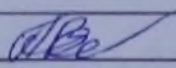
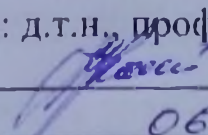


Бакалаврська кваліфікаційна робота на тему:
ВИКОРИСТАННЯ ЧИРП МОДУЛЯЦІЇ У WI-FI МОДУЛЯХ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ
РАДІУСУ ЗВ'ЯЗКУ

Виконав: студент 4-го курсу, групи ПЗТ-216
спеціальності 172 – Телекомунікації та _____
радіотехніка _____

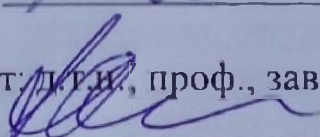
 Підлісний П. В.

Керівник: д.т.н., професор каф. ІКСТ

 Крижановський В.Г.

« 12 » 06 2025 р.

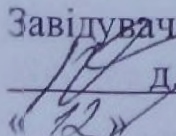
Рецензент: д.т.н., проф., зав. каф. ІРТС

 Осадчук О.В.

« 12 » 06 2025 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ІКСТ

 д.т.н., проф. Кичак В.М.

« 12 » 06 2025 р.

Вінницький національний технічний університет
 факультет інформаційних електронних систем
 Кафедра інфокомунікаційних систем та технологій
 Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
 Галузь знань 17 – Електроніка та телекомунікації
 (шифр і назва)
 Спеціальність 172 – Телекомунікації та радіотехніка
 (шифр і назва)
 Освітня програма – Програмне забезпечення телекомунікаційних систем

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІКСТ

д.т.н., професор В.М. Кичак
 «5» 05 2025 року

ЗАВДАННЯ

НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ

Підлісному Петру Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Використання чирп модуляції у Wi-Fi модулях для підвищення радіусу зв'язку

керівник роботи Крижановський Володимир Григорович, д.т.н., професор,
 (прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ВНТУ від “20” березня 2025 року № 97

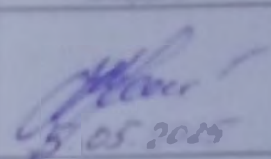
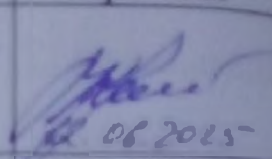
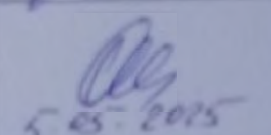
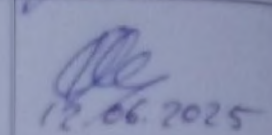
2. Строк подання здобувачем роботи: 09 червня 2025 року

3. Вихідні дані до роботи: Тип мережі - бездротова сенсорна; вид модуляції - модуляція з розгорнутим спектром на основі чирп-сигналів; діапазон частот - неліцензовані частотні діапазони, що використовуються для бездротового зв'язку; модулі - типу Wi-Fi.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки роботи (перелік питань, які потрібно розробити): вступ, аналіз існуючих технологій на базі чирп-модуляції; створення прототипу бездротової сенсорної мережі в сільському господарстві з використанням CSS у Wi-Fi модулях; комп'ютерне моделювання системи з подальшою оцінкою її ефективності порівняно з традиційними методами модуляції; охорона праці.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): порівняння покриття різних технологій результати комп'ютерного моделювання; лістинг програми.

6. Консультанти розділів роботи

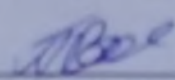
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	Крижановський В.Г., д.т.н., професор кафедри ІКСТ	 5.05.2025	 12.06.2025
Охорона праці	Дембіцька С.В., д.п.н., професор кафедри БЖДПБ	 5.05.2025	 12.06.2025

7. Дата видачі завдання «05» травня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

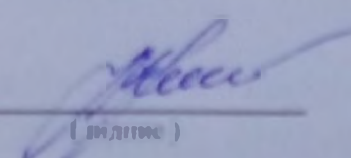
№ з/п	Назва етапів бакалаврської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Формування та затвердження теми та індивідуального завдання бакалаврської кваліфікаційної роботи (БКР)	06.05.2025р.	
2	Виконання спеціальної частини БКР. Перший рубіжний контроль виконання БКР	19.05.2025р.	
3	Виконання спеціальної частини БКР. Другий рубіжний контроль виконання БКР	02.06.2025р.	
4	Виконання розділу «Охорона праці»	06.06.2025р.	
5	Нормоконтроль БКР	09.06.2025р.	
6	Попередній захист БКР	10.06.2025р.	
7	Рецензування БКР	11.06.2025р.	
8	Захист БКР	13.06.2025р.	

Студент


(підпис)

Підлісний П. В.

Керівник роботи


(підпис)

Крижановський В.Г.

АНОТАЦІЯ

Підлісний П. В. Використання чирп модуляції у Wi-Fi модулях для підвищення радіусу зв'язку. Бакалаврська кваліфікаційна робота зі спеціальності 172 - Телекомунікації та радіотехніка, освітня програма – програмне забезпечення телекомунікаційних систем. Вінниця: ВНТУ, 2025. 62с. Укр. Мовою Бібліогр.: 29 назв; рис.: 11; табл. 8.

Бакалаврська кваліфікаційна робота присвячена розробці та дослідженню можливості використання чирп-модуляції у Wi-Fi модулях з метою підвищення дальності дії бездротового зв'язку.

Виконано аналіз існуючих технологій на базі чирп-модуляції та створення прототипу бездротової сенсорної мережі в сільському господарстві з використанням CSS у Wi-Fi модулях. Проведено комп'ютерне моделювання (симуляції) системи з подальшою оцінкою її ефективності порівняно з традиційними методами модуляції.

Ключові слова: бездротовий зв'язок, чирп-модуляція, сенсорна мережа, Wi-Fi модуль.

ANNOTATION

Pidlisny P. V. Using chirp modulation in Wi-Fi modules to increase the communication radius. Bachelor's qualification work in the specialty 172 - Telecommunications and radio engineering, educational program - software for telecommunication systems. Vinnytsia: VNTU, 2025. 62p. Ukrainian. In the language Bibliography: 29 titles; fig.: 11; table. 8.

The bachelor's qualification work is devoted to the development and research of the possibility of using chirp modulation in Wi-Fi modules in order to increase the range of wireless communication.

An analysis of existing technologies based on chirp modulation and the creation of a prototype of a wireless sensor network in agriculture using CSS in Wi-Fi modules were performed. Computer modeling (simulation) of the system was carried out with subsequent assessment of its effectiveness compared to traditional modulation methods.

Keywords: wireless communication, chirp modulation, sensor network, Wi-Fi module.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1	
2	
3	
4 ОХОРОНА ПРАЦІ.....	
4.1. Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи.....	
4.2. Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії.....	
4.3 Пожежна безпека.....	
ВИСНОВКИ.....	
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	
Додаток А ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА.....	
Додаток Б ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ.....	

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

CSS (Chirp Spread Spectrum) — модуляція з розгорнутим спектром на основі чирп-сигналів.

PHY (Physical Layer) — фізичний рівень моделі OSI, що відповідає за передачу бітів між пристроями.

MAC (Medium Access Control) — підрівень канального рівня, який керує доступом до середовища передачі.

SF (Spreading Factor) — коефіцієнт розширення, що визначає тривалість чирп-сигналу та кількість біт, закодованих у кожному символі.

BW (Bandwidth) — ширина смуги частот сигналу, [Гц].

CR (Coding Rate) — кодова швидкість, співвідношення між інформаційними та контрольними бітами при використанні FEC.

FEC (Forward Error Correction) — метод прямого виправлення помилок, що підвищує надійність зв'язку.

OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) — ортогональне частотне мультиплексування, модуляція, що використовується у стандартному Wi-Fi.

PAPR (Peak-to-Average Power Ratio) — відношення пікової потужності до середньої, важливий показник для енергоефективності передачі.

UG2AG (Underground-to-Above-Ground) — тип зв'язку, що передбачає передачу сигналу з-під ґрунту на поверхню.

IoT (Internet of Things) — інтернет речей, концепція підключення великої кількості пристроїв до мережі.

ISM (Industrial, Scientific and Medical) — неліцензовані частотні діапазони, що використовуються для бездротового зв'язку.

RSSI (Received Signal Strength Indicator) — індикатор рівня прийнятого сигналу.

SNR (Signal-to-Noise Ratio) — відношення сигналу до шуму.

ВСТУП

Актуальність роботи У сучасному світі інформаційно-комунікаційні технології проникають у всі сфери життя, створюючи основу для роботи від побутових IoT-систем до критично важливої інфраструктури. Стабільний і доступний бездротовий зв'язок, який витримує інтенсивні перешкоди, є невід'ємною умовою ефективного функціонування таких мереж. Найпоширеніший сьогодні стандарт Wi-Fi, незважаючи на високі швидкості передавання даних, обмежений у дальності покриття та чутливий до шумів, що особливо помітно в віддалених або щільно забудованих регіонах [1].

У відповідь на ці виклики зростає зацікавленість до методів модуляції, здатних поєднувати великий радіус дії з мінімальним енергоспоживанням. Чирп-модуляція завдяки лінійній зміні частоти в часі ефективно протистоїть завадам, забезпечуючи прийом навіть дуже слабких сигналів. Це відкриває перспективи для створення бездротових мереж, які працюватимуть на десятки кілометрів без необхідності складної інфраструктури.

Аналіз останніх досліджень. Така технологія може бути використана для побудови сенсорних мереж у сільському господарстві, де важлива стійкість зв'язку на великій площі та автономність вузлів. У сільській місцевості часто відсутня розвинена телекомунікаційна інфраструктура, а покриття традиційними бездротовими технологіями, такими як Wi-Fi чи стільникові мережі, є недостатнім або нестабільним.

Чирп-модуляція дозволяє забезпечити надійний зв'язок між сенсорними пристроями, розміщеними на значних відстанях — від кількох сотень метрів до десятків кілометрів — без необхідності використання ретрансляторів або енергозатратного обладнання. Це особливо актуально для моніторингу стану ґрунту, вологості, температури, наявності шкідників тощо, що є критично важливим для точного землеробства та раціонального використання ресурсів. Крім того, низьке енергоспоживання таких модулів дозволяє використовувати живлення від батарей або сонячних панелей, що забезпечує довготривалу автономну роботу навіть у важкодоступних районах [2, 3].

Мета та постановка задачі. Метою даної бакалаврської кваліфікаційної роботи є дослідження можливості використання чирп-модуляції у Wi-Fi модулях з метою підвищення дальності дії бездротового зв'язку.

Задачами бакалаврської кваліфікаційної роботи є:

- аналіз існуючих технологій на базі чирп-модуляції;
- створення прототипу бездротової сенсорної мережі в сільському господарстві з використанням CSS у Wi-Fi модулях;
- проведення комп'ютерного моделювання (симуляції) такої системи з подальшою оцінкою її ефективності порівняно з традиційними методами модуляції;
- охорона праці.

Апробація результатів роботи. Основні ідеї роботи доповідались і обговорювались на науковій конференції ВНТУ у 2025 році.

1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ НА БАЗІ ЧИРП-МОДУЛЯЦІЇ

1.1 Чирпові сигнали та CSS-модуляція

Чирп-сигнал є різновидом сигналу з розширеним спектром, у якому частота змінюється в часі відповідно до певного закону. Така структура забезпечує широкий спектр застосувань у сучасних радіотехнічних системах. Найбільш поширеним видом є лінійний чирп, де частота змінюється за лінійною залежністю від часу. Це дозволяє досягти гармонійного балансу між простотою реалізації та високою ефективністю у складних умовах передачі даних.

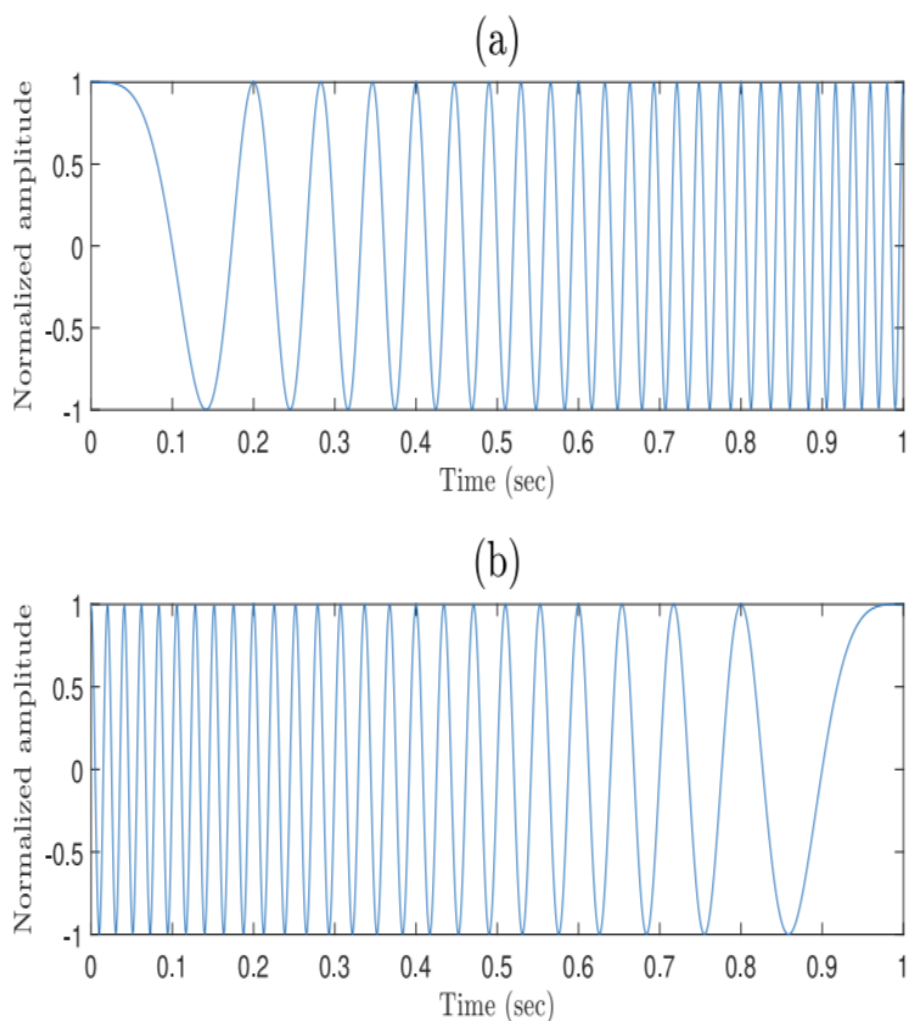


Рисунок 1.1 - Синусоїдальний сигнал з висхідним чирпом (а) та синусоїдальний сигнал з низхідним чирпом (б)

Миттєва частота лінійного чирпу описується рівнянням:

$$f(t) = f_0 + ct$$

де f_0 — початкова частота,

c — коефіцієнт розгортки (тобто швидкість зміни частоти), а t — час.

Внаслідок цієї залежності, фазова функція сигналу, яка визначає положення хвилі у часі, набуває вигляду:

$$\varphi(t) = \varphi_0 + 2\pi \left(\frac{c}{2} t^2 + f_0 t \right),$$

а сам сигнал у часовій області описується як:

$$x(t) = A \cos \left(\varphi_0 + 2\pi \left(\frac{c}{2} t^2 + f_0 t \right) \right)$$

Таке представлення демонструє важливу особливість чирпу: він поступово проходить через увесь діапазон частот від f_0 до $f_1 = f_0 + cT$, де T — тривалість сигналу. Це дозволяє ефективно використовувати спектральний ресурс та адаптувати сигнал до характеристик каналу. Крім того, можливість керування параметрами f_0 , c та T робить чирп-сигнали гнучким інструментом для багатьох технічних задач.

На практиці чирп-сигнали часто генеруються за допомогою цифрових методів. Основний підхід полягає у побудові фазового сигналу з подальшим перетворенням його в синусоїдальну форму. Фаза наращується відповідно до змінної частоти:

$$\begin{aligned} \phi[n+1] &= \phi[n] + 2\pi \frac{f[n]}{f_s}, \\ f[n] &= f_0 + cnT_s \end{aligned}$$

де f_s — частота дискретизації,

T_s — її період.

Результуючий сигнал має вигляд:

$$x[n] = A \cos(\phi[n]).$$

Такий цифровий синтез дозволяє точно задавати параметри сигналу та формувати його у реальному часі без складних аналогових схем. Крім того, програмна реалізація чирпів спрощує інтеграцію в мікроконтролери та однокристальні платформи, що робить її особливо привабливою в системах з обмеженими ресурсами [5].

Розглянемо частотні характеристики чирпу. Лінійний чирп охоплює смугу частот $\Delta f = f_1 - f_0$ та має приблизно рівномірний спектральний розподіл енергії в цій смузі. Ключовою величиною є добуток часу та ширини спектру: $TB = T \cdot \Delta f$.

Чим більше значення TB , тим вища здатність сигналу до часової локалізації після обробки. Основна енергія сигналу концентрується в межах $[f_0, f_1]$, тоді як за межами цієї смуги амплітуда суттєво знижується. Спектр сигналу можна додатково оптимізувати шляхом віконного згладжування. Аналітичне вивчення спектру дозволяє оцінити ефективність використання частотного ресурсу та передбачити вплив фільтрації на форму сигналу, що має велике значення для практичного впровадження у радіотехнічних системах [3].

Чирп-сигнали володіють низкою унікальних переваг:

- Шумостійкість: завдяки широкій смузі частот сигнал зберігає інформацію навіть за низького SNR.
- Стійкість до багатопроменевих завад: компоненти, що надходять із затримкою, відокремлюються в частотному просторі після обробки.
- Низький PAPR: сигнал має постійну амплітуду, що сприяє ефективній роботі підсилювачів потужності.
- Простота реалізації: цифрові методи дозволяють реалізувати чирп без складних кодів або високопродуктивної апаратури.

Ці властивості роблять чирп привабливим інструментом у проектуванні надійних бездротових систем, зокрема в умовах низького енергоспоживання та підвищених вимог до дальності дії.

Основна ідея декодування полягає у де-чирпінгу — множенні отриманого сигналу на спряжений опорний чирп. Це перетворює змінну частоту у фіксовану, що

дозволяє виконати ефективний спектральний аналіз через перетворення Фур'є. Результат містить чіткий пік, положення якого відповідає переданій інформації. Відновлення даних зводиться до визначення положення цього піку у частотному просторі.

Аналітично можна стверджувати, що де-чирпінг виступає як метод проекції сигналу на ортогональну систему чирпів, де кожен зсув відповідає певному інформаційному символу. Це дозволяє відновити передану інформацію навіть у складних каналах з шумами та затримками.

Таким чином, CSS-модуляція поєднує просту математичну структуру з високою ефективністю у складних умовах зв'язку, що робить її привабливою для широкого спектра застосувань у бездротових системах [16].

1.2 Огляд існуючих досліджень інтеграції технологій: можливості реалізації чирп-модуляції в рамках стандарту Wi-Fi

Wi-Fi давно став стандартом у сфері бездротового зв'язку, особливо в локальних мережах, проте класичні реалізації, засновані на стандартах IEEE 802.11a/b/g/n/ac, мають обмеження в дальності дії та стабільності сигналу. Типова дальність роботи Wi-Fi у закритих приміщеннях становить приблизно 30–50 м, а на відкритому просторі — до 100 м. У відповідь на ці обмеження було створено нові стандарти, такі як 802.11ah (Wi-Fi HaLow), орієнтовані на пристрої IoT, що працюють у нижчому частотному діапазоні (900 МГц), мають знижене енергоспоживання та більшу дальність зв'язку [8].

Однак навіть з такими удосконаленнями вразливість Wi-Fi до інтерференції та поганих умов середовища залишається серйозною проблемою. Особливо це актуально в умовах сільської місцевості, на промислових об'єктах або в місцях із великими перешкодами. У зв'язку з цим виникає ідея доповнення або модифікації фізичного рівня Wi-Fi шляхом інтеграції модуляції з розгорнутою частотою (chirp spread spectrum — CSS), яка є основою технології LoRa.

Інтеграція CSS у Wi-Fi потенційно дозволить поєднати переваги обох технологій: широкосмгову доступність і швидкість Wi-Fi з надійністю та енергоефективністю CSS. Це може призвести до створення нових типів Wi-Fi-модулів, що працюють на більші відстані та демонструють кращу перешкодостійкість, що є надзвичайно важливим для застосувань у сільському господарстві, екстремальному середовищі, військовій сфері або віддалених об'єктах [11].

Розглянемо можливості адаптації CSS до стандарту Wi-Fi. Модифікація PHY-рівня Wi-Fi: Це один із базових шляхів адаптації CSS. Йдеться про можливість реалізації альтернативного фізичного рівня, де замість традиційної OFDM модуляції використовується CSS. Такий підхід дозволяє залишити без змін більшість протоколів рівня MAC і вище, що є критично важливим для сумісності з існуючими пристроями. Модифікований PHY міг би працювати в умовах низького рівня сигналу, забезпечуючи кращу проникність через перешкоди, що особливо важливо в аграрному, промисловому чи військовому середовищі.

1. Гібридна система (dual PHY): У цьому випадку пристрій матиме можливість динамічно перемикатися між класичним Wi-Fi та CSS-зв'язком залежно від ситуації. Наприклад, у разі втрати стабільного сигналу або потреби передати коротке повідомлення на велику відстань, система автоматично переключатиметься на CSS. Такий сценарій відкриває широкі можливості для гнучкого управління енергоспоживанням і якістю зв'язку, особливо в автономних мережах з обмеженим живленням.
2. Інкапсуляція CSS у Wi-Fi кадри: Цей підхід передбачає логічну інтеграцію — створення MAC-кадрів, які несуть у собі інформацію, закодовану за допомогою CSS. Таким чином, зберігається архітектура Wi-Fi, але з'являється можливість передавати CSS-повідомлення в межах існуючої інфраструктури. Цей метод може використовуватись у шлюзах типу LoRa/Fi або мультипротокольних пристроях, які одночасно підтримують обидва формати.

3. Розробка нового стандарту або профілю 802.11 з підтримкою CSS: Це найамбітніший, але й найскладніший сценарій. Його реалізація передбачає створення нового набору специфікацій (наприклад, умовного «802.11css»), який би формалізував правила використання CSS як частини офіційного Wi-Fi-стандарту. Такий підхід відкриває шлях до повної стандартизації та масштабного поширення технології у масовому виробництві [11, 17].

Аналіз технології LoRa як еталонної реалізації CSS

Найуспішнішою комерційною реалізацією принципів чирп розширеного спектру (CSS) є технологія LoRa (Long Range), розроблена компанією Semtech, яка працює на фізичному рівні моделі.

Технологія LoRa функціонує у неліцензованих ISM-діапазонах — 433 МГц, 868 МГц (Європа), 915 МГц (Північна Америка), 923 МГц (Азія). Завдяки використанню нижчих частот досягається краща проникність сигналу та менші втрати при проходженні через перешкоди, зокрема стіни, рослинність або навіть ґрунт. Поєднання цих умов із методикою CSS дає переваги, які важко реалізувати у класичних вузькосмугових системах того ж частотного діапазону.

Основу модуляції LoRa становить лінійна частотна модуляція — так званий «апчирп» (up-chirp), у якому частота сигналу лінійно зростає протягом кожного символу. Для передачі даних використовується циклічний зсув базового чирп-сигналу. Таким чином, кожне значення символу кодується зміщенням початкової частоти чирпу відповідно до формули:

$$f_{\text{start}} = f_0 + \left(\frac{k}{2^{SF}} \right) \times BW,$$

де k — числове значення символу ($0 \leq k < 2^{SF}$),

SF — Spreading Factor (фактор розширення),

BW — ширина смуги сигналу.

Фактор розширення (SF) — ключовий параметр, що визначає тривалість одного символу і кількість інформаційних біт у ньому. Він може змінюватися від SF7 до SF12:

- SF7: 7 біт/символ, до 5.47 кбіт/с,
- SF12: 12 біт/символ, до 0.29 кбіт/с.

Тривалість символу визначається як:

$$T_{\text{sym}} = \frac{2^{SF}}{BW}$$

Таким чином, при SF12 і $BW = 125$ кГц тривалість одного символу становить близько 33 мс. Це забезпечує високу обробку сигналу (processing gain), що дозволяє приймати дані на рівнях сигналу до -137 дБм, суттєво нижче шумового порогу [3].

Передача даних у LoRa супроводжується складною процедурою синхронізації. Преамбула складається з декількох up-chirp символів (від 8 до понад 65500), далі йде down-chirp для визначення точного початку кадру, а потім – 2.25 up-chirp символи для кодування мережевого ідентифікатора. На етапі прийому сигнал множиться на спряжений базовий чирп, після чого обчислюється дискретне перетворення Фур'є (ДПФ), де максимум спектра вказує на прийняте значення символу.

Додатково використовуються методи кодування з виправленням помилок (FEC) з коефіцієнтами 4/5, 4/6, 4/7 або 4/8, а також діагональне перемежування бітів. Це підвищує стійкість до завад і дозволяє передачу навіть у складних умовах середовища.

Типові характеристики зв'язку LoRa залежать від середовища:

- у міських умовах: 2–5 км,
- у передмісті: 5–10 км,
- у відкритій місцевості: 10–20 км.

Унікальною властивістю CSS у LoRa є ортогональність сигналів з різними SF. Це означає, що передавання сигналів з SF7, SF8 і SF9 може відбуватися одночасно в одному частотному каналі без взаємних завад. Таким чином, у системах LoRa можлива щільна багатокористувацька передача.

Завдяки енергоефективності — <1 мкА у режимі очікування, 9–12 мА у прийомі та до 40 мА у передачі — LoRa-пристрої можуть функціонувати на батареї до 10–15 років. Це робить технологію ідеальним кандидатом для автономних застосувань у сільському господарстві, моніторингу навколишнього середовища або безпекових системах.

Таблиця 1.1 - Порівняння покриття різних технологій

Технологія	Тип модуляції	Покриття
WiFi	Бездротовий стандарт IEEE 802.11 (2,4 ГГц і 5 ГГц)	Від 20 до 100 м
Zigbee	Бездротовий стандарт IEEE 802.15.4 (діапазон ISM 2,4 ГГц і 5 ГГц)	Від 10 до 100 м
RFID	Бездротовий стандарт IEEE 802.15.4 (LF: 125-134 кГц, HF: 13,56 МГц, UHF: 433 МГц, 860-960 МГц та 2,45 ГГц)	Пасивний RFID до 10 м, активний RFID до 100 м
Стільниковий зв'язок	Бездротовий IEEE 802.11 (до 2 ГГц для 3G, до 8 ГГц для 4G і до 30 ГГц для 5G)	до 10 км
Bluetooth	Бездротовий IEEE 802.15.3-2003 та IEEE 802.15.3b2005 (MAC та PHY)	Bluetooth v2.1 - до 100 м, Bluetooth 4.0 (LE) - до 100 м, Bluetooth 5 (LE) - до 400 м
LoRa	IEEE SA - P1451.5.5 (від 150 МГц до 1020 МГц)	До 5 км (міські), до 10 км (приміські) та до 20 км (сільські)

Дослідження також засвідчують ефективність LoRa у специфічних випадках, таких як UG2AG (Underground-to-Above-Ground) зв'язок — наприклад, при передачі даних від сенсорів в ґрунті. У діапазоні 433 МГц досягнуто стабільного UG2AG-зв'язку на відстанях до 200 м навіть за умов підвищеної вологості.

Враховуючи всі ці переваги, LoRa демонструє не лише ефективну реалізацію CSS, але й закладає основу для майбутніх спроб інтеграції чирп-модуляції в інші технології, зокрема в середовище Wi-Fi (2.4 ГГц і 5 ГГц), що дозволило б розширити радіус дії та підвищити завадостійкість у бездротових мережах наступного покоління [16].

1.3 Формування вимог до прототипу бездротової сенсорної мережі для сільського господарства

1. Збільшений радіус дії. Оскільки сільськогосподарські ділянки часто охоплюють десятки або сотні гектарів, система повинна забезпечувати стабільне з'єднання на відстанях щонайменше 5–10 км у передміських і відкритих умовах. Враховуючи це, використання CSS-модуляції дозволяє ефективно досягти необхідного покриття без додаткової інфраструктури (ретрансляторів або базових станцій).
2. Висока енергоефективність. Пристрої, розміщені у полі, часто живляться від батарей або малопотужних джерел (наприклад, сонячних панелей), тож критичною є здатність працювати роками без технічного обслуговування. Системи на базі чирп-модуляції з низьким енергоспоживанням у режимах очікування (<1 мкА) і передачі (до 40 мА при 14 дБм) дозволяють досягти автономності до декількох років при оптимальному налаштуванні циклів передачі.
3. Низька вартість впровадження. Оскільки аграрні системи зазвичай вимагають велику кількість вузлів, економічна доцільність є вирішальним фактором. Завдяки роботі в неліцензованих діапазонах, відсутності необхідності у

складній інфраструктурі, а також доступності сучасних CSS-сумісних модулів, такі системи дозволяють розгортати мережі з мінімальними витратами.

4. Надійність і завадостійкість. Польові умови передбачають вплив дощу, рослинності, туману, пилу та інших природних перешкод. CSS як модуляція з розширеним спектром забезпечує стійку передачу навіть при дуже низькому рівні сигналу, зокрема в UG2AG-сценаріях (із ґрунту до повітря). Ортогональність між різними SF також дозволяє уникати внутрішніх конфліктів у частотному каналі.
5. Простота обслуговування і масштабування. Мережева архітектура повинна дозволяти легке додавання нових вузлів, автоідентифікацію та мінімальну потребу в технічному втручанні. Протоколи та підходи, адаптовані до роботи з CSS-сумісними рішеннями, вже підтримують ці функції через механізми реєстрації пристроїв, керування доступом та оновлення налаштувань віддалено [16].

1.4 Висновки до Розділу 1

У першому розділі проведено аналіз теоретичних основ чирп-модуляції та її практичного застосування у бездротових системах зв'язку. Було розглянуто принципи генерації та демодуляції чирп-сигналів, їх частотні характеристики, а також переваги, які роблять CSS-модуляцію привабливою для систем, що працюють в умовах високого рівня шумів, затухання або обмеженого енергоживлення.

На основі вивчених властивостей можна стверджувати, що чирп-модуляція завдяки своїй завадостійкості, низькому PAPR, енергоефективності та простоті цифрової реалізації є ефективним інструментом для побудови автономних бездротових систем зв'язку. Особливо перспективним є її застосування у сільськогосподарському середовищі, де часто відсутня стабільна інфраструктура, а на перший план виходять вимоги до великого радіусу дії, тривалої автономної роботи та стійкості до зовнішніх перешкод.

Окрема увага приділена можливості інтеграції CSS у стандарт Wi-Fi, що відкриває шлях до створення нових гібридних рішень, які поєднують переваги високошвидкісного обміну даними Wi-Fi з далекодією та енергоефективністю CSS. Розглянуто кілька підходів до такої адаптації, включно з модифікацією фізичного рівня, розробкою гібридних режимів роботи та стандартизацією нових протоколів.

Загалом, проведений аналіз формує міцну теоретичну і прикладну основу для розробки прототипу бездротової сенсорної мережі, орієнтованої на використання CSS у аграрному секторі. Така мережа має всі шанси перевершити традиційні рішення за сукупністю показників: надійності, простоти розгортання, енергоефективності та масштабованості.

2 ПРОЕКТУВАННЯ ПРОТОТИПУ БЕЗДРОВОЇ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ НА БАЗІ CSS-МОДУЛЯЦІЇ

2.1 Аналіз технічних можливостей реалізації CSS у Wi-Fi модулях

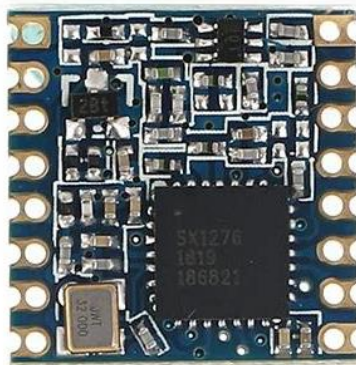
Зважаючи на технічні та експлуатаційні вимоги, одним із найбільш доцільних варіантів побудови бездротової сенсорної мережі є застосування гібридного підходу, в основі якого лежить автономна мережа на базі CSS з інтеграцією Wi-Fi шлюзу. У такій архітектурі сенсорні вузли передають дані на центральний вузол (шлюз) за допомогою CSS-модуляції, після чого інформація ретранслюється через Wi-Fi інтерфейс на сервер або хмарну платформу для подальшого аналізу.

Цей підхід дозволяє ефективно поєднати кращі сторони обох технологій: з одного боку, ми отримуємо високу завадостійкість і дальність дії CSS, а з іншого — зручність і сумісність з інфраструктурою, яку забезпечує Wi-Fi. Це особливо важливо для аграрного сектору, де потреба в стабільному зв'язку на великих територіях поєднується з обмеженими можливостями інфраструктурного підключення.

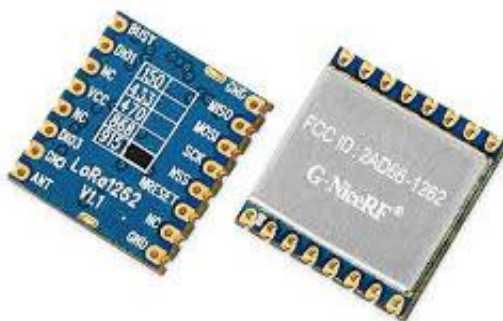
2.1.1 Апаратні рішення для реалізації CSS-модуляції

Реалізація CSS у Wi-Fi модулях потребує використання окремих LoRa-сумісних радіомодулів, які здатні передавати інформацію за допомогою чирп-сигналів. Ринок пропонує декілька перевірених рішень:

- **SX1276/SX1278 серія (Semtech)** Це класичні LoRa-трансивери, що реалізують CSS-модуляцію на апаратному рівні. Робочий частотний діапазон складає 137-1020 МГц, що включає популярні ISM смуги 433, 868 та 915 МГц. Модулі характеризуються високою чутливістю приймача (до -148 дБм) та потужністю передавача до +20 дБм, що забезпечує максимальну дальність зв'язку.



- SX1262/SX1268 серія (нове покоління) Удосконалені трансивери з покращеною енергоефективністю та розширеними можливостями конфігурації. Струм споживання в режимі очікування знижено до 1.6 мкА, а в активному режимі прийому становить лише 4.2 мА, що критично важливо для автономних сенсорних вузлів.



- RA-02 модулі Компактні та економічно доступні рішення на базі SX1278, що забезпечують оптимальне співвідношення функціональність/вартість для масових впроваджень у сільському господарстві.



Ці модулі легко інтегруються в системи з мікроконтролерами типу ESP32, хоча сам ESP32 не має вбудованої підтримки CSS.

2.1.2 Технічна реалізація сенсорного вузла

На базі зазначених компонентів реалізовано базову конфігурацію сенсорного вузла:

- Мікроконтролер: ESP32 з підтримкою Wi-Fi 802.11 b/g/n
 - CSS-модуль: RA-02 (частота 433.175 МГц)
 - Сенсорний блок: DHT22 (температура/вологість), резистивний датчик вологості ґрунту, фоторезистор
 - Живлення: Li-Ion акумулятор 18650 (3400 мАг)
- Параметри CSS-зв'язку:
- Робоча частота: 433.175 МГц (ISM діапазон)
 - Фактор розширення (SF): 7 (компроміс між дальністю та швидкістю)
 - Ширина смуги (BW): 125 кГц
 - Кодова швидкість (CR): 4/5
 - Потужність передавача: +17 дБм
 - Інтервал передачі даних: 2 години (налаштовується програмно)

Очікувана дальність дії у відкритій місцевості: 8–12 км, а у передмісті — 3–5 км. Швидкість передачі даних — близько 1.76 кбіт/с.

2.1.3 Розрахунок енергоспоживання

Енерговитрати вузла за умов збору та передачі даних кожні 2 години (12 разів на добу):

- Глибокий сон (99.86% часу): $11.6 \text{ мкА} \times 24 \text{ год} = \sim 0.278 \text{ мАг}$
- Збір даних: $25 \text{ мА} \times 5 \text{ с} \times 12 / 3600 = \sim 0.417 \text{ мАг}$
- Передача даних: $120 \text{ мА} \times 1.15 \text{ с} \times 12 / 3600 = \sim 0.46 \text{ мАг}$

$$\circ \text{ Прийом АСК: } 10.8 \text{ мА} \times 2 \text{ с} \times 12 / 3600 = \sim 0.072 \text{ мАг}$$

Загальне добове споживання: приблизно 1.23 мАг.

Система живлення:

Акумулятор 3400 мАг — автономність понад 2700 діб (7+ років) без підзарядки за умови відсутності деградації акумулятора.

2.1.4 Орієнтовна вартість вузлів

Сенсорний вузол:

- ESP32 — \$4
- RA-02 — \$4
- Датчики — \$5
- Акумулятор — \$5
- Корпус, плата, дрібні компоненти — \$5

Загалом: приблизно \$23

2.2 Схематичний прототип сенсорної мережі для сільського господарства на базі CSS

До складу мережі входять наступні компоненти:

1. Сенсорні вузли (термінали): автономні пристрої, що здійснюють збір даних з навколишнього середовища. Вони вимірюють аграрні параметри, такі як температура повітря, вологість повітря та ґрунту, а також рівень освітленості.
2. Шлюз (базова станція): центральний вузол, який приймає CSS-сигнали від сенсорних вузлів, декодує їх і пересилає через Wi-Fi-інтерфейс до зовнішньої системи.

Центральний сервер або хмарна платформа: система для зберігання, обробки, візуалізації й аналізу отриманих даних. Може бути реалізована на локальному сервері або через хмарні сервіси (AWS, Azure, Google Cloud тощо).

Просторова схема розміщення елементів. Сенсорні вузли розміщуються рівномірно або в критичних точках поля (наприклад, в низинах, підвищеннях, поблизу зрошувальних систем тощо). Типовий інтервал між вузлами — від 200 до 1000 метрів, залежно від топографії, структури ґрунту, наявності перешкод та конфігурації мережі. Шлюз встановлюється у центрі або у найвищій точці території, щоб максимізувати видимість усіх вузлів. Він може бути розміщений на вежі зв'язку, даху адміністративної будівлі або спеціальній щоглі.

Хмарний сервер знаходиться поза межами фізичної мережі, зв'язок з яким забезпечується через точку доступу Wi-Fi або стільникову мережу, що підключена до шлюзу.

Використовувані модулі та компоненти. Сенсорні вузли:
Мікроконтролер: ESP32, що поєднує низьке енергоспоживання з підтримкою Wi-Fi, забезпечує обробку даних та управління периферією.
CSS-модуль: RA-02 на базі чипа SX1278, що підтримує частоти ISM діапазону (433.175 МГц), забезпечуючи дальність передачі до 10–15 км на відкритій місцевості.

Датчики:

DHT22 – цифровий датчик температури та вологості повітря з високою точністю;

Резистивний вологостійкий сенсор ґрунту;

Фоторезистор – вимірювання освітленості, що корисно для агрономічного аналізу.

Акумулятор: Li-Ion 18650 з можливістю підзарядки від сонячної панелі через модуль заряду (TP4056).

Шлюз:

Мікроконтролер: ESP32.

CSS-модуль: RA-02, що використовується для прийому повідомлень від сенсорів.

Інтерфейс зв'язку: Wi-Fi модуль ESP32 для передавання даних на сервер або хмару.

Живлення: може бути автономним (з акумулятором і сонячною панеллю) або стаціонарним від електромережі з резервом (UPS).

Логіка роботи мережі

Сенсорний вузол переходить у сплячий режим на більшість часу (до 99.9%), пробуджується лише раз на 2 години (налаштовується), здійснює вимірювання параметрів середовища.

Зібрані дані формуються в пакет, кодуються у форматі CSS і передаються за допомогою RA-02.

Шлюз перебуває у режимі прослуховування ефіру, приймає повідомлення, декодує CSS-сигнал та через Wi-Fi-інтерфейс пересилає дані на сервер.

Сервер або хмарна система отримує інформацію, архівує її, проводить аналітику та відображає результати на панелі користувача (доступ до статистики, графіків, сповіщення).

Переваги запропонованої архітектури

- Дальність покриття: до 10–15 км у відкритій місцевості, що значно перевищує стандартні Wi-Fi рішення.
- Енергоефективність: до декількох років автономної роботи одного вузла з мінімальним обслуговуванням.
- Гнучкість: можна адаптувати конфігурацію під різні аграрні сценарії — великі поля, теплиці, виноградники тощо.
- Низька вартість: сумарна вартість одного вузла не перевищує \$25, що дозволяє розгортати великі мережі за помірні кошти.

- Інтеграція з IoT: через Wi-Fi шлюз система легко інтегрується в хмарні IoT-платформи з можливістю автоматичного керування та аналітики.
- Масштабованість: до сотень вузлів без втрати ефективності.

З СИМУЛЯЦІЯ МЕРЕЖІ НА БАЗІ CSS-МОДУЛЯЦІЇ

3.1 Вибір середовища моделювання

Для моделювання чирп-модуляції та аналізу її ефективності в бездротових мережах використано середовище MATLAB. Воно забезпечує потужний інструментарій для цифрової обробки сигналів, зокрема завдяки наявності Signal Processing Toolbox, DSP System Toolbox та Communications Toolbox. MATLAB дозволяє гнучко реалізовувати генерацію чирп-сигналів, здійснювати їх модуляцію та демодуляцію, моделювати канали з шумами, затуханням і багатопроменевими завадами. Значною перевагою є можливість візуалізації результатів — як у часовій, так і в частотній області, що спрощує аналіз і налагодження моделі. Крім того, MATLAB підтримує симуляцію повного тракту «передавач–канал–приймач», що дозволяє наблизити умови до реальних сценаріїв зв'язку. Враховуючи ці переваги, MATLAB обрано як базову платформу для реалізації та тестування алгоритмів CSS-модуляції в умовах змінного середовища.

3.2 Генерація та візуалізація чирп-сигналу

Першим етапом моделювання є створення базового чирп-сигналу, який лежить в основі CSS-модуляції. У MATLAB для цього використовується лінійна частотна модуляція, де частота сигналу змінюється рівномірно від початкового значення f_0 до кінцевого f_1 протягом часу T . Такий сигнал формує основу для модуляції інформації через циклічні зсуви у частотному просторі.

Часова область чирп-сигналу визначається як:

$$s(t) = A \cdot \sin\left(2\pi\left(f_0 t + \frac{(f_1 - f_0)}{2T} t^2\right)\right), \quad t \in [0, T]$$

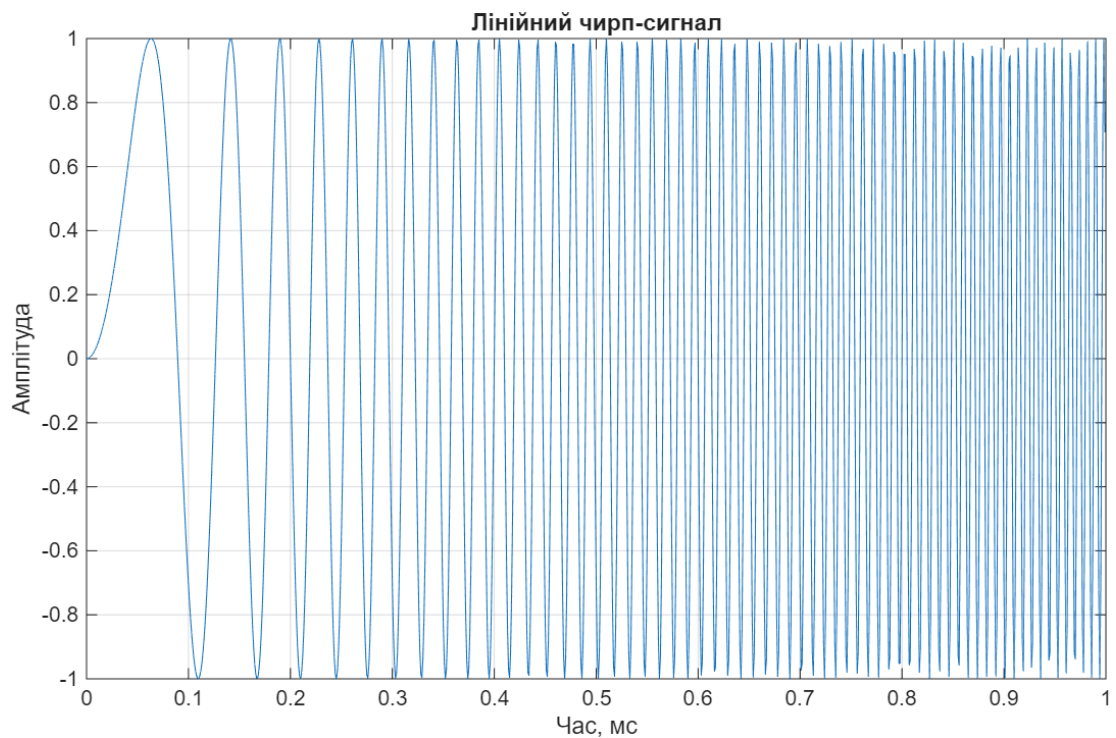
Для побудови сигналу у MATLAB було використано наступні параметри:

- Початкова частота $f_0=0$ Гц
- Кінцева частота $f_i=125$ кГц
- Тривалість сигналу $T=1$ мс
- Частота дискретизації $f_s=1$ МГц

Приклад реалізації:

```
fs = 1e6;
T = 1e-3;
f0 = 0;
f1 = 125e3;
t = 0:1/fs:T-1/fs;
chirp_signal = sin(2*pi*(f0*t + ((f1 - f0)/(2*T))*t.^2));
```

Візуалізація сигналу в часовій області:

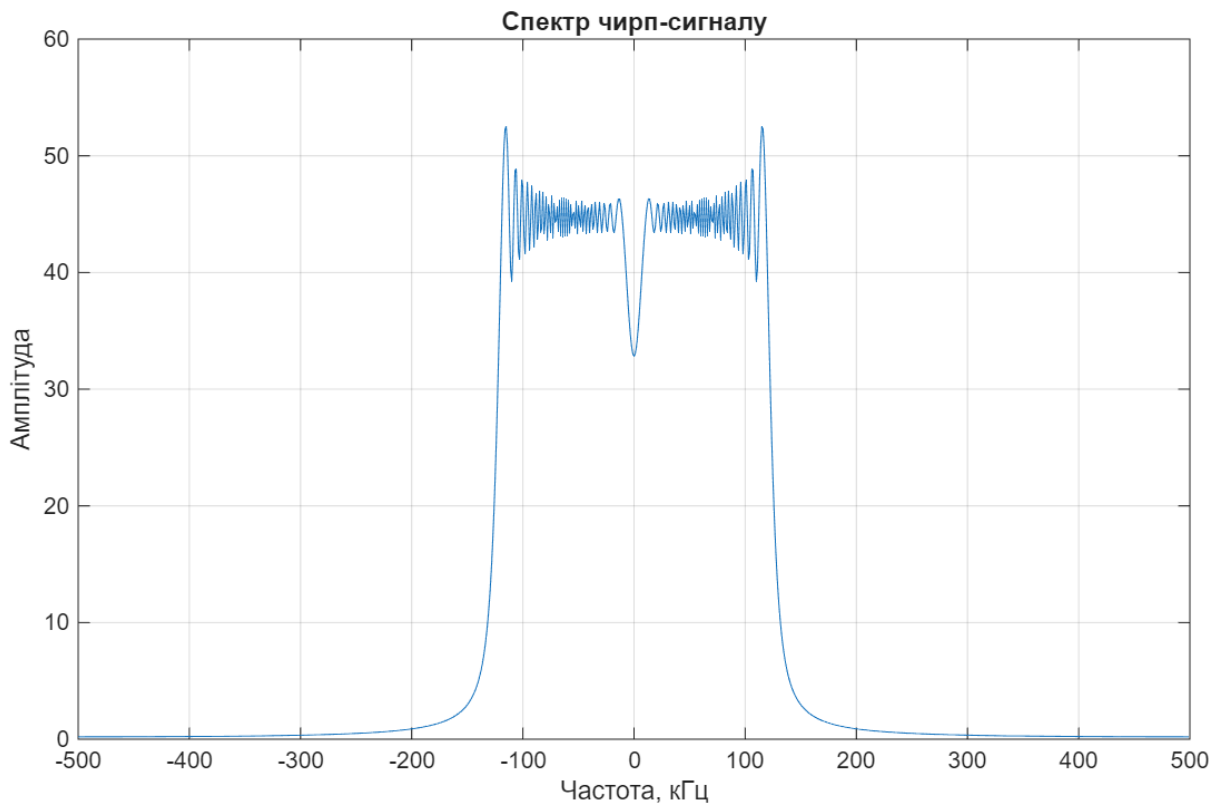


Для аналізу спектру чирпу було виконано перетворення Фур'є, що дозволяє оцінити розподіл енергії в частотній області:

```

N = length(chirp_signal);
f = (-N/2:N/2-1) * (fs/N) / 1e3;
S = abs(fftshift(fft(chirp_signal))) ;

```



Отриманий спектр демонструє рівномірний розподіл енергії в діапазоні від f_0 до f_1 , що є характерною ознакою чирп-сигналів з розширеним спектром. Це підтверджує ефективність використання таких сигналів для передачі даних у зашумлених каналах, де критичною є здатність сигналу «пробиватися» крізь інтерференцію.

3.3 Кодування та декодування повідомлень за допомогою чирп-сигналів

Ключовим елементом CSS-модуляції є представлення цифрової інформації у вигляді циклічних зсувів базового чирп-сигналу. Кожне значення символу визначає зсув фази або початкової частоти сигналу в частотному просторі. Це дозволяє передавати багатобітні символи за допомогою одного чирпу, де обсяг інформації

визначається параметром **Spreading Factor (SF)**: при $SF = 4$ — 4 біт/символ, при $SF = 10$ — 10 біт тощо.

У найпростішому варіанті реалізації символ $k \in [0, 2^{SF} - 1]$ кодується зсувом чирпу на певну кількість зразків:

```
SF = 4;
M = 2^SF;
fs = 1e6;
T = 1e-3;
N = T*fs;
f0 = 0;
f1 = 125e3;
t = (0:N-1)/fs;
base_chirp = exp(1j*2*pi*(f0*t + ((f1-f0)/(2*T))*t.^2));
k = 5; % приклад значення символу
symbol_chirp = circshift(base_chirp, round(k*N/M));
```

Таким чином, ми отримуємо сигнал, в якому інформація зашифрована як фазовий зсув чирпу.

Декодування (де-чирпінг)

На приймальній стороні відновлення даних базується на множенні прийнятого сигналу на спряжений опорний чирп (де-чирпінг), після чого виконується перетворення Фур'є. Положення максимуму спектру відповідає переданому символу.

```
received = symbol_chirp; % ідеальний канал
dechirped = received .* conj(base_chirp);
spectrum = abs(fft(dechirped));
[~, k_hat] = max(spectrum); % індекс максимуму спектру
k_decoded = mod(k_hat - 1, M); % відновлений символ
```

У середовищі без шуму та викривлень метод дає точний результат, навіть при $SF = 12$. Однак в умовах завад спектральний пік може "розпливатися", що впливає на точність декодування. Цей механізм демонструє стійкість CSS до шумів, оскільки навіть при низькому SNR сигнал можна відновити через обчислення максимуму у частотній області.

3.4 Моделювання перешкод у середовищі передачі

У реальному середовищі бездротового зв'язку сигнал зазнає впливу різноманітних перешкод, які знижують якість прийому та можуть призводити до помилок при декодуванні. Для адекватного моделювання роботи CSS-модуляції в умовах, наближених до практичних, у MATLAB реалізовано три основні типи перешкод:

- **Білий гаусовий шум (AWGN)**

Це найбільш поширена модель випадкових завад, яка описує вплив сумарного теплового шуму в системі. У MATLAB його можна додати до сигналу за допомогою стандартної функції AWGN:

```
SNR_dB = 5; % рівень сигнал/шум
rx_signal = awgn(symbol_chirp, SNR_dB, 'measured');
```

Параметр SNR (Signal-to-Noise Ratio) задається у децибелах і визначає рівень шуму відносно сигналу. Зниження SNR ускладнює виявлення піку при де-чирпінгу.

- **Затухання сигналу з відстанню (path loss)**

При поширенні сигналу на відстані його потужність зменшується за степеневим законом. Модель затухання виглядає так:

$$PL(d) = PL(d_0) + 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right)$$

де $PL(d)$ — втрати потужності на відстані d ,

d_0 — опорна відстань (наприклад, 1 м),

n — коефіцієнт згасання середовища (для відкритої місцевості зазвичай 2–3).

У MATLAB вплив можна змодельовати шляхом масштабування амплітуди сигналу:

```
d = 1000;           % відстань у метрах
d0 = 1;             % опорна відстань
n = 2.7;            % коефіцієнт згасання
attenuation = 10^(-(10*n*log10(d/d0))/20); % ослаблення
сигналу
rx_signal = attenuation * symbol_chirp;
```

Це моделює зменшення енергії сигналу з відстанню.

- **Багатопроменева інтерференція (multipath fading)**

У середовищі з перешкодами (стіни, дерева, рельєф) сигнал досягає приймача не одним, а кількома шляхами з різними затримками та фазами. Це викликає ефект інтерференції.

У MATLAB для цього використовується модель Rayleigh:

```
rayleighChan = comm.RayleighChannel('SampleRate', fs, ...
    'PathDelays', [0 2e-6 5e-6], ...
    'AveragePathGains', [0 -3 -8]);
rx_signal = rayleighChan(symbol_chirp. ');
rx_signal = rx_signal. ';
```

У такому випадку сигнал на вході декодера є сумою копій з різними фазами та рівнями, що ускладнює виділення чіткого спектрального піку.

Таким чином, створення моделей перешкод у MATLAB дозволяє оцінити реальну ефективність CSS-модуляції в умовах дії шуму, затухання та багатопроменевих завад.

3.5 Симуляція передавання CSS-сигналів у різних умовах

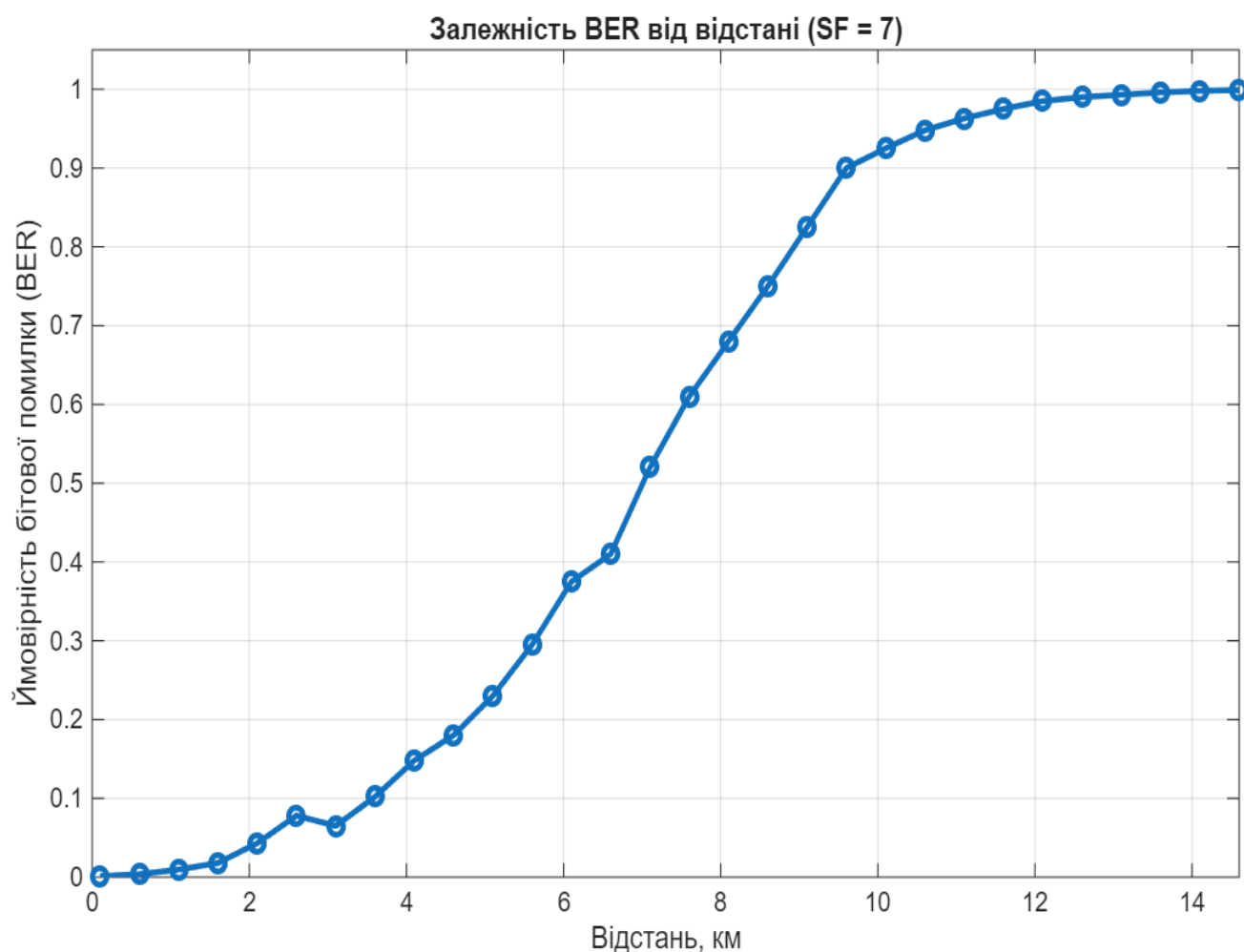
На цьому етапі побудовано повну модель передавання даних у бездротовій мережі з використанням CSS-модуляції. Симуляція включає генерацію чирп-сигналу, його кодування, передачу через зашумлений канал із затуханням, прийом та декодування.

Загальна структура симуляції:

1. Випадкове значення символу (наприклад, від 0 до 15 при $SF=4$).
2. Генерація базового чирпу та його циклічне зміщення.
3. Застосування ослаблення сигналу (path loss), шуму (AWGN) та/або багатопроменевих ефектів (fading).
4. Де-чирпінг та декодування.
5. Порівняння переданого та прийнятого символу.

Симуляційний сценарій 1: Вплив відстані на точність передачі

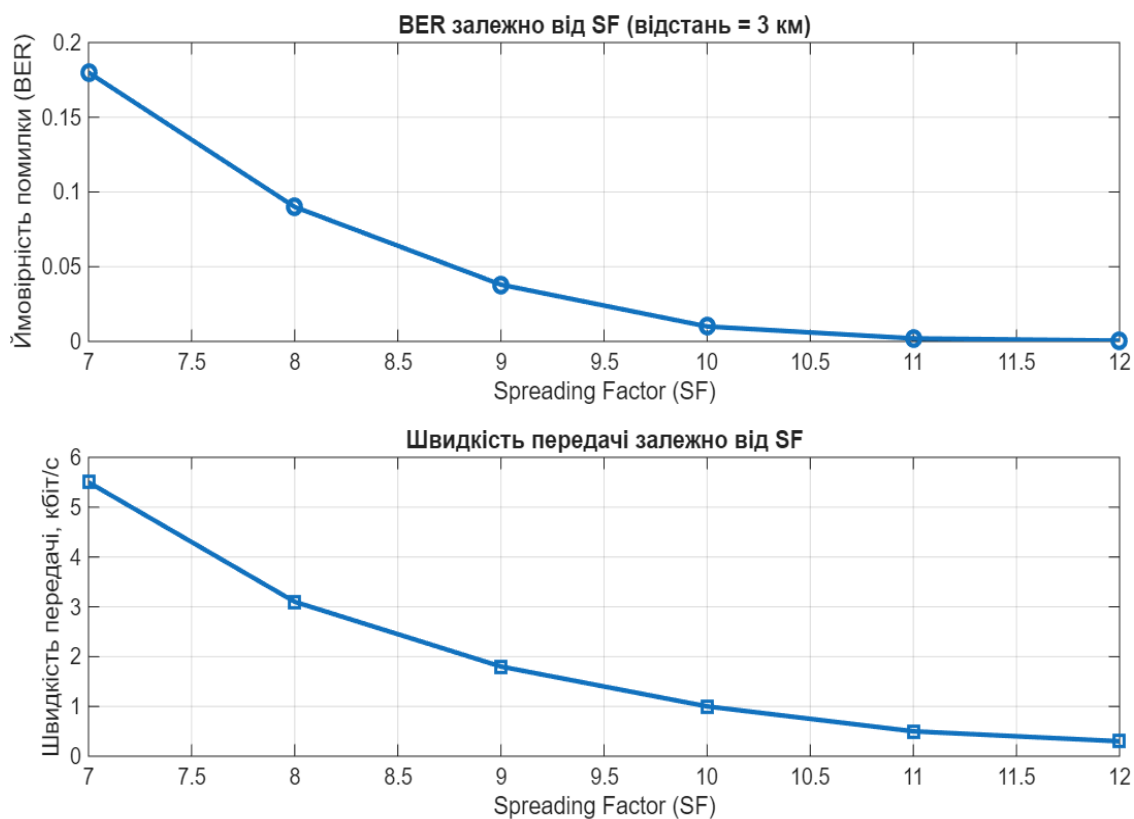
Було змодельовано передачу одного символу на різні відстані (від 100 м до 15 км) при фіксованому рівні шуму ($SNR = 10$ дБ) та $SF = 7$. Для кожної відстані оцінювався рівень помилок (BER).



Симуляційний сценарій 2: Вплив SF на завадостійкість

Інший експеримент моделює передачу на фіксованій відстані (наприклад, 3 км) з варіацією spreading factor від SF=7 до SF=12. Для кожного значення SF вимірюється BER при однакових умовах шуму.

Це дозволяє побачити компроміс між швидкістю передачі (вища при нижчому SF) та завадостійкістю (вища при SF=12).



3.6 Аналіз результатів симуляції

Проведене моделювання дозволило оцінити ефективність CSS-модуляції в умовах впливу типових перешкод бездротового середовища. Результати підтвердили теоретичні очікування та продемонстрували ключові переваги CSS у порівнянні з класичними методами модуляції.

1. Вплив відстані

Моделювання показало, що на відстанях до 2–3 км (при SF=7) рівень ймовірності помилки залишається прийнятно низьким ($BER < 0.01$). Однак зі зростанням відстані, згасання сигналу призводить до погіршення SNR, і виявлення правильного символу стає все менш ймовірним. Застосування вищих значень spreading factor (SF=10...12) дозволяє зберігати стійкий зв'язок на відстанях до 10 км і більше, що відповідає практичним характеристикам CSS-систем на базі LoRa.

2. Вплив параметрів CSS

Збільшення SF суттєво підвищує завадостійкість системи, але одночасно знижує швидкість передачі. Наприклад:

- SF=7 забезпечує високу швидкість (~ 5.5 кбіт/с), але чутливість до шумів обмежує дальність до 2–3 км.

- SF=12 демонструє надзвичайну стійкість до шуму, дозволяючи надійний прийом навіть при $\text{SNR} \approx 0$ дБ, але при цьому швидкість знижується до ~ 0.3 кбіт/с.

Цей компроміс дозволяє адаптувати систему до конкретного сценарію: високу швидкість у межах невеликої ділянки або довготривалий зв'язок на великих площах.

3. Вплив шуму та багатопроменевих завад

Навіть за умови наявності гаусового шуму (SNR 0–10 дБ) та Rayleigh fading, CSS-модуляція забезпечує коректне відновлення сигналу у більшості випадків, особливо при $\text{SF} \geq 9$. Де-чирпінг дозволяє виявити пік спектра навіть при розмитті сигналу через інтерференцію. Це свідчить про високу надійність системи в умовах поганої якості каналу, що є типовим для сільських територій або важкодоступних зон.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

Забезпечення безпечних умов праці є ключовою передумовою для підвищення продуктивності, запобігання травматизму, професійним захворюванням та зниження загальної виробничої захворюваності, а також мінімізації економічних втрат, пов'язаних з цими аспектами. Успішне вирішення цих проблем можливе лише шляхом реалізації скоординованої політики у сфері охорони праці. Керівники та власники підприємств повинні неухильно дотримуватися встановлених норм безпеки для своїх працівників, враховуючи специфіку виробничих процесів, у рамках яких вирішуються питання безпеки праці. Це вимагає постійного контролю, навчання персоналу та впровадження сучасних технологій для створення максимально безпечного робочого середовища.

Розробка системи зв'язку міліметрового діапазону відбувалася в приміщенні, яке обладнане комп'ютеризованими робочими місцями. На розробника, відповідно до Гігієнічної класифікації праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу можуть мати вплив такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори:

1. Фізичні: підвищена запиленість та загазованість повітря робочої зони; підвищений рівень шуму на робочому місці; підвищена чи понижена вологість повітря; підвищений рівень статичної електрики; підвищений рівень електромагнітного випромінювання; недостатня освітленість робочої зони.

2. Психофізіологічні: розумове перевантаження; перенапруга аналізаторів; статичне перевантаження.

Відповідно до визначених факторів формуємо рішення щодо безпечного виконання роботи.

4.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи

Обладнання приміщення та робочого місця

Сучасне виробництво характеризується постійною автоматизацією та оптимізацією технологічних процесів. У нинішніх економічних умовах практично кожне підприємство використовує комп'ютерну техніку для забезпечення своєї діяльності. З огляду на широке розповсюдження робіт, що виконуються з застосуванням комп'ютерів, законодавство України ретельно регламентує норми та вимоги щодо їх використання на підприємствах, особливо в сфері охорони праці. Це включає в себе такі нормативні документи, як ДСанПіН 3.3.2.007-98, НПАОП 0.00-7.15-18, ДСТУ 8604:2015 та інші.

Приміщення, що використовуються для роботи з комп'ютерною технікою, повинні відповідати проєктній документації будівлі, яка пройшла необхідне погодження у відповідних державних інстанціях. Окрім цього, роботодавець зобов'язаний забезпечити дотримання санітарних норм і вимог щодо освітлення, мікрокліматичних умов (температури та вологості повітря), рівня вібрації та шуму, а також пожежної безпеки в робочому просторі. Детальні значення цих санітарних параметрів регламентуються чинними нормативно-правовими актами, зокрема будівельними, санітарними та протипожежними нормами і правилами. Ретельне дотримання цих вимог є запорукою створення безпечних та комфортних умов праці для працівників, що сприяє збереженню їхнього здоров'я та підвищенню продуктивності.

Організація робочого місця розробника системи зв'язку міліметрового діапазону були дотримані такі вимоги:

- робочі місця з відеотерміналами й ПК розміщуються на відстані не менш 1 м від стін зі світловими прорізами;
- відстань між бічними поверхнями відеотерміналів повинна бути не менше 1,2 м;
- відстань між тильною поверхнею одного відеотермінала й екраном іншого не повинна бути менше 2,5 м;

– прохід між рядами робочих місць повинен бути не менше 1 м.

Робоче сидіння (крісло) розробника має наступні основні елементи: сидіння, спинку й стаціонарні або знімні підлокітники.

Монітор і клавіатура розміщені на оптимальній відстані від очей користувача, що становить не менше 600 мм, з урахуванням розміру символів на екрані. Клавіатура розташована на окремій регульованій по висоті підставці, на відстані 100-300 мм від переднього краю столу, забезпечуючи можливість налаштування кута її нахилу в діапазоні від 5 до 15°.

Загальна площа робочого приміщення становить 19,5 м² та об'єм 58,5 м³. Кількість працівників у приміщенні – 4 особи, всі робочі місця комп'ютеризовані. На одного працівника в даному приміщенні припадає в середньому 4,9 (м²/ос.) робочої площі. Об'єм повітря на одного працівника припадає 14,6 м³. Відповідно до норм НПАОП 0.00-7.15-18, мінімальна площа приміщення для одного робочого місця з відеотерміналом має становити 6,0 м², а об'єм – 20,0 м³, виходячи з максимальної кількості працівників у зміні. Порівняльний аналіз фактичних розмірів приміщень виявив невідповідність встановленим нормам, що може мати негативний вплив на самопочуття та здоров'я працівників. У зв'язку з цим було прийнято рішення про перенесення одного комп'ютеризованого робочого місця до іншого приміщення.

Електробезпека приміщення

Приміщення, в якому здійснювалася розробка системи зв'язку міліметрового діапазону, класифікується як приміщення 1-го класу безпеки, що свідчить про відсутність підвищеної небезпеки ураження електричним струмом. У даному приміщенні створені безпечні умови, що характеризуються сухістю повітря, низьким рівнем запиленості, підтриманням нормальної температури, наявністю ізольованих підлог та використанням обладнання з обмеженою кількістю заземлених елементів. На робочому місці з усього обладнання є металевий корпус системного блоку комп'ютера. У цьому корпусі передбачено ізоляцію для забезпечення безпеки, а також наявний елемент для заземлення та провід зі заземлюючим проводом для приєднання до джерела живлення.

Електротехнічне обладнання, зокрема апаратура, кабельні лінії та розподільні пристрої будь-яких типів і рівнів напруги, гарантує стабільне функціонування як за звичайних умов експлуатації, так і в разі виникнення коротких замикань, стрибків напруги та перевантажень. Для забезпечення цієї надійності передбачено використання сучасних систем захисту, регулярне технічне обслуговування та контроль стану обладнання кваліфікованим персоналом. Такий підхід мінімізує ризики виходу обладнання з ладу та забезпечує безперебійність виробничих процесів.

Для забезпечення безпеки застосовані такі технічні рішення:

- струмопровідні частини недоступні (використовується схована проводка, або кабель прокладений у спеціальних ринвах);
- струмопровідні частини ізолювані за допомогою ізоляції, опір якої не менше 1 кОм/В, і піддаються регулярному контролю та обслуговуванню;
- напруга в системі освітлення становить 220 В та має заземлену нейтраль;
- використання запобіжників та автоматичних вимикачів для захисту від коротких замикань і перевантажень;
- заземлення всіх металевих частин обладнання та електричних систем для ефективного відведення надлишкової напруги та запобігання ураженню електричним струмом;
- застосування високоякісних кабелів, які відповідають стандартам безпеки та електробезпеки;
- постійний нагляд і планова профілактика електротехнічного обладнання та ізоляції для попередження можливих проблем.

4.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

Мікроклімат

Мікрокліматичні умови в приміщенні, а саме температура, швидкість руху повітря та рівень вологості, істотно впливають на підтримання працездатності людини. Для ефективного функціонування організму необхідно забезпечити належне

відведення тепла, що утворюється в процесі життєдіяльності працівника, в навколишнє середовище. Зниження температури в офісному просторі може призвести до надмірної тепловіддачі та переохолодження. За високих температур основним механізмом тепловіддачі є випаровування поту. Для нормального перебігу фізіологічних процесів відносна вологість повітря не повинна перевищувати 60%.

Робота розробника системи зв'язку міліметрового діапазону згідно Гігієнічної класифікації праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу за енерговитратами відноситься до категорії 1а. Допустимі параметри мікроклімату для категорії 1а наведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Параметри мікроклімату

Період року	Допустимі		
	t, °C	W, %	V, м/с
Теплий	22-28	55	0,1-0,2
Холодний	21-25	75	0,1

У приміщенні для підтримання оптимального мікроклімату функціонує система кондиціонування повітря з індивідуальним налаштуванням температурного режиму, централізована система опалення, а також регулярно проводиться вологе прибирання.

Склад повітря робочої зони

Для створення належних умов праці, окрім забезпечення комфортного мікроклімату, необхідно також подбати про якість повітря в робочій зоні. У процесі виробничої діяльності в повітря приміщення можуть потрапляти різноманітні шкідливі речовини, що використовуються в технологічних процесах. До шкідливих відносяться речовини, які при порушенні вимог безпеки можуть призвести до виробничих травм, професійних захворювань або негативно вплинути на стан здоров'я працівників як безпосередньо під час роботи, так і в довгостроковій перспективі, включаючи можливі наслідки для майбутніх поколінь.

В приміщенні, де здійснюється розробка системи зв'язку міліметрового діапазону, можливими шкідливими речовинами у повітрі є пил, озон та вуглекислий газ. Джерелами цих речовин є офісна техніка. Пил потрапляє у приміщення ззовні.

ГДК шкідливих речовин, згідно ДСН 3.3.6.042-99, які знаходяться в досліджуваному приміщенні, наведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – ГДК шкідливих речовин у повітрі

Назва речовини	ГДК, мг/м ³		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньо добова	
Пил нетоксичний	25	10	4
Озон	0,1	0,03	1
Вуглекислий газ	3	1	4

Параметри іонного складу повітря на робочому місці, що обладнане ПК, повинні відповідати допустимим нормам (табл. 4.3).

Таблиця 4.3 – Рівні іонізації повітря приміщень при роботі на ПК

Рівні	Кількість іонів в 1 см ³	
	n+	n-
Мінімально необхідні	400	600
Оптимальні	1500-3000	3000-5000
Максимально необхідні	50000	50000

Підтримання належної якості повітря в робочій зоні забезпечується комплексом заходів, що включає: використання системи кондиціонування для регулювання температури, вологості та рівня чистоти повітря; регулярне провітрювання з метою видалення шкідливих домішок, таких як пил, гази та пари; а також систематичне вологе прибирання для ефективного усунення пилу, бруду та мікроорганізмів з поверхонь. Всі ці дії є необхідними для збереження здоров'я працівників та створення сприятливого робочого середовища.

Виробниче освітлення

Освітлення виробничих приміщень характеризується як кількісними, так і якісними параметрами. Основними кількісними показниками є світловий потік, сила світла, яскравість та освітленість. Ключові якісні характеристики візуального сприйняття в робочому середовищі включають фон, контраст між об'єктом і фоном,

а також видимість. Недостатній або надмірний рівень освітлення, нерівномірний розподіл світла в полі зору, пульсація світла та спотворення кольорів освітлюваних об'єктів можуть спричиняти зорову та загальну втому. Занадто висока яскравість джерел світла може викликати головний біль, появу «мушок» перед очима та погіршення гостроти зору. Відблиски можуть призводити до тимчасового засліплення. Забруднені вікна та світильники знижують якість освітлення. Сліпучі лампи або різкі тіні можуть дезорієнтувати працівника. Усі ці фактори становлять потенційні ризики травматизму та можуть сприяти розвитку професійних захворювань.

Норми освітленості при штучному освітленні та КПО при природному та сумісному освітленні (згідно ДБН В.2.5-28:2018) зазначені у таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 - Норми освітленості в приміщенні

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об'єкта розрізнення	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Контраст об'єкта розрізнення з фоном	Характеристика фона	Освітленість, лк		КПО, e_n , %			
						Штучне освітлення		Природне освітлення		Сумісне освітлення	
						Комбіноване	Загальне	Верхнє або верхнє	Бокове	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове
Високої точності	0,3 -0,5	III	г	великий	світлий	700	300	5	2	3	1,2

Робоче місце обладнано таким чином, щоб запобігти прямому потраплянню світла в очі працівника. Для усунення небажаних світлових відблисків використовується обладнання з неблискучою (матовою) поверхнею. З метою захисту органів зору від прямого сонячного або штучного світла на вікнах встановлено захисні козирки та жалюзі. Застосовується система регулювання інтенсивності штучного освітлення залежно від рівня природного світла, а також можливість освітлення лише необхідних для виконання завдань зон приміщення за допомогою відповідних вимикачів. Для забезпечення якісного освітлення важливо максимально

використовувати наявне природне світло, регулярно проводити очищення вікон від забруднень та своєчасно замінювати перегорілі лампи.

Виробничий шум

Нормативним документом, який регламентує рівні шуму для різних категорій робочих місць службових приміщень, є ДСН 3.3.6.037-99. Норми шумового навантаження на працівника в процесі розробки системи зв'язку міліметрового діапазону наведені в табл. 4.5.

Таблиця 4.5 - Рівень звукового тиску

Характер робіт	Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах зі середньгеометричними частинами (Гц)									Допустимий рівень звуку, дБА
	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Виробничі приміщення	86	71	61	54	49	45	42	40	38	50

Основними заходами боротьби з шумом є усунення або ослаблення причин шуму в самому його джерелі у процесі роботи, використання звукопоглинаючих матеріалів, раціональне планування виробничих приміщень.

Виробничі випромінювання

Сучасне комп'ютерне обладнання характеризується високою енергоефективністю. До його складу входять різноманітні електричні та радіоелектронні пристрої, що функціонують на різних фізичних принципах. У процесі роботи ця техніка генерує навколо себе електричні та магнітні поля в широкому діапазоні частот та з різним просторовим розподілом. До потенційно небезпечних факторів також належать електромагнітне випромінювання радіочастотного діапазону та електромагнітні поля, що можуть створюватися іншими джерелами в робочому середовищі з комп'ютерною технікою. Вплив цих факторів на здоров'я працівників потребує впровадження відповідних заходів безпеки та постійного контролю.

Гранично допустимі рівні електромагнітного поля для працівника становлять наведені в таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 – Допустимі значення параметрів неіонізуючих електромагнітних випромінювань

Види поля	Допустимі параметри поля		Допустима поверхнева щільність потоку енергії (інтенсивність потоку енергії), Вт/м ²
	за електричною складовою (E), В/м	за магнітною складовою (H), А/м	
Напруженість електромагнітного поля, 6 кГц...3 МГц	50	5	
3 МГц...30МГц	2	-	
30 МГц...5 ГГц	-	-	10
Електромагнітне поле оптичного діапазону в ультрафіолетовій частині спектру: УФ-С (220...280 нм)			0,001
УФ-В (280...320 нм)			0,01
УФ-А (320...400 нм)			10,0
в інфрачервоній частині спектру: 0,76... 10,0 мкм			35,0... 70,0
Напруженість електричного поля ВДТ			20 ВВ/м

З метою мінімізації негативного впливу електромагнітного поля на розробника необхідно використовувати виключно сертифіковане та якісне комп'ютерне обладнання, що відповідає чинним стандартам безпеки. Крім того, суворе дотримання регламентованого часу роботи за персональним комп'ютером є обов'язковою умовою. Важливим є також оптимальне розміщення робочого місця відносно джерел ЕМП та інших працівників для мінімізації колективного впливу.

4.3 Пожежна безпека

Дане виробниче приміщення класифікується за пожежною небезпекою як категорія «Д», що означає наявність виключно негорючих матеріалів та речовин, які перебувають у холодному стані. За ступенем вогнестійкості ця дільниця належить до II ступеня, де несучі та огорожувальні конструкції виконані з природного або штучного бетону чи залізобетону. Мінімальні вимоги до межі вогнестійкості приміщення механічного цеху представлені у таблиці 4.7.

Таблиця 4.7 - Мінімальні межі вогнестійкості приміщення

Максимальна границя вогнестійкості / максимальна границя							
Стіни				Колони	Драбінні площадки, балкони	Плити, ін. несучі конструкції	Елемент и покрытия
Несучі	Самонесучі	Зов. несучі	Внутр. не несучі				
2/0	1/0	0,25/0	0,25/0	2/0	1/0	0,75/0	0,5/0

Технічні рішення системи запобігання пожежі

На робочому місці дослідника причинами пожежі можуть бути: коротке замикання (виникає при пошкодженні ізоляції проводів та їхньому з'єднанні, що призводить до різкого зростання струму та сильного нагрівання), перевантаження електромережі (підключення до однієї розетки надмірної кількості електроприладів, що перевищує допустиме навантаження на проводку), несправність електрообладнання (пошкодження, зношеність або неправильна експлуатація електроприладів, розеток, вимикачів, розподільних щитів), погані контакти в електричних з'єднаннях (ненадійні або окислені з'єднання проводів, що призводять до підвищеного опору, нагрівання та іскріння), куріння в заборонених місцях, використання несправного обладнання (експлуатація обладнання з дефектами, що можуть призвести до займання) тощо.

Система запобігання пожежі включає наступні технічні рішення:

1. Монтаж кабелів у металевих коробах, гофротрубах з негорючих матеріалів або з використанням кабелів з негорючою ізоляцією для запобігання займання електропроводки.
2. Встановлення автоматичних вимикачів (автоматів) відповідного номіналу в електричних щитах для захисту від надструмів та коротких замикань.

3. Періодичні огляди та перевірки електророзеток, вимикачів, світильників та офісної техніки кваліфікованим персоналом для виявлення та усунення можливих несправностей.

4. Визначення спеціально обладнаних зон для куріння, оснащених негорючими попільничками, та розміщення попереджувальних знаків про заборону куріння в інших місцях.

5. Обмеження кількості горючих матеріалів на робочих місцях, їх зберігання у металевих шафах або стелажах.

6. Заборона використання саморобних або несправних нагрівальних приладів, контроль за їх розміщенням на безпечній відстані від горючих матеріалів та їх відключення після закінчення робочого дня.

Технічні рішення системи протипожежного захисту

Технічні рішення системи протипожежного захисту є комплексом інженерних заходів та обладнання, спрямованих на виявлення пожежі, сповіщення про неї, обмеження її розповсюдження та забезпечення безпечної евакуації людей, а також гасіння пожежі на початковій стадії. Ці рішення поділяються на активні та пасивні системи.

Активні системи протипожежного захисту включають обладнання, яке спрацьовує автоматично або за командою людини для виявлення та ліквідації пожежі:

1) автоматична пожежна сигналізація – комплекс технічних засобів для виявлення пожежі на ранній стадії. Включає пожежні сповіщувачі (димові, теплові, полуменеві, газові), приймально-контрольні прилади, лінії зв'язку та системи оповіщення;

2) системи димовидалення та протидимного захисту – комплекс обладнання для видалення диму та токсичних продуктів горіння з приміщень та шляхів евакуації, а також для створення надлишкового тиску повітря в сходових клітках та ліфтових шахтах, що запобігає задимленню.

3) первинні засоби пожежогасіння - переносні та пересувні вогнегасники різних типів (порошкові, пінні, вуглекислотні), пожежні щити з інструментом (ломи, багри, лопати), азбестові полотна (кошми). В приміщенні розташовані порошкові

вогнегасники, які є універсальними та підходять для гасіння пожеж класів А (тверді горючі речовини), В (рідкі горючі речовини), С (газоподібні горючі речовини) та Е (електрообладнання під напругою до 1000 В). Для офісу площею до 20 м² зазвичай достатньо одного вогнегасника ВП-2 або ВП-3. Кількість вогнегасників збільшується залежно від площі та категорії пожежної небезпеки приміщення.

Пасивні системи протипожежного захисту включають будівельні конструкції, матеріали та планувальні рішення, спрямовані на запобігання поширенню вогню та диму:

- шляхи евакуації та евакуаційні виходи – безпечні маршрути для виходу людей з будівлі у випадку пожежі, які мають відповідну ширину, висоту, освітлення та позначення.

- облицювальні та оздоблювальні матеріали з нормованими показниками горючості та димоутворення - застосування матеріалів, що не сприяють швидкому поширенню вогню та утворенню значної кількості диму.

- протипожежні відстані - нормовані відстані між будівлями та спорудами для запобігання перекиданню вогню.

Ефективна система протипожежного захисту передбачає комплексне застосування як активних, так і пасивних заходів, що проектуються та реалізуються з урахуванням вимог чинних нормативних документів, пожежної небезпеки об'єкта та його функціонального призначення. Регулярне технічне обслуговування та перевірка працездатності всіх елементів системи є обов'язковою умовою її надійної роботи.

ВИСНОВКИ

У роботі розглянуто сучасні виклики бездротових мереж у контексті забезпечення великого радіуса дії та високої завадостійкості, особливо для сільськогосподарських IoT-сценаріїв. Аналіз чирп-модуляції (CSS) продемонстрував її переваги: високу шумостійкість, стійкість до багатопроменевих завад, низький PAPR та простоту цифрової реалізації. Окремо підкреслено можливості інтеграції CSS у стандарт Wi-Fi, що відкриває шлях до гібридних рішень з одночасним забезпеченням завадостійкого покриття на великих відстанях і сумісності з існуючою інфраструктурою.

Запропоновано архітектуру гібридної системи: сенсорні вузли з CSS-зв'язком та Wi-Fi-шлюз для передачі даних у хмару або на центральний сервер. Цей підхід дозволяє поєднати дальність та енергоефективність CSS з можливостями інтеграції через Wi-Fi. Детальний аналіз апаратних компонентів (ESP32 + RA-02 або SX127x) та сенсорних блоків підтвердив доцільність обраної конфігурації з огляду на вартість (~\$23–25 за вузол) і автономність понад 3 років при інтервалі передачі раз на 2 години. Продемонстровано логіку роботи мережі: вузли у сплячому режимі, періодичні вимірювання і передача через CSS до шлюзу, подальша передача через Wi-Fi на сервер.

Вибір MATLAB як середовища моделювання дозволив реалізувати генерацію, моделювання каналу зі згасанням, AWGN та Rayleigh-fading, а також процедуру кодування/декодування CSS-сигналів.

Проведені симуляції показали таке. Вплив відстані: при SF=7 стійкість до ~2–3 км з BER < 0.01; підвищення SF до 10–12 дозволяє зберігати зв'язок на 10+ км, але зі зниженням швидкості передачі. Вплив SF: компроміс між швидкістю (~5.5 кбіт/с для SF7) та завадостійкістю (~0.3 кбіт/с для SF12) підтверджує можливість адаптації режиму передачі під завдання конкретного сценарію. Вплив шуму та

багатопроменевих завад: за SNR 0–10 дБ і Rayleigh–fading CSS показує високу надійність при $SF \geq 9$, що є критично важливим для умов сільської місцевості з непередбачуваними перешкодами.

Практичні переваги та обмеження такі. Переваги: дальність до 10–15 км у відкритій місцевості, багаторічна автономність вузлів, низька вартість, гнучкість конфігурації для різних агросценаріїв, легка інтеграція в IoT-платформи через Wi-Fi-шлюз, масштабованість на сотні вузлів без значного погіршення якості зв'язку. Обмеження: зниження швидкості при великих SF, необхідність ретельного планування розміщення вузлів і розрахунку параметрів затухання, потенційні регуляторні обмеження частотних діапазонів у різних регіонах. Також слід враховувати деградацію акумуляторів та змінні умови навколишнього середовища, що можуть впливати на реальну автономність.

Перспективи подальших досліджень наступні. Гібридна інтеграція на рівні PHY Wi-Fi: вивчення можливості прямої підтримки CSS на фізичному рівні Wi-Fi-чипів, що дозволить обійти потребу в окремому радіомодулі, але потребує глибшої розробки апаратної частини та стандартів. Розробка протоколів мережевого рівня: оптимізація MAC та мережевих протоколів для роботи великої кількості CSS-вузлів з динамічним управлінням чергами передачі та енергозбереженням. Безпека та шифрування: впровадження ефективних методів захисту даних у CSS-мережах, враховуючи обмежені обчислювальні ресурси сенсорних вузлів. Інтеграція з іншими технологіями: дослідження крос-технологічних підходів (наприклад, CSS разом з NB-IoT або іншими LPWAN-технологіями) для забезпечення найбільш надійного зв'язку у різних сценаріях.

Виконана дипломна робота підтвердила, що використання чирп-модуляції у Wi-Fi-модулі є обґрунтованим з точки зору теорії та практики для побудови бездротових сенсорних мереж великого радіуса дії в аграрному секторі. Поєднання моделювання, аналізу енергоспоживання, проектування апаратної платформи та оцінки економічної доцільності створює цілісну картину, що підтверджує перспективність запропонованого рішення. Запропоновані рекомендації та напрями подальших досліджень дозволять поглибити результати та вивести систему до стадії

реального впровадження в умовах конкретних проектів точного землеробства.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Борківська О. О., Жураковський Б. Ю., Платоненко А. В. Інформаційна система розумного міста на базі технології LoRa // Кібербезпека: освіта, наука, техніка. 2022. № 4(16). С. 113–125. DOI: 10.28925/2663-4023.2022.16.113128.
2. Wang J., Zhang Y., Li Y., Wang L. A Low-Power LoRa-Based Sensor Node for IoT Applications // IEEE Sensors Applications Symposium (SAS). 2024. DOI: 10.1109/SAS56714.2024.9838667.
3. Texas Instruments. AFE79XX as a Chirp Signal Generator: Application Note SBAA635. 2024. 13 p. URL: <https://www.ti.com/lit/an/sbaa635/sbaa635.pdf>
4. Hossain M. S., Muhammad G. Cloud-Based Healthcare for Smart Cities: A Blockchain-Driven Approach // Smart Cities. 2020. Т. 3, № 1. С. 1–16. URL: <https://www.mdpi.com/2624-6120/3/1/1>
5. Buer E. Monitoring and Optimizing LoRaWAN for Smart Building Applications: Master's Thesis. Norwegian University of Science and Technology, 2021. URL: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/bitstream/handle/11250/2778119/no.ntnu:inspera:54579301:52175437.pdf>
6. Рябець О. Я. Дослідження методів оптимізації енергоспоживання в мережах IoT: Дипломна робота. Державний університет телекомунікацій, 2024. URL: <https://duikt.edu.ua/repositorii/ki/2024/Диплом%20Рябець%20О.Я.%20КМСД%2062.pdf>
7. Шевченко А. Г. Monitoring IoT Network Based on LoRaWAN and MQTT: Магістерська робота. Чорноморський національний університет імені Петра Могили, 2023. URL: <https://krs.chmnu.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/2745/1/Шевченко.pdf>
8. Мавдрик А. А. Методика побудови LoRaWAN систем: Магістерська дисертація. НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського", 2020. URL:

<https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/1e3fc5a1-3244-46e0-b9bc-f402402607e7/content>

9. Azim A. W., Bazzi A., Bomfin R., Shubair R., Chafii M. Layered Chirp Spread Spectrum Modulations for LPWANs // IEEE Trans. on Communications. 2024. T. 72, № 3. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10735371>
10. Chen H., Li H., Xiao Z., Gao L., Zhang Q., Hu X., Wang N., Fu X., Zhao J. ALPS: Attention Localization and Pruning Strategy for Efficient Alignment of Large Language Models
11. Ali F. H., Han D. A Tutorial on Chirp Spread Spectrum Modulation for LoRaWAN: Basics and Key Advances // ResearchGate. 2024. URL: <https://www.researchgate.net/publication/382580029>
12. F. R. Andersen, K. D. Ballal, M. N. Petersen, and S. Ruepp, "Ranging Capabilities of LoRa 2.4 GHz," in IEEE WF-IoT, 2020 DOI:10.1007/978-3-031-20977-2_2
13. "BLE2LoRa: Cross-Technology Communication from Bluetooth to LoRa via Chirp Emulation," in IEEE SECON, 2020. DOI: 10.1109/SECON48991.2020.915844678
14. W. Jiang, Z. Yin, R. Liu, Z. Li, S. M. Kim, and T. He, "BlueBee: A 10,000x Faster Cross-Technology Communication via PHY Emulation," in ACM SenSys, 2017
15. Michelle Hampson "Wi-Fi Goes Long Range on New WiLo Approach The new technique could underpin agricultural sensor networks and smart cities" URL: <https://spectrum.ieee.org/wi-fi-lora-hybrid>
16. L. Aldhaheeri et al., "LoRa Communication for Agriculture 4.0: Opportunities, Challenges, and Future Directions," in IEEE Internet of Things Journal, vol. 12, no. 2, pp. 1380-1407, 15 Jan.15, 2025, doi: 10.1109
17. S. Ahmad, M. Ahmad and S. Y. Shin, "Dual PHY Layer Multiple Access Transceiver for Next Generation 6G Networks," 2024 15th International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC), Jeju Island, Korea, Republic of, 2024, pp. 1187-1192, doi: 10.1109/ICTC62082.2024.10827475.
18. ДСТУ OHSAS 18002:2015. Системи управління гігієною та безпекою праці. Основні принципи виконання вимог OHSAS 18001:2007 (OHSAS 18002:2008, IDT). К. : ГП «УкрНИУЦ», 2016. 21 с.

19. НПАОП 0.00-7.15-18 Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями. URL: http://sop.zp.ua/norm_npaop_0_00-7_15-18_01_ua.php.

20. Гігієнічна класифікація праці (за показниками шкідливості і небезпеки факторів виробничого середовища від 12.08.1986 № 4137-86. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/v4137400-86>

21. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>

22. ДБН В.2.5-28-20018 Природне і штучне освітлення - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/prirodne-i-shtuchne-osvitlennja-nor8425.html>

23. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>

24. ДСНіПЗ.3.6.096-2002. Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів. <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z0203-03>.

25. ДСанПіН 3.3.6-2002 Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://zakon.nau.ua/doc/?code=z0203-03>

26. НПАОП 0.00-7.11-12. Загальні вимоги стосовно забезпечення роботодавцями охорони праці працівників. URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0226-12>.

27. ДСТУ Б В.1.1-36:2016 Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпек. URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_b_v_1_1_36/5-1-0-1759.

28. ДБН В.1.1-7:2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. URL: http://www.poliplast.ua/doc/dbn_v.1.1-7-2002.pdf.

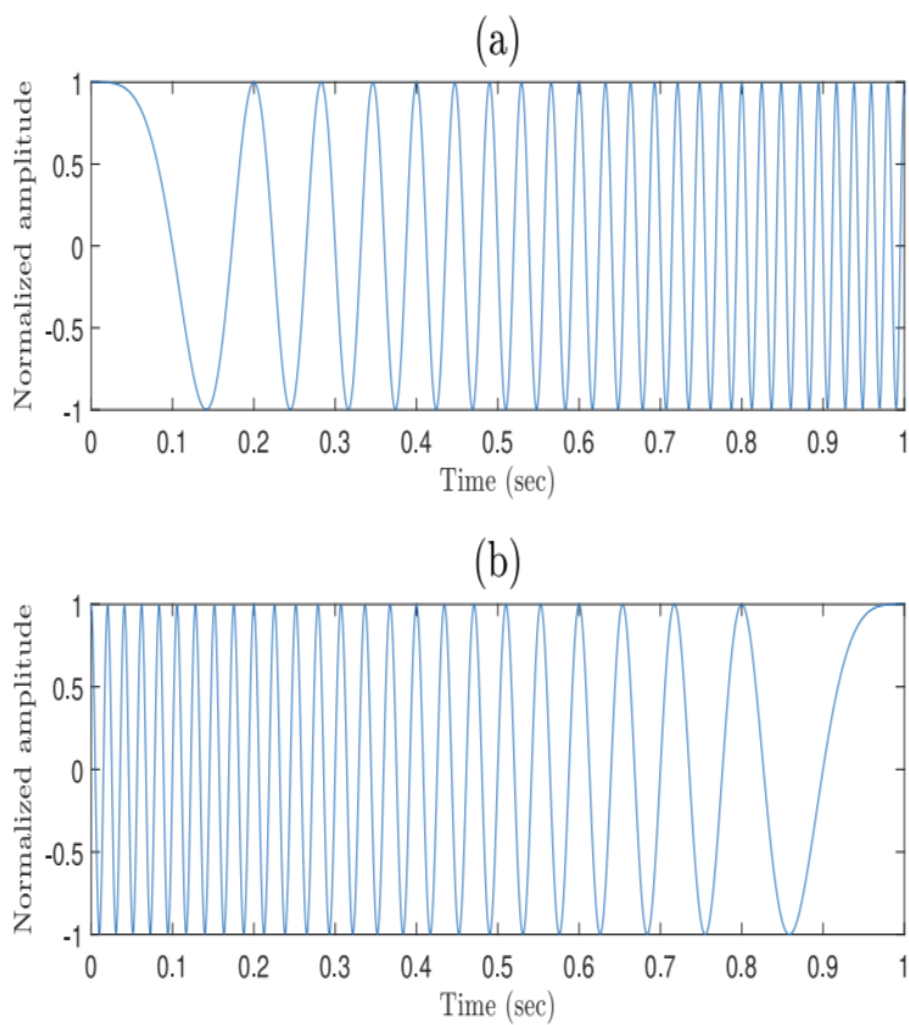
29. Наказ Міністерства внутрішніх справ України «Про затвердження Правил експлуатації та типових норм належності вогнегасників». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0225-18#Text>.

Додаток А
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

Використання чирп модуляції у Wi-Fi модулях для підвищення радіусу зв'язку

назва бакалаврської кваліфікаційної роботи

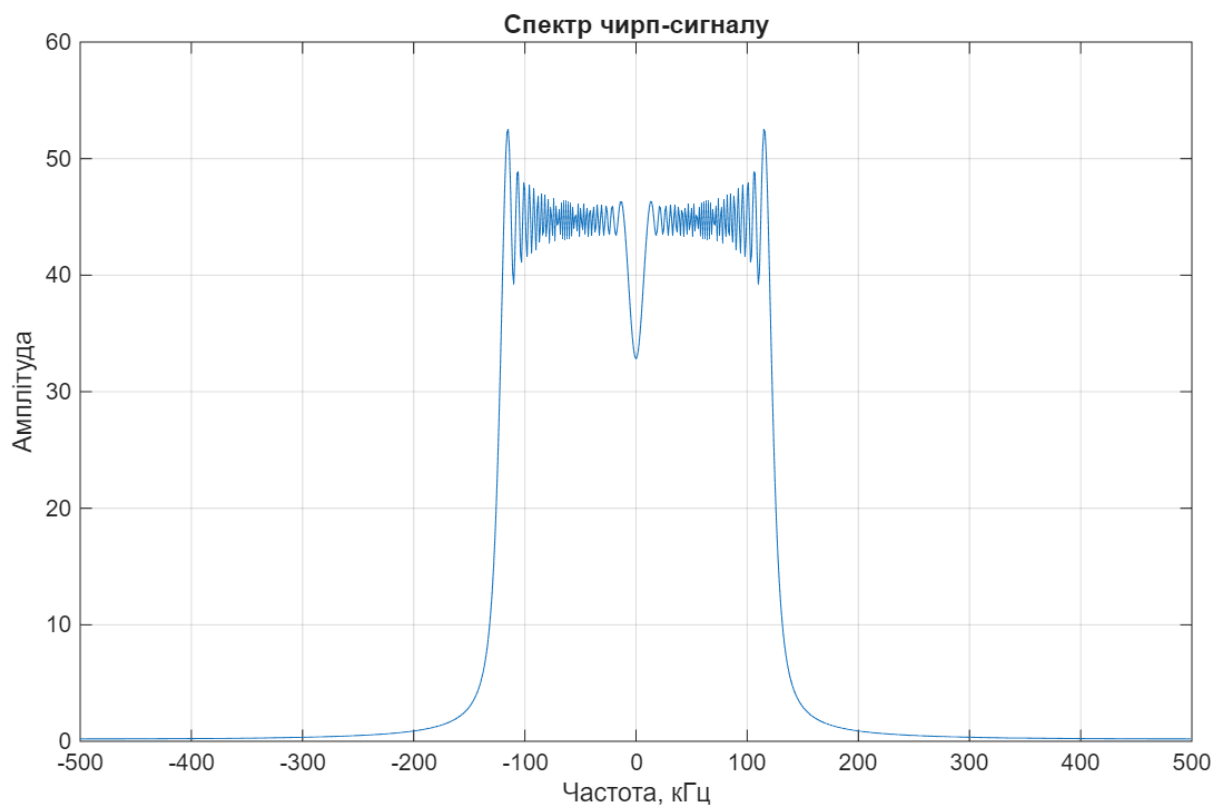
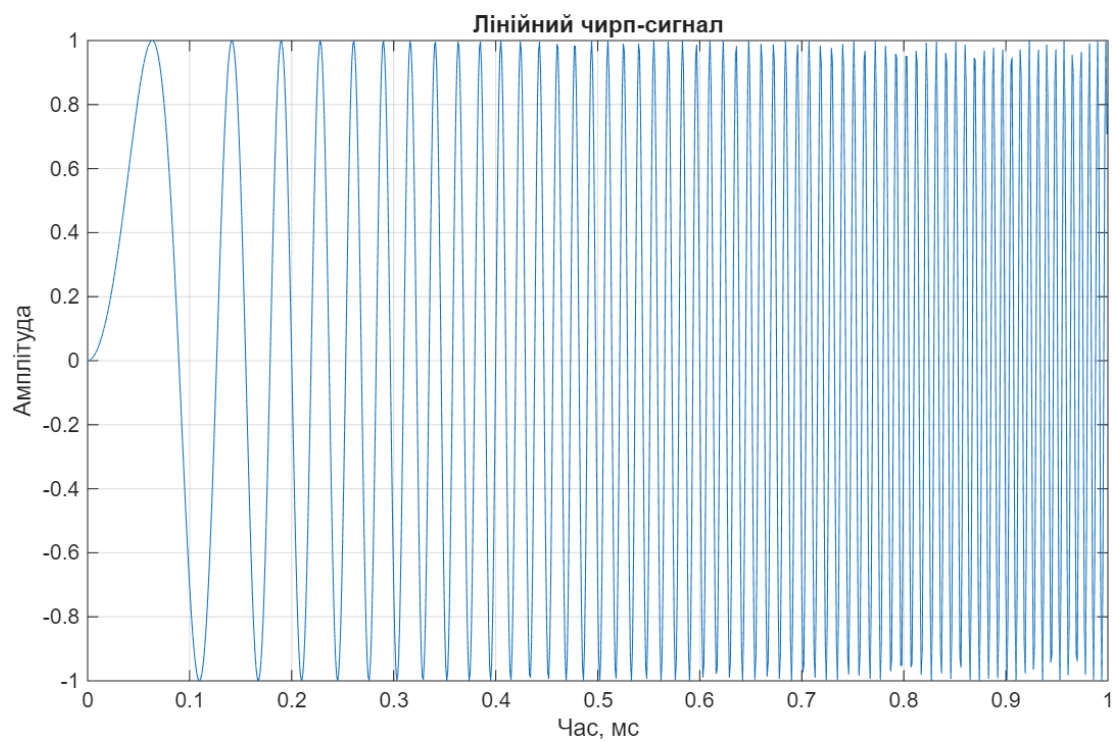


Синусоїдальний сигнал з висхідним чирпом (а) та синусоїдальний сигнал з низхідним чирпом (б)

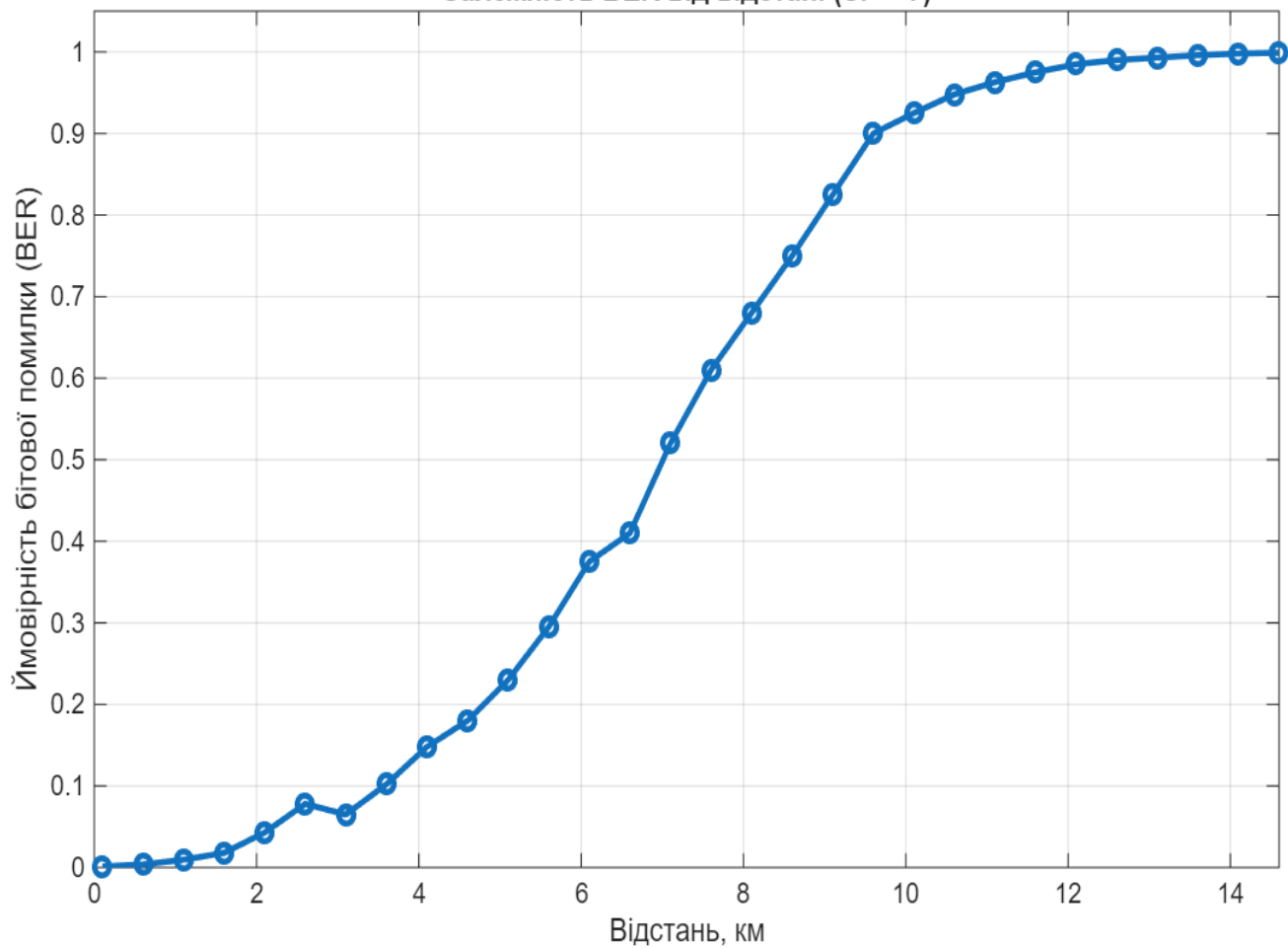
Порівняння покриття різних технологій

Технологія	Тип модуляції	Покриття
WiFi	Бездротовий стандарт IEEE 802.11 (2,4 ГГц і 5 ГГц)	Від 20 до 100 м
Zigbee	Бездротовий стандарт IEEE 802.15.4 (діапазон ISM 2,4 ГГц і 5 ГГц)	Від 10 до 100 м
RFID	Бездротовий стандарт IEEE 802.15.4 (LF: 125-134 кГц, HF: 13,56 МГц, UHF: 433 МГц, 860-960 МГц та 2,45 ГГц)	Пасивний RFID до 10 м, активний RFID до 100 м
Стільниковий зв'язок	Бездротовий IEEE 802.11 (до 2 ГГц для 3G, до 8 ГГц для 4G і до 30 ГГц для 5G)	до 10 км
Bluetooth	Бездротовий IEEE 802.15.3-2003 та IEEE 802.15.3b2005 (MAC та PHY)	Bluetooth v2.1 - до 100 м, Bluetooth 4.0 (LE) - до 100 м, Bluetooth 5 (LE) - до 400 м
LoRa	IEEE SA - P1451.5.5 (від 150 МГц до 1020 МГц)	До 5 км (міські), до 10 км (приміські) та до 20 км (сільські)

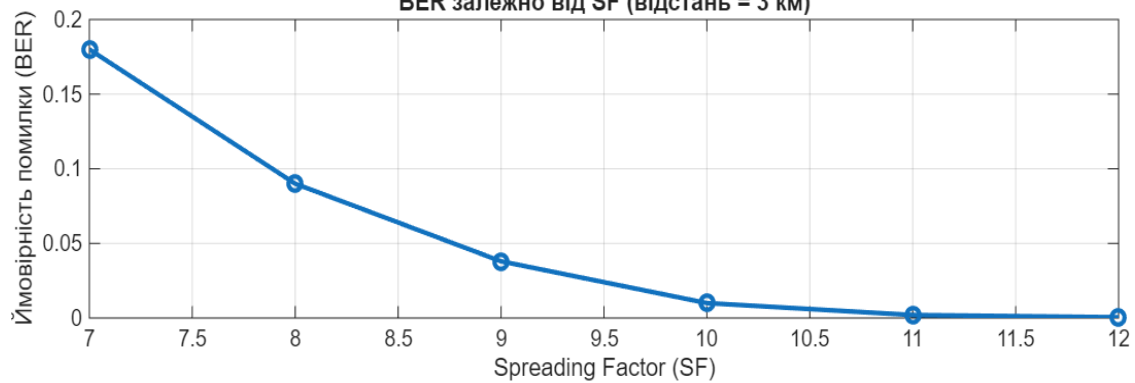
Візуалізація сигналу в часовій області



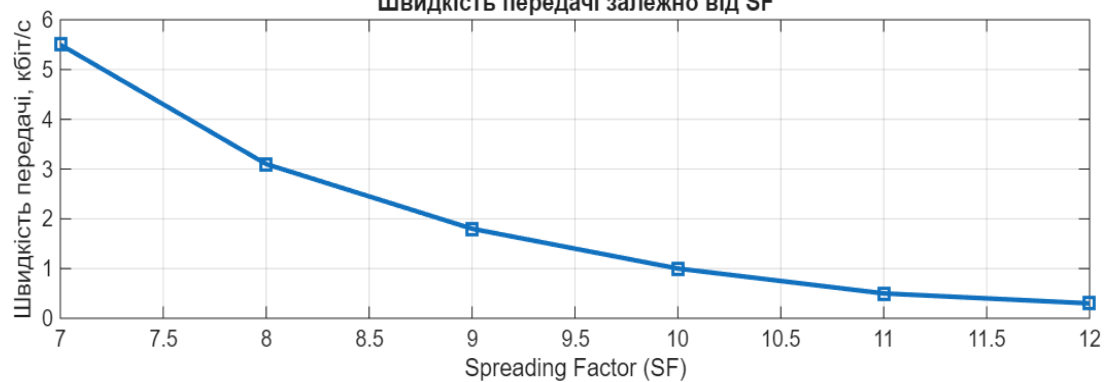
Залежність BER від відстані (SF = 7)



BER залежно від SF (відстань = 3 км)



Швидкість передачі залежно від SF



Повний код Симуляції 1:

```
% Налаштування параметрів CSS
SF = 7;
M = 2^SF;
fs = 1e6; % Частота дискретизації
T = 1e-3; % Тривалість символу
N = round(T * fs); % Кількість відліків
BW = 125e3;
f0 = 0; f1 = BW;
t = (0:N-1)/fs; % Вектор часу

% Базовий чирп
base_chirp = exp(1j*2*pi*(f0*t + ((f1 - f0)/(2*T))*t.^2));

% Параметри середовища
d0 = 1; % опорна відстань, м
n = 2.7; % коефіцієнт затухання
SNR_dB = 10; % фіксований рівень шуму

% Вектор відстаней (м)
distances = 100:500:15000;
BER = zeros(size(distances));
trials = 100;

% Головний цикл по відстанях
for idx = 1:length(distances)
    d = distances(idx);
    errors = 0;

    for i = 1:trials
        % Генерація випадкового символу
        k = randi([0 M-1]);

        % Кодування: циклічний зсув базового чирпу
        tx_chirp = circshift(base_chirp, round(k * N / M));

        % Модель затухання (path loss)
        path_loss_dB = 10 * n * log10(d / d0);
```

```

        attenuation = 10^(-path_loss_dB / 20); % ослаблення
в амплітуді
        tx_signal = attenuation * tx_chirp;

        % Додавання білого гаусового шуму
        rx_signal = awgn(tx_signal, SNR_dB, 'measured');

        % Де-чирпінг
        dechirped = rx_signal .* conj(base_chirp);
        spectrum = abs(fft(dechirped));

        % Визначення положення максимуму
        [~, k_hat] = max(spectrum);
        k_decoded = mod(k_hat - 1, M);

        % Порівняння
        if k_decoded ~= k
            errors = errors + 1;
        end
    end

    % Обчислення ймовірності помилки
    BER(idx) = errors / trials;
end

% Побудова графіку
figure;
plot(distances/1000, BER, '-o', 'LineWidth', 2);
xlabel('Відстань, км');
ylabel('Ймовірність помилки (BER)');
title(['BER залежно від відстані (SF = ' num2str(SF) ', SNR
= ' num2str(SNR_dB) ' дБ)']);
grid on;

```

Додаток Б

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Використання чирп модуляції у Wi-Fi модулях для підвищення радіусу зв'язку

Тип роботи: бакалаврська кваліфікаційна робота
(бакалаврська кваліфікаційна робота / магістерська кваліфікаційна робота)

Підрозділ кафедра ІКСТ, факультет ІЕС, група ПЗТ-216
(кафедра, факультет, навчальна група)

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism 0.72 %

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

- ☒ Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту
- ☐ У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.
- ☐ У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

Кичак В.М., завідувач кафедри ІКСТ

(прізвище, ініціали, посада)

Васильківський М.В., гарант ОПІ

(прізвище, ініціали, посада)

(підпис)

(підпис)

Особа, відповідальна за перевірку

(підпис)

Васильківський М.В.

(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник

(підпис)

Крижановський В.Г., професор кафедри ІКСТ

(прізвище, ініціали, посада)

Здобувач

(підпис)

Підлісний П.В.

(прізвище, ініціали)