-ROM), механічні сканери, пересувні механічні частини принтера, що може викликати психічні та фізіологічні порушення, що знижують працездатність і створюють передумови для загальних та професійних захворювань і виробничого травматизму.

Високий рівень інфразвуку може бути спричинений вентиляторами та іншими рухомими елементами обладнання з частотою рухів менше 20 Гц або 1200 об/хв, що супроводжується відчуттям обертання, розхитування,

почуттям тривоги, страху, біллю у вухах, порушенням роботи органів рівноваги.

Високий рівень ультразвуку може бути викликаний обладнанням, у якому генеруються ультразвукові коливання для виконання технологічних операцій, а також обладнання, при експлуатації якого ультразвук виникає як побічний фактор, що може викликати функціональні порушення нервової системи, головний біль, зміну тиску, складу і властивостей крові, втрату слухової чутливості, підвищену втомлюваність.

Високий рівень електромагнітних випромінювань промислової частоти може бути спричинений будь-якими електроустановками та струмоведучими частинами промислової частоти, що може викликати поляризацію атомів і молекул тіла людини, появу іонних струмів, і як наслідок - нагрівання тканин.

Підвищене значення напруги в електричній мережі може бути спричинене наявністю ЕОМ, світильників, копіювальної техніки, кондиціонерів, що може викликати ураження електричним струмом людини.

Понижена або підвищена температура повітря робочої зони може бути спричинена різкою зміною температури повітря навколишнього середовища, наявністю або відсутністю опалення робочого приміщення тощо. Це може викликати перегрів або переохолодження організму людини. Понижена або підвищена відносна вологість повітря робочої зони може бути спричинена різною кількістю води, що випаровується у приміщенні, метеорологічними умовами поза приміщенням, що може викликати зменшення або збільшення тепловіддачі організмом людини, що сприяє його перегріванню або переохолодженню. Понижена або підвищена швидкість руху повітря робочої зони може бути спричинена нераціональними параметрами системи вентиляції або її відсутністю, що може викликати порушення реакції терморегуляції організму працівника.

Підвищена інтенсивність теплового випромінювання може бути спричинена теплом, яке надходить до приміщення від системи опалювання, в результаті сонячної радіації та від інших джерел, що може викликати підвищення температури повітря в приміщенні вище допустимих меж.

Відсутність або недостатність природного освітлення може бути спричинена відсутністю або недостатніми розмірами віконних проїм, а також наявністю конфронтуючих будинків та споруд. Відсутність або недостатність природного освітлення приводить до напруження зору, послабляє увагу, приводить до настання передчасної стомленості.

Недостатня освітленість робочої зони може бути спричинена відсутністю або недостатністю природного освітлення, нераціональним

розташуванням світильників та ламп штучного освітлення та ін.

Недостатня освітленість може стати причиною багатьох важких травм і смертельних випадків на виробництві.

Шкідливі хімічні речовини в повітрі робочої зони можуть бути спричинені утворенням такої речовини, як пил зерновий і аероіонізацією в процесі роботи за ПК. В приміщеннях із ПК оператори піддаються впливу пилу, який притягається до працюючого і сильно наелектризованого устаткування. При роботі ПК виникає іонізація повітря, яка приводить до фізико-хімічних змін у структурі речовин. Пил може бути вибухонебезпечним. Нижній поріг вибухонебезпечної концентрації зернового пилу в повітрі складає  $40 \text{ г/м}^3$ .

Перенапруження аналізаторів може бути спричинене інтенсивною роботою за ЕОМ, що призводить до різкої втоми органів зору працюючого і навіть до погіршення зору.

Монотонність праці може бути спричинена розвитком напівавтоматичного виробництва і автоматизованих систем керування, оскільки основними функціями працівника за таких умов стають нескладні, одноманітні рухи, які повторюються тисячі разів за зміну, або функції спостереження, керування і контролю за роботою системи і призводить до швидкого розвитку втоми в зв'язку з локалізацією м'язових і нервових навантажень, незадоволення роботою і зниження творчої активності працівника.

Обґрунтуємо вибір нормованих значень небезпечних та шкідливих виробничих факторів.

Згідно [22] для такої шкідливої речовини, як пил зерновий, встановлюємо, що вона відноситься до 2-го класу безпеки, а її ГДК =  $4 \text{ мг/м}^3$ .

Враховуючи вид вібрації - локальна, вибираємо нормований еквівалентний рівень віброприскорення 76 дБ [23].

Враховуючи призначення приміщення - дослідження і вид шуму - непостійний, вибираємо нормований еквівалентний рівень шуму 55 дБА [24].

Згідно рекомендацій [28] нормований загальний рівень інфразвуку 110 дБ, нормований рівень ультразвуку 110 дБ.

Для частоти електричного поля радіочастотного діапазону 45,409 МГц нормована напруженість електричного поля 8-ми годинного робочого дня становить  $10 \text{ В/м}$  відповідно до [25]. Нормована напруженість електричного поля промислової частоти для 8-ми годинного робочого дня становить  $5 \text{ кВ/м}$  [25]. За показником енерговитрат 233 Вт відповідно до [26]

вибираємо категорію важкості робіт за фізичним навантаженням – ІІБ для якої в теплий період року для постійних робочих місць допустима температура повітря складає 16...27 °С, допустима швидкість руху повітря 0,2...0,5 м/с, а допустима відносна вологість повітря не більше ніж 70 %. Інтенсивність теплового випромінювання допускається не більше ніж 140 Вт/м<sup>2</sup>.

За найменшим розміром об'єкта розрізнення 0,45 мм, вибираємо розряд зорових робіт - 3, для якого нормоване КПО для бокового освітлення становить 1,2 % [27]. Оскільки приміщення знаходиться в м. Вінниця (2-га група забезпеченості природним світлом), а вікна орієнтовані за азимутом 154<sup>0</sup>, то для таких умов нормоване КПО визначатиметься за формулою [27]:

$$e_N = e_n m_N [\%], \quad (4.1)$$

де  $e_n$  - табличне значення КПО для бокового освітлення, %;

$m_N$  - коефіцієнт світлового клімату;

$N$  - порядковий номер групи забезпеченості природним світлом.

За відомими значеннями отримаємо:

$$e_N = 1,2 \cdot 0,85 = 1,02(\%).$$

За співвідношенням контрасту (великий) та фону (світлий), вибираємо підрозряд зорових робіт - г, в межах якого вибираємо нормовану освітленість для загального штучного освітлення - 200 лк.

## 4.2 Карта умов праці

Для здійснення атестації робочого місця потрібна карта умов праці. Атестацію робочих місць проводять за наслідками всебічного обстеження і оцінки характеру та умов праці.

### 4.2.1 Оцінка факторів трудового та виробничого процесів

Оцінку стану робочого місця за умовами праці виконують з урахуванням впливу на працівників усього комплексу факторів трудового процесу і виробничого середовища, що передбачаються Гігієнічною класифікацією праці [28]. В таблиці 4.2 наведено оцінку факторів трудового та виробничого процесів.

Таблиця 4.2 – Оцінка факторів трудового та виробничого процесів

4Номер	Фактори виробничого середовища і трудового процесу	Нормативне значення (ГДР, ГДК)		Фактичне значення	3-й клас: шкідливі умови і характер праці		
		нижнє	верхнє		I ступінь	II ступінь	III ступінь
1	Шкідливі хімічні речовини:						
	1-й клас безпеки		—	—			
	2-й клас безпеки		4	7,49	+		
	3-й, 4-й класи безпеки		—	—			
2	Вібрація		76	58			
3	Шум		55	57	+		
4	Інфразвук		110	56			
5	Ультразвук		110	75			
6	Неіонізуючі випромінювання:						
	• радіочастотний діапазон		10	80	+		
	• промислової частоти		5	5,64	+		
	• оптичний діапазон		0,0	0			
7	Мікроклімат у приміщенні:						
	• температура повітря, °С	16	27	31	+		
	• швидкість руху повітря, м/с	0,2	0,5	1,3	+		
	• відносна вологість повітря, %		70	94	+		
	• інтенсивність теплового випромінювання, Вт/м <sup>2</sup>		140	232	+		
8	Виробниче освітлення:						
	• розряд зорових робіт	4		3	+		
	• КПО для природного освітлення, %	1,02		1	+		
	• освітленість для штучного освітлення, лк	200		308			
	Кількість факторів	—	—	—	10	0	0

#### 4.2.2 Гігієнічна оцінка умов праці

Підвищена концентрація шкідливої хімічної речовини 2-го класу небезпеки - 1 ст.

Підвищений рівень шуму - 1 ст.

Підвищений рівень неіонізуючих випромінювань радіочастотного діапазону - 1 ст.

Підвищений рівень неіонізуючих випромінювань промислової частоти - 1 ст.

Підвищена температура в теплий період року - 1 ст.

Підвищена швидкість руху повітря в теплий період року - 1 ст.

Підвищена відносна вологість повітря в теплий період року - 1 ст.

Підвищена інтенсивність теплового випромінювання - 1 ст.

Підвищена напруженість зору - 1 ст.

Недостатня освітленість робочої зони природнім освітленням - 1 ст.

#### 4.2.3 Оцінка технічного й організаційного рівня

Технічний рівень робочого місця не відповідає нормативним вимогам.

#### 4.2.4 Атестація робочого місця

Робоче місце атестовано за першим ступенем шкідливості.

#### 4.2.5 Рекомендації щодо покращення умов праці

З метою забезпечення чистоти повітря робочої зони потрібно доповнити природну вентиляцію механічною.

Для забезпечення допустимих параметрів шуму в приміщенні потрібно проводити постійне змащування підшипників вентиляторів системи вентиляції.

З метою забезпечення нормованих параметрів неіонізуючих випромінювань радіочастотного діапазону в приміщенні необхідно застосувати захист часом або відстанню.

З метою забезпечення нормованих параметрів неіонізуючих випромінювань промислової частоти в приміщенні необхідно застосувати захист відстанню.

З метою забезпечення допустимих параметрів температури повітря в приміщенні доцільно застосувати механічну загальнообмінну вентиляцію.

З метою забезпечення допустимих параметрів швидкості руху повітря в приміщенні доцільно зменшити продуктивність вентиляції.

З метою забезпечення допустимих параметрів відносної вологості повітря в приміщенні доцільно організувати підсушування припливного повітря.

З метою забезпечення допустимих параметрів інтенсивності теплового випромінювання в приміщенні доцільно застосувати механічну загальнообмінну вентиляцію.

У випадку підвищеної напруженості зору потрібно застосувати систему суміщеного освітлення.

Для забезпечення нормованих параметрів КПО для природного освітлення в приміщенні потрібно доповнити природне освітлення штучним, створивши систему суміщеного освітлення.

4.3 Розрахунок допустимої довжини провідника (антени), при якій напруженість магнітного поля на робочому місці знаходиться в межах норми

Виконати розрахунок допустимої довжини провідника (антени), по якому протікає струм силою в  $I = 2,2$  А, при якій напруженість магнітного поля на робочому місці, віддаленому на  $r = 0,25$  м, знаходиться в межах норми.

Біля джерела ЕМВ виділяють ближню зону (зону індукції), що знаходиться на відстані  $r \leq \lambda/2\pi$ , і далеку зону (зону випромінювання), для якої  $r > \lambda/2\pi$ , де  $\lambda$  - довжина хвилі, м.

Допустиму довжину провідника (антени) в умовах магнітного поля для ближньої зони можна визначити з формули:

$$H_{\text{бл}} = \frac{IL}{4\pi r^2} \text{ [А/м]}, \quad (4.2)$$

звідки:

$$L = \frac{4\pi r^2 H_{\text{бл}}}{I} \text{ (м)}, \quad (4.3)$$

де  $H_{\text{бл}}$  - напруженість магнітного поля ближньої зони, А/м;

$r$  – віддаленість робочого місця, м;

$I$  – сила струму, А.

Для діапазону частот 30...50 МГц  $H_{\text{ГД}}=3$  А/м.

Після підстановки відомих значень у формулу (4.3), отримаємо:



$$L = \frac{4 \cdot 3,14 \cdot 0,25^2 \cdot 3}{2,2} = 1,07 \text{ (м)}.$$

#### 4.4 Пожежна безпека

Мінімальні межі вогнестійкості конструкцій приміщення, що розглядається наведені в таблиці 4.3 [29].

Таблиця 4.3 – Значення мінімальних меж вогнестійкості приміщення

Ступінь вогнестійкості будівлі	Стіни				Колони	Східчасті майданчики	Плити та інші несучі конструкції	Елементи покриття	
	Несучі та східчасті клітки	Самонесучі	Зовнішні несучі	Перегородки				Плити, прогони	Балки, ферми
4	REI 30 M1	REI 15 M1	E 15 M1	EI 15 M1	R 30 M1	R 15 M1	REI 15 M1	нн нн	нн нн

Примітка. R - втрати несучої здатності; E - втрати цілісності; I - втрати теплоізолювальної спроможності; M - показник здатності будівельної конструкції поширювати вогонь (межа поширення вогню); M0 - межа поширення вогню дорівнює 0 см; M1 - M < 25 см - для горизонтальних конструкцій; M < 40 см - для вертикальних і похилих конструкцій; M2 - M > 25 см - для горизонтальних конструкцій; M > 40 см - для вертикальних і похилих конструкцій, нн - не нормується.

В таблиці 4.4 наведено протипожежні норми проектування будівель і споруд.

Таблиця 4.4 – Протипожежні норми проектування будівель і споруд [30]

Об'єм приміщення, тис. м <sup>2</sup>	Категорія протипожежної безпеки	Ступінь вогнестійкості	Відстань, м, при щільності людського потоку в загальному проході, осіб/м <sup>2</sup>			Кількість людей на 1 м ширини евакуиходу	Протипожежні розриви, м, для ступеня їх вогнестійкості			Найбільша кількість поверхів	Максимально допустима площа поверху, м <sup>2</sup> , для кількості поверхів		
			до 1	2-3	4-5		I,II	III	IV,V		1	2	3 і більше
до 15	В	4	70	40	30	75	12	15	18	2	2600	2000	-

## ВИСНОВКИ

В даній бакалаврській дипломній роботі був проведений аналіз технології MIMO в мережах стандарту 802.11 Wi-Fi. Було досліджено як працює ця технологія, що в себе включає, і які принципи лежать в її основі. Розглянуто основні напрямки цієї технології. Як реалізується MIMO в техніці. Переваги та недоліки MIMO перед іншими технологіями. Метою MIMO є збільшення швидкості передачі даних при тій же обмеженій смузі частот. Ця технологія починає широко використовуватися на нових пристроях і має величезні перспективи розвитку. Технологія MIMO, реалізована в стандарті 802.11n, забезпечує одночасну роботу передачі / прийому даних між пристроями мережі. Але в конкретний момент часу тільки один пристрій може отримувати і відправляти дані, тоді як інші чекають своєї черги. Стандарт 802.11ac значно покращує цю ситуацію. В рамках стандарту була реалізована технологія множинного MIMO - MU-MIMO (Multi-User Multiple-Input, Multiple-Output).

MU-MIMO створює багато потоковий канал передачі, при використанні якого інші пристрої не чекають своєї черги.

Пристрої з підтримкою MU-MIMO можуть забезпечувати одночасну передачу чотирьох потоків даних (до чотирьох клієнтів). Це дозволило реалізувати більш ефективно використання безпроводної мережі і скоротити затримки (час очікування на обслуговування), які виникають при значному збільшенні числа клієнтів в мережі

В результаті вдалося підвищити швидкість передачі і розширити зону покриття за допомогою технології MIMO, завдяки збільшенню ширини каналу в два і чотири рази.

При розрахунках було визначено дальність роботи стандарту 802.11ac бездротового обладнання на швидкості 6 Мбіт/с, яка дорівнює 109 м., радіус зони Френеля для 36,40,44,48 каналів та максимальну швидкість MIMO 2×2, яка склала 98,8 Мбіт / с.

Застосування в стандарті 802.11ac нової і більш продуктивної системи модуляції сигналу 256-QAM забезпечує приріст пропускної здатності в безпроводній мережі.

Як видно з результатів дослідження роботи Wi-Fi адаптерів при декількох потоках даних технологія 802.11ac, 3x3: 3 MIMO з частотою 80 МГц показала майже в три рази більшу швидкість, і забезпечує більшу ємність і масштабованість потоку, порівняно з технологією 802.11n, 3x3: 3 MIMO з частотою 40 МГц.

Під час написання розділу з охорони праці розглянуто такі питання, як аналіз небезпечних та шкідливих виробничих чинників у виробничому приміщенні; карта умов праці (обґрунтування вибору нормованих значень шкідливих та небезпечних виробничих чинників, оцінка факторів виробничого і трудового процесів, гігієнічна оцінка умов праці, оцінка технічного і організаційного рівня, атестація робочого місця); заходи щодо покращення умов праці, виконано розрахунок допустимої довжини провідника (антени), при якій напруженість магнітного поля на робочому місці знаходиться в межах норми, а також розглянуто норми пожежної безпеки.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. «Широкополосные беспроводные сети передачи информации»/ Вишневецкий В.М. [та ін.]. - М.: Техносфера, 2005.592 с.
2. «Беспроводные линии связи и сети» : пер. с англ. / В. Столлингс. - М. : Издательский дом «Вильямс», 2003. – 640 с.
3. «Современные технологии беспроводной связи»/ Шахнович И. - Изд. второе, М.: Технология, 2006. – 288с.
4. Стандарты Wi-Fi – Режим доступа: <http://viconnect.ru/standarty-wi-fi/> - Назва з екрану.
5. «Беспроводные сети широкополосного доступа к ресурсам Интернета» / В. Вишневецкий. – М. : Техносфера, 2003. – 108 с.
6. «Мобильные коммуникации» : пер. с англ. / Й. Шиллер. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2002. – 384 с.
7. «Беспроводные сети. Первый шаг» : пер. с англ. / В. Гусева. / Гейер Д. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2005. – 192 с.
8. «Основы построения беспроводных локальных сетей стандарта 802.11» / Педжман Р., Джонатан Л. - М.: Вильямс, 2004 – 304 с.
9. Свободная энциклопедия «Википедия». – 2002. – Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org/wiki/Wi-Fi> (21.10.2010). – Назва з екрану.
10. « Rayleigh fading Channels in mobile digital communication systems» / В. Sklar. – Р. : Prentice-Hall, Sept. 2000. – 146 pp.
11. «Особенности стандарта беспроводной связи IEEE 802.11ac (WiFi)» / Макаренко В. - ЭКИС – Киев: VD MAIS, 2012, № 7.
12. Beamforming in 802.11ac. - Режим доступа: [/http://chimera.labs.oreilly.com/books/123400\\_0001739/ch04.html](http://chimera.labs.oreilly.com/books/123400_0001739/ch04.html).- Назва з екрану.
13. 802.11ac in - depth. - Режим доступа: [http://standards.ieee.org/news/2014/ieee\\_802\\_11ac\\_ballot.html](http://standards.ieee.org/news/2014/ieee_802_11ac_ballot.html). - Назва з екрану.
14. «Системы ММО: принципы построения и обработка сигналов» / Слюсар В. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, №8, 2005.
15. MU-MIMO- Режим доступа: <http://habrahabr.ru/post/132247>. - Назва з екрану.
16. «802.11ac: The Fifth Generation of Wi-Fi» / Cisco - Technical White Paper, August 2012.
17. Wi-Fi смуги частот і каналів – Режим доступа: <http://wi-life.ru/tehnologii/wi-fi/wi-fi-frequency-bands-and-channels> - Назва з екрану.
18. Резолюция 229 (ВКР-03). Использование полос частот 5150–5250 МГц, 5250–5350 МГц и 5470– 5725 МГц подвижной службой для внедрения систем беспроводного доступа. МСЕ, 2003.

19. D-LINK – Режим доступу: <http://asp24.com.ua/d-link-besprovodnoe-oborudovanie/d-link-dap-2660/> - Назва з екрану.
20. Методическое пособие для самостоятельной работы магистров направления 210700.68 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» / Ворошилин Е.П.. – ТУСУР. Томск, 2012.
21. ГОСТ 12.0.003-74. ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
22. ПДК 4617-88. Общесоюзные санитарно-гигиенические и санитарно-противоэпидемические правила и нормы "Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны".
23. ДСН 3.3.6.039-99. Санітарні норми виробничої та загальної вібрацій.
24. ДСН 3.3.6-037-99. Державні санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку.
25. ДСанПіН 3.3.6-096-2002. Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів.
26. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень.
27. ДБН В.2.5-28-2006. Природне і штучне освітлення.
28. Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи "Атестація робочих місць за умовами праці" з дисципліни "Охорона праці в галузі" для студентів усіх спеціальностей / Уклад. О.В. Березюк, М.С. Лемешев. - Вінниця: ВНТУ, 2010. - 21 с.
29. ДБН В.1.1.7-2002. Пожежна безпека об'єктів будівництва.
30. СНиП 2.09.02-85. Противопожарные нормы проектирования зданий и сооружений.

## ДОДАТКИ