

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка»

Інститут електроенергетики
Факультет інформаційних технологій
Кафедра безпеки інформації та телекомунікацій

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
кваліфікаційної роботи ступеня магістра

студента Альтишудер Анни Борисівни

академічної групи 172М-21-1

спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка

спеціалізації _____

за освітньо-професійною програмою Телекомунікації та радіотехніка

на тему «Імітаційне моделювання системи мобільного зв'язку стандарту
IEEE 802.11»

Керівники	Прізвище, ініціали	Оцінка за шкалою		Підпис
		рейтинговою	інституційною	
кваліфікаційної роботи	к.ф.-м.н., проф. Гусєв О.Ю.			
розділів:				
спеціальний	к.ф.-м.н., проф. Гусєв О.Ю.			
економічний	к.е.н., доц. Романюк Н.М.			
Рецензент				
Нормоконтролер	к.ф.-м.н., проф. Гусєв О.Ю.			

Дніпро
2022

ЗАТВЕРДЖЕНО:
завідувач кафедри
безпеки інформації та телекомунікацій
_____ д.т.н., проф. Корнієнко В.І.

« _____ » _____ 20__ року

**ЗАВДАННЯ
на кваліфікаційну роботу ступеня магістра**

студенту _____ *Альтшулер А.Б.* _____ академічної групи _____ *172М-21-1* _____
(прізвище та ініціали) (шифр)

спеціальності _____ *172 Телекомунікації та радіотехніка* _____

спеціалізації _____

за освітньо-професійною програмою _____ *Телекомунікації та радіотехніка* _____

на тему _____ *«Імітаційне моделювання системи мобільного зв'язку стандарту
IEEE 802.11»* _____

Затверджену наказом ректора НТУ «Дніпровська політехніка» від _____ № _____

Розділ	Зміст	Термін виконання
Стан питання. Постановка задачі	Аналітичний огляд літератури по темі проекту	Вересень 2022
Спеціальна частина	Принцип роботи систем передачі даних на базі використання системи мобільного зв'язку стандарту IEEE 802.11. Розробка моделі в середовищі MATLAB. Оформлення пояснювальної записки.	Жовтень 2022
Економічний розділ	Розрахунок капітальних витрат	Листопад 2022

Завдання видано _____
(підпис керівника)

Гусев О.Ю.
(прізвище, ініціали)

Дата видачі завдання: _____

Дата подання до екзаменаційної комісії: _____

Прийнято до виконання _____
(підпис студента)

Альтшулер А.Б.
(прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 83 с., 44 рис., 12 табл., 4 додатки, 23 джерела

Об'єкт розробки: системи мобільного зв'язку

Предмет розробки: моделювання системи мобільного зв'язку стандарту IEEE 802.11.

Мета дипломного проєкту: розробка імітаційної моделі, дослідження та аналіз системи мобільного зв'язку стандарту IEEE 802.11 на її основі.

У першому розділі зроблено огляд технологій стандарту IEEE 802.11, розглянуто основні принципи функціонування систем мобільного зв'язку різних специфікацій стандарту. Здійснено постановку задачі роботи.

У спеціальному розділі для імітаційного моделювання обрано специфікацію стандарту IEEE 802.11b, розроблена модель у середовищі Simulink MATLAB. Виконано дослідження і проведено аналіз результатів.

В економічній частині проведений розрахунок капітальних витрат на розробку імітаційної моделі системи мобільного зв'язку стандарту IEEE 802.11.

СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ, БЕЗДРОТОВІ СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗКУ,
ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, СТАНДАРТ IEEE 802.11, МОБІЛЬНИЙ
ЗВ'ЯЗОК

ABSTRACT

Explanatory note: 83 p., 44 fig., 12 tab., 4 appendices, 23 sources

Object of development: mobile communication systems.

Subject of development: modeling of the IEEE 802.11 standard mobile communication system.

The purpose of the diploma project: development of a simulation model, research and analysis of the IEEE 802.11 standard mobile communication system based on it.

In the first section, an overview of the technologies of the IEEE 802.11 standard is made, the basic principles of the operation of mobile communication systems of various specifications of the standard are considered. The work task has been set.

In a special section, the specification of the IEEE 802.11b standard was chosen for simulation modeling, and the model was developed in the Simulink MATLAB environment. The research was carried out and the results were analyzed.

In the economic part, the calculation of capital costs for the development of a simulation model of a mobile mobile communication system of the IEEE 802.11 standard was carried out.

DATA TRANSMISSION SYSTEMS, WIRELESS COMMUNICATION SYSTEMS, SIMULATION MODELING, IEEE 802.11 STANDARD, MOBILE COMMUNICATION

СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

AWGN (Additive White Gaussian Noise) - вид білого шуму, що заважає в каналі передачі інформації.

BER (Bit Error Rate) - відношення кількості помилкових бітів до їх загального переданого числа.

BPSK (Binary Phase-Shift Keying) – двійкова фазова маніпуляція, що передає 1 біт на символ.

CCK (Complementary Code Keying) - схема модуляції, що використовується у бездротових мережах, що використовують специфікацію IEEE 802.11b, був прийнятий на додаток до коду Баркера в бездротових цифрових мережах.

CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access With Collision Avoidance) - мережевий протокол, множинний доступ до каналу зв'язку з контролем несучої та запобіганням колізій.

DBPSK (Differential Binary Phase-Shift Keying) - диференціальна BPSK використовується у випадку некогерентного детектування.

DQPSK (Differential quadrature phase-shift keying) - диференціальна QPSK кодує дані, створюючи певний зсув фази щодо попереднього символу, щоб схема демодуляції аналізувала фазу символу, використовуючи опорну точку, яка є спільною для приймача, і для передавача.

DSSS (Direct Sequence Spread Sequence) - розширення спектра методом прямої послідовності. Метод формування широкосмугового сигналу, при якому вихідний двійковий сигнал перетворюється на псевдовипадкову послідовність для маніпуляції несучої.

FHSS (Frequency-Hopping Spread Spectrum) - метод передачі інформації, особливість якого полягає в частій зміні частоти, що несе. Частота змінюється відповідно до псевдовипадкової послідовності чисел, відомої як відправнику, так і одержувачу.

GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying) - один з видів FSK маніпуляції, яка використовує Гаусівський фільтр для згладжування позитивних/негативних відхилень частоти, які являють собою двійкові 1 або 0.

IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) - міжнародна некомерційна асоціація фахівців у галузі техніки, розробки стандартів з радіоелектроніки, електротехніки та апаратного забезпечення обчислювальних систем та мереж.

LAN (Local Area Network) - є об'єднанням певного числа комп'ютерів на відносно невеликій території.

MAC (Medium Access Control) - нижній підрівень каналного (другого) рівня моделі OSI згідно стандартів IEEE 802.

OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) - є цифровою схемою модуляції, яка використовує велику кількість близько розташованих ортогональних піднесучих.

OSI (The Open Systems Interconnection model) - модель стека мережевих протоколів OSI/ISO. За допомогою цієї моделі різні мережні пристрої можуть взаємодіяти один з одним. Модель визначає різні рівні взаємодії систем.

PBCC (Packet Binary Convolutional Coding) – опційна модифікація методу, рекомендованого у WLAN відповідно до 802.11g. Цей метод використовується в комбінації з ССК, де ССК використовується для повідомлень і PBCC для корисного навантаження.

PLCP (Physical Layer Convergence Procedure) - процедура визначення стану фізичного рівня

PLW (PSDU Length Word) - слово довжини службового елемента даних

PMD (Physical Medium Dependent) - підрівень фізичного рівня, що залежить від середовища передачі.

PSDU (PLCP Service Data Unit) – службовий елемент даних PLCP.

PSF (PLCP Signaling Field) - сигнальне поле PLCP, вказує швидкість передачі даних конкретного кадру.

QAM (Quadrature Amplitude Modulation) - квадратурно-амплітудна модуляція, різновид амплітудної модуляції сигналу.

QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) - один з видів фазової модуляції, який використовується для передачі цифрового сигналу.

WiFi (Wireless Fidelity) - торгова марка Wi-Fi Alliance та загальноживана назва для стандарту IEEE 802.11 передавання цифрових потоків даних по радіоканалах.

WLAN (Wireless Local Area Network) - бездротова локальна мережа. При такому способі побудови мереж передача даних здійснюється через радіоефір; об'єднання пристроїв у мережу відбувається без використання кабельних з'єднань.

ШПФ (Швидке Перетворення Фур'є) - швидкий алгоритм обчислення дискретного перетворення Фур'є.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1 СТАН ПИТАННЯ, ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ.....	11
1.1 Історія створення та розвитку технології 802.11	11
1.2 Методи побудови радіосигналу у Wi-Fi-мережах	14
1.3 Загальна характеристика стандарту 802.11	15
1.4 Особливості та переваги технології IEEE 802.11	38
1.5 Постановка задачі.....	43
1.6 Висновки	43
2 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА.....	44
2.1 Принципи функціонування системи IEEE 802.11b	44
2.2 Створення моделі радіоінтерфейсу WiFi 802.11 IEEE 802.11b	47
2.3 Дослідження моделі в середовищі MATLAB.....	54
2.4 Аналіз результатів.....	67
2.5 Висновки	68
3 ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ.....	69
3.1 Розрахунок капітальних витрат на розробку імітаційної моделі системи мобільного зв'язку стандарту IEEE 802.11	69
3.1.1 Визначення трудомісткості розробки моделі.....	69
3.1.2 Розрахунок витрат на розробку моделі.....	70
3.1.3 Розрахунок капітальних витрат	73
3.2 Висновки	74
ВИСНОВКИ	75
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	76
ДОДАТОК А. Відомість матеріалів кваліфікаційної роботи	79
ДОДАТОК Б. Перелік документів на оптичному носії.....	80
ДОДАТОК В. Відгук керівника економічного розділу.....	81
ДОДАТОК Г. Відгук керівника дипломної роботи	82

ВСТУП

На новітній стадії розвитку мережевих технологій, технологія бездротових мереж стандарту IEEE 802.11, що більш відома під торговою назвою Wi-Fi, є найбільш зручною, бо забезпечує мобільність, простоту установки та використання. Сучасні люди вже настільки звикли до даної технології, що не уявляють, як можна підключати Ethernet-кабель напрму до комп'ютера, а виробники ноутбуків вже не перший рік виробляють пристрої, у яких навіть немає Ethernet-роз'єму. А Wi-Fi-роутер вже є невід'ємною частиною інтер'ру будинку чи офісу. Завдяки бурхливому розвитку протоколів стандарту IEEE 802.11 все ширшим стає поняття «інтернету речей».

Wi-Fi – це стандарт бездротового підключення LAN для комунікації різних пристроїв, що використовує радіохвилі (так само, як Bluetooth та стільникові мережі) для комунікації пристроїв у малому масштабі, наприклад: у будинках, торгових центрах, на площах тощо.

Wi-Fi – це найдешевший і найшвидший спосіб передачі даних на короткі відстані. Як правило, використовується для організації бездротових локальних комп'ютерних мереж, а також створення гарячих точок високошвидкісного доступу в Інтернет.

До переваг Wi-Fi відносять:

- можливість розгорнути мережу без прокладання кабелю, що може зменшити вартість розгортання та розширення мережі;
- можливість забезпечити доступом до Інтернету місць, де неможливо прокласти кабель;
- мобільність пристроїв, що дозволяє позбавитися проблем з кабелем, наприклад ноутбук, який використовується в кількох кімнатах;
- Wi-Fi має глобальний стандарт і може працювати по всьому світу без додаткових налаштувань або модернізації пристроїв, але в умовній зоні покриття;

– у межах Wi-Fi зони в мережу Інтернет можуть виходити кілька користувачів з комп'ютерів, ноутбуків, телефонів і т.д.

Бездротове підключення, по суті, двостороння комунікація між роутером і клієнтським пристроєм. Обидва пристрої обладнані радіопередавачем та приймачем для комунікації один з одним шляхом відправки сигналів радіодіапазоном (2,4 ГГц або 5 ГГц). Зазвичай Wi-Fi роутер фізично підключений до Ethernet-роз'єму або DSL/кабельного/супутникового модему через кабель мережі для доступу в Інтернет.

В даному дипломному проєкті докладно розглянуті технології стандарту IEEE 802.11, порівняно окремі його протоколи та описано архітектуру.

Дану технологію все активніше використовують у будь-яких сферах – для забезпечення бездротовим доступом до мережі Інтернет офісів, підприємств, закладів освіти, лікарень, банків, відкритих ділянок міста та житлових будинків. І це призводить до актуалізації багатьох обмежень Wi-Fi. Перешкоди, послаблення сигналу, інтерференція, перевантаженість радіоефіру, інші пристрої, що працюють в тому самому частотному діапазоні, та, звісно, шуми.

В даному дипломному проєкті розглядається задача розробки імітаційної моделі системи мобільного зв'язку стандарту IEEE 802.11 з метою її дослідження та аналізу характеристик передачі сигналу в умовах різних рівнів шуму.

1 СТАН ПИТАННЯ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

1.1 Історія створення та розвитку технології 802.11

Історія бездротових технологій передачі інформації почалася в кінці XIX століття з передачею першого радіосигнала і появою в 20-х роках XX століття перших радіоприймачів з амплітудною модуляцією. У 1930-і роки з'явилося радіо з частотною модуляцією і телебачення. У 1970-і роки були створені перші бездротові телефонні системи. Спочатку це були аналогові мережі, на початку 1980-х з'явився стандарт GSM, що ознаменував початок переходу на цифрові стандарти, забезпечення кращого розподілу спектру, кращої якості сигналу і більшої безпеки. З 90-х років XX століття відбувається укріплення позицій бездротових мереж. Розвиваючись з величезною швидкістю, вони стимулюють створення нових пристроїв і послуг [1].

Технологія 802.11 бере свій початок у постанові Федеральної комісії зв'язку США від 1985 року, згідно з якою смуга ISM була дозволена для неліцензійного використання.

У 1990 р. Комітет із стандартів IEEE 802 (Institute of Electrical and Electronic Engineers) сформував робочу групу зі стандартів для бездротових локальних мереж 802.11. Ця група зайнялася розробкою загального стандарту для радіообладнання та мереж, що працюють на частоті 2.4 ГГц зі швидкостями 1 та 2 Мбіт/с. Робота зі створення стандарту було завершено через сім років, і в червні 1997 р. була ратифікована перша специфікація 802.11 [2].

У 1991 році NCR Corporation/AT&T (нині Nokia Labs і LSI Corporation) винайшли попередника 802.11 у Ньюгейні, Нідерланди. Спочатку винахідники мали намір використовувати технологію для касових систем. Перші бездротові продукти були представлені на ринку під назвою WaveLAN зі швидкістю передачі даних 1 Мбіт/с і 2 Мбіт/с.

Вік Хейс, який очолював IEEE 802.11 протягом 10 років і якого називають «батьком Wi-Fi», брав участь у розробці початкових стандартів 802.11b і 802.11a в рамках IEEE. Він разом з інженером Bell Labs Брюсом Тачем звернулися до IEEE, щоб створити стандарт.

У 1999 році Wi-Fi Alliance було сформовано як торгову асоціацію для утримання торгової марки Wi-Fi, під якою продається більшість продуктів [3].

Цей альянс здійснює керівництво роботами по сертифікації устаткування різних виробників і видачі дозволу на використання членами Альянсу Wi-Fi логотипа торговельної марки Wi-Fi. Наявність на устаткуванні логотипа Wi-Fi гарантує надійну роботу й сумісність устаткування при побудові бездротової локальної мережі (WLAN) навіть при використанні пристроїв різних виробників. На сьогоднішній день Wi-Fi сумісним є устаткування, побудоване по стандарту IEEE 802.11a, b і g (для забезпечення захищеного з'єднання також може використовуватися стандарт IEEE 802.11i). Крім того, наявність на устаткуванні логотипа Wi-Fi означає, що робота устаткування здійснюється в діапазоні 2,4 ГГц або 5 ГГц. Отже, під Wi-Fi варто розуміти сумісність устаткування різних виробників, призначеного для побудови бездротових локальних мереж, з урахуванням викладених вище обмежень [4].

Стандарт IEEE 802.11 став першим стандартом продуктів WLAN від незалежної міжнародної організації. Однак до моменту виходу стандарту у світ спочатку закладена у ньому швидкість передачі виявилася недостатньою. Це спричинило подальші доробки, тому сьогодні можна говорити про групу стандартів.

Великий комерційний прорив стався з впровадженням Apple Wi-Fi для серії ноутбуків iBook у 1999 році. Це був перший масовий споживчий продукт, який пропонував підключення до мережі Wi-Fi, яка тоді була названа Apple AirPort. Через рік у 2000 році IBM випустила серію ThinkPad 1300.

У 2018 році Wi-Fi Alliance почав використовувати зручну для споживача схему нумерації для загальнодоступних протоколів 802.11. Покоління Wi-Fi 1–6 стосуються протоколів 802.11b, 802.11a, 802.11g, 802.11n, 802.11ac та 802.11ax у такому порядку (табл.1.1) [5].

Таблиця 1.1 - Покоління Wi-Fi [6]

Покоління	IEEE стандарт	Максимальна швидкість передачі (Мбіт/с)	Рік прийняття	Частота (ГГц)
Wi-Fi 7	802.11be	40000	-	2.4/5/6
Wi-Fi 6E	802.11ax	600-9608	2020	2.4/5/6
Wi-Fi 6			2019	2.4/5
Wi-Fi 5	802.11ac	433-6933	2014	5
Wi-Fi 4	802.11n	72-600	2008	2.4/5
Wi-Fi 3	802.11g	6-54	2003	2.4
Wi-Fi 2	802.11a	6-54	1999	5
Wi-Fi 1	802.11b	1-11	1999	2.4
Wi-Fi 0	802.11	1-2	1997	2.4

Можна виділити такі переваги цієї технології:

1 Бездротові технології не вимагають використання кабелю всередині мережі, що значно знижує вартість обладнання;

2 Точки доступу бездротової мережі здатні забезпечити високі швидкості передачі до 600 Мбіт/с, що значно перевищує швидкість провідної передачі Ethernet 10 Мбіт/с або Fast Ethernet 100 Мбіт/с;

3 Бездротовий доступ до Інтернету можна забезпечити у місцях, де немає можливості або не вигідно прокласти кабель. Технологія Wi-Fi є гнучкою у побудові та дозволяє швидко організувати тимчасові мережі;

4 Мобільність клієнтів дає можливість переміщення в межах зони покриття, що відкидає потребу дротів та фіксованого робочого місця;

5 Також варто відзначити високу сумісність різних типів мережних пристроїв, наприклад, ноутбуки та телефони, та обладнання з підтримкою стандартів бездротових мереж.

1.2 Методи побудови радіосигналу у Wi-Fi-мережах

В даний час при розробці апаратури для бездротових мереж використовуються два методи побудови сигналу:

1 З безпосередньою модуляцією несучої частоти (Direct-Sequence Spread Spectrum – DSSS).

Інформаційний сигнал примножується на псевдовипадковий код (Pncode – Pseudo Random Noise Code). Отриманий результат використовують для модуляції несучої. У приймачі отриманий сигнал множать той самий код і виділяють корисний сигнал [7].

Основною проблемою, що виникає під час використання методу прямої послідовності, є ефект близько розташованого передавача, тобто рівень сигналу передавача, що заважає, набагато вище рівня потрібного передавача, що може призвести до втрати зв'язку.

2 З стрибкоподібною перебудовою частоти (Frequency-Hopping Spread Spectrum - FHSS).

Частота несучої змінюється відповідно до унікальної послідовності. Для цього необхідний швидкісний синтезатор частот.

Недолік: складність отримання високого значення бази сигналу, що необхідне для збільшення числа користувачів, перешкодостійності, підвищення конфіденційності.

Перевага: менша схильність до ефекту близького передавача.

Обидва методи засновані на принципі приймання з «розширеним спектром», який забезпечує захист від перешкод і конфіденційність інформації, що передається. Зазвичай при виборі враховують такі фактори: швидкість передачі даних, дальність сталого зв'язку, відповідність стандартам, експлуатаційні характеристики та вартість. Вибір типу апаратури для бездротової мережі визначається як умовами експлуатації, так і вартістю виробу.

1.3 Загальна характеристика стандарту 802.11

З усіх існуючих стандартів бездротової передачі даних IEEE 802.11 на практиці найчастіше використовуються лише три стандарти, визначені Інженерним інститутом електротехніки та радіоелектроніки (IEEE): 802.11b, 802.11a та 802.11g.

Завдяки високій швидкості передачі даних (до 11 Мбіт/с), практично еквівалентній пропускну здатності звичайних дротових локальних мереж Ethernet, а також орієнтації на діапазон 2,4 ГГц, стандарт IEEE 802.11b завоював найбільшу популярність у виробників бездротових мереж.

Оскільки обладнання, що працює на максимальній швидкості 11 Мбіт/с, має менший радіус дії, ніж на нижчих швидкостях, стандартом 802.11b передбачено автоматичне зниження швидкості при погіршенні якості сигналу.

Стандарт IEEE 802.11a має велику ширину смуги із сімейства стандартів 802.11 при швидкості передачі даних до 54 Мбіт/с.

На відміну від базового стандарту, орієнтованого на частоту 2,4 ГГц, специфікаціями 802.11a передбачена робота в діапазоні 5 ГГц. Як метод модуляції сигналу вибрано ортогональне частотне мультиплексування (OFDM).

До недоліків 802.11a відносяться більш висока споживана потужність радіопередавачів для частот 5 ГГц, а також менший радіус дії.

Стандарт IEEE 802.11g є логічним розвитком 802.11b і передбачає передачу даних у тому частотному діапазоні. Крім того, стандарт 802.11g повністю сумісний із 802.11b, тобто будь-який пристрій 802.11g має підтримувати роботу з пристроями 802.11b. Максимальна швидкість передачі у стандарті 802.11g становить 54 Мбіт/с, тому на сьогодні це найперспективніший стандарт бездротового зв'язку.

При розробці стандарту 802.11g розглядалися дві конкуруючі технології: метод ортогонального частотного поділу OFDM і метод двійкового пакетного згорткового кодування PBCC, опціонально реалізований у стандарті 802.11b. В результаті стандарт 802.11g містить компромісне рішення: як базові застосовуються технології OFDM і CCK, а опціонально передбачено використання технології PBCC.

Фізичні рівні стандарту

Основне призначення фізичних рівнів стандарту 802.11 – забезпечити механізми бездротової передачі для підрівня MAC, а також підтримувати виконання вторинних функцій, таких як оцінка стану бездротового середовища та повідомлення про нього під рівнем MAC.

Рівні MAC та PHY розроблялися так, щоб вони були незалежними. Саме незалежність між MAC та підрівнем PHY і дозволила використовувати додаткові високошвидкісні фізичні рівні, описані у стандартах 802.11b, 802.11a та 802.11g.

Кожен із фізичних рівнів стандарту 802.11 має два підрівні:

- Physical Layer Convergence Procedure (PLCP) - процедура визначення стану фізичного рівня;
- Physical Medium Dependent (PMD) - підрівень фізичного рівня, що залежить від середовища передачі.

На рисунку 1.1 показано, як ці підрівні співвідносяться між собою і з вищими рівнями моделі взаємодії відкритих систем (Open System Interconnection - OSI).



Рисунок 1.1 - Підрівні рівня РНУ

Підрівень PLCP по суті є рівнем забезпечення взаємодії, на якому здійснюється переміщення елементів даних протоколу MAC (MAC Protocol Data Units - MPDU) між MAC-станціями з використанням рівня PMD, на якому реалізується той або інший метод передачі і прийому даних через бездротове середовище. Підрівні PLCP та PMD відрізняються для різних варіантів стандарту 802.11 [8].

Щоб розібратися в різних підрівнях PMD, які забезпечує кожен рівень РНУ стандарту 802.11, потрібно спочатку розглянути такі основні концепції та "будівельні блоки" РНУ:

- Скремблювання (scrambling);
- Кодування (coding);
- Чергування (interleaving);
- Перетворення символів та модуляція (symbol mapping and modulation).

Перед тим як приступити до вивчення фізичних рівнів, розглянемо одну із складових фізичного рівня, яка досі не згадана, а саме – скремблювання.

Одна з особливостей, що лежать в основі сучасних передавачів, завдяки якій дані можна передавати з високою швидкістю, це припущення про те, що дані, що пропонуються для передачі, надходять, з погляду передавача, випадковим чином. Без цього припущення багато переваг, отриманих з допомогою застосування інших складових фізичного рівня, залишилися б нереалізованими.

Однак буває, що дані не цілком випадкові і насправді можуть містити повторювані набори і довгі послідовності нулів і одиниць.

Скремблювання (перестановка елементів) - це метод, з якого прийняті дані робляться більш схожими на випадкові; досягається це шляхом перестановки бітів послідовності таким чином, щоб перетворити її зі структурованої на схожу на випадкову. Цю процедуру іноді називають "відбілювання потоку даних". Дескремблер приймача потім виконує зворотне перетворення цієї випадкової послідовності з метою одержання вихідної структурованої послідовності. Більшість способів скремблювання належить до самосинхронізованих; це означає, що дескремблер здатний самостійно синхронізуватися із скремблером.

Скремблювання є важливим інструментом, що дозволяє інженерам розробляти системи зв'язку з високою ефективністю використання спектру (spectral efficiency). Кодування – це механізм, що дозволяє здійснювати високошвидкісну передачу даних по зашумлених каналах. Всі канали передачі схильні до перешкод, через що виникають помилки у вілі спотворених або модифікованих бітів. Колірування дозволяє максимізувати обсяг даних, які можна передати через зашумлене середовище передачі. Це можна зробити шляхом заміни послідовностей бітів більш довгими послідовностями, які дозволять розпізнати та виправити спотворені біти.

Одне з основних припущень, на яких базується механізм кодування, полягає в тому, що помилки, що виникають під час передачі інформації, є незалежними подіями. Однак найчастіше ви можете виявити, що помилки передачі двійкових рядів не незалежні і відбуваються серіями. З цих причин почали використовувати

чергування для розкидання бітів блокових помилок, які могли б статися, таким чином роблячи помилки більш схожими на незалежні. Чергування може бути виконане на апаратному або програмному уроці: незалежно від цього, основна його мета розкидати сусідні біти шляхом розміщення між ними бітів несусідних.

Перетворення символів (symbol mapping) - це процес, під час якого біти групуються і перетворюються на синфазні або квадратурні компоненти [8].

IEEE 802.11

Вихідний стандарт 802.11 визначає три методи передачі фізично:

- Передача в діапазоні інфрачервоних хвиль;
- Технологія розширення спектру шляхом стрибкоподібної перебудови частоти (FHSS) у діапазоні 2,4 ГГц;
- Технологія широкосмугової модуляції з розширенням спектра методом прямої послідовності (DSSS) у діапазоні 2,4 ГГц.

Передача у діапазоні інфрачервоних хвиль

Середовищем передачі є інфрачервоні хвилі діапазону 850 нм, які генеруються напівпровідниковим лазерним діодом, або світлодіодом (LED). Оскільки інфрачервоні хвилі не проникають через стіни, область покриття LAN обмежується зоною прямої видимості.

Стандарт передбачає три варіанти поширення випромінювання: ненаправлену антену, відбиття від стелі та фокусне спрямоване випромінювання. У першому випадку тонкий промінь розсіюється за допомогою системи лінз. Фокусне спрямоване випромінювання призначене для організації двоточкового зв'язку, наприклад, між двома будинками.

Бездротові локальні мережі зі стрибкоподібною перебудовою частоти (FHSS)

Бездротові локальні мережі FHSS підтримують швидкість передачі 1 і 2 Мбіт/с. Пристрої FHSS ділять призначену для їх роботи смугу частот від 2,402 до 2,480 ГГц на 79 каналів, що не перекриваються (це справедливо для Північної Америки і більшої частини Європи). Ширина кожного з 79 каналів становить 1 МГц, тому бездротові локальні мережі FHSS використовують відносно високу швидкість передачі символів – 1 МГц – і набагато меншу швидкість перебудови з каналу на канал.

Послідовність перебудови частоти повинна мати такі параметри: частота пересkokів не менше 2,5 разів на секунду як мінімум між шістьма каналами (6 МГц). Щоб мінімізувати число колізій між зонами покриття, що перекриваються, можливі послідовності пересkokів повинні бути розбиті на три набори послідовностей, довжина яких для Північної Америки і більшої частини Європи становить 26. У таблиці 1.2 представлені схеми стрибкоподібною перебудови частоти, що забезпечують мінімальне перекриття.

Таблиця 1.2 - Схема FHSS для Північної Америки і Європи

Набір	Схема стрибкоподібною перебудови частоти
1	{0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30, 33, 36, 39, 42, 45, 48, 51, 54, 57, 60, 63, 66, 69, 72, 75}
2	{1, 4, 7, 10, 13, 16, 19, 22, 25, 28, 31, 34, 37, 40, 43, 46, 49, 52, 55, 58, 61, 64, 67, 70, 73, 76}
3	{2, 5, 8, 11, 14, 17, 20, 23, 26, 29, 32, 35, 38, 41, 44, 47, 50, 53, 56, 59, 62, 65, 68, 71, 74, 77}

По суті схема стрибкоподібної перебудови частоти забезпечує неквапливий перехід з одного можливого каналу на інший таким чином, що після кожного стрибка покривається смуга частот, що дорівнює як мінімум 6 МГц, завдяки чому в багатосотових мережах мінімізується можливість виникнення колізій.

Після того, як рівень MAC пропускає MAC-фрейм, який у локальних бездротових мережах FHSS називається також службовим елементом даних PLCP, або ps (PLCP Service Data Unit), підрівень PLCP додає два поля на початок кадру, щоб сформувати таким чином кадр PPDU (PPDU - елемент даних протоколу PLCP). На рис. 1.2 представлений формат кадру FHSS підрівня PLCP [9].

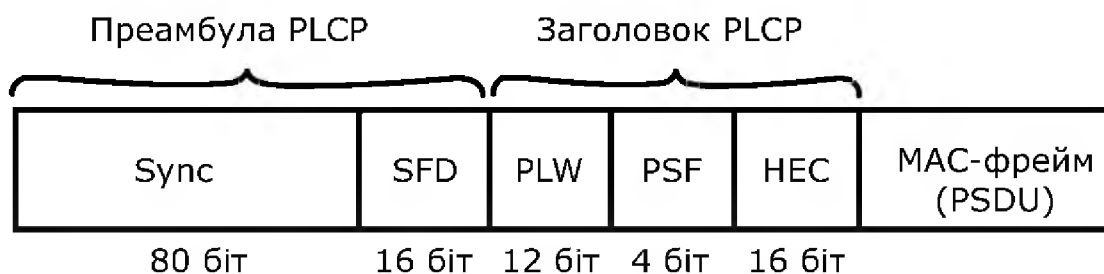


Рисунок 1.2 - Формат фрейма FHSS підрівня PLCP

Преамбула PLCP складається з двох підполів:

- Підполе Sync розміром 80 біт. Рядок, що складається з 0 і 1, що чергуються, починається з 0. Приймальна станція використовує це поле, щоб прийняти рішення про вибір антени за наявності такої можливості, відкоригувати догляд частоти (frequency offset) і синхронізувати розподіл пакетів (packet timing);
- Підполе прапора початку кадру (Start of Frame Delimiter, SFD) розміром 16 біт. Складається зі специфічного рядка (0000 1100 1011 1101, крайній зліва біт перший) забезпечення синхронізації фреймів (frame timing) для приймальної станції.

Заголовок кадру PLCP складається з трьох підполів:

- Слово довжини службового елемента даних PLCP (PSDU), PSDU

Length Word (PLW) розміром 12 біт. Вказує розмір кадру MAC (PSDU) у октетах;

- Сигнальне поле PLCP (Signaling Field PLCP – PSF) розміром 4 біти. Вказує швидкість передачі даних конкретного кадру;

- HEC (Header Error Check). Контрольна сума кадру.

Службовий елемент даних PLCP (PSDU) проходить через операцію скремблювання для відбілювання (рандомізації) послідовності вхідних бітів. Отриманий результаті PSDU представлений на рис.1.3. Заповнюючі символи вставляють між усіма 32-символьними блоками. Ці символи усувають будь-які систематичні відхилення в даних, наприклад, коли одиниць більше, ніж нулів (або навпаки), які могли б призвести до небажаних ефектів при подальшій обробці.

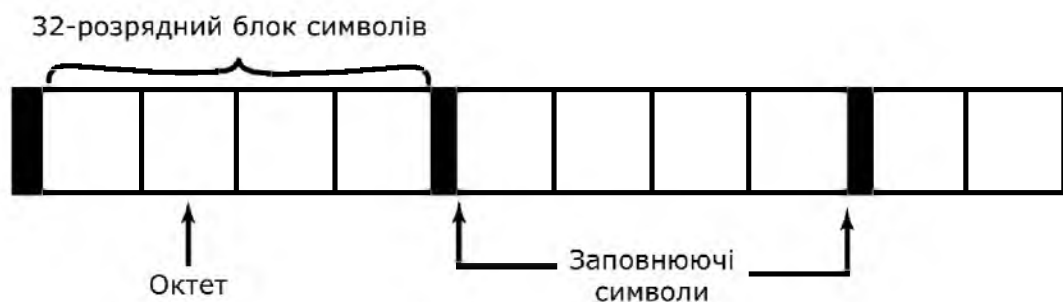


Рисунок 1.3 - Скрембльований PSDU в технології FHSS

Підрівень PLCP перетворює кадр на потік бітів і передає його на рівень PMD. Підрівень PMD технології FHSS модулює потік даних з використанням модуляції, заснованої на частоті гаусової модуляції (Gaussian Frequency Shift Keying - GFSK).

Бездротові локальні мережі використовують широкосмугову модуляцію DSSS з розширенням спектра методом прямої послідовності.

У специфікації стандарту 802.11 обумовлено використання іншого фізичного рівня - на основі технології широкосмугової модуляції з розширенням спектра методом прямої послідовності (DSSS). Як було зазначено в стандарті 802.11 розробки 1997, технологія DSSS підтримує швидкості передачі 1 і 2 Мбіт/с.

Аналогічно підрівню PLCP, що використовується в технології FHSS, підрівень PLCP технології DSSS стандарту 802.11 додає два поля кадру MAC, щоб сформувати PPDU: преамбулу PLCP і заголовок PLCP. Формат кадру представлений на рис. 1.4.

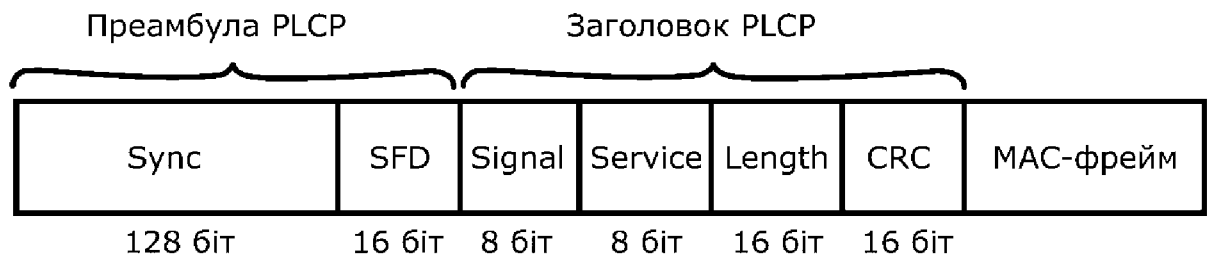


Рисунок 1.4 - Формат фрейма DSSS підрівня PLCP

Преамбула PLCP складається з двох підполів:

- Підполе Sync шириною 128 біт, що є рядком, що складається з одиниць. Завдання цього підполя – забезпечити синхронізацію для приймальної станції;
- Підполе SFD шириною 16 біт; у ньому міститься специфічний рядок 0xF3A0; його завдання – забезпечити таймінг (timing) для приймальної станції.

Заголовок PLCP складається з чотирьох підполів:

- Підполе Signal шириною 8 біт, що вказує тип модуляції та швидкість передачі для цього кадру;
- Підполе Service завширшки 8 біт зарезервовано. Це означає, що під час розробки специфікації стандарту вона залишилася невизначеною; передбачається, що воно стане в нагоді в майбутніх модифікаціях стандарту;
- Підполе Length шириною 16 біт, що вказує кількість мікросекунд (з діапазону 16-216), необхідне передачі частини MAC-фрейму;
- Підполе CRC. 16-бітна контрольна сума.

Підрівень PLCP перетворює кадр на потік бітів і передає дані на рівень PMD.

Весь PPDU проходить через процес скремблювання з метою рандомізації даних [10].

Скрембльована преамбула PLCP завжди передається зі швидкістю 1 Мбіт/с, тоді як скрембльований кадр MPDU передається зі швидкістю, вказаною в підполі Signal. Підрівень PMD модулює вибілений потік бітів, використовуючи наступні методи модуляції:

- Двійкова відносна фазова модуляція (Differential Binary Phase Shift Keying – DBPSK) для швидкості передачі 1 Мбіт/с;
- Квадратурна відносна фазова модуляція (Differential Quadrature Phase Shift Key – DQPSK) для швидкості передачі 2 Мбіт/с.

IEEE 802.11b

Фізично до MAC-кадр (MPDU) додається заголовок фізичного рівня, що складається з преамбули і власне PLCP-заголовка (рис. 1.5).



Рисунок 1.5 - Структура кадрів мережі IEEE 802.11b фізичного рівня

Преамбула містить стартову синхропослідовність (SYNC) для налаштування приймача і 16-бітний код початку кадру (SFD) - число F3A016. PLCP-заголовок включає поля SIGNAL (інформація про швидкість і тип модуляції), SERVICE (додаткова інформація, у тому числі про застосування високошвидкісних розширень та RBCC-модуляції) і LENGTH (час у мікросекундах, необхідний передачі наступної за заголовком частини кадру). Усі три поля заголовка захищені 16-бітною контрольною сумою CRC.

У стандарті IEEE 802.11b передбачено два типи заголовків: довгий та короткий (рис 1.6).

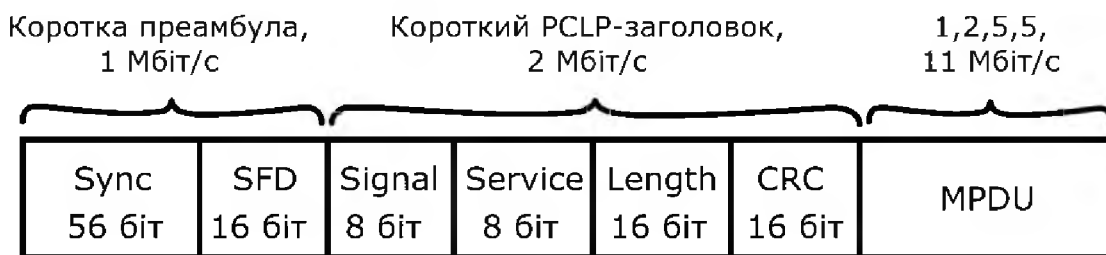


Рисунок 1.6 - Короткий заголовок кадрів мережі 802.11b

Вони відрізняються довжиною синхропослідовності (128 і 56 біт), способом її генерації, а також тим, що символ початку кадру в короткому заголовку передається у зворотному порядку. Крім того, якщо всі поля довгого заголовка передаються зі швидкістю 1 Мбіт/с, при короткому заголовку преамбула транслюється на швидкості 1 Мбіт/с, інші поля заголовка - зі швидкістю 2 Мбіт/с. Решту кадру можна передавати на будь-якій із допустимих стандартом швидкостей передачі, зазначених у полях SIGNAL та SERVICE. Короткі заголовки фізичного рівня передбачені специфікацією IEEE 802.11b для збільшення пропускної здатності мережі [11].

З опису процедур зв'язку мережі IEEE 802.11 видно, що "накладні витрати" у цьому стандарті вищі, ніж у дротовій мережі Ethernet. Тому дуже важливо

забезпечити високу швидкість передачі даних у каналі. Підвищити пропускну здатність каналу із заданою шириною смуги частот можна, розробляючи та застосовуючи нові методи модуляції. Цим шляхом пішла група розробників IEEE 802.11b.

Нагадаємо, що від початку стандарт IEEE 802.11 передбачав роботу в режимі DSSS з використанням так званої Баркерівської послідовності (Barker) довжиною 11 біт: $B1 = (10110111000)$. Кожен інформаційний біт заміщається своїм добутком за модулем 2 (операція "що виключає АБО") з даною послідовністю, тобто кожна інформаційна одиниця замінюється на $B1$, кожен нуль – на інверсію $B1$. В результаті біт замінюється послідовністю 11 чіпів. Далі сигнал кодується за допомогою диференціальної дво- або чотиріпозиційної фазової модуляції (DBPSK або DQPSK, один або два чіпи на символ відповідно). При частоті модуляції, що несе 11 МГц, загальна швидкість становить залежно від типу модуляції 1 і 2 Мбіт/с.

Стандарт IEEE 802.11b додатково передбачає швидкість передачі 11 і 5,5 Мбіт/с. Для цього використовується так звана ССК-модуляція (Complementary Code Keying – кодування комплементарним кодом).

Хоча механізм розширення спектру, що використовується для отримання швидкостей 5,5 і 11 Мбіт/с із застосуванням ССК, відноситься до методів, які застосовуються для швидкостей 1 і 2 Мбіт/с, він унікальний. В обох випадках застосовується метод розширення, але при використанні модуляції ССК код, що розширює, являє собою код з 8 комплексних чіпів, у той час як при роботі зі швидкостями 1 і 2 Мбіт/с застосовується 11-розрядний код. 8-чіповий код визначається або 4 або 8 бітами - в залежності від швидкості передачі даних. Швидкість передачі чіпів становить 11 Мчіп/с, тобто при 8 комплексних чіпах на символ і 4 або 8 бітів на символ можна досягти швидкості передачі даних 5,5 та 11 Мбіт/с [12].

Щоб передавати дані зі швидкістю 5,5 Мбіт/с, потрібно згрупувати скрембльований потік бітів у символи по 4 біти (b_0, b_1, b_2 і b_3). Останні два біти

(b2 і b3) використовуються для визначення послідовностей 8 комплексних чіпів, як показано в таблиці 6, де $\{c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8\}$ представляють чіпи послідовності. У таблицях 6 j представляє уявне число, корінь квадратний з -1 , і відкладається по уявній, або квадратурній осі комплексної площини.

Тепер, маючи послідовність чіпів, визначену бітами (b2, b3), можна використовувати перші два біти (b0, b1) для визначення повороту фази, що здійснюється при модуляції методом DQPSK, який буде застосований до послідовності (таблиця 1.3). Ви повинні також пронумерувати кожен 4-бітовий символ PSDU, починаючи з 0, щоб можна було визначити, перетворюєте ви парний або непарний символ відповідно з цією таблицею. Слід пам'ятати, що йдеться про використання DQPSK, а не QPSK, і тому представлені в таблиці зміни фази відраховуються по відношенню до попереднього символу або, у випадку першого символу PSDU, по відношенню до останнього символу попереднього символу DQPSK, що передається зі швидкістю 2 Мбіт /с.

Таблиця 1.3 – Поворот фази при модуляції CCK

(b0, b1)	Зміна фази парних символів	Зміна фази непарних символів
0	0	π
1	$\pi/2$	$-\pi/2$
1	π	0
0	$-\pi/2$	$\pi/2$

Цей поворот фази застосовується до 8 комплексних чіпів символу, потім здійснюється модуляція на відповідній несучій частоті.

Щоб передавати дані зі швидкістю 11 Мбіт/с, скрембльована послідовність бітів PSDU розбивається на групи по 8 символів. Останні 6 бітів вибирають одну

послідовність, що складається з 8 комплексних чіпів, з числа 64 можливих послідовностей, майже так само, як використовувалися біти (b_2, b_3) для вибору однієї з чотирьох можливих послідовностей. Біти (b_0, b_1) використовуються так само, як при модуляції ССК на швидкості 5,5 Мбіт/с для обертання фази послідовності і подальшої модуляції на відповідній несучій частоті.

У чому перевага ССК-модуляції? Річ у тім, що чіпи символу визначаються основі послідовностей Уолша-Адамара. Послідовності Уолша-Адамара добре вивчені, мають відмінні автокореляційні властивості. Що важливо, кожна така послідовність мало корелює сама з собою при фазовому зрушенні - дуже корисна властивість при боротьбі з відбитими сигналами. Неважко помітити, що теоретичне операційне посилення ССК-модуляції - 3 дБ (удвічі), оскільки без кодування QPSK-модульований з частотою 11 Мбіт/с сигнал може транслювати 22 Мбіт/с. Як видно, ССК-модуляція є видом блочного коду, а тому досить проста при апаратній реалізації. Сукупність цих властивостей і забезпечила ССК місце у стандарті IEEE 802.11b як обов'язковий вид модуляції.

Насправді важливо як операційне посилення. Істотну роль грає і рівномірність розподілу символів у фазовому просторі - вони повинні якнайдалі відстояти один від одного, щоб мінімізувати помилки їх детектування. І з цього погляду ССК-модуляція не виглядає оптимальною, її реальне операційне посилення не перевищує 2 дБ. Тому спочатку опрацьовувався інший спосіб модуляції - пакетне бінарне згорткове кодування PBCC (Packet Binary Convolutional Coding). Цей метод увійшов до стандарту IEEE 802.11b як додаткова (необов'язкова) опція. Механізм PBCC (5.51) дозволяє досягати в мережах IEEE 802.11b пропускної спроможності 5,5, 11 та 22 Мбіт/с.

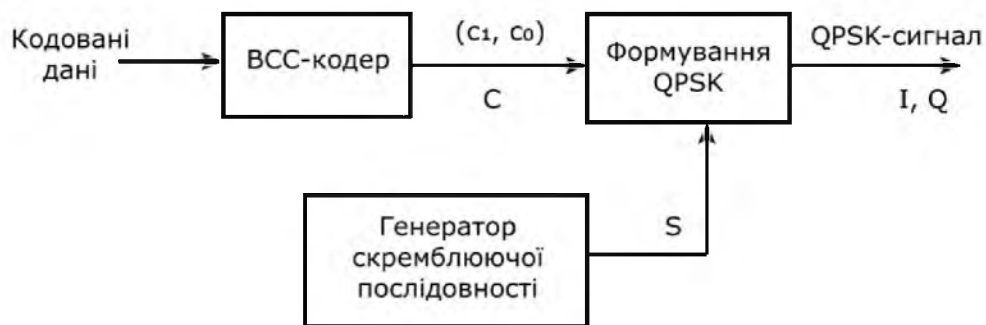


Рисунок 1.7 - Загальна схема РВСС-модуляції

Як випливає з назви, метод ґрунтується на згортковому кодуванні. Для швидкостей 5,5 та 11 Мбіт/с потік інформаційних бітів надходить у шестирозрядний зсувний регістр із суматорами (рисунок 1.8). У початковий час всі тригери зсувного регістру ініціалізують банкрутом. В результаті кожен вихідний біт d замінюється двома бітами кодової послідовності (c_0, c_1). При швидкості 11 Мбіт/с c_0 та c_1 задають один символ чотирипозиційної QPSK-модуляції. Для швидкості 5,5 Мбіт/с використовують двопозиційну BPSK-модуляцію, послідовно передаючи кодові біти c_0 та c_1 . Якщо ж потрібна швидкість 22 Мбіт/с, схема кодування ускладнюється: три кодові біти (c_0 - c_2) визначають один символ у 8-позиційній 8-PSK-модуляції (рисунок 1.9).

Після формування PSK-символів відбувається скремблювання. Залежно від сигналу s (рисунок 1.7) символ залишається без змін ($s = 0$), або його фаза збільшується ($s = 1$). Значення s визначає 256-бітова циклічно повторювана послідовність S . Вона формується на основі початкового вектора $U = 338Bh$, в якому рівне число нулів та одиниць.

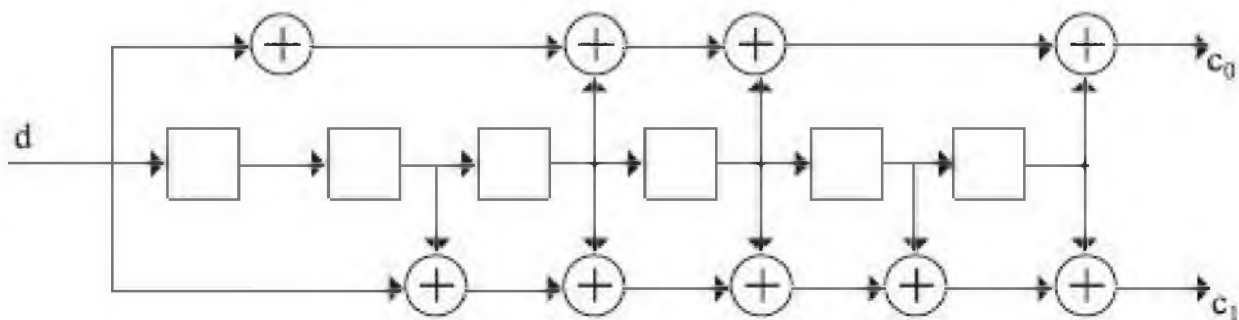


Рисунок 1.8 - Згорткове кодування з двома бітами кодової послідовності

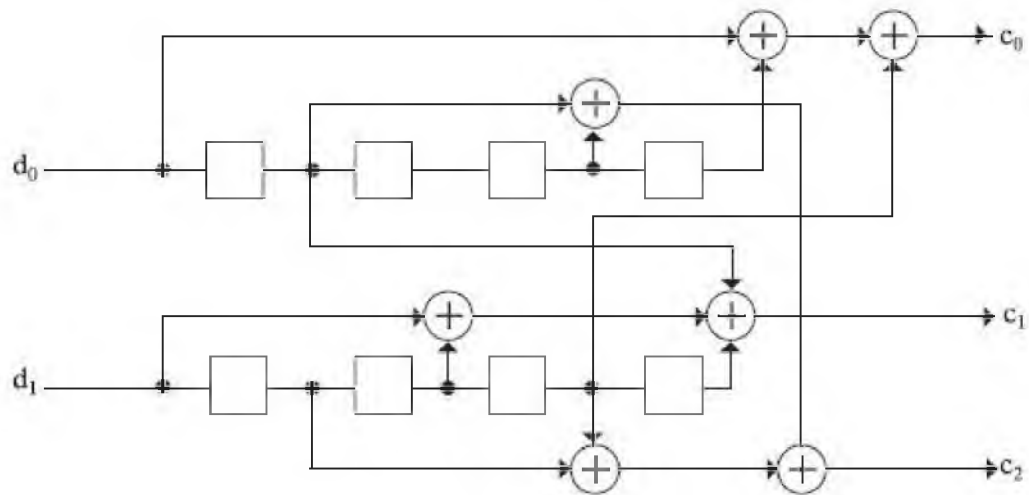


Рисунок 1.9 - Згорткове кодування з трьома бітами кодової послідовності

У шестирозрядного зсувного регістра, що застосовується в РВСС для швидкостей 11 і 5,5 Мбіт/с, 64 можливих вихідних станів. Так що при модуляції РВСС інформаційні біти у фазовому просторі виявляються набагато далі один від одного, ніж при ССК-модуляції. Тому РВСС і дозволяє при тому самому співвідношенні "сигнал-шум" і рівні помилок вести передачу з більшою швидкістю, ніж у випадку ССК. Однак плата за ефективніше кодування - складність апаратної реалізації даного алгоритму.

IEEE 802.11a

Стандарт IEEE 802.11a з'явився практично одночасно з IEEE 802.11b у вересні 1999 року. Ця специфікація була орієнтована на роботу в діапазоні 5 ГГц і заснована на принципово іншому, ніж описано вище, механізмі кодування даних - на частотному мультиплексуванні за допомогою ортогональних несучих (OFDM).

Стандарт 802.11a визначає характеристики обладнання, що застосовується в офісних або міських умовах, коли поширення сигналу відбувається по багатопроменеві канали через безліч відображень.

У IEEE 802.11a кожен кадр передається за допомогою 52 ортогональних несучих, кожна із шириною смуги близько 300 КГц (20 МГц/64). Ширина одного каналу – 20 МГц. Несучі модулюють за допомогою BPSK, QPSK, а також 16- і 64-

позиційної квадратурної амплітудної модуляції (QAM). У сукупності з різними швидкостями кодування ($1/2$ та $3/4$, для 64-QAM - $2/3$ та $3/4$) утворюється набір швидкостей передачі 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 та 54 Мбіт/с . У таблиці 1.4 показано, як необхідна швидкість передачі перетворюється на відповідні параметри вузлів передавача OFDM.

Таблиця 1.4 – Параметри передавача стандарту 802.11a

Швидкість передачі даних, Мбіт/с	Модуляція	Швидкість згорткового кодування	Кількість канальних бітів на піднесучу	Кількість канальних бітів на символ	Кількість бітів даних на символ OFDM
6	BPSK	$1/2$	1	48	24
9	BPSK	$3/4$	1	48	36
12	QPSK	$1/2$	2	96	48
18	QPSK	$3/4$	2	96	72
24	16-QAM	$1/2$	4	192	96
36	16-QAM	$3/4$	4	192	144
48	64-QAM	$2/3$	6	288	192
54	64-QAM	$3/4$	6	288	216

Структура заголовків фізичного рівня відрізняється від прийнятого специфікації IEEE 802.11b, але незначно (рис.1.10).

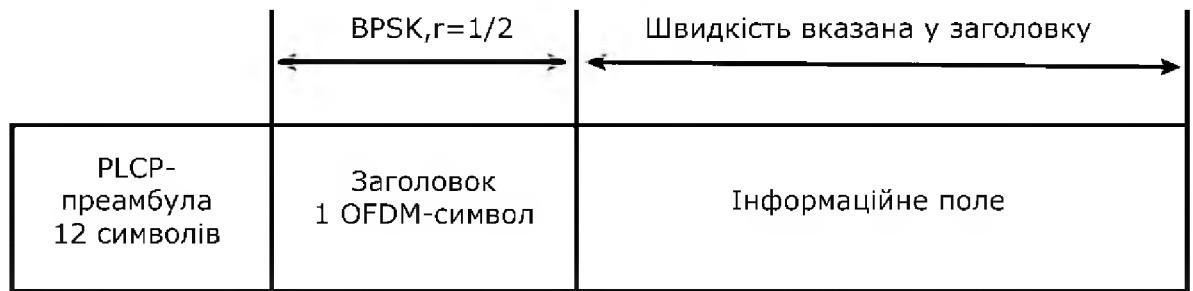


Рисунок 1.10 - Структура заголовка фізичного рівня стандарту IEEE 802.11a

Кадр включає преамбулу (12 символів синхрослідковості), заголовок фізичного рівня (PLCP-заголовок) та власне інформаційне поле, сформоване на MAC-рівні. У заголовку передається інформація про швидкість кодування, тип модуляції та довжину кадру. Преамбула та заголовок транслюються з мінімально можливою швидкістю (BPSK, швидкість кодування $r = 1/2$), а інформаційне поле - із зазначеною в заголовку, як правило, максимальною швидкістю, залежно від умов обміну. OFDM-символи передаються через кожні 4 мкс, причому кожному символу тривалістю 3,2 мкс передують захисний інтервал 0,8 мкс (частина символу, що повторюється). Останній необхідний боротьби з багатопроменевим поширенням сигналу - відбитий і який із затримкою символ потрапить у захисний інтервал і пошкодить наступний символ.

Природно, формування/декодування OFDM символів відбувається за допомогою швидкого перетворення Фур'є (оберненого/прямого, ОШПФ/ШПФ). Функціональна схема трактів прийому/передачі (рис. 1.11) досить стандартна для даного методу і включає згортковий кодер, механізм перемежування/перерозподілу (захист від пакетних помилок) та процесор ОШПФ. Фур'є-процесор, власне, формує сумарний сигнал, після чого до символу додається захисний інтервал, остаточно формується OFDM-символ і за допомогою квадратурного модулятора/конвертера переноситься в задану частотну область. При прийомі все відбувається у зворотному порядку.

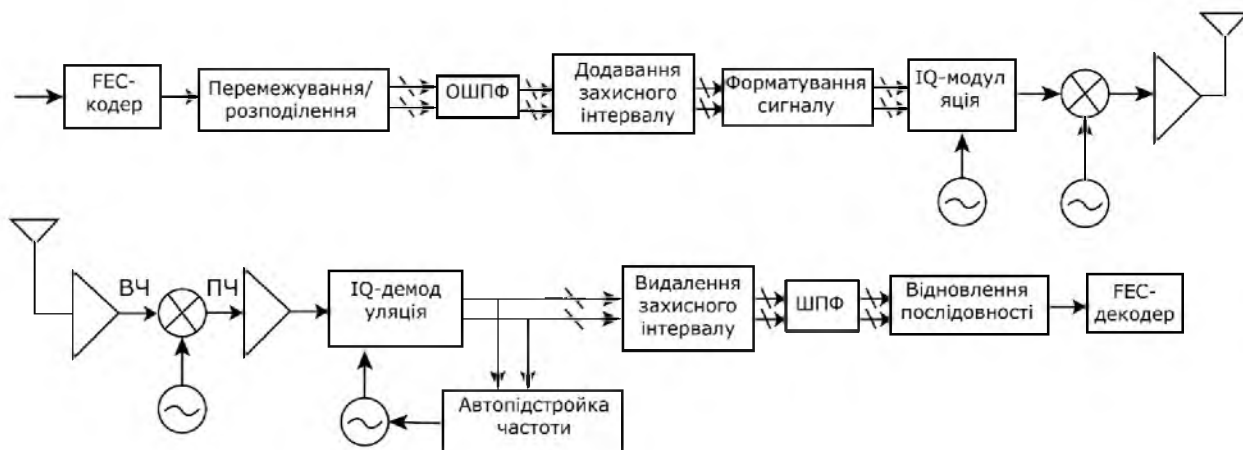


Рисунок 1.11 - Функціональна схема трактів прийому/передачі стандарту IEEE 802.11a

IEEE 802.11g

Стандарт IEEE 802.11g по суті є перенесення схеми модуляції OFDM, що чудово зарекомендувала себе в 802.11a, з діапазону 5 ГГц в область 2,4 ГГц при збереженні функціональності пристроїв стандарту 802.11b. Це можливо, оскільки у стандартах 802.11 ширина одного каналу в діапазонах 2,4 та 5 ГГц схожа – 22 МГц.

Однією з основних вимог до специфікації 802.11g була зворотна сумісність із пристроями 802.11b. Дійсно, в стандарті 802.11b як основний спосіб модуляції прийнята схема ССК (Complementary Code Keying), а як додаткова можливість допускається модуляція РВСС (Pocket Binary Convolutional Coding).

Розробники 802.11g передбачили ССК-модуляцію для швидкостей до 11 Мбіт/с та OFDM для більш високих швидкостей. Але мережі стандарту 802.11 під час роботи використовують принцип CSMA/CA - множинний доступ до каналу зв'язку з контролем несучої та запобіганням колізій. Жодний пристрій 802.11 не повинен починати передачу, доки не переконається, що ефір у діапазоні вільний від інших пристроїв. Якщо в зоні чутності виявляться пристрої 802.11b і 802.11g, причому обмін відбуватиметься між пристроями 802.11g за допомогою OFDM, то

обладнання 802.11b просто не зрозуміє, що інші пристрої ведуть передачу, і спробує почати трансляцію. Наслідки очевидні.

Щоб не допустити подібної ситуації, передбачена можливість роботи у змішаному режимі – ССК-OFDM. Інформація у мережах 802.11 передається кадрами. Кожен інформаційний кадр включає два основні поля: преамбулу із заголовком та інформаційне поле (рис.1.12).



Рисунок 1.12 - Кадри IEEE 802.11g у різних режимах модуляції

Преамбула містить синхропослідовність і код початку кадру, заголовок - службову інформацію, у тому числі про тип модуляції, швидкість і тривалість передачі кадру. У режимі ССК-OFDM преамбула і заголовок модулюються шляхом ССК (реально - шляхом прямого розширення діапазону DSSS за допомогою послідовності Баркера, тому в стандарті 802.11g цей режим називається DSSS-OFDM), а інформаційне поле - шляхом OFDM. Таким чином, всі пристрої 802.11b, що постійно "прослуховують" ефір, приймають заголовки кадрів і дізнаються, скільки часу транслюватиметься кадр 802.11g. У цей період вони "мовчать". Природно, пропускна спроможність мережі падає, оскільки швидкість передачі преамбули та заголовка – 1 Мбіт/с.

Мабуть, даний підхід не влаштував табір прихильників технології РВСС, і для досягнення компромісу в стандарт 802.11g як додаткову можливість ввели, так само як і в 802.11b, необов'язковий режим - РВСС, в якому заголовок і преамбула передаються так само, як і СБК, а інформаційне поле модулюється за схемою РВСС і передається на швидкості 22 або 33 Мбіт/с. В результаті пристрою стандарту 802.11g повинні бути сумісними з усіма модифікаціями обладнання 802.11b і не створювати взаємних перешкод. Діапазон підтримуваних ним швидкостей відбито 8, залежність швидкості від типу модуляції - на рис.1.13. Можливості специфікації IEEE 802.11g представлені в таблиці 1.5.

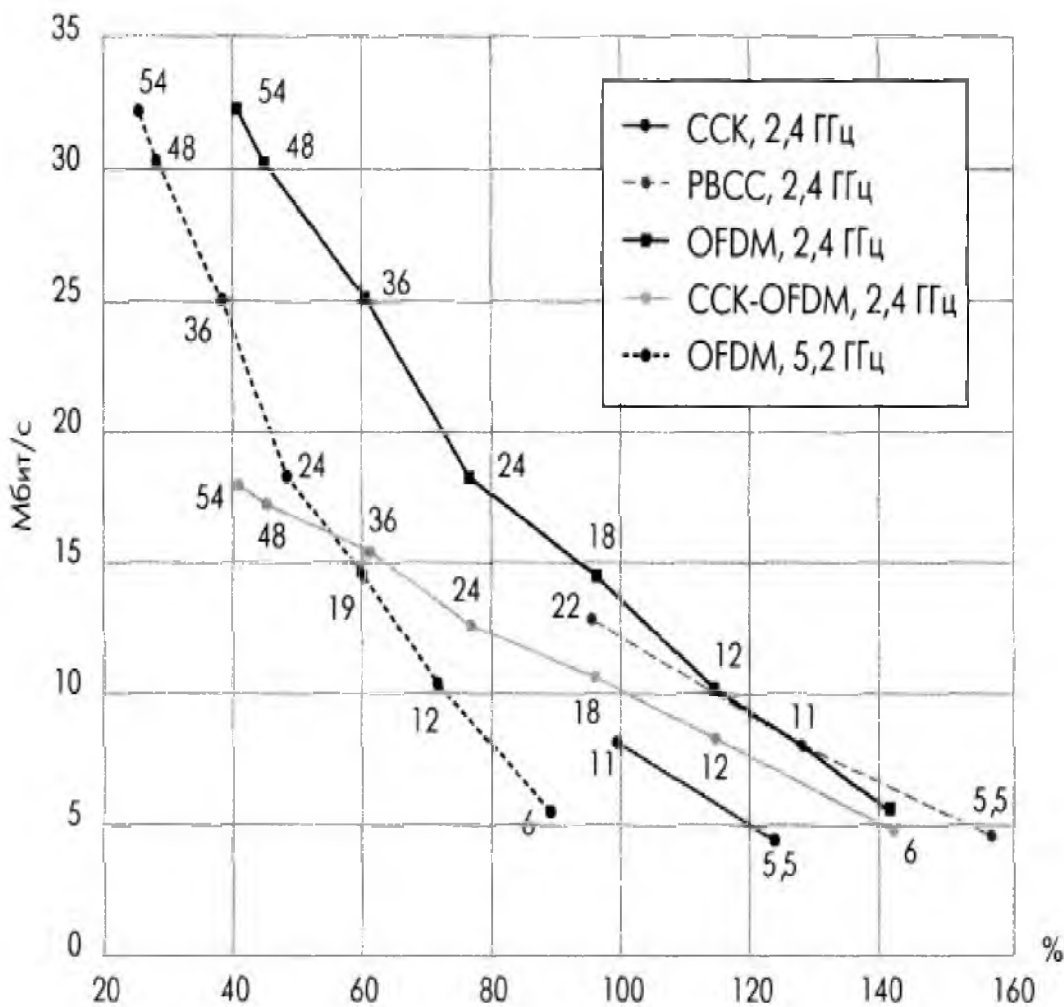


Рисунок 1.13 - Залежність швидкості передачі від відстані різних технологій передачі. Відстань наведена у відсотках, 100% – дальність передачі з модуляцією ССК на швидкості 11 Мбіт/с

Таблиця 1.5 – Можливі швидкість і тип модуляції в специфікації IEEE
802.11g

Швидкість, Мбіт/с	Тип модуляції	
	Обов'язково	Допустимо
1	Послідовність Баркера	-
2	Послідовність Баркера	-
5,5	ССК	PBCC
6	OFDM	OFDM
9	-	OFDM, ССК-OFDM
11	ССК	PBCC
12	OFDM	ССК-OFDM
18	-	OFDM, ССК-OFDM
22	-	PBCC
24	OFDM	ССК-OFDM
33	-	PBCC
36	-	OFDM, ССК-OFDM
48	-	OFDM, ССК-OFDM
54	-	OFDM, ССК-OFDM

Очевидно, що пристрої стандарту IEEE 802.11g досить довго доведеться працювати в одних мережах з обладнанням 802.11b. Також очевидно, що виробники в своїй масі не будуть підтримувати режими ССК-OFDM і РВСС в силу їх необов'язковості, адже майже все вирішує ціна пристрою. Тому одна з основних проблем цього стандарту – як забезпечити безконфліктну роботу змішаних мереж 802.11b/g.

Основний принцип роботи в мережах 802.11 - "слухати, перш ніж вести мовлення". Але пристрої 802.11b не здатні почути пристрої 802.11g в режимі OFDM. Ситуація аналогічна проблемі прихованих станцій: два пристрої видалені настільки, що не чують один одного і намагаються звернутися до третього, яке знаходиться у зоні чутності обох.

Для запобігання конфліктам у подібній ситуації в 802.11 введено захисний механізм, що перед початком інформаційного обміну передбачає передачу короткого кадру "запит на передачу" (RTS) та отримання кадру підтвердження "можна передавати" (CTS). Механізм RTS/CTS застосовується і до змішаних мереж 802.11b/g. Звичайно, ці кадри повинні транслюватися в режимі ССК, який повинні розуміти всі пристрої. Однак захисний механізм суттєво знижує пропускну здатність мережі.

Стандарти фізичного рівня для різних специфікацій 802.11 наведені у таблиці 1.6.

Таблиця 1.6 – Стандарти фізичного рівня

Параметр	802.11 DSSS	802.11 FHSS	802.11b	802.11a	802.11g
Частотний діапазон, ГГц	2,4	2,4	2,4	5	2,4
Максимальна швидкість передачі даних, Мбіт/с	2	2	11	54	54
Технологія	DSSS	FHSS	CCK	OFDM	OFDM
Тип модуляції (для максимальної швидкості передачі)	QPSK	GFSK	QPSK	64-QAM	64-QAM
Кількість каналів, що не перекриваються	3	3	3	15	3

1.4 Особливості та переваги технології IEEE 802.11

З розвитком технологій LAN у всьому світі різко зросла кількість різних бездротових пристроїв і виникла проблема перешкод і перевантаженості діапазону 2,4 ГГц. Це пов'язано з тим, що такі пристрої, як мікрохвильові печі, бездротові телефони, рації, Bluetooth обладнання та інші аналогічні прилади помітно впливають один на одного. Зокрема це позначається і на якості роботи обладнання Wi-Fi.

Як було зазначено вище, у стандарті 802.11 максимальна швидкість передачі визначається як сума каналами. Тому теоретична швидкість однозначно відповідає реальній швидкості передачі. У випадках, коли різні пристрої 802.11 використовують ті самі канали або працюють в зоні потужних радіоперешкод, можуть виникати суттєві зниження швидкості. Наприклад, бездротова станція, що встановила з'єднання на швидкості 11 Мбіт/с, реально працюватиме зі швидкістю не більше 1 Мбіт/с, якщо вона знаходиться в зоні дії потужної мікрохвильової печі.

Канали та частоти

У діапазоні 2,4 ГГц стандартами визначено 14 каналів. Деякі з них можуть бути недоступні в ряді країн (наприклад, 14 канал дозволено для використання лише в Японії). Канали з номерами 1, 6 і 11 вважаються такими, що повністю не перетинаються за частотами.

Кожен канал займає ширину 20 МГц. У деяких випадках стандартами дозволено використовувати ширину каналу рівну 40 МГц. Номери каналів та його центральні частоти наведено на рисунку 1.14.

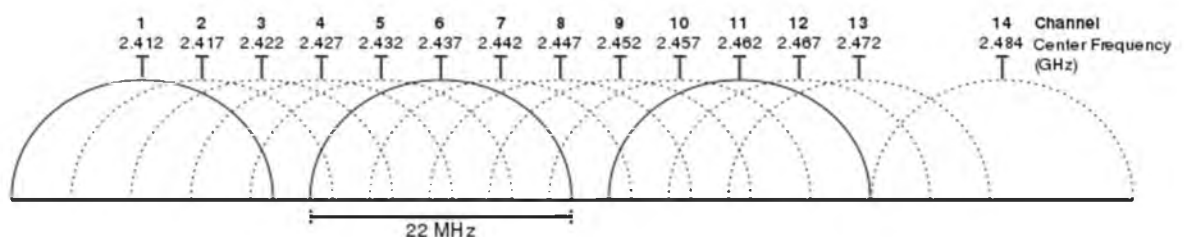


Рисунок 1.14 – Канали 802.11b/g в діапазоні 2.4 ГГц

Одним із недоліків діапазону 2,4 ГГц є його висока завантаженість та мала кількість каналів. Перешкоди для Wi-Fi-мережі можуть створювати не тільки інші Wi-Fi-пристрої та точки доступу, але й Bluetooth-пристрої, що працюють у цьому частотному діапазоні. Навіть звичайна побутова НВЧ-піч здатна дуже сильно впливати на якість з'єднання в діапазоні 2,4 ГГц. Проблеми з перешкодами і щільністю користувачів в діапазоні 2,4 ГГц стали серйозною проблемою.

Для мінімізації взаємних впливів потужність Wi-Fi-передавачів суворо обмежена та регламентована. Використання потужного передавача вимагає отримання дозволу у радіочастотному центрі.

Для компенсації шуму в каналі використовується техніка, яка називається «чіпінг». Кожен біт даних користувача перетворюється на серію надлишкових бітових шаблонів, які називаються «чіпами». Внутрішня надмірність кожного чіпа в поєднанні з розподілом сигналу по каналу 22 МГц забезпечує форму перевірки та виправлення помилок; навіть якщо частина сигналу пошкоджена, у багатьох випадках її все одно можна відновити, мінімізуючи потребу в повторних передачах [13].

Підключення до мережі

MAC рівень 802.11 несе відповідальність за те, яким чином клієнт підключається до точки доступу. Коли клієнт потрапляє в зону дії однієї або декількох точок доступу, він на основі потужності сигналу і значення кількості помилок обирає одну з них і підключається до неї. Як тільки клієнт отримує підтвердження того, що його прийнято точкою доступу, він налаштовується на радіоканал, в якому вона працює. Час від часу він перевіряє всі канали, щоб переглянути, чи не надає інша точка доступу вищу якість зв'язку. Якщо така точка доступу є, то станція підключається до неї, перенастроюючи її частоту (рис. 1.15).

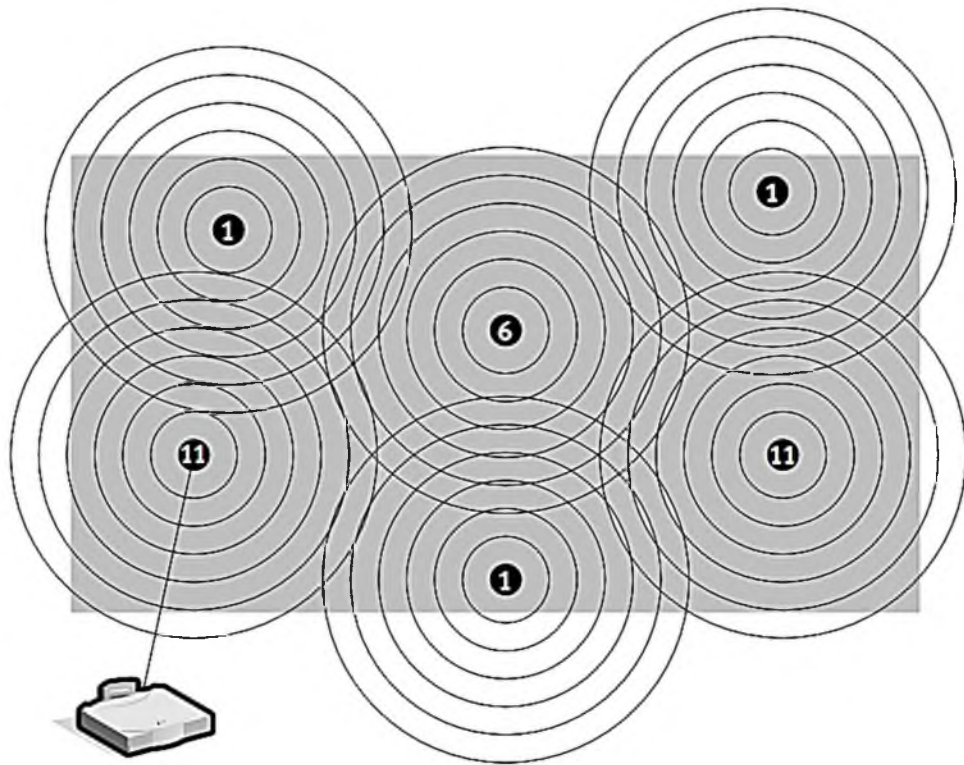


Рисунок 1.15 - Підключення до мережі та ілюстрація правильного призначення каналів для точок доступу

Перепідключення зазвичай відбувається в тому випадку, якщо станція була фізично переміщена далеко від точки доступу, що викликало ослаблення сигналу. В інших випадках повторне підключення відбувається через зміну радіочастотних характеристик будівлі, або просто через великий мережевий трафік через початкову точку доступу. В останньому випадку ця функція протоколу відома як "балансування навантаження", тому що її головне призначення - розподіл загального навантаження на бездротову мережу найбільш ефективно по всій інфраструктурі мережі.

Процес динамічного підключення і перепідключення дозволяє мережевим адміністраторам встановлювати бездротові мережі з дуже широким покриттям, створюючи "стілники", що частково перекриваються. Ідеальним варіантом є такий, при якому сусідні точки доступу, що перекриваються, будуть використовувати різні DSSS канали, щоб не створювати перешкод у роботі один одному (рис. 1.15).

Управління живленням

Додатково щодо керування доступом до носія, MAC рівень підтримує енергозберігаючі режими для продовження терміну служби батарей мобільних пристроїв. Стандарт підтримує два режими споживання енергії, звані "режим тривалої роботи" та "заощаджуючий режим". У першому випадку радіо завжди знаходиться у включеному стані, у той час як у другому випадку радіо періодично включається через певні проміжки часу для прийому "маячкових" сигналів, які постійно посилає точка доступу. Ці сигнали включають інформацію щодо того, яка станція повинна прийняти дані. Таким чином, клієнт може прийняти маячковий сигнал, прийняти дані, а потім знову перейти в "сплячий" режим.

Безпека

802.11b забезпечує контроль доступу на MAC рівні (другий рівень моделі ISO/OSI), і механізми шифрування, відомі як Wired Equivalent Privacy (WEP), метою яких є забезпечення бездротової мережі засобами безпеки, еквівалентними засобам безпеки провідних мереж. Коли WEP увімкнено, він захищає лише пакет даних, але не захищає заголовки фізичного рівня, так що інші станції в мережі можуть переглядати дані, необхідні для керування мережею. Для контролю доступу до кожної точки доступу міститься так званий ESSID (або WLAN Service Area ID), без знання якого мобільна станція не зможе підключитися до точки доступу.

Додатково точка доступу може зберігати список дозволених MAC-адрес, званий списком контролю доступу (Access Control List, ACL), дозволяючи доступ тільки тим клієнтам, чії MAC адреси знаходяться в списку.

Для шифрування даних стандарт надає можливість шифрування з використанням алгоритму RC4 з 40-бітовим ключем, що розділяється. Після того, як станція підключається до точки доступу, всі передані дані можуть бути зашифровані з використанням цього ключа. Коли використовується шифрування, точка доступу надсилатиме зашифрований пакет будь-якої станції, яка намагається

підключитися до неї. Клієнт повинен використовувати свій ключ для шифрування коректної відповіді для того, щоб автентифікувати себе та отримати доступ до мережі [14].

1.5 Постановка задачі

Метою цієї роботи є розробка імітаційної моделі, дослідження та аналіз системи мобільного зв'язку стандарту IEEE 802.11 на її базі.

Для реалізації поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- 1 виконати аналітичний огляд технології мобільного зв'язку стандарту IEEE 802.11b;
- 2 розробити імітаційну модель системи мобільного зв'язку стандарту IEEE 802.11b;
- 3 провести модельний експеримент з метою дослідження поведінки основних характеристик системи мобільного зв'язку стандарту IEEE 802.11b в умовах шумів;
- 4 здійснити аналіз отриманих результатів.

1.6 Висновки

У першому розділі розглянуто історію розвитку бездротової технології IEEE 802.11 (Wi-Fi), наведено опис технології та її реалізації на різних рівнях моделі OSI, основних принципів функціонування MAC-рівня, виконано порівняльний аналіз протоколів стандарту, а також сформульовано задачі на розробку та дослідження імітаційної моделі системи мобільного зв'язку стандарту IEEE 802.11.

2 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

2.1 Принципи функціонування системи IEEE 802.11b

802.11b (також відомий як 802.11 High Rate або Wi-Fi) є стандартом IEEE та розширенням 802.11, який застосовується до бездротових локальних мереж і забезпечує передачу 11 Мбіт/с (з резервною швидкістю до 5,5, 2 і 1 Мбіт/с).

Стандарт 802.11b заснований на методі широкосмугової модуляції із прямим розширенням спектру (Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS). Весь робочий діапазон ділиться на 14 каналів, що рознесені на 25 МГц для виключення взаємних перешкод. Дані передаються одним із цих каналів без перемикання інші. Можливе одночасне використання лише 3 каналів.

Швидкість передачі може автоматично змінюватися залежно від рівня перешкод і відстані між передавачем і приймачем. Короткий опис специфікації стандарту Wi-Fi 802.11b наведено у таблиці 2.1.

Стандарт IEEE 802.11b реалізує максимальну теоретичну швидкість передачі 11 Мбіт/с, що можна порівняти з кабельною мережею 10 BaseT Ethernet. Слід враховувати, що така швидкість можлива під час передачі даних одним WLAN-пристроєм. Якщо в середовищі одночасно функціонує більше абонентських станцій, то смуга пропускання розподіляється між усіма і швидкість передачі даних на одного користувача падає.

Відмінною особливістю цього стандарту є те, що у разі погіршення якості сигналу, великої віддаленості від точки доступу та різних перешкод швидкість передачі даних може зменшуватися до 1 Мбіт/с, і навпаки, виявивши, що якість сигналу покращилася, мережне обладнання автоматично починає працювати швидше до максимального рівня. Цей механізм називається динамічним зсувом швидкості.

Таблиця 2.1 - Короткий опис специфікації стандарту Wi-Fi 802.11b [15]

Параметр	Значення
Дата прийняття стандарту	Липень 1999
Максимальна швидкість передачі даних (Мбіт/с)	11
Типова швидкість передачі даних (Мбіт/с)	5
Типовий діапазон у приміщенні (метри)	~30
Модуляція	ССК (DSSS)
Радіочастотний діапазон (ГГц)	2.4
Ширина каналу (МГц)	20

Слід зазначити, що технологія Wi-Fi є одним з напрямків бездротового зв'язку, що найбільш бурхливо розвиваються. В даний час обладнання для Wi-Fi випускають багато компаній. Тільки у складі Wi-Fi Alliance [16] налічується близько 320 фірм, серед яких Intersil, Texas Instruments, Samsung, Broadcom, 3Com, Atheros, Cisco, Alcatel-Lucent, Nokia, Intel, Samsung, Microsoft, Sony, Apple, MSI, Motorola, The Boeing, Electrobit (EB), Huawei, Hitachi, Ford Motor Company, ST-Ericsson, Murata, NXP, HP, OKI, Garmin, LG, Epson, Sharp, Sierra Wireless, Philips, Canon, Ricoh, Microchip, Panasonic, Toshiba, NETGEAR, NEC, Logitech, Mitsumi, Lexmark, Alcatel, ROHM, Trimble Navigation, Kodak, Symbol Technologies, Airgo Networks та ін.

Основна архітектура, ідеологія, структура та характерні особливості рівнів нового стандарту 802.11b аналогічні первісному варіанту Wi-Fi - 802.11, змінився лише фізичний рівень, що характеризує вищі швидкості доступу та передачі даних. Розподіл частот лінійного тракту системи передачі (Frequency Assignment Plan) реалізується відповідно до формули, наведеної в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Основні параметри стандарту IEEE 802.11b

Параметр	Значення	Метод модуляції
Діапазон частот, МГц	2400-2483,5	-
Метод розширення спектра	DSSS	-
План частот	$2412+5(n-1)$, $n = 1, 2 \dots 13$	-
Швидкості передачі даних по радіоканалу, Мбіт/с	1	DBPSK
	2	DQPSK
	5,5	ССК
	11	ССК
Максимальна потужність випромінювання передавача, дБм	не більше 20 (100 мВт)	-

Для модуляції та підтримки різних режимів швидкості передачі є різні способи. Швидкість 1 Мбіт/с підтримується з допомогою методу DBPSK (Differential Binary Phase Shift Keying). Для забезпечення швидкості 2 Мбіт/с використовується метод DQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying). Схема модуляції ССК (Complementary Code Keying) допускає швидкості передачі 5,5 та 11 Мбіт/с. Використання ССК кодів дозволяє кодувати 8 біт на один символ. Символьна швидкість 1,385 мегасимволів за секунду ($11/8 = 1,385$) відповідає швидкості 11 Мбіт/с. При цьому кодується 8 біт символ. При швидкості передачі 5,5 біт/с в одному символі кодується лише 4 біти.

2.2 Створення моделі радіоінтерфейсу WiFi 802.11 IEEE 802.11b

Імітаційне моделювання - це метод дослідження, при якому система, що вивчається, замінюється моделлю, що з достатньою точністю описує реальну систему і з якою проводяться експерименти з метою отримання інформації про властивості цієї системи. Одним з основних видів імітаційного моделювання є статистичне імітаційне моделювання [17].

Імітаційне статистичне моделювання являє собою чисельний метод проведення на ЕОМ обчислювальних експериментів з математичними моделями, що імітують поведінку реальних об'єктів, процесів і систем в часі протягом заданого періоду.

Переваги імітаційного моделювання:

- Висока адекватність між фізичною суттю описуваного процесу і його моделлю;
- Можливість описати складну систему на досить високому рівні деталізації;
- Значно більше областей дослідження, ніж аналітичне моделювання;
- Відсутність обмежень на відображення в моделі залежностей між параметрами моделі;
- Отримання великого числа даних про досліджуваний об'єкт (функцію розподілу випадкової величини багато іншого);
- Доступність і розвиненість інструментів моделювання.

До недоліків імітаційного моделювання відносять:

- Розробка хорошою ІМ вимагає багато часу на створення і налагодження;
- Відносно високі вимоги до кваліфікації дослідника для моделі;
- Низька відтворюваність - спільність застосування і індивідуальність реалізації.

Ця модель (рис. 2.1), створена у графічному середовищі Simulink MATLAB, демонструє реалізацію системи DSSS - розширення спектра методом прямої послідовності, яка забезпечує швидкість передачі корисних даних 1 Мбіт/с, 2 Мбіт/с, 5,5 Мбіт/с і 11 Мбіт/с.

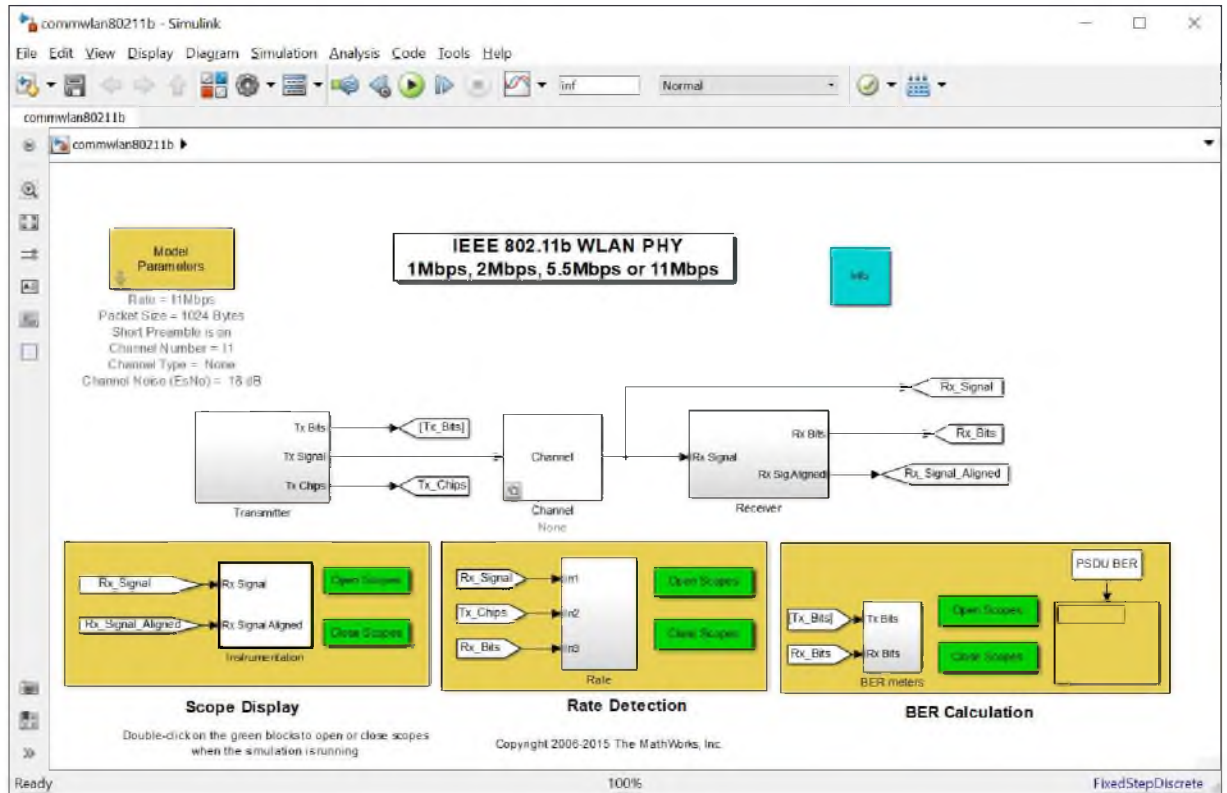


Рисунок 2.1 – Модель IEEE 802.11b WLAN PHY

Модель складається із трьох основних блоків:

- 1 Transmitter (передавач);
- 2 Channel (канал);
- 3 Receiver (приймач) (рис. 2.3).

Розгорнута модель передавача представлена на рисунку 2.2. Можна побачити, на якому саме етапі створюється PSDU і формується кадр PPDU.

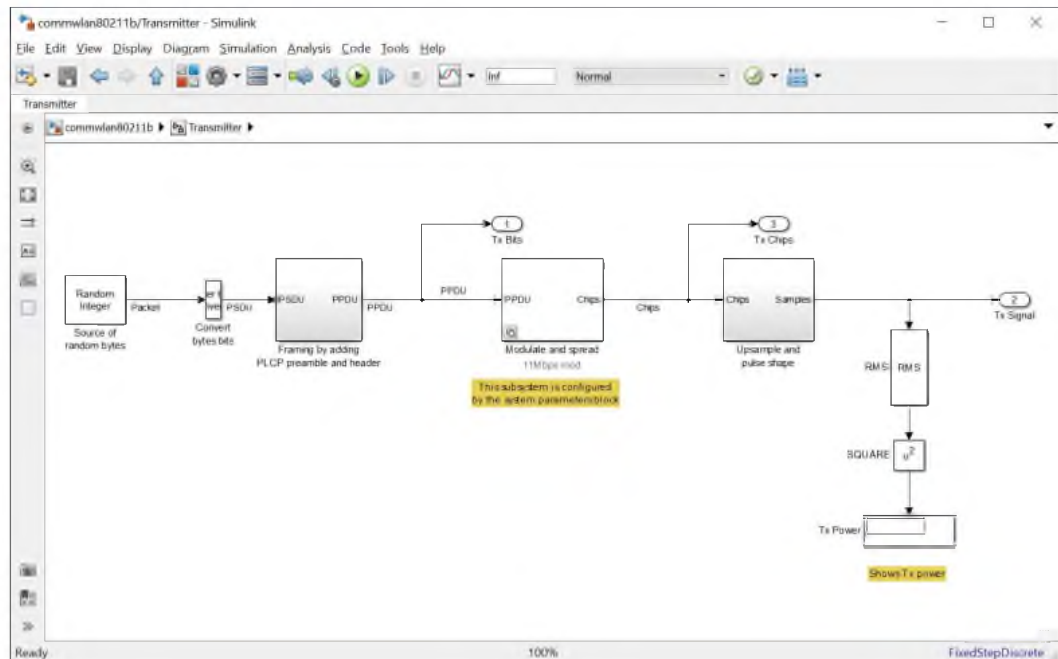


Рисунок 2.2 – Модель передавача

Блоки даних протоколу підрівня MAC (MPDU) перетворюються на блоки даних протоколу PHY (PPDU) для передачі. Перетворення виконується шляхом додавання преамбули PLCP і заголовка PLCP до MPDU.

Преамбула PLCP і заголовок PLCP модулюються за допомогою DBPSK. MPDU модулюється за допомогою DBPSK або комбінації DQPSK, QPSK і CCK, залежно від використовуваної швидкості передачі даних [18].

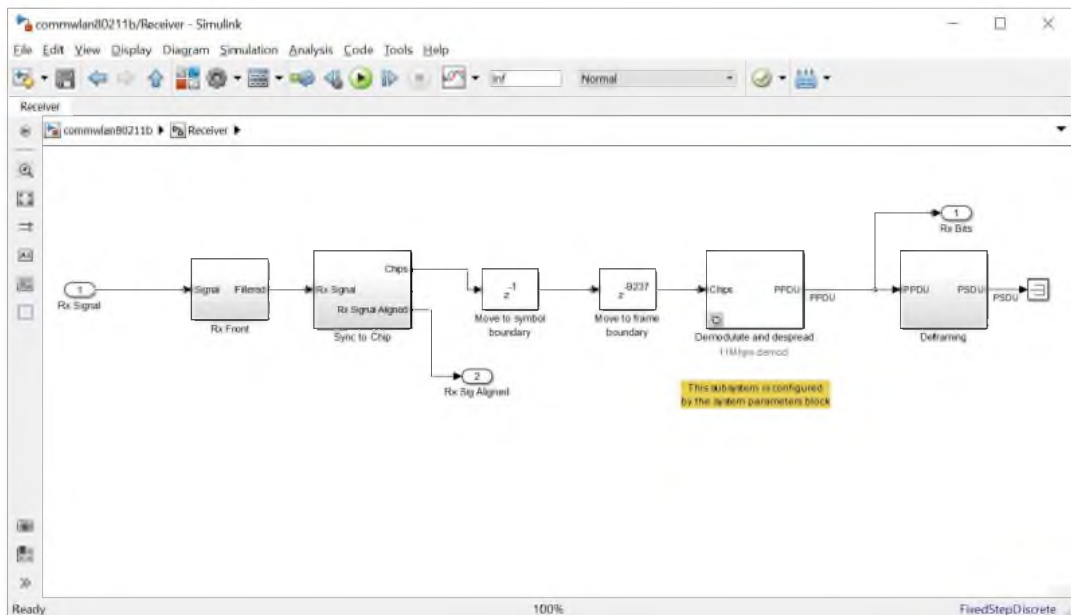


Рисунок 2.3 – Модель приймача

Канал має два режими роботи:

- 1 None (немає каналу);
- 2 AWGN (канал із шумами) (рис. 2.4).

AWGN (адитивний білий гаусівський шум) — вид білого шуму, що заважає в каналі передачі інформації. Характеризується рівномірною спектральною щільністю, нормально розподіленим значенням амплітуди і адитивним способом впливу на сигнал. Найбільш поширений вид шуму, який використовується для розрахунку і моделювання систем радіозв'язку. Термін «адитивний» означає, що даний вид шуму підсумовується з корисним сигналом.

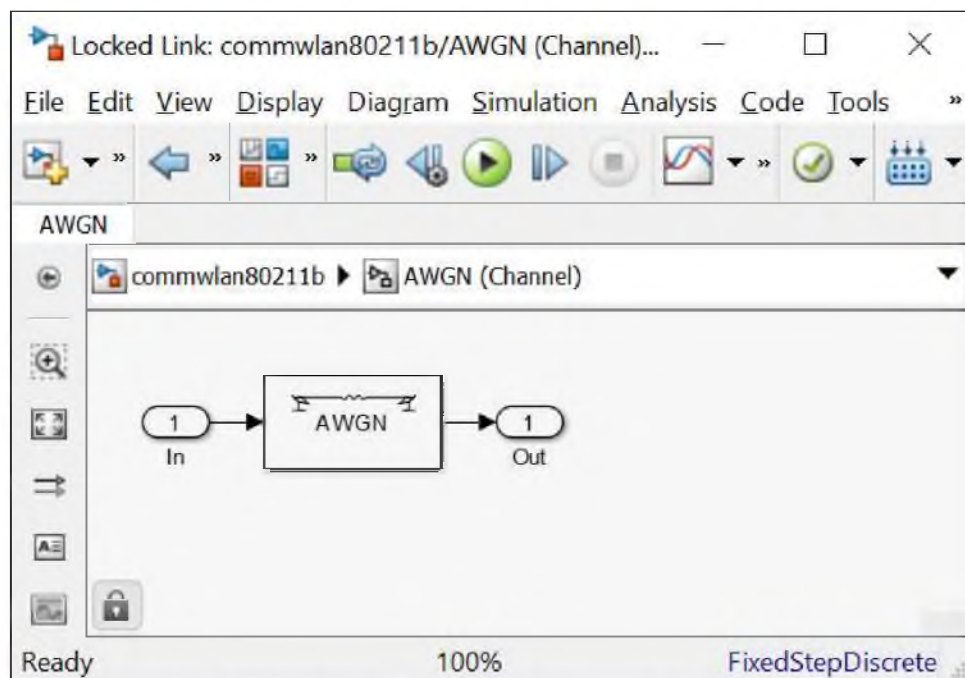


Рисунок 2.4 – Канал передачі з шумами

За допомогою елемента Model Parameters (рис. 2.5) можна встановлювати бажані параметри мережі, що моделюється:

- швидкість передачі даних (Rate);
- розмір пакету (Packet Size);
- кількість каналів (Channel Number);
- тип каналу (Channel Type);
- рівень шумів у каналі (Channel EsNo).

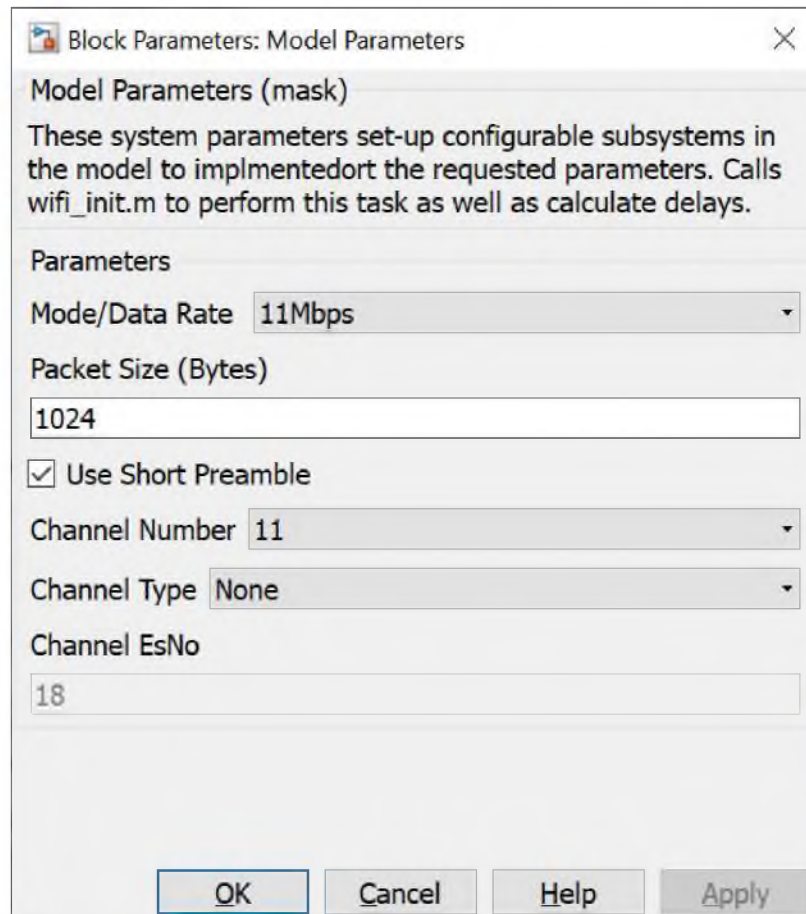


Рисунок 2.5 – Вікно налаштування параметрів

Для дослідження використовуються наступні елементи:

1 Score Display наочно відображає два параметри: частотну характеристику (рис. 2.6) та діаграму сигнальних сузір'їв (рис. 2.7).

Частотна характеристика (аналізатор спектру, який приймає вхідні сигнали з дискретним часом дискретизації та відображає частотні спектри цих сигналів) [19] показує, як розподілюється енергія спектра в полосі частот.

Передана потужність є важливим вимірюваним параметром. Занадто мала потужність означає, що сигнал не зможе досягти точки призначення. Вимірювання якості модуляції може бути важливим для того, щоб забезпечити нормальну роботу системи і бути впевненим у тому, що інформація передається коректно [20].

Діаграма сузір'я – показує значення комплексної амплітуди радіосигналу, які представлені у вигляді точок на двохмірній точковій діаграмі на комплексній площині. Більш абстрактно, на діаграмі позначен всі значення, які можуть бути обрані даною схемою маніпуляції, як точки на комплексній площині. Сигнальні зв'язки, отримані в результаті виміру комплексної амплітуди радіосигналу, можуть використовуватися для визначення типу маніпуляції, роду перешкод і рівня виявлених сигналів [21].

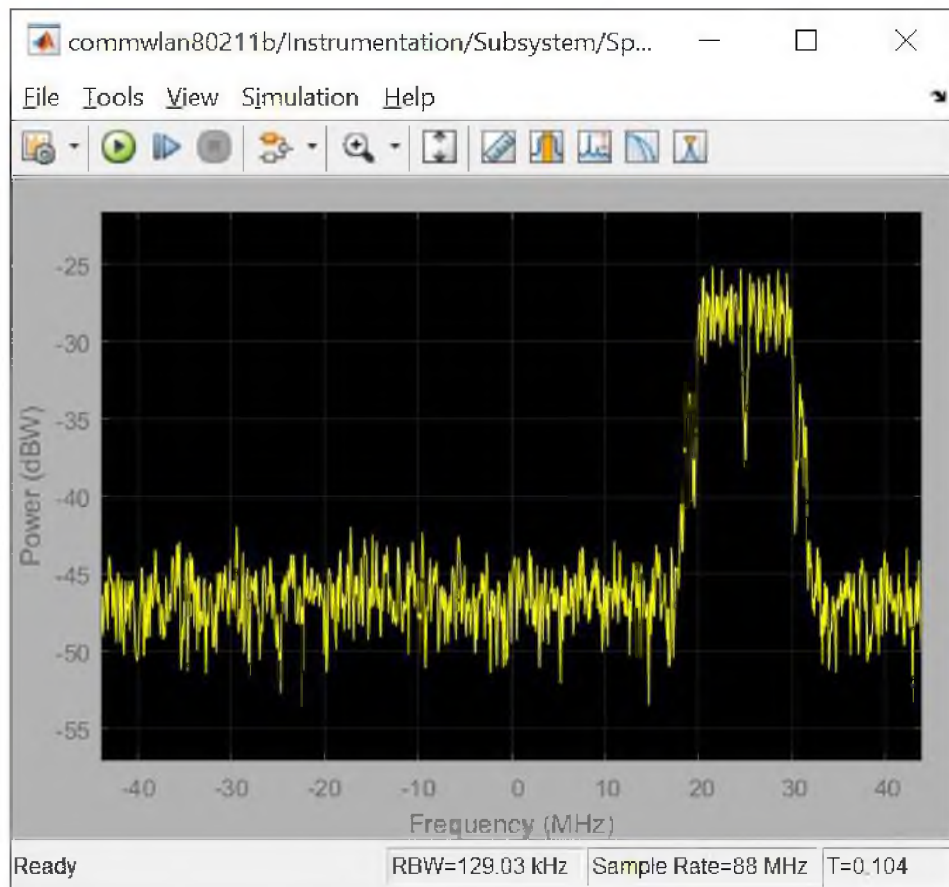


Рисунок 2.6 - Частотна характеристика

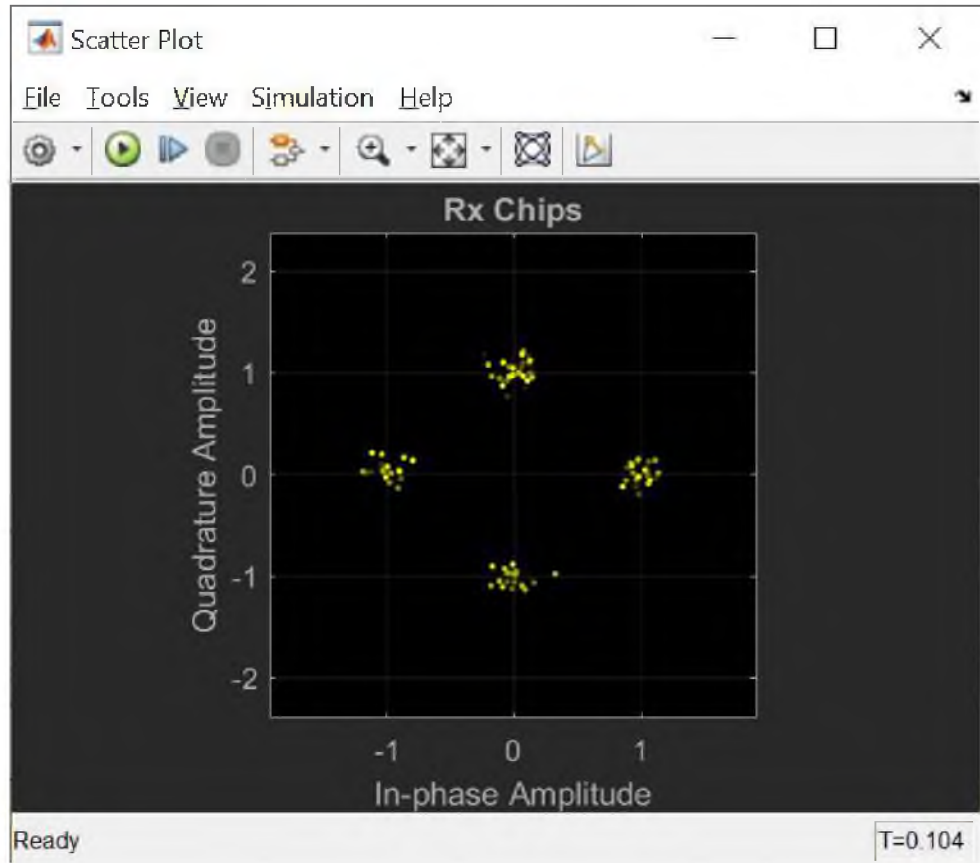


Рис. 2.7 - Діаграма сузір'я

2 Rate Detection

Як видно з рисунку 2.8, даний елемент розраховує такі параметри як Upsample/channel rate (отриманий), Chip rate (переданий), PSDU data rate.

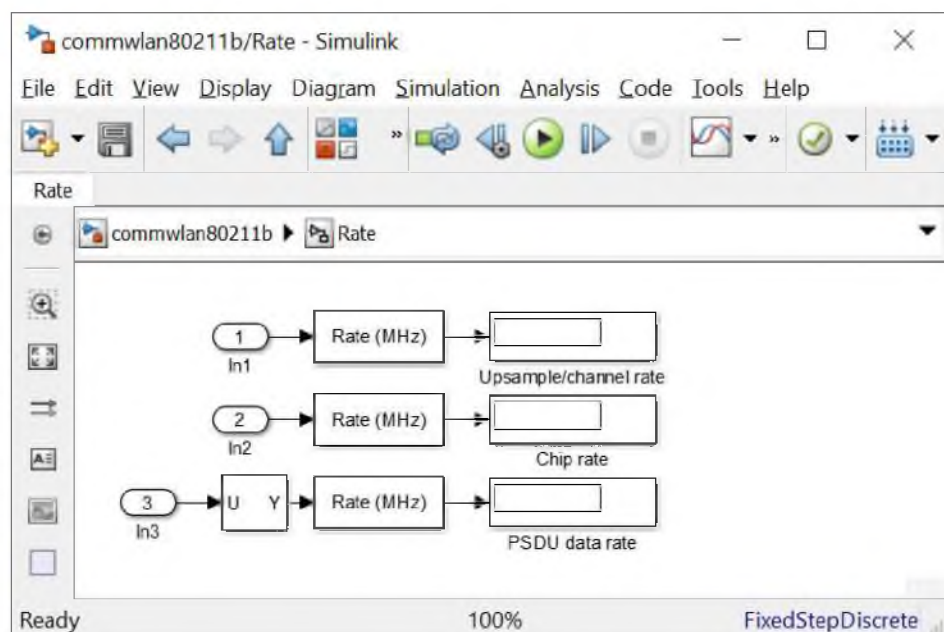


Рисунок 2.8 – Елемент Rate Detection

3 BER Calculation

Компонент розрахунку BER порівнює декодований сигнал та сигнал, згенерований базовою станцією. Якщо BER дорівнює нулю, то сигнал не зазнав будь-яких змін або помилки вдалося виправити.

2.3 Дослідження моделі

Необхідно провести моделювання для двох типів каналу – без шуму та з AWGN та зняти їх частотні характеристики та діаграми сигнальних сузір'їв.

Спочатку виконаємо моделювання без шуму у каналі. Для цього у блоці Model Parameters у вкладці Channel Type виберемо Channel Type: None. Як бачимо, якщо в каналі немає шуму, то ми не можемо встановити значення SNR. Результат моделювання (частотна характеристика та діаграма сузір'їв) для швидкостей 1 Мбіт/с, 2 Мбіт/с, 5,5 Мбіт/с, 11 Мбіт/с представлені нижче:

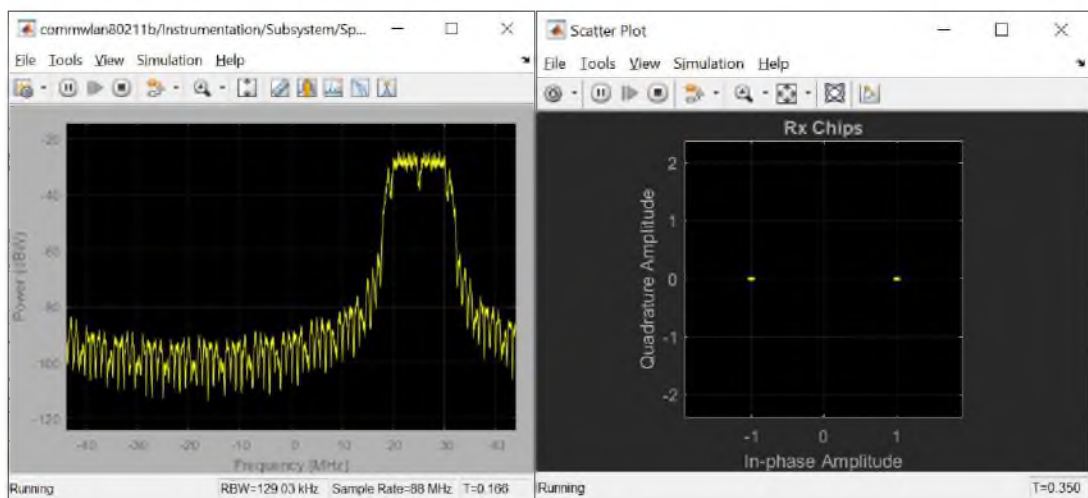


Рисунок 2.9 – Частотна характеристика та діаграма сузір'їв сигналу без шуму в каналі для швидкості передачі 1 Мбіт/с

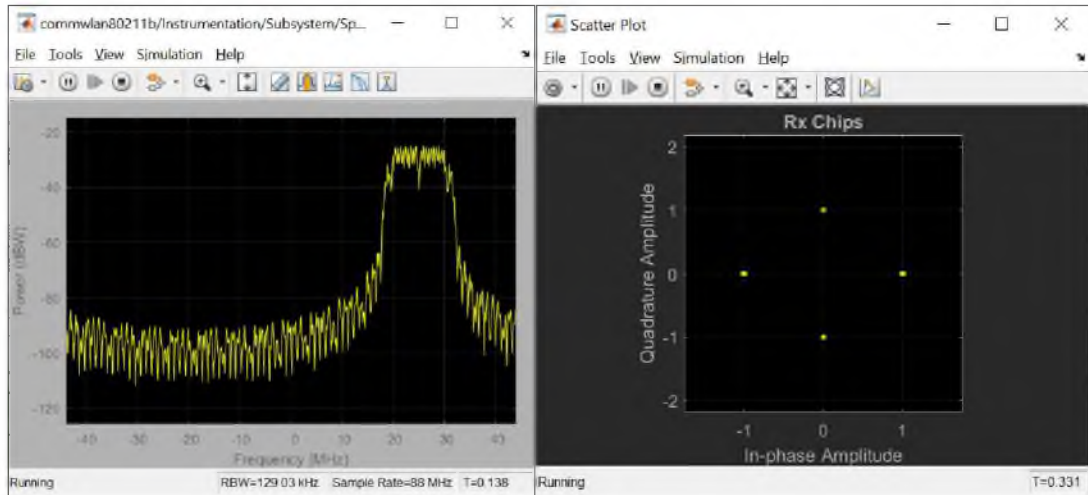


Рисунок 2.10 – Частотна характеристика та діаграма сузір'я сигналу без шуму в каналі для швидкості передачі 2 Мбіт/с

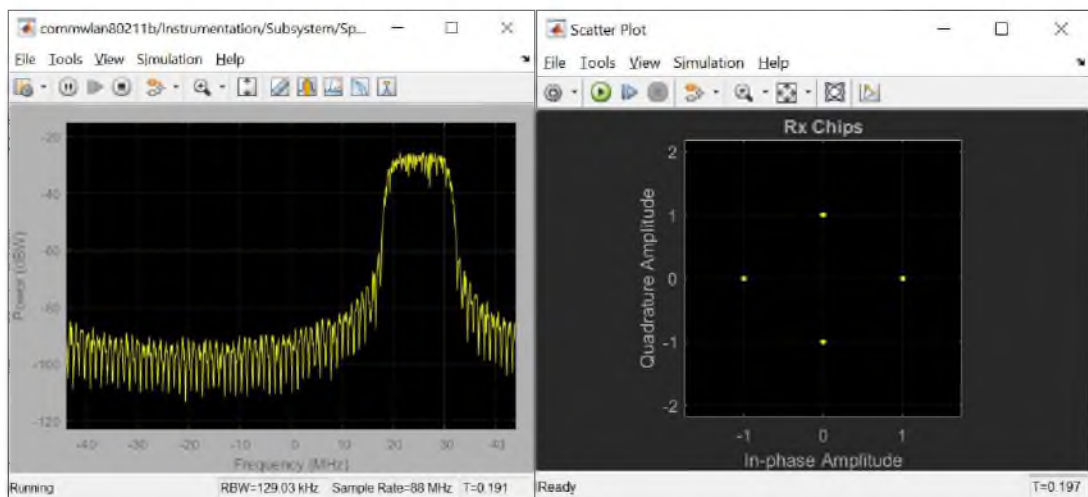


Рисунок 2.11 – Частотна характеристика та діаграма сузір'я сигналу без шуму в каналі для швидкості передачі 5,5 Мбіт/с

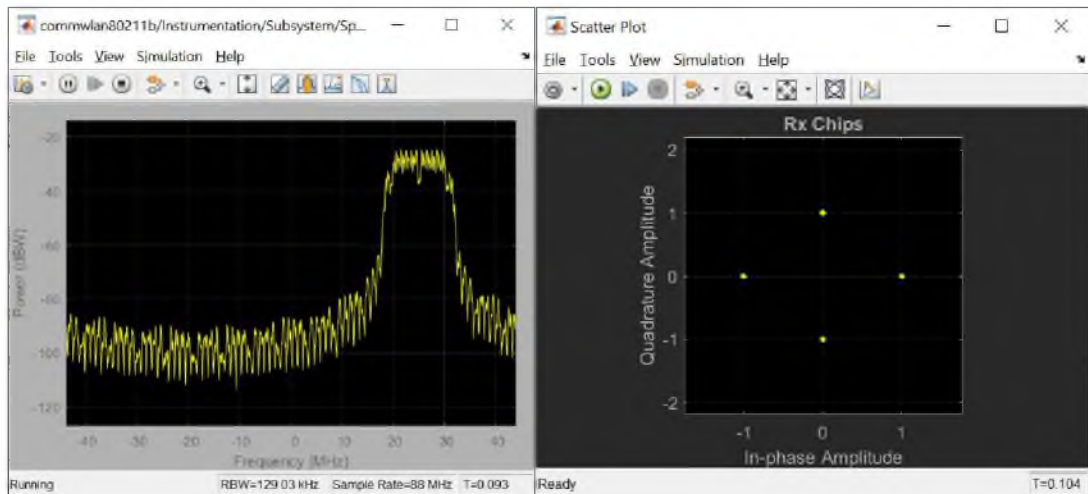


Рисунок 2.12 – Частотна характеристика та діаграма сузір'я сигналу без шуму в каналі для швидкості передачі 11 Мбіт/с

Як видно з частотних спектрів, коли в каналі немає шуму, то на будь-якій швидкості передачі потужність сигналу буде високою в необхідній полосі частот.

Діаграми сузір'я також не відрізняються одна від одної (окрім швидкості 1 Мбіт/с, бо там використовується BPSK модуляція на відміну від QPSK на інших швидкостях), бо якщо немає шумів та інших перешкод, то точки на діаграмі чіткі.

Тепер додамо у канал шум і виконаємо моделювання. Для цього у блоці Model Parameters у вкладці Channel Type виберемо Channel Type: AWGN. Далі для кожної з чотирьох швидкостей змінюємо відношення сигнал/шум в каналі в діапазоні від 0 до 14 дБ та знімаємо залежність BER від Channel EsNo для кожного значення, що задаємо.

Отримані дані представлено у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Залежність BER від SNR у каналі з AWGN

SNR, дБ	BER для 1 Мбіт/с	BER для 2 Мбіт/с	BER для 5,5 Мбіт/с	BER для 11 Мбіт/с
0	1,211e-05	0,007204	0,02821	0,1761
1	2,018e-06	0,002625	0,01526	0,1282
2	0	0,0007553	0,005128	0,0768
3	0	0,0001961	0,001099	0,04554
4	0	2,926e-05	0,000293	0,0254
5	0	3,027e-06	4,742e-05	0,005006
6	0	0	2,018e-06	0,002197
7	0	0	0	0,0008733
8	0	0	0	0,0001822
9	0	0	0	2,825e-05
10	0	0	0	3,027e-06
11	0	0	0	0
12	0	0	0	0
14	0	0	0	0

На основі даних таблиці 2.3 будемо графік залежності BER від SNR у каналі з шумом (AWGN):

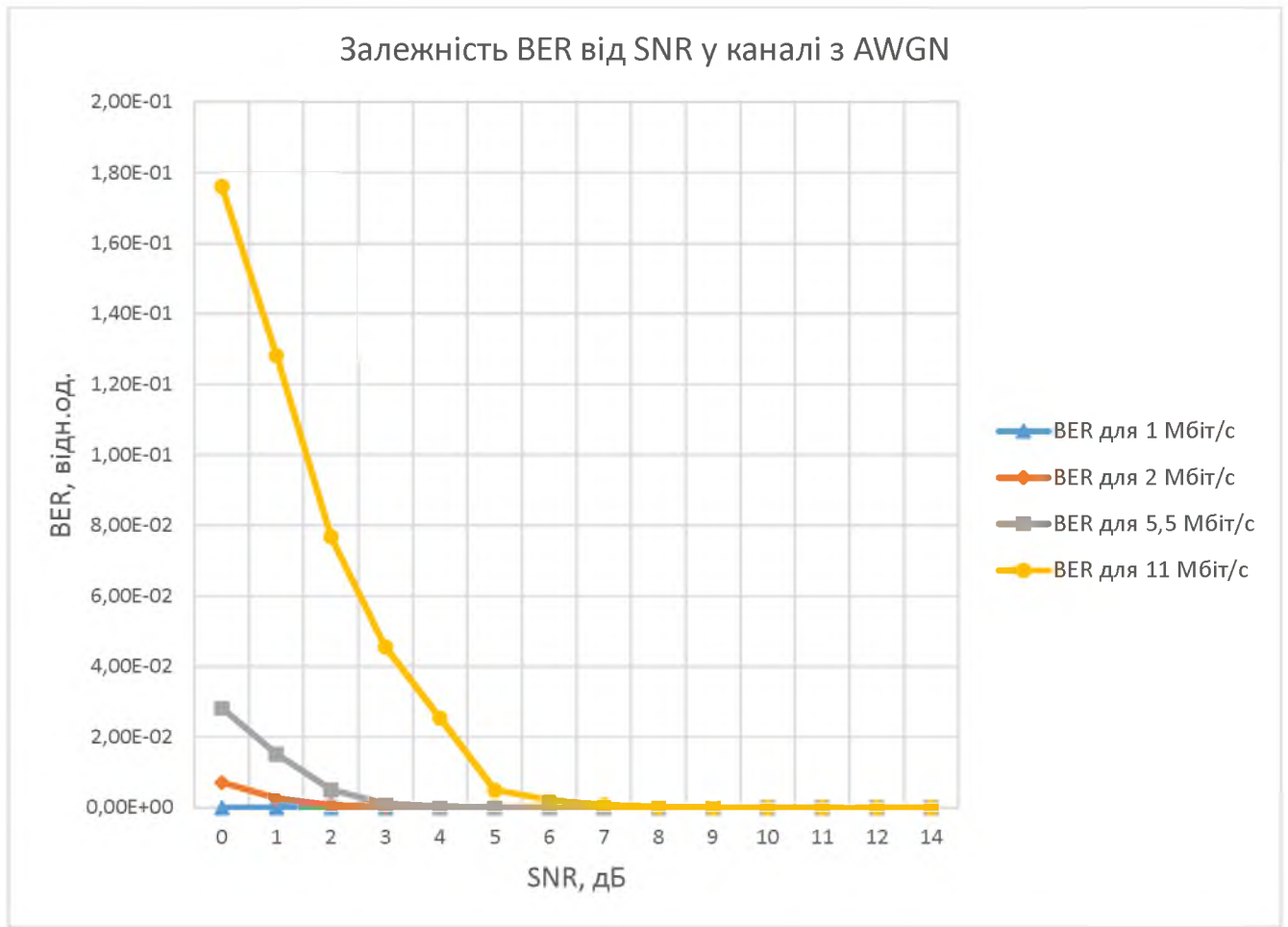


Рисунок 2.13 – Графік залежності BER від SNR у каналі з AWGN для швидкостей передачі 1, 2, 5,5 та 11 Мбіт/с

З рисунку 2.13 видно, що чим нижча швидкість передачі, тим краща якість передачі сигналу навіть на невеликих значеннях відношення сигнал/шум. Тож для високої швидкості передачі треба забезпечувати високу потужність сигналу і знижувати вірогідність появи шуму у каналі. Найбільш надійною для якісної передачі є швидкість 1 Мбіт/с.

Швидкість 11 Мбіт/с показує помітно гіршу здатність передавати сигнал без помилок при наявності аддитивних шумів у каналі передачі. Тож динамічний зсув швидкості в сторону зниження є гарним рішенням в умовах низького відношення сигнал/шум, особливо для цієї швидкості.

Також для кожної з чотирьох швидкостей робимо скріншоти частотної характеристики та діаграми сузір'я при чотирьох рівнях SNR, які зазначено нижче:

- 0 дБ;
- значення, при якому BER суттєво зменшується (індивідуально для кожної швидкості передачі);
- значення, при якому BER падає до 0 (індивідуально для кожної швидкості передачі);
- 14 дБ.

Для швидкості передачі 1 Мбіт/с маємо наступні результати:

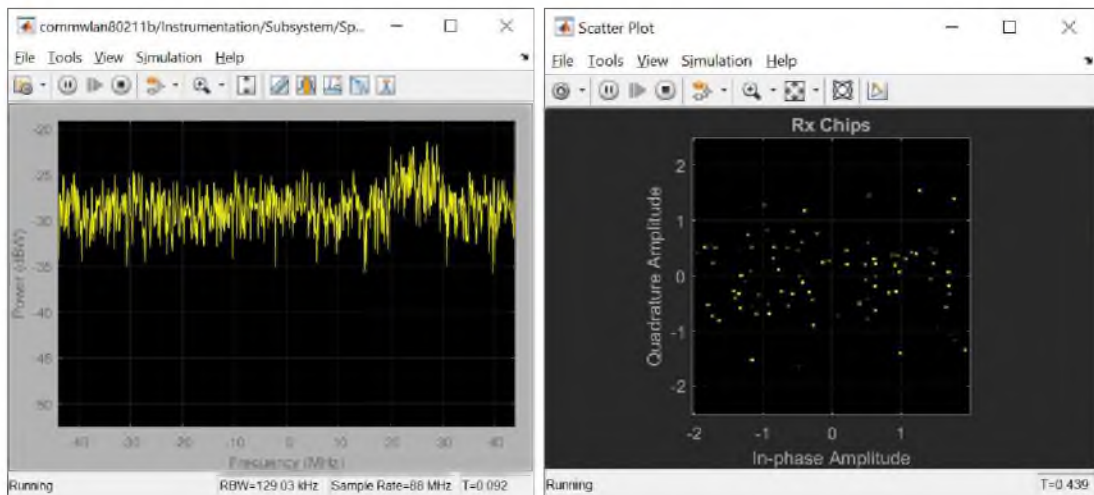


Рисунок 2.14 – Частотна характеристика та діаграма сузір'я сигналу при SNR 0 дБ для швидкості передачі 1 Мбіт/с

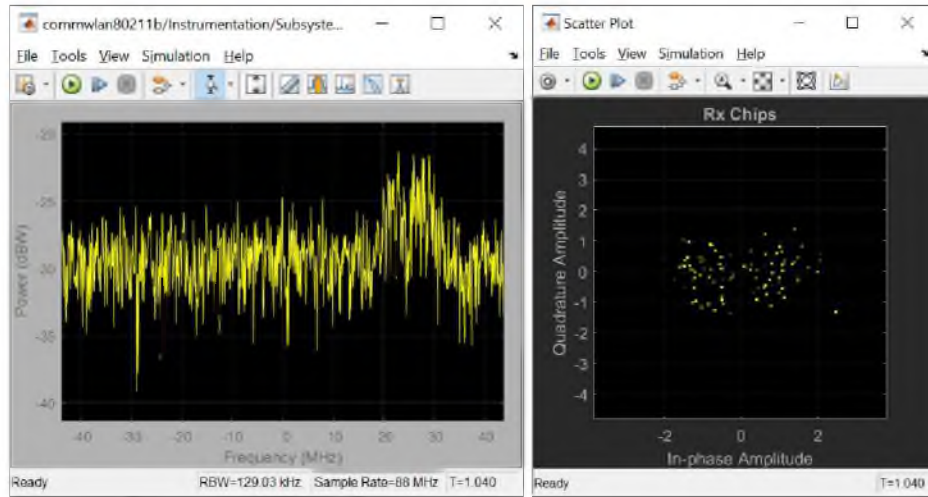


Рисунок 2.15 – Частотна характеристика та діаграма сузір'я сигналу при SNR 1 дБ для швидкості передачі 1 Мбіт/с

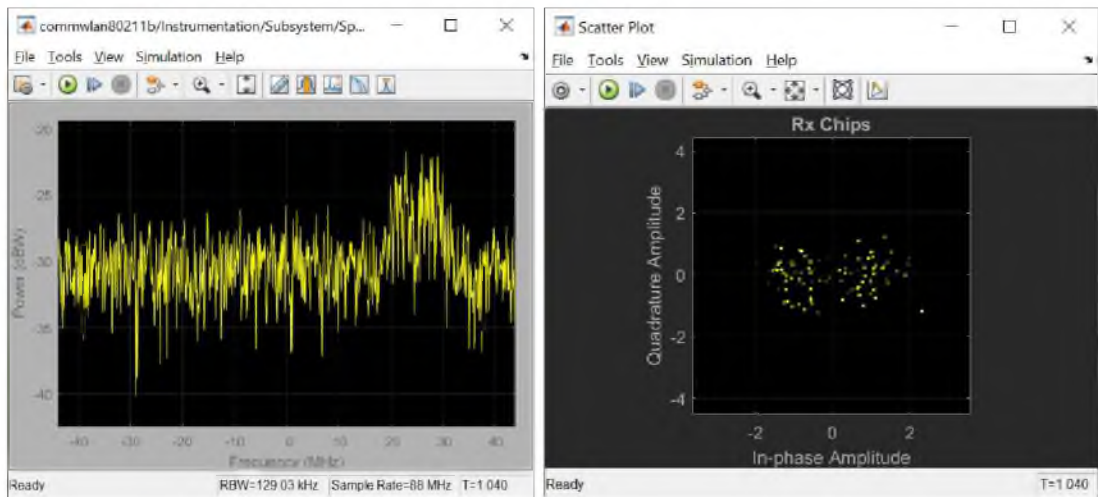


Рисунок 2.16 – Частотна характеристика та діаграма сузір'я сигналу при SNR 2 дБ для швидкості передачі 1 Мбіт/с

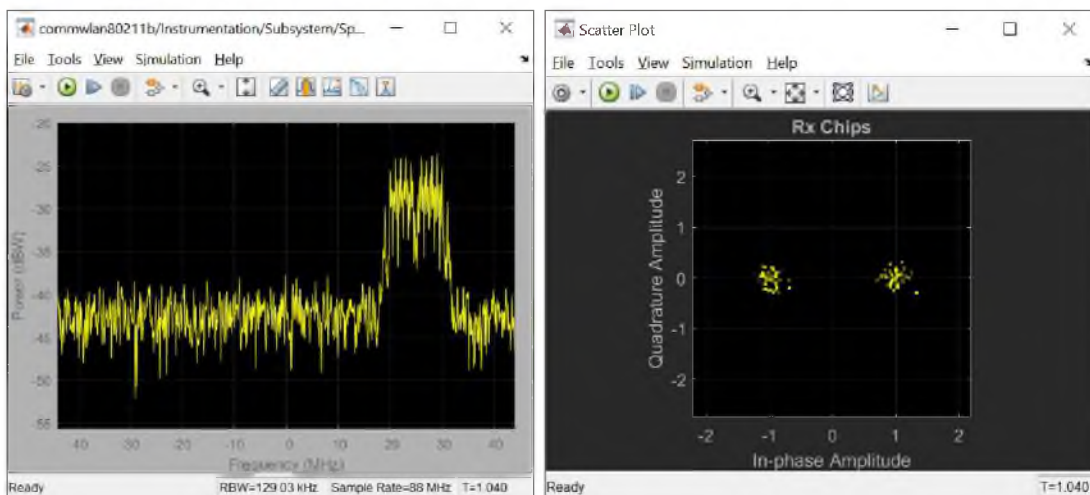


Рисунок 2.17 – Частотна характеристика та діаграма сузір'я сигналу при SNR 14 дБ для швидкості передачі 1 Мбіт/с

Для швидкості передачі 2 Мбіт/с маємо наступні результати:

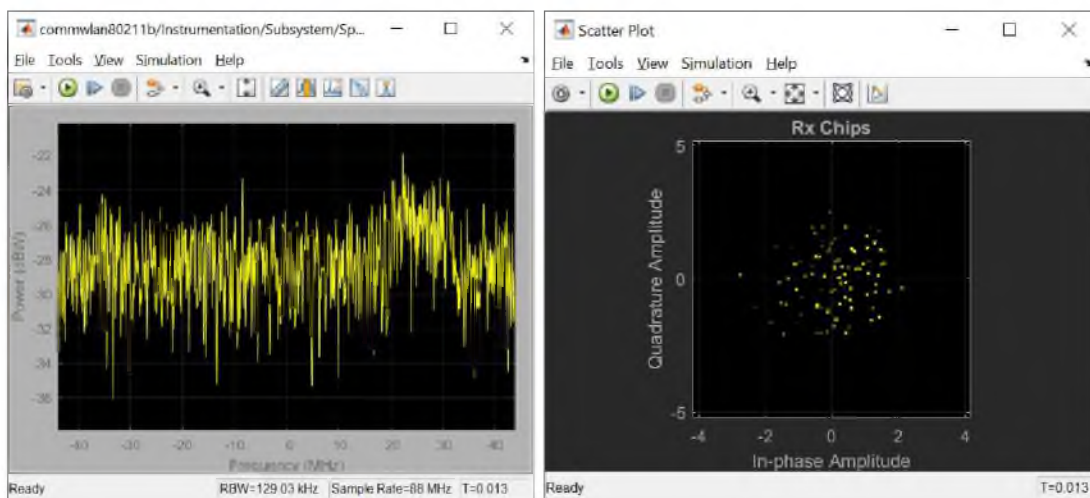


Рисунок 2.18 – Частотна характеристика та діаграма сузір'я сигналу при SNR 0 дБ для швидкості передачі 2 Мбіт/с

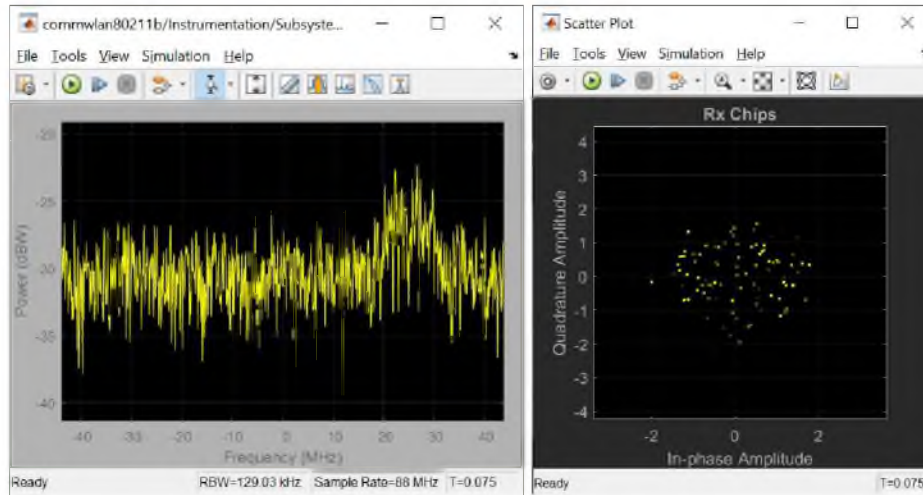


Рисунок 2.19 – Частотна характеристика та діаграма сузір'я сигналу при SNR 2 дБ для швидкості передачі 2 Мбіт/с

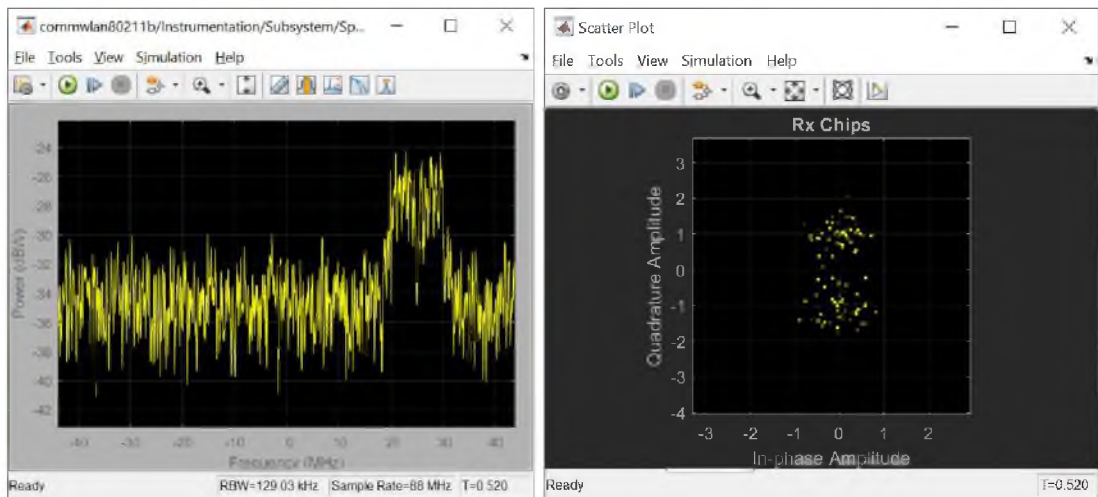


Рисунок 2.20 – Частотна характеристика та діаграма сузір'я сигналу при SNR 6 дБ для швидкості передачі 2 Мбіт/с

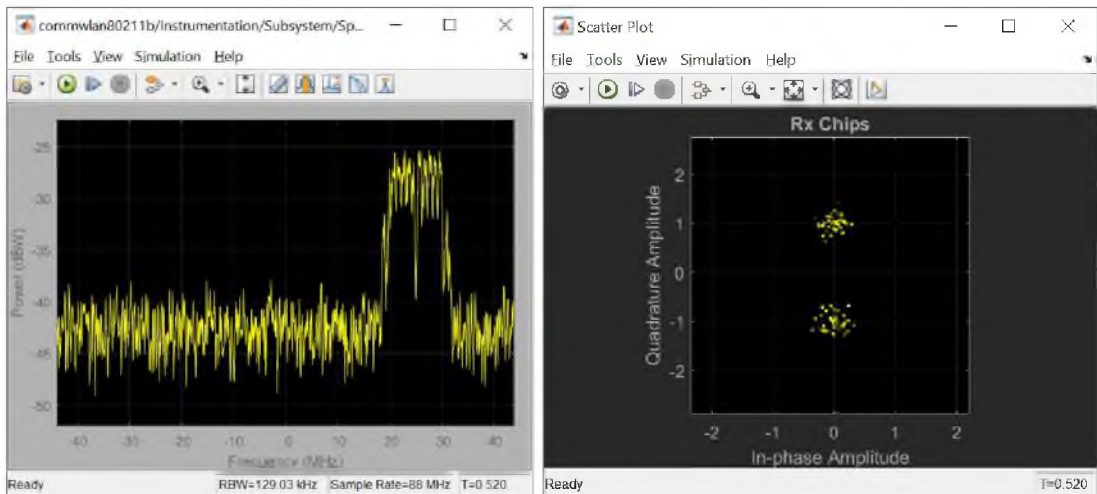


Рисунок 2.21 – Частотна характеристика та діаграма сузір'я сигналу при SNR 14 дБ для швидкості передачі 2 Мбіт/с

Для швидкості передачі 5,5 Мбіт/с маємо наступні результати:

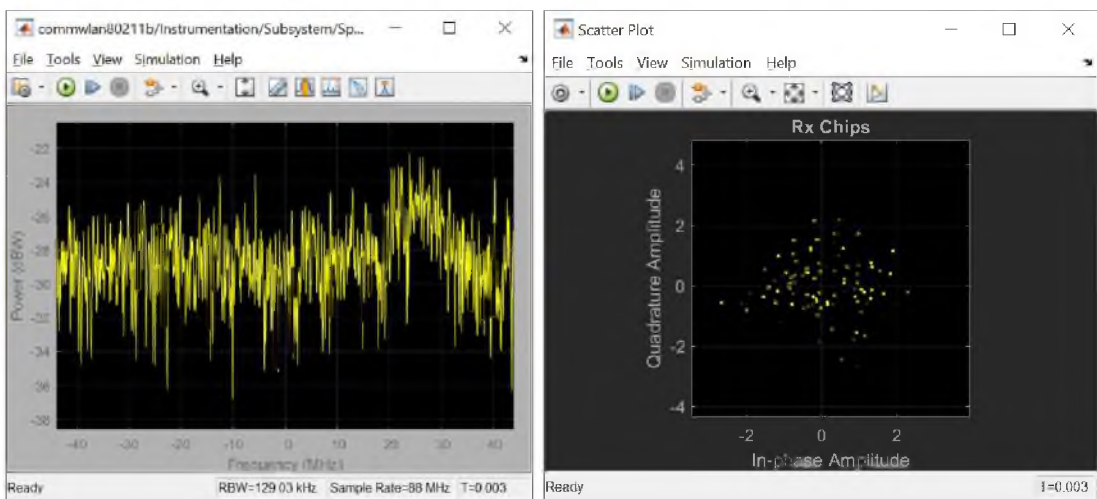


Рисунок 2.22 – Частотна характеристика та діаграма сузір'я сигналу при SNR 0 дБ для швидкості передачі 5,5 Мбіт/с

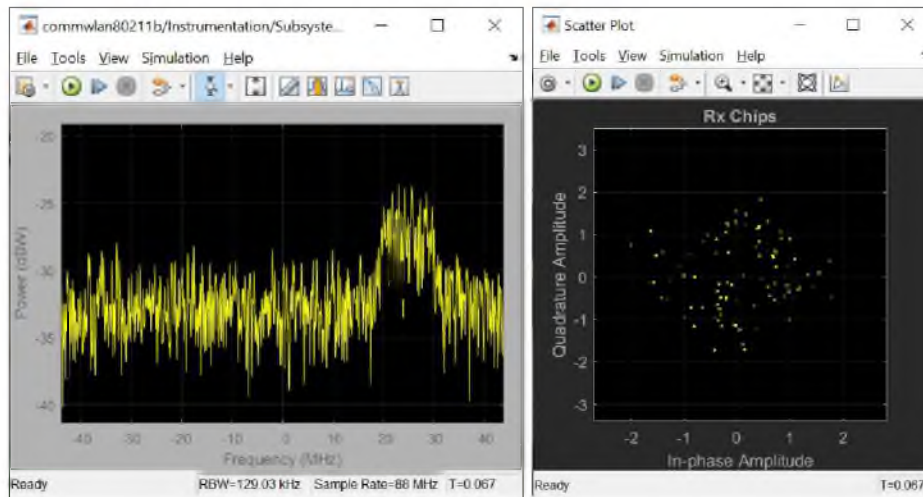


Рисунок 2.23 – Частотна характеристика та діаграма сузір'я сигналу при SNR 4 дБ для швидкості передачі 5,5 Мбіт/с

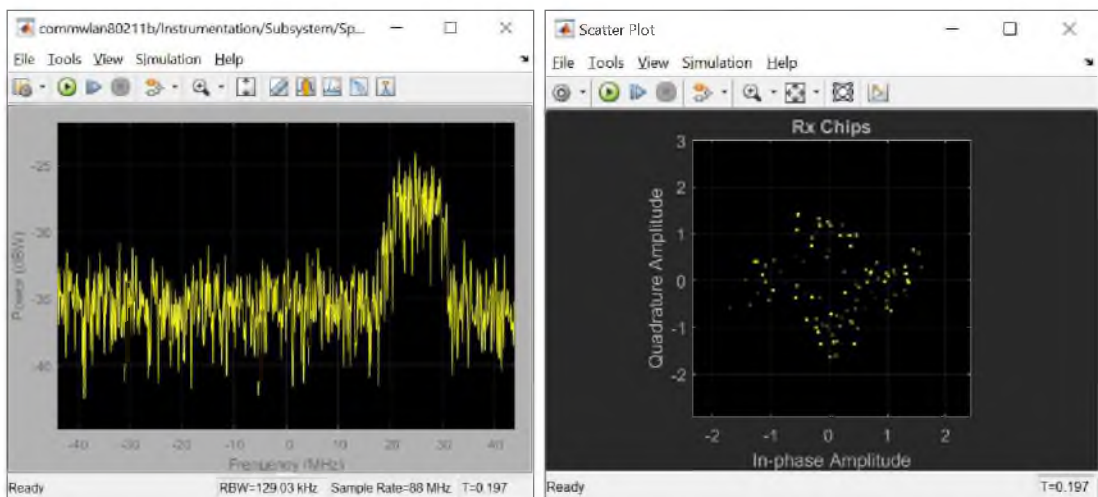


Рисунок 2.24 – Частотна характеристика та діаграма сузір'я сигналу при SNR 7 дБ для швидкості передачі 5,5 Мбіт/с

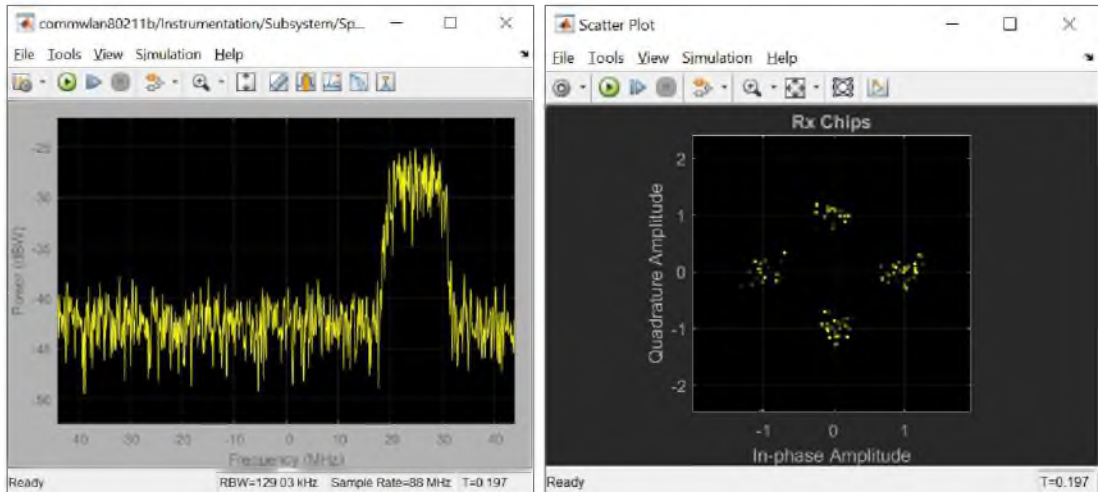


Рисунок 2.25 – Частотна характеристика та діаграма сузір'я сигналу при SNR 14 дБ для швидкості передачі 5,5 Мбіт/с

Для швидкості передачі 11 Мбіт/с маємо наступні результати:

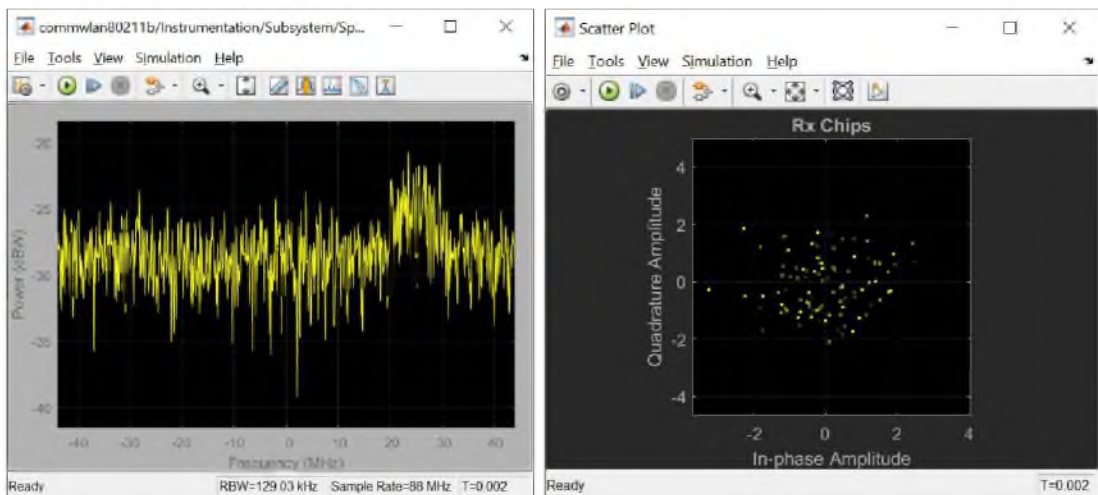


Рисунок 2.26 – Частотна характеристика та діаграма сузір'я сигналу при SNR 0 дБ для швидкості передачі 11 Мбіт/с

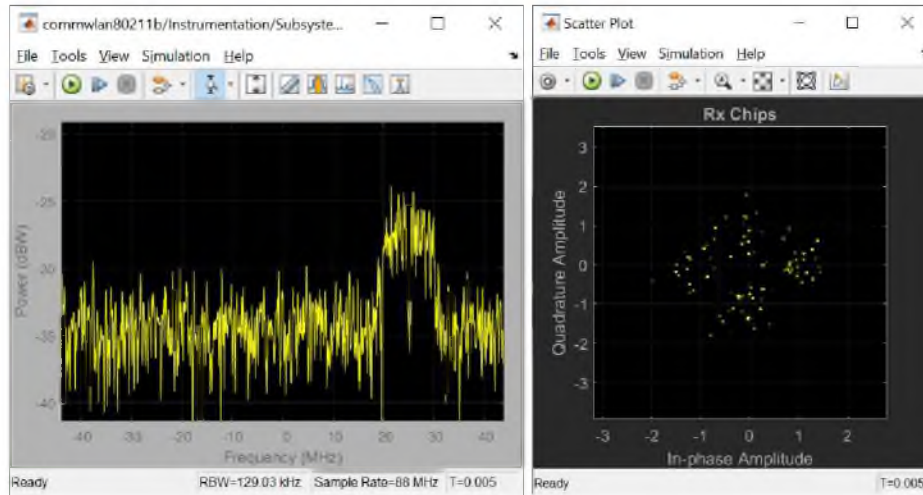


Рисунок 2.27 – Частотна характеристика та діаграма сузір'я сигналу при SNR 6 дБ для швидкості передачі 11 Мбіт/с

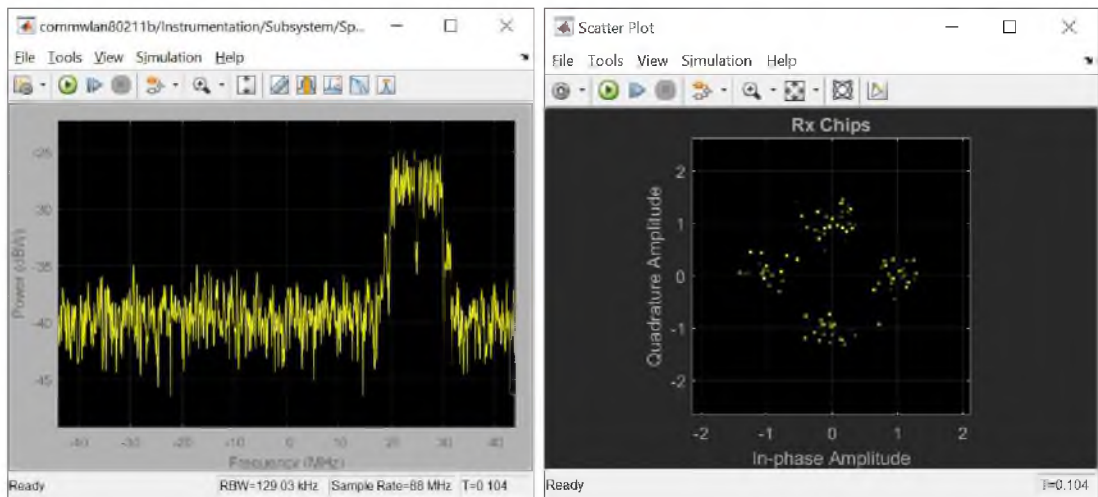


Рисунок 2.28 – Частотна характеристика та діаграма сузір'я сигналу при SNR 11 дБ для швидкості передачі 11 Мбіт/с

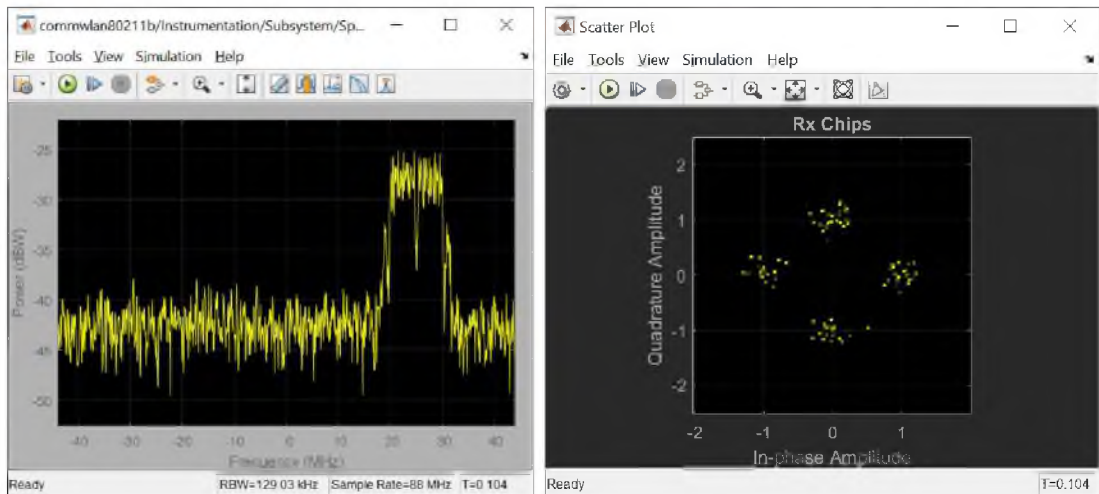


Рисунок 2.29 – Частотна характеристика та діаграма сузір'я сигналу при SNR 14 дБ для швидкості передачі 11 Мбіт/с

2.4 Аналіз результатів

Проаналізувавши отримані частотні спектри, видно, що при відношенні сигнал/шум 0 дБ сигнал веде себе однаково на всіх чотирьох швидкостях, його потужність не піднімається достатньо високо над шумом, щоб передати корисний сигнал без помилок (рисунки 14, 18, 22, 26).

На рівні відношення сигнал/шум, де BER помітно падає, починає виділятися зростаюча потужність сигналу (рисунки 15, 19, 23, 27).

На рівні SNR, де сигнал починає передаватися без помилок (рисунки 16, 20, 24, 28) і на 14 дБ (рисунки 17, 21, 25, 29), бачимо досить схожі спектри – на них потужності сигналу на певній полосі частот достатньо, щоб подолати шум та передатися без спотворень.

На всіх без виключень отриманих діаграмах сузір'я чітко видно вплив аддитивного білого гаусівського шуму (він представляється на діаграмі як розмиті точки сигнального сузір'я).

На рівні відношення сигнал/шум 0 дБ точки настільки розмиті, що неможливо навіть визначити їх кількість, вплив шуму дуже сильний (рисунки 14, 18, 22, 26).

На рівні SNR, де BER помітно падає, точки стають менш розмитими (рисунки 15, 19, 23, 27).

На рівні SNR, де сигнал починає передаватися без помилок (рисунки 16, 20, 24, 28) і на 14 дБ (рисунки 17, 21, 25, 29), точки стають чіткішими, але різниця між діаграмами добре помітна – особливо на швидкостях 1 і 2 Мбіт/с.

Навіть коли $SNR = 14$ дБ на діаграмах сузір'я все ще помітний вплив шуму, точки не стають повністю чіткими.

В динаміці (на зображеннях від 0 до 14 дБ) можна прослідкувати, що з кожним підвищенням SNR потужність сигналу стає помітно вищою, а точки сузір'я все менш розмиті. Це повністю відповідає динаміці числових даних у таблиці 2.3.

З вищеописаних спостережень можна зробити висновки, що:

- великим швидкостям відповідає велика ймовірність появи помилки;
- для зменшення ймовірності появи помилки необхідно збільшувати відношення сигнал/шум;
- великим швидкостям необхідне більш високе значення відношення сигнал/шум для усунення можливих помилок.

2.5 Висновки

У другому розділі було проведено дослідження імітаційної моделі системи IEEE 802.11b у графічному середовищі Simulink MATLAB. Отримано графік залежностей ймовірності помилки (BER) від відношення сигнал/шум для різних швидкостей. Досліджено вплив різних рівнів відношення сигнал/шум на частотну характеристику сигналу та діаграму сигнальних сузір'я, виявлено та описано залежності.

3 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

В цьому проєкті розроблено імітаційну модель системи мобільного зв'язку стандарту IEEE 802.11. У економічному розділі розраховуються одноразові капітальні витрати на розробку моделі розробленої системи.

3.1 Розрахунок капітальних витрат на розробку імітаційної моделі системи мобільного зв'язку стандарту IEEE 802.11

3.1.1 Визначення трудомісткості розробки моделі

Трудомісткість створення моделі визначається тривалістю кожної робочої операції, починаючи зі складання технічного завдання й закінчуючи оформленням документації (за умови роботи одного проєктувальника):

$$t = tmz + te + ta + tnp + tonp + t\partial \text{ [год]}. \quad (3.1)$$

де:

tmz – тривалість складання технічного завдання на впровадження методу;

te – тривалість вивчення технічного завдання (ТЗ) та літературних джерел за темою;

ta – тривалість розробки моделі;

tnp – тривалість модулювання віртуального аналога каналу зв'язку;

$tonp$ – тривалість опрацювання здобутих характеристик;

$t\partial$ – тривалість підготовки технічної документації.

Вихідні дані для визначення трудомісткості створення моделі приведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Тривалість розробки моделі

$t_{mз}$, год	$t_{в}$, год	$t_{а}$, год	t_{np} , год	t_{onp} , год	t_{∂} , год
40	50	65	21	18	32

Розрахуємо трудомісткість розробки моделі за формулою (3.1):

$$t = 40 + 50 + 65 + 21 + 18 + 32 = 226 \text{ [год]}.$$

3.1.2 Розрахунок витрат на розробку моделі

Витрати на розробку моделі $K_{ПЗ}$ складаються з витрат на заробітну платню розробника $З_{ЗП}$ і вартості витрат машинного часу, що необхідний для опрацювання моделі мережі на ПК $З_{МЧ}$:

$$K_{ПЗ} = З_{ЗП} + З_{МЧ} \text{ [грн]} \quad (3.2)$$

Заробітна плата виконавця враховує основну і додаткову заробітну плату, а також відрахування на соціальні потреби (пенсійне страхування, страхування на випадок безробіття, соціальне страхування тощо) і визначається за формулою:

$$З_{ЗП} = t \cdot З_{ПР} \text{ [грн]}. \quad (3.3)$$

де: t – трудомісткість створення моделі;

$З_{ПР}$ дорівнює 90 грн/год.

Розрахуємо заробітну платню проєктувальника за формулою (3.3):

$$З_{ЗП} = 226 \cdot 90 = 20340,00 \text{ [грн]}.$$

Вартість машинного часу на ПК визначається за формулою:

$$Змч = (t_a + t_{np} + t_{onp} + t_{\partial}) \cdot C_{мч} \text{ [грн]}. \quad (3.4)$$

де: $C_{мч}$ – вартість 1 години машинного часу ПК, грн/година.

Вартість 1 години машинного часу ПК визначається за формулою:

$$C_{мч} = P_e \cdot t \cdot C_e + \frac{\Phi_{перв} \cdot H_a}{F_p} + \frac{K_{лнз} \cdot H_{анз}}{F_p} \text{ [грн/год]}, \quad (3.5)$$

де: P_e – встановлена потужність ПК;

t – трудомісткість створення моделі;

C_e – енерговитрати;

$\Phi_{перв}$ – первісна вартість ПК на початок року;

H_a – річна норма амортизації на ПК;

$K_{лнз}$ – вартість ліцензійного програмного забезпечення;

$H_{анз}$ – річна норма амортизації на ліцензійне програмне забезпечення;

F_p – річний фонд робочого часу (за 40-годинного робочого тижня).

Енерговитрати розраховуються за формулою:

$$C_e = P_e \cdot C_{кВт} \text{ [грн/год]}, \quad (3.6)$$

де: $C_{кВт}$ – тариф на електричну енергію.

Тариф за електроенергію станом на 2022 рік дорівнює 1,44 грн/кВт·год [22].

Розрахунок витрат на розробку моделі зводимо в таблицю 3.2:

Таблиця 3.2 – Розрахунок витрат на розробку моделі

P_e , кВт	$C_{кВт}$ кВт·год	$\Phi_{перв}$, грн	H_a , частка одиниці	$K_{лнз}$, грн	$H_{анз}$, частка одиниці	F_p , год
1,5	1,44	30000,00	0,4	9055,00	0,4	1920,00

Тоді за формулою (3.6) отримаємо розмір енерговитрат:

$$C_e = 1,5 \cdot 1,44 = 2,16 \text{ [грн/год]}.$$

Річна норма амортизації, якщо використовується метод прискорення зменшеної вартості, визначається за формулою:

$$H_a = 2/T \cdot 100\% \quad (3.7)$$

де T – строк корисного використання ПК, дорівнює 5 років.

Розрахуємо річну норму амортизації за формулою (3.7):

$$H_a = 2/5 \cdot 100\% = 40\% = 0,40 \text{ [частки одиниці]}$$

Строк корисного використання ліцензійного програмування дорівнює 5 років.

Річна норма амортизації на ліцензійне програмне забезпечення визначається за формулою (3.7):

$$H_{анз} = 2/5 \cdot 100\% = 40\% = 0,40 \text{ [частки одиниці]}.$$

Ліцензійне програмне забезпечення, яке використовується в даному випадку Microsoft Windows 10 Enterprise LTSC 2019. Його вартість 9055 грн.

Вартість 1 години машинного часу ПК визначаються за формулою (3.5):

$$C_{мч} = 1,5 \cdot 226 \cdot 1,44 + \frac{30000 \cdot 0,40}{1920} + \frac{9055 \cdot 0,40}{1920} = 496,30 \text{ [грн/год]}$$

Розрахуємо вартість машинного часу за формулою (3.4):

$$Z_{мч} = (65 + 21 + 18 + 32) \cdot 496,30 = 67496,80 \text{ [грн]}$$

Щоб отримати величину витрат на розробку моделі необхідно підставити отримані результати у формулу (3.2):

$$K_{пз} = 20340 + 67496,80 = 87836,80 \text{ [грн]}$$

3.1.3 Розрахунок капітальних витрат

Загальні капітальні витрати на розробку визначаються за формулою:

$$KЗ = K_{пз} + K_{навч} + K_n \text{ [грн]}, \quad (3.8)$$

де $K_{навч}$ - витрати на навчання технічних фахівців і обслуговуючого персоналу;

K_n - витрати на встановлення обладнання та налагодження системи.

Дані про витрати на розробку моделі зводимо в таблицю 3.3.

Таблиця 3.3 – Витрати на розробку моделі

Кпз, грн	Кнавч, грн	Кн, грн
87836,80	6000,00	1600,00

Отже, капітальні витрати становлять:

$$KЗ = 87836,80 + 6000 + 1600 = 95436,80 \text{ [грн]}$$

3.2 Висновки

В економічному розділі було розраховано, що трудомісткість розробки імітаційної моделі становитиме 226 год; заробітна платня проєктувальника – 20340,00 грн; витрати на розробку моделі – 87836,80 грн. І з цього отримано, що капітальні витрати на розробку імітаційної моделі системи мобільного зв'язку стандарту IEEE 802.11 становитимуть 95436,80 грн.

ВИСНОВКИ

1 Здійснено огляд історії розвитку бездротової технології IEEE 802.11 (Wi-Fi), її особливостей та переваг, принципів архітектури. Наведено опис протоколів Wi-Fi, виконано їх порівняння, що дозволило сформулювати задачі на розробку та дослідження імітаційної моделі.

2 Виконано аналітичний огляд технології мобільного зв'язку стандарту IEEE 802.11b, що дало необхідну інформацію для подальшої розробки імітаційної моделі.

3 Розроблено імітаційну модель системи стандарту IEEE 802.11b у середовищі динамічного моделювання Simulink MATLAB для подальшого її дослідження.

4 Здійснено аналіз залежності ймовірності помилки при передачі сигналу від відношення сигнал/шум у каналі для всіх швидкостей передачі, що забезпечуються стандартом. Це показало, що більшій швидкості передачі відповідає більша ймовірність появи помилки. Найкраща передача при швидкості 1 Мбіт/с, найгірша – при 11 Мбіт/с. Звідси зроблено висновок, що динамічний зсув швидкості в сторону зниження є гарним рішенням в умовах низького відношення сигнал/шум.

5 Розраховано трудомісткість розробки імітаційної моделі, заробітна платня проектувальника, витрати на розробку моделі і на основі цих розрахунків зроблено висновки про розмір капітальних витрат на створення імітаційної моделі системи мобільного зв'язку за стандартом 802.11, що становитиме 95436,80 грн.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- 1 Кольцов А.С. Федорков О.Д. Перспективні інформаційні технології та середовища. Частина 2 (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <https://nashaucheba.ru/v23299/?cc=1>. – Загол.з екрана.
- 2 Столлингс В. Беспроводные линии связи и сети. Москва : Молодая гвардия, 2003. 640 с.
- 3 History | Wi-Fi Alliance. Wi-Fi Alliance (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <https://www.wi-fi.org/who-we-are/history> – Загол.з екрана.
- 4 Макаренко А.Ю. Бездротові технології передачі даних Wi-Fi, Bluetooth та ZigBee. / А.Ю. Макаренко, А.О. Парфенова, С.Б. Могильний // Вісник НТУУ "КПІ". Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2010. – No 41. – с. 171-181
- 5 IEEE 802.11 WIRELESS LOCAL AREA NETWORKS (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <https://www.ieee802.org/11/> – Загол.з екрана.
- 6 Kastrenakes J. Wi-Fi now has version numbers, and Wi-Fi 6 comes out next year. The Verge (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <https://www.theverge.com/2018/10/3/17926212/wifi-6-version-numbers-announced> – Загол.з екрана.
- 7 What is DSSS: Direct Sequence Spread Spectrum » Electronics Notes. Electronics Notes: reference site for electronics, radio & wireless (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <https://www.electronics-notes.com/articles/radio/dsss/what-is-direct-sequence-spread-spectrum.php> – Загол.з екрана.
- 8 Рошан П. Лиэри Дж. Основы построения беспроводных локальных сетей стандарта 802.11. Руководство Cisco. М.: «Вильямс», 2004. 304 с.
- 9 Шахнович И. Беспроводные локальные сети. Анатомия стандартов IEEE 802.11 (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <https://www.electronics.ru/journal/article/1166> – Загол.з екрана.
- 10 "High Rate" Wireless Local Area Networks (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <http://www.fedu.ucc.ac.jp/~thavisak/Tech-Link/IEEE802.11b/IEEE80211b.htm> – Загол.з екрана.

- 11 Вишнеvский В. М., Ляхов А. И., Портной С. Л., Шахнович И. Л., Широкополосные беспроводные сети передачи информации. М.: Техносфера, 2005, 592 с.
- 12 CCK and Barker Coding Implementation in IEEE 802.11b Standard. IEEE Xplore (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4234233> – Загол.з екрана.
- 13 IEEE 802.11b Wireless LANs Wireless Freedom at Ethernet Speeds (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: http://www.3com.com/technology/tech_net/white_papers/503072.html – Загол.з екрана.
- 14 Borisov N. Goldberg I. Wagner D. Intercepting mobile communications: The insecurity of 802.11. MOBICOM, 2001
- 15 802.11n: Next-Generation Wireless LAN Technology (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: http://www.broadcom.com/docs/WLAN/802_11n-WP100-R.pdf – Загол.з екрана.
- 16 Member Companies | Wi-Fi Alliance. Wi-Fi Alliance (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <https://www.wi-fi.org/membership/member-companies> – Загол.з екрана.
- 17 Лекції Уривського Л.О. з дисципліни "Імітаційне моделювання", НТУУ "КПІ ім.І.Сікорського", 2017 рік
- 18 Specification parameters of WLAN performance with MatLab Simulink model of IEEE 802.11 (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/745/1/012056/pdf> – Загол.з екрана.
- 19 Display frequency spectrum - Simulink. MathWorks - Makers of MATLAB and Simulink - MATLAB & Simulink (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <https://www.mathworks.com/help/simscape/ref/spectrumanalyzer.html> – Загол.з екрана.

20 Основы анализа спектра. Что такое спектр? Для чего измерять спектр? Вимірювальне обладнання Юнітест. (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <https://www.unitest.com/theory/spectrum-1.html> – Загол.з екрана.

21 Прокис, Дж. Цифровая связь / Кловский Д. Д.. М.: Радио и связь, 2000. 800 с.

22 Yasno (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <https://yasno.com.ua/b2c-tariffs> – Загол.з екрана.

23 IEEE Std. 802.11-2007, IEEE Standard for Information technology - Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks -Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, IEEE-SA Standards Board, 2007.

ДОДАТОК А. Відомість матеріалів кваліфікаційної роботи

№	Формат	Найменування	Кількість листоків	Примітки
<i>Документація</i>				
1	A4	Реферат	2	
2	A4	Список умовних скорочень	3	
3	A4	Зміст	1	
4	A4	Вступ	2	
5	A4	Стан питання. Постановка задачі.	33	
6	A4	Спеціальна частина	25	
7	A4	Економічний розділ	6	
8	A4	Висновки	1	
9	A4	Перелік посилань	3	
10	A4	Додаток А	1	
11	A4	Додаток Б	1	
12	A4	Додаток В	1	
13	A4	Додаток Г	2	

ДОДАТОК Б. Перелік документів на оптичному носії

1 Електронна версія пояснювальної записки (Пояснювальна Записка Альтшулер.doc та Пояснювальна Записка Альтшулер.pdf)

2 Електронна версія демонстраційного матеріалу (Презентація Альтшулер.pdf)

ДОДАТОК В. Відгук керівника економічного розділу

ВІДГУК

Керівник розділу

(підпис)

Романюк Н.М.

ДОДАТОК Г. Відгук керівника дипломної роботи

ВІДГУК
на магістерську дипломну роботу

Студента(ки) _____ гр.

(прізвище, ім'я)

на тему: _____
_____Актуальність теми _____
_____Повнота розкриття теми _____
_____Теоретичний рівень _____
_____Практична значущість _____
_____Самостійність виконання роботи _____
_____Якість оформлення, загальна та спеціальна грамотність _____
_____Переваги та недоліки роботи _____

Загальна оцінка роботи та висновок щодо рекомендації до захисту в ДЕК

Науковий керівник

к.ф.-м.н., професор

(посада)

(підпис)

Гусєв О.Ю.

(ініціали, прізвище)

« ____ » _____ 2022 р.