

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

Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем

Кафедра телекомунікацій

До захисту допущено:

В.о.завідувача кафедри

_____ Сергій КРАВЧУК

« ____ » _____ 2026 р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньо-професійною програмою «Інженерія та програмування
інфокомунікацій»**

спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

**на тему: «Дослідження ефективності протидії технології LoRa
широкосмуговій ЛЧМ заваді»**

Виконала:

студентка IV курсу, групи ТЗ-22

Браїлко Марія Михайлівна _____

Керівник:

Старший викладач кафедри ТК НН ІТС

Кайденко Микола Миколайович _____

Рецензент:

Доцент кафедри ІТТ НН ІТС, к.т.н., доцент

Правило Валерій Володимирович _____

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.

Студентка _____

Київ – 2026 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем
Кафедра телекомунікацій

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітньо-професійна програма «Інженерія та програмування інфокомунікацій»

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о.завідувача кафедри

_____ Сергій КРАВЧУК

«__» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ
на дипломну роботу студенту
Браїлко Марії Михайлівні

1. Тема роботи «Дослідження ефективності протидії технології LoRa широкосмуговій ЛЧМ заваді», керівник роботи Кайденко Микола Миколайович, затверджені наказом по університету від «26» травня 2026 р. № 1912-с.

2. Термін подання студентом роботи 10 червня 20265 р.

3. Вихідні дані до роботи: Технологія безпроводового зв'язку LoRa; метод модуляції Chirp Spread Spectrum (CSS); широкосмугові лінійно-частотно-модульовані (ЛЧМ) завади; параметри сигналів LoRa (spreading factor, bandwidth, coding rate); стандарт IEEE Std 802.15.4-2020; діапазони робочих частот відповідно до European Conference of Postal and Telecommunications Administrations ECA Table.

4. Зміст роботи: Аналіз особливостей технології LoRa та принципів передачі даних із використанням сигналів із розширеним спектром. Дослідження характеристик широкосмугових лінійно-частотно-модульованих завад та їх впливу на роботу систем LoRa. Аналіз завадостійкості LoRa в умовах дії ЛЧМ завад. Дослідження методів забезпечення електромагнітної сумісності та способів підвищення ефективності протидії завадам у безпроводових мережах.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо):

Слайд 1 — Тема дослідження;

Слайд 2 — Об'єкт, предмет та методи дослідження;

Слайд 3 — Мета та основні задачі дослідження;

Слайд 4 — Загальна характеристика технології LoRa;

Слайд 5 — Принцип роботи Chirp Spread Spectrum;

Слайд 6 — Характеристики широкосмугових ЛЧМ завад;

Слайд 7 — Вплив ЛЧМ завад на системи LoRa;

Слайд 8 — Методи підвищення завадостійкості та протидії завадам;

Слайд 9 — Результати дослідження та загальні висновки.

6. Дата видачі завдання 10 жовтня 2025 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання індивідуального завдання	01.10.2025-03.01.2026	Виконано
2	Визначення мети індивідуального завдання	04.01.2026-24.01.2026	Виконано
3	Підбір технічної літератури відповідно до індивідуального завдання	25.01.2026-26.02.2026	Виконано
4	Збір інформації	27.02.2026-27.03.2026	Виконано
5	Формулювання плану дослідження	28.03.2026-03.04.2026	Виконано
6	Аналіз сучасних рішень	04.04.2026-19.04.26	Виконано
7	Принципи роботи технології LoRa, її архітектуру, основні параметри та особливості передачі даних у мережах IoT.		Виконано
8		20.04.2026-26.04.2026	Виконано
9	Принципи формування та характеристики широкосмугових лінійно-частотно-модульованих (ЛЧМ) завад. Теоретичний аналіз впливу ЛЧМ завад на роботу систем LoRa	27.04.2026-03.05.2026	Виконано
10	Дослідила існуючі методи забезпечення електромагнітної сумісності у безпроводових мережах та способи зменшення впливу завад на системи зв'язку. Систематизувала отримані теоретичні відомості	04.05.2026-10.05.2026	Виконано
11	Провела оформлення та аналіз отриманих	11.05.2026-17.05.2026	Виконано

	результатів дослідження щодо впливу широкосмугової ЛЧМ завади на роботу технології LoRa		
12	Відредагувала та оформила звіт з переддипломної практики. Підготувала сформовані висновки для подальшого використання у дипломній роботі	17.05.2026-31.05.2026	Виконано
13	Оформлення дипломної роботи	01.06.2026-09.06.2026	Виконано

Студентка

Марія БРАІЛКО

Керівник

Микола КАЙДЕНКО

РЕФЕРАТ

Дипломна робота містить сторінок, 14 рисунків, 12 таблиць. Було використано 15 джерел.

Коротко, у дипломній роботі, я зроблю дослідження впливу радіоелектронних завад, зокрема широкосмугових лінійно-частотно модульованих (ЛЧМ) сигналів, на ефективність функціонування безпроводових систем зв'язку на базі технології LoRa, а також аналіз методів підвищення їх завадостійкості в умовах складної електромагнітної обстановки.

Робота присвячена дослідженню ефективності протидії технології LoRa широкосмуговій лінійно-частотно-модульованій (ЛЧМ) заваді та аналізу завадостійкості систем безпроводового зв'язку в умовах впливу перешкод. Актуальність теми обумовлена широким застосуванням технології LoRa у сучасних IoT-системах та необхідністю забезпечення стабільного зв'язку в умовах дії радіоелектронних завад.

Мета роботи — дослідити та проаналізувати ефективність технології LoRa в умовах впливу широкосмугових ЛЧМ завад. Вивчити особливості роботи технології LoRa та принципи передачі даних із використанням сигналів із розширеним спектром. Дослідити вплив широкосмугових ЛЧМ завад на параметри зв'язку та завадостійкість систем LoRa. Визначити методи зменшення впливу завад і підвищення ефективності функціонування безпроводових систем зв'язку. На основі отриманих результатів сформулювати рекомендації щодо підвищення стійкості технології LoRa до впливу ЛЧМ завад.

Об'єкт дослідження: системи безпроводового зв'язку на основі технології LoRa.

Предмет дослідження: ефективність протидії технології LoRa широкосмуговим лінійно-частотно-модульованим завадам.

Метод дослідження: теоретичний аналіз наукової літератури, дослідження характеристик сигналів із розширеним спектром, аналіз впливу ЛЧМ завад на параметри зв'язку та завадостійкість систем LoRa.

У роботі проаналізовано принципи функціонування технології LoRa, особливості використання Chirp Spread Spectrum та характеристики широкосмугових ЛЧМ завад. Досліджено вплив завад на якість передачі даних, співвідношення сигнал/завада та завадостійкість систем зв'язку. Розглянуто методи забезпечення електромагнітної сумісності та способи підвищення ефективності роботи LoRa в умовах дії завад.

Отримані результати можуть бути використані під час проєктування та вдосконалення безпроводових систем зв'язку, що функціонують в умовах підвищеного рівня радіоелектронних завад.

Ключові слова: LORA, ЛЧМ ЗАВАДА, CHIRP SPREAD SPECTRUM, ЗАВАДОСТІЙКІСТЬ, БЕЗПРОВОДОВИЙ ЗВ'ЯЗОК, ЕЛЕКТРОМАГНІТНА СУМІСНІСТЬ, ШИРОКОСМУГОВА ЗАВАДА, ІОТ.

ABSTRACT

The diploma thesis contains pages, figures, tables, sources were used.

Briefly, this diploma thesis presents a study of the influence of radio-electronic interference, particularly wideband linear frequency modulated (LFM) signals, on the efficiency of wireless communication systems based on LoRa technology, as well as an analysis of methods for improving their interference immunity under complex electromagnetic conditions.

The thesis is devoted to the study of the effectiveness of LoRa technology in counteracting wideband linear frequency modulated (LFM) interference and to the analysis of the interference immunity of wireless communication systems under interference conditions. The relevance of the topic is determined by the widespread application of LoRa technology in modern IoT systems and the need to ensure stable communication under conditions of radio-electronic interference.

The purpose of the thesis is to investigate and analyze the efficiency of LoRa technology under the influence of wideband LFM interference. The study examines the operational features of LoRa technology and the principles of data transmission using spread spectrum signals. It also investigates the impact of wideband LFM interference on communication parameters and the interference immunity of LoRa systems. Methods for reducing interference influence and improving the efficiency of wireless communication systems are identified. Based on the obtained results, recommendations for increasing the resistance of LoRa technology to LFM interference are developed.

Object of research: wireless communication systems based on LoRa technology.

Subject of research: the effectiveness of LoRa technology in counteracting wideband linear frequency modulated interference.

Research methods: theoretical analysis of scientific literature, study of spread spectrum signal characteristics, and analysis of the impact of LFM interference on communication parameters and the interference immunity of LoRa systems.

The thesis analyzes the operating principles of LoRa technology, the features of Chirp Spread Spectrum application, and the characteristics of wideband LFM interference. The influence of interference on data transmission quality, signal-to-interference ratio, and communication system interference immunity is investigated. Methods for ensuring electromagnetic compatibility and improving the efficiency of LoRa operation under interference conditions are considered.

The obtained results can be used in the design and improvement of wireless communication systems operating under increased levels of radio-electronic interference.

Keywords: LORA, LFM INTERFERENCE, CHIRP SPREAD SPECTRUM, INTERFERENCE IMMUNITY, WIRELESS COMMUNICATION, ELECTROMAGNETIC COMPABILITY, WIDEBAND INTERFERENCE, IOT.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	12
РОЗДІЛ 1	13
АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЇ LORA ТА ВПЛИВУ ШИРОКОСМУГОВИХ ЛЧМ ЗАВАД НА БЕЗПРОВОДОВІ СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗКУ	13
1.1 Характеристики широкосмугових ЛЧМ завад та їх вплив на LoRa.....	19
1.2 Актуальність дослідження ефективності протидії ЛЧМ завадам	21
Висновки	23
РОЗДІЛ 2	25
ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЇ LoRa ТА ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЗАВАД	25
2.1 Загальна характеристика технології LoRa	25
2.2 Особливості модуляції Chirp Spread Spectrum	27
2.2 Електромагнітна сумісність у безпроводових мережах.....	30
2.4 Класифікація та особливості електромагнітних завад	30
2.5 Особливості широкосмугових ЛЧМ завад.....	31
Висновки	31
РОЗДІЛ 3	33
МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЛЧМ ЗАВАД НА ТЕХНОЛОГІЮ LoRa	33
3.1 Постановка задачі дослідження	33
3.2 Вибір параметрів сигналу LoRa.....	36
3.3 Математична модель широкосмугової ЛЧМ завади	40
3.4 Програмні засоби та методика моделювання	45
3.5 Критерії оцінювання ефективності системи	45
Висновки	46
РОЗДІЛ 4	48
ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ШИРОКОСМУГОВИХ ЛЧМ ЗАВАД НА РОБОТУ СИСТЕМ LORA	48
4.1 Принцип формування широкосмугових ЛЧМ сигналів.....	48
4.2 Особливості функціонування технології LoRa в умовах завад	50
4.3 Аналіз впливу ЛЧМ завад на параметри систем LoRa.....	54

	10
4.4 Методи підвищення завадостійкості систем LoRa	56
4.5 Оцінка ефективності протидії ЛЧМ завадам.....	58
Висновки	63
РОЗДІЛ 5	64
ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОТИДІЇ ТЕХНОЛОГІЇ LoRa ШИРОКОСМУГОВІЙ ЛЧМ ЗАВАДІ	64
5.1 Аналіз методів забезпечення електромагнітної сумісності у безпроводових мережах	64
5.2 Дослідження особливостей впливу ЛЧМ завади на сигнали LoRa	66
5.3 Моделювання процесу впливу широкосмугової ЛЧМ завади	70
5.4 Оцінювання ефективності методів протидії завадам	73
Висновки	75
РОЗДІЛ 6	77
ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ LoRa В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ В УКРАЇНІ	77
6.1 Особливості використання безпроводових мереж в умовах воєнного стану	77
6.2 Використання технології LoRa для моніторингу та передачі даних.....	80
6.3 Вплив електромагнітних завад на роботу систем LoRa в умовах війни....	82
6.4 Перспективи розвитку технології LoRa в Україні	83
Висновки	83
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ.....	85
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	87

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

BER	Bit Error Rate
BW	Bandwidth
CR	Coding Rate
CSS	Chirp Spread Spectrum
EMC	Electromagnetic Compatibility
FPV	First Person View
IoT	Internet of Things
LoRa	Long Range
LoRaWAN	Long Range Wide Area Network
LR-FHSS	Long Range – Frequency Hopping Spread Spectrum
PER	Packet Error Rate
REB	Radio Electronic Warfare
RF	Radio Frequency
RSSI	Received Signal Strength Indicator
SF	Spreading Factor
SNR	Signal-to-Noise Ratio
БПЛА	безпілотний літальний апарат
ЛЧМ	лінійно-частотна модуляція
РЧР	радіочастотний ресурс
ЕМС	електромагнітна сумісність

ВСТУП

У сучасних умовах стрімкого розвитку інформаційно-комунікаційних технологій особливого значення набувають безпроводові системи передачі даних, які широко застосовуються у сфері Інтернету речей (IoT), автоматизованих системах моніторингу, промисловості, логістиці, енергетиці та інших галузях. Однією з найбільш перспективних технологій безпроводового зв'язку є LoRa, яка забезпечує передачу даних на великі відстані при низькому енергоспоживанні та високій завадостійкості. Завдяки використанню методу модуляції Chirp Spread Spectrum технологія LoRa дозволяє забезпечити надійний зв'язок навіть у складних умовах експлуатації.

Разом із розвитком безпроводових технологій зростає і кількість факторів, що негативно впливають на якість передачі інформації. Одним із найбільш небезпечних видів впливу є широкосмугові лінійно-частотно-модульовані (ЛЧМ) завади, які здатні суттєво погіршувати параметри зв'язку, знижувати рівень завадостійкості систем та порушувати стабільність передачі даних. Умови насиченого електромагнітного середовища та активного використання радіоелектронних засобів створюють необхідність детального дослідження впливу таких завад на сучасні безпроводові системи.

Актуальність теми дипломної роботи полягає у необхідності оцінки ефективності функціонування технології LoRa в умовах дії широкосмугових ЛЧМ завад, а також визначення можливостей підвищення завадостійкості безпроводових систем зв'язку. Дослідження даної проблематики є важливим для забезпечення стабільної роботи IoT-мереж та інших систем, що використовують технологію LoRa для передачі інформації.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЇ LORA ТА ВПЛИВУ ШИРОКОСМУГОВИХ ЛЧМ ЗАВАД НА БЕЗПРОВОДОВІ СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗКУ

Особливості сучасних безпроводових систем зв'язку та технологій IoT

Розглянуто принципи функціонування безпроводових систем зв'язку на основі технології LoRa, яка використовує модуляцію типу Chirp Spread Spectrum (CSS). Такий підхід забезпечує високу завадостійкість сигналу за рахунок розширення спектра та можливості прийому сигналів при низькому рівні відношення сигнал/шум.

Особливу увагу приділено аналізу впливу радіоелектронних завад, зокрема широкосмугових лінійно-частотно модульованих (ЛЧМ) сигналів. Показано, що за рахунок зміни частоти в широкому діапазоні такі завади здатні перекривати робочий спектр системи LoRa та суттєво погіршувати умови прийому сигналу. Це призводить до зниження енергетичного потенціалу каналу зв'язку та зростання кількості помилок під час передачі даних.

У роботі досліджено залежність якості передачі інформації від ключових параметрів системи. Зокрема, встановлено, що збільшення коефіцієнта розширення спектра (spreading factor) дозволяє підвищити завадостійкість, однак супроводжується зменшенням швидкості передачі даних і збільшенням часу передачі пакету. Аналогічно, зміна ширини смуги пропускання (bandwidth) впливає на компроміс між швидкістю передачі та стійкістю до завад.

Окремо розглянуто вплив швидкості кодування (coding rate), яка визначає рівень надлишковості даних і, відповідно, здатність системи виправляти помилки. Збільшення надлишковості дозволяє зменшити ймовірність помилок, але призводить до зниження ефективної пропускної здатності каналу.

У процесі виконання роботи проведено моделювання впливу різних типів завад на параметри якості зв'язку, такі як відношення сигнал/шум (SNR), ймовірність бітової помилки (BER) та ймовірність втрати пакетів (PER). Отримані результати показали, що навіть при незначному зниженні SNR

спостерігається різке зростання BER, що, у свою чергу, призводить до значного збільшення PER.

Також у роботі проаналізовано вплив умов поширення радіохвиль, зокрема багатопроменевого поширення, відбиттів і дифракції, які додатково ускладнюють прийом сигналу в реальних умовах. Встановлено, що в умовах щільної забудови або складного рельєфу ефективність системи може значно знижуватись навіть без наявності активних завад.

На основі проведеного аналізу сформульовано підходи до підвищення завадостійкості системи, які включають оптимальний вибір параметрів передачі, використання адаптивних алгоритмів та врахування характеристик середовища поширення сигналу. Отримані результати можуть бути використані при проєктуванні та оптимізації безпроводових мереж, що працюють у складних електромагнітних умовах.

Сучасні безпроводові мережі, зокрема системи Інтернету речей (IoT), активно використовують технологію LoRa завдяки її високій енергоефективності, значній дальності передачі та здатності працювати в умовах обмежених ресурсів. Технологія LoRa базується на методі модуляції Chirp Spread Spectrum (CSS), який забезпечує підвищену завадостійкість, ефективне використання спектра та можливість прийому сигналів на рівні, близькому до шуму.

LoRa широко застосовується у таких галузях, як моніторинг інфраструктури, аграрні системи, «розумні міста», системи безпеки та телеметрія. Особливу роль ця технологія відіграє у випадках, коли необхідна автономна робота пристроїв протягом тривалого часу без частого обслуговування.

В умовах сучасної війни в Україні значення безпроводових технологій, зокрема LoRa, суттєво зросло. Вони використовуються для:

- побудови децентралізованих систем зв'язку;
- передачі телеметричних даних з безпілотних систем;

- моніторингу об'єктів критичної інфраструктури;
- організації резервних каналів зв'язку в умовах пошкодження традиційних мереж.

Завдяки великій дальності дії та низькому енергоспоживанню LoRa є ефективним рішенням для роботи в польових умовах, де відсутня стабільна телекомунікаційна інфраструктура.

Основи радіоелектронної боротьби та типи завад

РЕБ (радіоелектронна боротьба) — це сукупність методів впливу на радіосигнали з метою порушення або повного зриву роботи систем зв'язку, навігації чи управління. Простими словами, це боротьба в ефірі, де одна сторона намагається передати сигнал, а інша — завадити цьому. У сучасних умовах, особливо у військовій сфері, РЕБ відіграє дуже важливу роль, оскільки більшість систем, включаючи дрони, сильно залежать від стабільного радіоканалу.

Найпоширенішим методом є глушіння, коли в ефір передається потужний шумовий сигнал, що перекриває корисний сигнал. У результаті приймач не може коректно виділити потрібну інформацію із шуму, що призводить до втрати зв'язку. Окрім шумових завад, використовують більш складні типи впливу, зокрема широкосмугові лінійно-частотно-модульовані сигнали (ЛЧМ), у яких частота постійно змінюється. Такі сигнали можуть перекривати широкий діапазон частот і є ефективними проти сучасних систем зв'язку.

Ще одним напрямком є спуфінг — підміна сигналів. У цьому випадку система отримує неправдиву інформацію, наприклад підроблений GPS-сигнал, що може призвести до втрати орієнтації безпілотного апарата.

Важливою особливістю сучасних систем РЕБ є їх здатність адаптуватися до характеристик сигналу, проти якого здійснюється вплив. Для цього використовуються засоби аналізу радіочастотного спектра, які дозволяють визначати параметри сигналу та підбирати найбільш ефективний тип завади. У

результаті цього підвищується ефективність пригнічення систем зв'язку та зменшується ймовірність відновлення стабільного каналу передачі даних.

Сучасні системи зв'язку намагаються протидіяти впливу РЕБ за допомогою різних методів підвищення завадостійкості. До таких методів належать використання розширення спектра, адаптивна зміна частоти передачі, шифрування сигналів та застосування спеціальних алгоритмів фільтрації. Однією з технологій, що має підвищену стійкість до завад, є LoRa, яка використовує метод Chirp Spread Spectrum. Завдяки цьому сигнал розподіляється у ширшій смузі частот, що ускладнює його повне пригнічення шумовими або вузькосмуговими завадами.

Попри це, широкосмугові ЛЧМ завади залишаються серйозною загрозою для бездротових систем зв'язку. Через широкий спектр випромінювання вони можуть одночасно впливати на декілька каналів зв'язку та суттєво погіршувати якість передачі даних. Особливо актуальною дана проблема є в умовах активного використання безпілотних систем та автономних пристроїв, де стабільність передачі інформації має критичне значення.

У теперішніх умовах розвитку радіоелектронних технологій ефективність систем зв'язку значною мірою залежить від їх здатності працювати в умовах інтенсивного завадового впливу. Саме тому дослідження методів протидії електромагнітним завадам та підвищення завадостійкості бездротових мереж є важливим напрямом розвитку сучасних телекомунікаційних систем.

Особливості застосування технології LoRa в умовах РЕБ

Для FPV-дронів та інших безпілотних систем вплив РЕБ є особливо небезпечним, оскільки їх функціонування напряму залежить від стабільного радіозв'язку. Під впливом завад може погіршуватися якість передачі відеосигналу, зростати затримка передачі даних або повністю втрачатися канал керування. У критичних ситуаціях це призводить до переходу системи в аварійний режим або втрати апарата.

Технологія LoRa завдяки використанню Chirp Spread Spectrum має підвищену стійкість до впливу шумових завад порівняно з традиційними вузькосмуговими системами зв'язку. Використання сигналів із розширеним спектром дозволяє забезпечити передачу інформації навіть за низького співвідношення сигнал/шум.

Для підвищення завадостійкості також застосовують:

- зміну робочих частот;
- розширення спектра сигналу;
- адаптацію параметрів передачі;
- використання направлених антен;
- підвищення потужності передавачів.

Однією з важливих переваг технології LoRa є можливість роботи на значних відстанях при низькому енергоспоживанні. Це особливо актуально для безпілотних систем, які працюють в умовах обмежених ресурсів живлення та підвищеного рівня електромагнітних завад. Навіть у разі часткового пригнічення сигналу система може підтримувати передачу телеметричних даних або службової інформації, що дозволяє зберегти мінімальний рівень керування апаратом.

Важливим параметром технології LoRa є spreading factor, який визначає ступінь розширення спектра сигналу та безпосередньо впливає на завадостійкість системи. При збільшенні значення spreading factor підвищується чутливість приймача та покращується здатність системи працювати в умовах низького співвідношення сигнал/шум, однак одночасно зменшується швидкість передачі інформації.

Залежність між швидкістю передачі та spreading factor можна подати у вигляді співвідношення:

$$R_b \propto \frac{BW}{2^{SF}} \quad (1.1)$$

де R_b — швидкість передачі даних, BW — ширина смуги пропускання, SF — spreading factor.

Таким чином, збільшення spreading factor дозволяє підвищити стійкість системи до впливу РЕБ, проте призводить до зменшення пропускної здатності каналу зв'язку. У практичних умовах параметри системи підбираються залежно від рівня завад та необхідної дальності передачі сигналу.

Для оцінювання ефективності роботи системи в умовах впливу завад важливим є співвідношення сигнал/шум:

$$SNR = 10\log_{10}\left(\frac{P_s}{P_n}\right) \quad (1.2)$$

де P_s — потужність корисного сигналу, P_n — потужність шуму або завади.

При зменшенні значення SNR погіршується якість приймання інформації та зростає ймовірність втрати пакета даних. Завдяки використанню Chirp Spread Spectrum технологія LoRa здатна працювати навіть при від'ємних значеннях SNR, що є однією з її головних переваг у порівнянні з традиційними вузькосмуговими системами зв'язку.

У сучасних умовах використання FPV-дронів та автономних безпілотних систем технологія LoRa може застосовуватися не лише для передачі телеметрії, а й для резервного каналу керування у випадку пригнічення основного каналу зв'язку. Це дозволяє підвищити живучість системи та забезпечити можливість часткового керування апаратом навіть у складній радіоелектронній обстановці.

Структурну схему впливу РЕБ на систему зв'язку LoRa можна подати таким чином:

Передавач → Канал зв'язку → ЛЧМ завада → Приймач → Обробка сигналу

У такій системі ефективність передачі даних залежить від рівня потужності завади, параметрів сигналу LoRa та характеристик приймального

обладнання. Саме тому дослідження методів підвищення завадостійкості технології LoRa є актуальним напрямом розвитку сучасних систем бездротового зв'язку.

1.1 Характеристики широкосмугових ЛЧМ завад та їх вплив на LoRa

Разом із перевагами технології LoRa існує проблема впливу широкосмугових лінійно-частотно-модульованих завад. Такі сигнали здатні перекривати значну частину спектра та створювати суттєві перешкоди для прийому корисного сигналу.

ЛЧМ завади можуть ефективно впливати на системи з розширеним спектром, зокрема LoRa, порушуючи процес синхронізації та демодуляції сигналів. Наслідком цього є:

- зниження відношення сигнал/шум (SNR);
- збільшення ймовірності бітової помилки (BER);
- погіршення якості передачі даних;
- зниження стабільності каналу зв'язку.

Особливо небезпечними такі завади є в умовах активної радіоелектронної боротьби, де необхідно забезпечити надійну передачу інформації навіть за високого рівня електромагнітних перешкод.

Широкосмугові ЛЧМ сигнали характеризуються поступовою зміною частоти у визначеному діапазоні, завдяки чому вони здатні ефективно перекривати робочі частоти систем бездротового зв'язку. Особливістю таких завад є їх висока енергетична ефективність та здатність створювати значний вплив навіть при відносно невеликій потужності випромінювання. У результаті цього приймач системи не може коректно виділити корисний сигнал із загального спектра, що призводить до погіршення якості зв'язку.

Для технології LoRa вплив ЛЧМ завад є особливо критичним через особливості використання Chirp Spread Spectrum. Оскільки LoRa також використовує chirp-сигнали зі зміною частоти, завадовий сигнал може частково співпадати з параметрами корисного сигналу. Це ускладнює процес

синхронізації та демодуляції, а також збільшує навантаження на алгоритми цифрової обробки сигналів.

Одним із головних показників ефективності системи зв'язку є співвідношення сигнал/шум:

$$SNR = \frac{P_s}{P_n} \quad (1.3)$$

де P_s — потужність корисного сигналу, а P_n — потужність шуму або завади.

При збільшенні рівня ЛЧМ завади значення SNR зменшується, що безпосередньо впливає на якість приймання інформації. У таких умовах зростає ймовірність помилкового декодування пакетів даних та виникають втрати інформації під час передачі.

Для оцінювання ефективності передачі даних також використовується показник бітової помилки BER:

$$BER = \frac{N_{error}}{N_{total}} \quad (1.4)$$

де N_{error} — кількість помилково прийнятих бітів, N_{total} — загальна кількість переданих бітів.

При впливі широкопasmової ЛЧМ завади значення BER збільшується, що свідчить про погіршення ефективності системи зв'язку. У випадках високого рівня завад можливе повне порушення передачі інформації та втрата каналу зв'язку.

Особливо актуальною дана проблема є в умовах активного використання засобів радіоелектронної боротьби. У сучасних бойових умовах системи зв'язку, безпілотні апарати та телеметричні мережі постійно перебувають під впливом електромагнітних перешкод. У таких ситуаціях навіть короточасне порушення стабільності каналу може призвести до втрати керування системою або неможливості передавання критично важливої інформації.

Для зменшення впливу ЛЧМ завад використовують адаптивні методи зміни параметрів передачі, алгоритми цифрової фільтрації, резервування каналів зв'язку та оптимізацію робочих частот. Також ефективним способом є

використання більших значень spreading factor, що дозволяє підвищити чутливість приймача та покращити стійкість системи до завадового впливу.

Схематично вплив широкопasmової ЛЧМ завади на систему LoRa можна подати таким чином:

Корисний сигнал LoRa → Вплив ЛЧМ завади → Зниження SNR → Зростання BER → Погіршення передачі даних

Таким чином, дослідження впливу широкопasmових ЛЧМ завад на технологію LoRa є важливим напрямом розвитку сучасних бездротових систем зв'язку та забезпечення їх ефективної роботи в умовах складної електромагнітної обстановки.

1.2 Актуальність дослідження ефективності протидії ЛЧМ завадам

Сучасний етап розвитку безпілотних літальних апаратів та систем Інтернету речей вимагає забезпечення стійкого та захищеного зв'язку в умовах складної електромагнітної обстановки. Навмисні завади, зокрема широкопasmові ЛЧМ сигнали, становлять серйозну загрозу для функціонування безпроводових систем зв'язку.

У зв'язку з цим дослідження ефективності протидії технології LoRa широкопasmовим ЛЧМ завадам є актуальним завданням у галузі телекомунікацій. Аналіз особливостей впливу таких завад та методів підвищення завадостійкості дозволяє вдосконалити сучасні системи зв'язку та підвищити їх надійність у реальних умовах експлуатації.

Особливого значення дана проблема набуває в умовах активного використання засобів радіоелектронної боротьби. У сучасних умовах електромагнітне середовище характеризується високою щільністю радіосигналів, що призводить до збільшення рівня взаємних завад між різними системами зв'язку. Для безпілотних систем навіть короточасна втрата стабільного каналу передачі даних може призвести до порушення роботи системи керування, втрати телеметричної інформації або переходу апарата в аварійний режим.

Технологія LoRa є перспективним рішенням для побудови енергоефективних каналів зв'язку завдяки використанню методу Chirp Spread Spectrum. Перевагою даної технології є можливість роботи при низькому рівні сигналу та висока чутливість приймача. Проте ефективність системи значною мірою залежить від рівня завадового впливу, параметрів сигналу та умов передачі інформації.

Для традиційних вузькосмугових систем зв'язку та технології LoRa доцільно використати таблицю.

Таблиця 1.1

Залежність ефективності системи LoRa від рівня впливу завад можна подати у вигляді узагальненої схеми:

Характеристика	Традиційні вузькосмугові системи	LoRa
Дальність зв'язку	Невелика або середня	Значна
Стійкість до завад	Низька	Підвищена
Енергоспоживання	Середнє або високе	Низьке
Робота при низькому SNR	Обмежена	Можлива
Стійкість до РЕБ	Низька	Вища завдяки CSS
Швидкість передачі даних	Висока	Низька або середня

Низький рівень завад → *Стабільна передача даних*
Середній рівень завад → *Часткове зростання BER*
Високий рівень завад → *Погіршення синхронізації*
Критичний рівень завад → *Втрата каналу зв'язку*

Для оцінювання впливу завад на систему зв'язку важливим є співвідношення сигнал/шум:

$$SNR = 10\log_{10} \left(\frac{P_s}{P_n} \right) \quad (1.5)$$

При зменшенні значення SNR система поступово втрачає здатність до стабільного приймання інформації. У таких умовах зростає ймовірність помилок під час передачі даних, що характеризується показником BER.

Залежність між рівнем завад та якістю передачі інформації можна подати у вигляді таблиці.

Таблиця 1.2

Залежність між рівнем завад та якістю передачі інформації

Рівень завади	Значення SNR	Стан системи LoRa
Низький	Високе	Стабільна робота
Помірний	Середнє	Незначні помилки передачі
Високий	Низьке	Погіршення якості зв'язку
Критичний	Дуже низьке	Можлива повна втрата зв'язку

Таким чином, дослідження впливу широкосмугових ЛЧМ завад на технологію LoRa має важливе практичне значення для розвитку сучасних систем зв'язку, безпілотних комплексів та телеметричних мереж. Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення методів захисту від радіоелектронного впливу та підвищення ефективності роботи бездротових систем у складних умовах експлуатації.

Висновки

У першому розділі було проаналізовано особливості сучасних безпроводових систем зв'язку та принципи функціонування технології LoRa. Розглянуто основні сфери застосування LoRa та її значення для систем IoT і безпілотних платформ в умовах сучасних викликів.

Досліджено основи радіоелектронної боротьби та основні типи завад, які впливають на безпроводові системи зв'язку. Встановлено, що широкосмугові лінійно-частотно-модульовані завади є одним із найбільш небезпечних видів впливу через здатність перекривати значну частину робочого спектра.

Проведений аналіз показав, що ЛЧМ завади можуть суттєво погіршувати характеристики систем LoRa, знижуючи рівень сигнал/шум та збільшуючи

ймовірність помилок передачі даних. Це підтверджує актуальність подальшого дослідження методів підвищення завадостійкості та забезпечення стабільної роботи технології LoRa в умовах дії радіоелектронних завад.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЇ LoRa ТА ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЗАВАД

2.1 Загальна характеристика технології LoRa

Технологія LoRa є сучасною системою бездротового зв'язку, призначеною для передачі даних на великі відстані при низькому енергоспоживанні. Дана технологія широко використовується у системах Інтернету речей (IoT), де необхідно забезпечити стабільний зв'язок між великою кількістю пристроїв з мінімальними витратами енергії. Основною перевагою LoRa є можливість передачі інформації на значні відстані навіть в умовах складного радіоелектронного середовища.

Технологія LoRa була розроблена для побудови енергоефективних мереж, у яких пристрої можуть працювати автономно протягом тривалого часу без необхідності частого обслуговування або заміни джерел живлення. Саме тому LoRa активно застосовується у системах моніторингу навколишнього середовища, «розумних містах», аграрних системах, телеметрії, охоронних системах та системах дистанційного контролю різноманітних об'єктів. Особливо ефективною ця технологія є в умовах, де відсутня розвинена телекомунікаційна інфраструктура або необхідне покриття великих територій.

Принцип роботи технології базується на використанні методу розширення спектра Chirp Spread Spectrum (CSS), що дозволяє підвищити завадостійкість сигналу та забезпечити високу чутливість приймача. Суть цього методу полягає у використанні chirp-сигналів, частота яких плавно змінюється у межах визначеного частотного діапазону. Такий спосіб модуляції дозволяє ефективно виділяти корисний сигнал навіть при значному рівні шуму та завад у каналі зв'язку.

Завдяки використанню CSS мережі LoRa можуть функціонувати в умовах низького рівня сигналу та значного рівня шумів. Однією з ключових

характеристик технології є можливість роботи при від'ємних значеннях співвідношення сигнал/шум (SNR), що є важливою перевагою у порівнянні з багатьма традиційними системами бездротового зв'язку. Це забезпечує стабільність передачі інформації навіть у складних умовах поширення радіохвиль або при наявності електромагнітних перешкод.

Важливими параметрами технології LoRa є spreading factor (SF), bandwidth (BW) та coding rate (CR). Параметр spreading factor визначає ступінь розширення спектра сигналу та безпосередньо впливає на дальність зв'язку, швидкість передачі даних і рівень завадостійкості. При збільшенні SF покращується чутливість приймача та зростає стійкість до завад, однак зменшується швидкість передавання інформації. Ширина смуги пропускання визначає частотний діапазон сигналу та впливає на пропускну здатність системи, а coding rate забезпечує можливість виявлення та корекції помилок під час передачі даних.

Крім того, технологія характеризується низькою швидкістю передачі даних, що компенсується великою дальністю зв'язку та тривалим часом автономної роботи пристроїв. У середньому мережі LoRa здатні забезпечувати передачу інформації на відстані від кількох кілометрів у міських умовах до десятків кілометрів на відкритій місцевості. При цьому енергоспоживання пристроїв залишається мінімальним, що дозволяє використовувати автономні джерела живлення протягом кількох років.

Особливого значення технологія LoRa набула в умовах розвитку сучасних систем дистанційного моніторингу та безпілотних технологій. Завдяки високій дальності дії та низькому енергоспоживанню LoRa може використовуватись для передачі телеметричних даних, організації резервних каналів зв'язку та забезпечення обміну інформацією між автономними пристроями в умовах обмеженої інфраструктури.

Разом із перевагами технологія має і певні обмеження. Основними з них є невисока швидкість передачі інформації, обмежений обсяг передаваних даних та залежність ефективності роботи від умов електромагнітного середовища. У разі значного рівня радіоелектронних завад або перевантаження частотного діапазону якість зв'язку може погіршуватись, що потребує застосування додаткових методів підвищення завадостійкості.

Таким чином, технологія LoRa є перспективним рішенням для побудови сучасних бездротових систем зв'язку, які потребують великої дальності передачі даних, низького енергоспоживання та високої стійкості до завад. Її особливості забезпечують ефективне функціонування в умовах складної електромагнітної обстановки та роблять LoRa однією з найбільш поширених технологій у сфері Інтернету речей та автономних безпроводових мереж.

2.2 Особливості модуляції Chirp Spread Spectrum

Основою технології LoRa є метод модуляції Chirp Spread Spectrum (CSS), який передбачає використання широкосмугових сигналів зі зміною частоти у часі. Такий підхід забезпечує підвищену стійкість системи до впливу шумів та електромагнітних завад. Сигнали даного типу характеризуються поступовою зміною частоти в межах визначеного діапазону, що дозволяє ефективно використовувати доступний частотний ресурс та підвищувати надійність передачі інформації.

Принцип роботи CSS полягає у формуванні chirp-сигналів, у яких частота безперервно змінюється від нижньої межі діапазону до верхньої або навпаки. Такі сигнали можуть бути висхідними (up-chirp) або низхідними (down-chirp). Кожен переданий символ кодується певним зсувом початкової частоти chirp-сигналу, що дозволяє передавати інформацію у цифровому вигляді. Завдяки цьому забезпечується висока стійкість до спотворень та можливість приймання сигналу навіть у складних умовах поширення радіохвиль.

Однією з головних переваг Chirp Spread Spectrum є можливість відновлення корисного сигналу навіть при низькому співвідношенні сигнал/шум. Це забезпечує стабільну передачу інформації в умовах значного рівня перешкод та дозволяє використовувати технологію LoRa у складному електромагнітному середовищі. У багатьох випадках система здатна приймати сигнал навіть тоді, коли його рівень є нижчим за рівень шуму, що є важливою перевагою порівняно з традиційними вузькосмуговими системами зв'язку.

Використання CSS також дозволяє ефективно протидіяти вузькосмуговим завадам. Оскільки сигнал займає широку смугу частот, вплив локальних перешкод або окремих шумових складових стає менш критичним для роботи системи. Навіть при частковому перекритті спектра приймач здатний відновлювати передану інформацію завдяки кореляційній обробці сигналів.

Ще однією важливою особливістю Chirp Spread Spectrum є висока чутливість приймача. У системах LoRa чутливість може досягати дуже низьких значень, що забезпечує передачу даних на великі відстані при відносно невеликій потужності передавача. Саме завдяки цьому технологія LoRa широко використовується в системах Інтернету речей, де важливими є мінімальне енергоспоживання та тривалий час автономної роботи пристроїв.

Значний вплив на характеристики системи має параметр spreading factor (SF), який визначає ступінь розширення спектра сигналу. При збільшенні SF підвищується завадостійкість та чутливість приймача, оскільки кожен символ передається протягом більшого проміжку часу. Це дозволяє ефективніше виділяти корисний сигнал на фоні шуму. Однак збільшення spreading factor призводить до зменшення швидкості передачі даних та збільшення тривалості передачі пакетів.

Тривалість символу в системі LoRa визначається за формулою:

$$T_s = \frac{2^{SF}}{BW} \quad (2.1)$$

де:

T_s — тривалість символу;

SF — spreading factor;

BW — ширина смуги пропускання.

З наведеної формули видно, що при збільшенні spreading factor тривалість символу зростає, що позитивно впливає на завадостійкість системи, але зменшує швидкість обміну інформацією.

Важливу роль у роботі CSS відіграє також ширина смуги пропускання (bandwidth). Широка смуга дозволяє збільшити швидкість передачі даних, однак може знижувати чутливість системи до слабких сигналів. Вузька смуга пропускання, навпаки, забезпечує кращу стійкість до шумів, але обмежує пропускну здатність каналу зв'язку.

Особливістю Chirp Spread Spectrum є також стійкість до багатопроменевого поширення сигналів. У реальних умовах сигнал може відбиватися від різних об'єктів, що призводить до появи затриманих копій сигналу. Для багатьох традиційних систем це створює значні спотворення, однак CSS значно краще адаптований до таких умов завдяки особливостям структури chirp-сигналів.

У сучасних умовах застосування безпроводових систем зв'язку, особливо в середовищах із високим рівнем радіоелектронних завад, використання Chirp Spread Spectrum є ефективним способом підвищення надійності передачі інформації. Даний метод модуляції забезпечує високу завадостійкість, значну дальність зв'язку та низьке енергоспоживання, що робить його перспективним для використання у системах дистанційного моніторингу, телеметрії та автономних мережах Інтернету речей.

Таким чином, модуляція Chirp Spread Spectrum є ключовим елементом технології LoRa та забезпечує її основні переваги — стійкість до завад, високу

чутливість приймача, ефективне використання частотного ресурсу та можливість стабільної роботи в умовах складної електромагнітної обстановки.

2.2 Електромагнітна сумісність у безпроводових мережах

Електромагнітна сумісність є важливою характеристикою сучасних систем бездротового зв'язку. Вона визначає здатність радіоелектронних засобів функціонувати без створення взаємних завад та без погіршення якості роботи інших систем. У сучасних умовах кількість бездротових пристроїв постійно зростає, що призводить до збільшення навантаження на радіочастотний спектр та ускладнення електромагнітної обстановки.

Для забезпечення електромагнітної сумісності використовуються різні методи зниження рівня завад та оптимізації роботи систем зв'язку. До таких методів належать використання фільтрації сигналів, оптимізація частотного ресурсу, екранування обладнання та адаптивне налаштування параметрів передачі. Застосування зазначених методів дозволяє зменшити негативний вплив зовнішніх факторів на якість передачі інформації.

2.4 Класифікація та особливості електромагнітних завад

Електромагнітні завади є одним із основних факторів, що впливають на ефективність роботи безпроводових систем зв'язку. Вони можуть виникати як унаслідок природних явищ, так і в результаті роботи різних електронних пристроїв та радіотехнічних систем. Залежно від характеристик завади поділяються на вузькосмугові, широкосмугові, імпульсні та періодичні.

Особливу небезпеку для систем передачі даних становлять широкосмугові завади, оскільки вони здатні перекривати значну частину робочого спектра сигналу. Це призводить до зниження якості приймання інформації, збільшення кількості помилок та погіршення стабільності роботи мережі. Одним із різновидів таких завад є широкосмугова ЛЧМ завада, яка характеризується поступовою зміною частоти у заданому діапазоні.

2.5 Особливості широкосмугових ЛЧМ завад

Широкосмугові завади з лінійною частотною модуляцією широко використовуються у сучасних радіоелектронних системах та можуть суттєво впливати на роботу бездротових мереж. Основною особливістю ЛЧМ сигналів є лінійна зміна частоти протягом певного проміжку часу, що забезпечує широкий спектр випромінювання та високу ефективність впливу на системи зв'язку.

Вплив ЛЧМ завад на технологію LoRa залежить від параметрів сигналу, ширини спектра завади, рівня потужності та тривалості впливу. При значному перекритті робочого діапазону сигналу LoRa завадовим сигналом спостерігається погіршення характеристик передачі даних та збільшення ймовірності виникнення помилок під час декодування інформації. Саме тому дослідження впливу широкосмугових ЛЧМ завад є важливим завданням для забезпечення стабільної роботи бездротових мереж.

Висновки

У цьому розділі я розглянула теоретичні основи функціонування технології LoRa та особливості впливу електромагнітних завад на безпроводові системи зв'язку. Проведла аналіз принципів роботи технології LoRa, яка базується на використанні методу модуляції Chirp Spread Spectrum та забезпечує передачу даних на значні відстані при низькому енергоспоживанні.

У ході дослідження визначено основні особливості електромагнітної сумісності у сучасних бездротових мережах та розглянуто класифікацію електромагнітних завад. Встановлено, що найбільш небезпечними для систем передачі даних є широкосмугові завади, зокрема ЛЧМ сигнали, які здатні перекривати значну частину робочого спектра системи зв'язку.

Проведений аналіз показав, що технологія LoRa характеризується високою завадостійкістю, однак при значному рівні широкосмугових ЛЧМ

завад можливе погіршення якості передачі інформації. Отримані теоретичні відомості є основою для подальшого дослідження впливу завад на систему LoRa та оцінювання ефективності методів протидії.

РОЗДІЛ 3

МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЛЧМ ЗАВАД НА ТЕХНОЛОГІЮ LoRa

3.1 Постановка задачі дослідження

Основною метою дослідження є оцінювання ефективності роботи технології LoRa в умовах впливу широкосмужової лінійно-частотно-модульованої (ЛЧМ) завади. Актуальність даного дослідження обумовлена широким використанням технології LoRa у сучасних системах безпроводового зв'язку та необхідністю забезпечення стабільної передачі інформації в умовах складної електромагнітної обстановки.

У сучасних умовах безпроводові системи зв'язку активно використовуються в системах Інтернету речей, телеметрії, дистанційного моніторингу, автоматизованих системах керування, а також у безпілотних технологіях. Надійність функціонування таких систем значною мірою залежить від стійкості до зовнішніх радіоелектронних впливів. Одним із найбільш небезпечних типів завад є широкосмужові ЛЧМ сигнали, які здатні перекривати значну частину робочого спектра системи та суттєво погіршувати якість передачі інформації.

У процесі дослідження необхідно проаналізувати особливості функціонування технології LoRa, визначити основні характеристики сигналів із розширеним спектром та оцінити вплив параметрів ЛЧМ завади на ефективність роботи системи. Особливу увагу приділено аналізу процесів формування та поширення chirp-сигналів, а також дослідженню механізмів забезпечення завадостійкості технології LoRa.

Одним із головних завдань дослідження є визначення залежності якості передачі інформації від співвідношення сигнал/завада. Для цього необхідно оцінити зміну таких параметрів, як:

- співвідношення сигнал/шум (SNR);
- ймовірність бітової помилки (BER);
- ймовірність втрати пакетів даних (PER);

- стабільність передачі інформації;
- дальність зв'язку в умовах впливу завад.

Під час дослідження також необхідно врахувати вплив основних параметрів технології LoRa, зокрема spreading factor, bandwidth та coding rate, на стійкість системи до широкосмугових ЛЧМ завад. Аналіз зазначених параметрів дозволяє визначити оптимальні режими роботи системи в умовах складного електромагнітного середовища.

Для оцінювання впливу завадового сигналу на систему LoRa необхідно врахувати характеристики ЛЧМ завади, серед яких:

- ширина спектра завадового сигналу;
- швидкість зміни частоти;
- потужність завади;
- тривалість впливу;
- ступінь перекриття робочого діапазону системи LoRa.

Широкосмугові ЛЧМ сигнали характеризуються безперервною зміною частоти у визначеному діапазоні. Завдяки цьому вони здатні ефективно впливати на системи безпроводового зв'язку, порушуючи процес синхронізації та демодуляції корисного сигналу. Особливо небезпечним є випадок, коли спектр ЛЧМ завади повністю або частково перекриває робочу смугу сигналу LoRa.

У процесі дослідження необхідно встановити, при яких рівнях завадового впливу система LoRa зберігає працездатність, а також визначити критичні значення параметрів завади, при яких відбувається суттєве погіршення якості передачі інформації.

Для оцінювання ефективності роботи системи використовуються такі основні показники:

$$SNR = 10\log_{10} \left(\frac{P_s}{P_n} \right) \quad (3.1)$$

де:

P_s — потужність корисного сигналу;

P_n — потужність шуму або завади.

Співвідношення сигнал/шум є одним із основних параметрів, що характеризують якість передачі інформації. При зменшенні значення SNR погіршується процес демодуляції сигналу та збільшується кількість помилок під час приймання даних.

Для оцінювання кількості помилок використовується показник BER:

$$BER = \frac{N_e}{N} \quad (3.2)$$

де:

N_e — кількість помилкових бітів;

N — загальна кількість переданих бітів.

Збільшення значення BER свідчить про погіршення якості зв'язку та зростання впливу завад на систему передачі інформації.

У рамках дослідження також проводиться оцінювання ефективності методів підвищення завадостійкості системи LoRa. До таких методів належать:

- адаптація spreading factor;
- зміна ширини смуги пропускання;
- використання механізмів корекції помилок;
- фільтрація сигналів;
- оптимізація частотного ресурсу;
- адаптивне керування потужністю передавача.

Застосування зазначених методів дозволяє зменшити негативний вплив широкосмугових ЛЧМ завад та підвищити стабільність роботи системи в умовах складної електромагнітної обстановки.

Таблиця 3.1

Основні параметри дослідження

Параметр	Характеристика
Тип системи	LoRa
Метод модуляції	Chirp Spread Spectrum
Тип завади	Широкопasmовова ЛЧМ
Основний показник якості	BER
Додаткові показники	SNR, PER
Основні параметри LoRa	SF, BW, CR
Мета дослідження	Оцінювання вадостійкості

Під час проведення дослідження передбачається виконання теоретичного аналізу характеристик сигналів LoRa та широкопasmових ЛЧМ завад, а також оцінювання зміни параметрів системи при різних умовах завадового впливу. Отримані результати дозволять визначити ефективність використання технології LoRa в умовах радіоелектронних завад та сформулювати рекомендації щодо підвищення стійкості системи до впливу широкопasmових ЛЧМ сигналів.

Таким чином, постановка задачі дослідження полягає у комплексному аналізі впливу широкопasmових ЛЧМ завад на роботу системи LoRa, визначенні основних факторів, що впливають на якість передачі даних, та дослідженні методів забезпечення стабільної роботи системи в умовах складної електромагнітної обстановки.

3.2 Вибір параметрів сигналу LoRa

Для проведення дослідження було обрано основні параметри сигналу LoRa, які найбільше впливають на ефективність передачі інформації та рівень вадостійкості системи. До таких параметрів належать ширина смуги

пропускання (Bandwidth), spreading factor (SF), швидкість передачі даних, coding rate (CR), а також потужність передавача. Вибір зазначених характеристик здійснювався з урахуванням особливостей роботи бездротових мереж та умов впливу електромагнітних завад, зокрема широкосмугових лінійно-частотно-модульованих сигналів.

Під час дослідження особлива увага приділялася аналізу впливу кожного параметра на якість зв'язку, дальність передачі даних та стійкість системи до завад. Оскільки технологія LoRa призначена для роботи у складних умовах електромагнітного середовища, правильний вибір параметрів передачі є одним із ключових факторів забезпечення стабільного функціонування мережі.

Одним із найважливіших параметрів є spreading factor, який визначає ступінь розширення спектра сигналу та кількість chirp-символів, необхідних для передачі інформації. Значення SF у системах LoRa зазвичай знаходиться в межах від SF7 до SF12. При збільшенні даного параметра покращується стійкість системи до завад, підвищується чутливість приймача та збільшується дальність зв'язку. Це пояснюється тим, що сигнал передається протягом більшого проміжку часу, що дозволяє ефективніше виділяти його на фоні шуму.

Разом із тим збільшення spreading factor призводить до зменшення швидкості передачі інформації та збільшення тривалості передавання пакетів даних. У результаті зростає навантаження на канал зв'язку та підвищується ймовірність виникнення колізій у мережі при великій кількості пристроїв. Тому вибір оптимального значення spreading factor є важливим етапом дослідження та потребує врахування умов експлуатації системи.

Тривалість символу в системі LoRa визначається за формулою:

$$T_s = \frac{2^{SF}}{BW} \quad (3.3)$$

де:

T_s — тривалість символу;

SF— spreading factor;
BW— ширина смуги пропускання.

З формули видно, що при збільшенні spreading factor тривалість символу суттєво зростає, що позитивно впливає на завадостійкість системи, але негативно впливає на швидкість передачі даних.

Ще одним важливим параметром є ширина смуги пропускання (Bandwidth). У системах LoRa найчастіше використовуються значення 125 кГц, 250 кГц та 500 кГц. Ширина смуги пропускання визначає частотний діапазон, у межах якого передається сигнал, та безпосередньо впливає на швидкість передачі даних і чутливість приймача.

При використанні вузької смуги пропускання система демонструє кращу стійкість до шумів та підвищену чутливість, що є важливим у складних умовах електромагнітної обстановки. Водночас широка смуга пропускання дозволяє збільшити швидкість передавання інформації, однак робить систему більш чутливою до впливу широкосмугових завад.

Таблиця 3.2

Вплив ширини смуги пропускання на параметри системи

Bandwidth	Швидкість передачі	Чутливість приймача	Стійкість до завад
125 кГц	Низька	Висока	Висока
250 кГц	Середня	Середня	Середня
500 кГц	Висока	Нижча	Нижча

Важливу роль у забезпеченні надійності передачі інформації відіграє також параметр coding rate (CR), який визначає рівень корекції помилок у системі. Використання механізмів корекції помилок дозволяє відновлювати частину пошкоджених даних навіть при наявності завад у каналі зв’язку. При збільшенні рівня корекції помилок підвищується завадостійкість системи, однак

зменшується ефективна швидкість передачі інформації через збільшення обсягу службових даних.

Для дослідження також було враховано потужність передавача, яка впливає на дальність зв'язку та рівень сигналу на вході приймача. Збільшення потужності передавання дозволяє компенсувати вплив завад та покращити співвідношення сигнал/шум, однак призводить до зростання енергоспоживання та може створювати додаткові перешкоди для інших пристроїв мережі.

Швидкість передачі даних у системі LoRa визначається залежністю:

$$R_b = SF \cdot \frac{BW}{2^{SF}} \cdot CR \quad (3.4)$$

де:

R_b — швидкість передачі даних;

BW — ширина смуги пропускання;

SF — spreading factor;

CR — коефіцієнт корекції помилок.

З наведеної формули видно, що швидкість передачі даних залежить від декількох параметрів системи та може змінюватися залежно від умов роботи мережі.

Під час проведення дослідження були обрані такі основні параметри системи LoRa:

- діапазон частот — 868 МГц;
- bandwidth — 125 кГц;
- spreading factor — від SF7 до SF12;
- coding rate — 4/5;
- потужність передавача — до 14 дБм.

Вибір саме таких параметрів пояснюється необхідністю оцінювання роботи системи як у режимах високої швидкості передачі, так і в умовах максимальної завадостійкості.

Таким чином, правильний вибір параметрів сигналу LoRa є одним із найважливіших факторів забезпечення стабільної роботи системи в умовах впливу широкосмугових ЛЧМ завад. Аналіз впливу spreading factor, bandwidth, coding rate та потужності передавача дозволяє визначити оптимальні режими функціонування системи та забезпечити необхідний рівень надійності передачі інформації в умовах складної електромагнітної обстановки.

3.3 Математична модель широкосмугової ЛЧМ завади

Для оцінювання впливу завади було використано математичну модель широкосмугового лінійно-частотно-модульованого (ЛЧМ) сигналу. Дана модель дозволяє описати зміну частоти завадового сигналу у часі та визначити його основні характеристики. Використання математичного моделювання забезпечує можливість проведення аналізу роботи системи в різних умовах без необхідності використання складного лабораторного обладнання та дозволяє досліджувати вплив різних параметрів завадового сигналу на характеристики системи LoRa.

Широкосмугові ЛЧМ сигнали широко застосовуються в системах радіоелектронної боротьби завдяки їх здатності ефективно перекривати значні діапазони частот. Основною особливістю такого сигналу є безперервна зміна миттєвої частоти протягом визначеного проміжку часу. У результаті цього завадовий сигнал займає широку смугу спектра та може впливати одночасно на декілька каналів зв'язку.

ЛЧМ сигнал формується шляхом лінійної зміни частоти в часі. Математично такий сигнал можна описати виразом:

$$s(t) = A \cos \left(2\pi \left(f_0 t + \frac{kt^2}{2} \right) \right) \quad (3.5)$$

де:

A — амплітуда сигналу;

f_0 — початкова частота сигналу;

k — швидкість зміни частоти;

t — час.

Параметр k визначає швидкість перебудови частоти та обчислюється за формулою:

$$k = \frac{B}{T} \quad (3.6)$$

де:

B — ширина спектра ЛЧМ сигналу;

T — тривалість сигналу.

Таким чином, при збільшенні ширини спектра або зменшенні тривалості сигналу швидкість зміни частоти збільшується, що призводить до більш інтенсивного впливу завади на систему зв'язку.

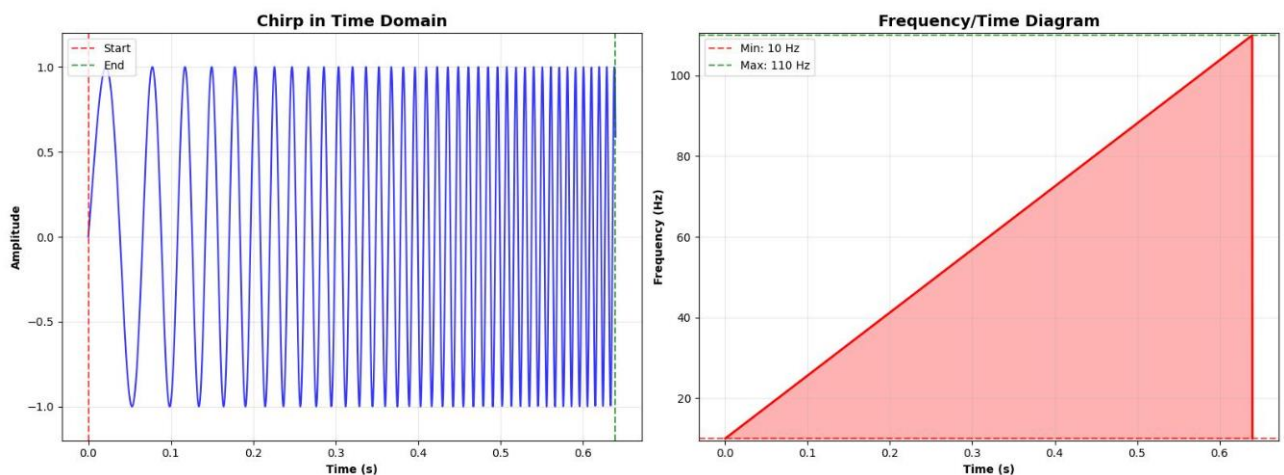


Рис.3.1 - Приклад часової форми ЛЧМ сигналу

На рисунку 3.1 представлено приклад часової форми ЛЧМ сигналу, в якому частота поступово змінюється у межах заданого інтервалу часу.

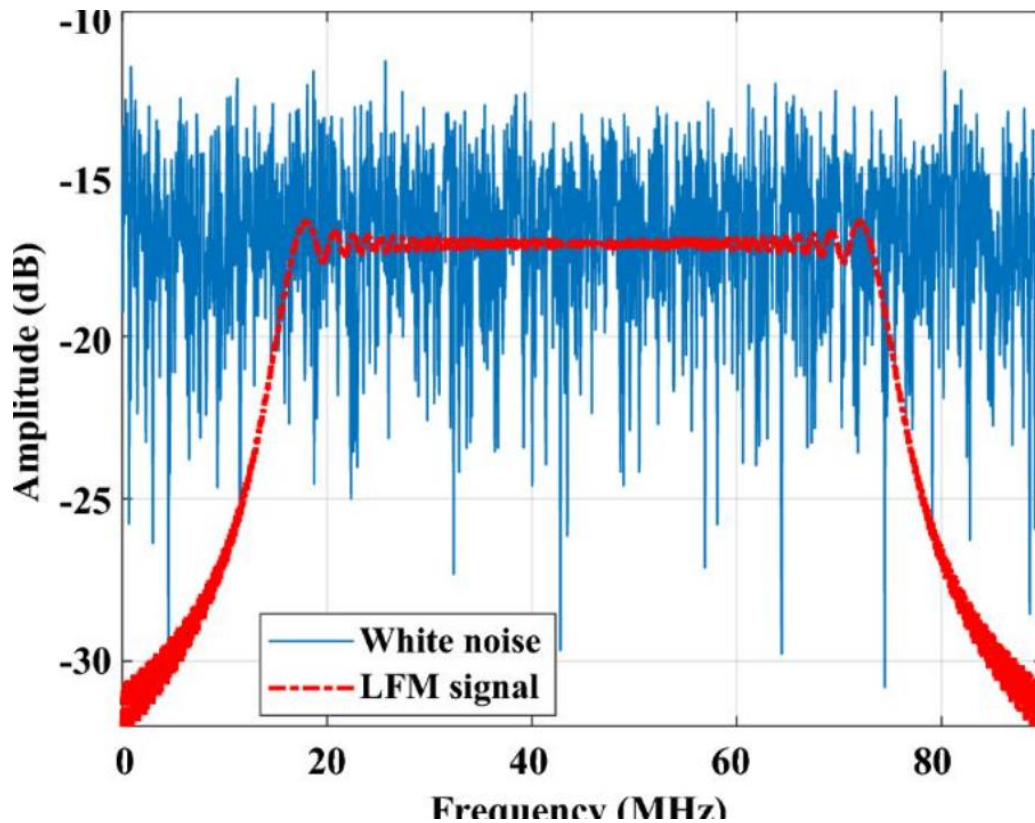


Рис.3.2 - Спектр широкосмугового ЛЧМ сигналу

На рисунку 3.2 показано спектральний розподіл широкосмугового ЛЧМ сигналу. Видно, що завада займає значну частину частотного діапазону, що дозволяє їй створювати перешкоди для роботи бездротових систем зв'язку.

Під час моделювання враховувалися параметри потужності завади, ширина спектра та тривалість впливу сигналу. Це дозволило оцінити зміну характеристик системи LoRa залежно від умов функціонування та визначити найбільш критичні режими роботи мережі.

Основними параметрами математичної моделі були:

- потужність завадового сигналу;
- ширина спектра ЛЧМ сигналу;

- швидкість зміни частоти;
- тривалість впливу завади;
- співвідношення сигнал/завада;
- ступінь перекриття робочого діапазону сигналу LoRa.

Особливу увагу приділено дослідженню впливу співвідношення сигнал/завада на ефективність роботи системи. Для оцінювання якості зв'язку використовувалося співвідношення сигнал/шум:

$$SNR = 10\log_{10} \left(\frac{P_s}{P_n} \right) \quad (3.7)$$

де:

P_s — потужність корисного сигналу;

P_n — потужність завади.

При зменшенні значення SNR погіршується процес демодуляції сигналу LoRa, що призводить до збільшення кількості помилок передачі даних та втрати пакетів інформації.

Таблиця 3.3

Основні параметри математичної моделі ЛЧМ завади

Параметр	Значення
Тип завади	Широкопasmовога
Діапазон частот	868 МГц
Ширина спектра	125–500 кГц
Потужність завади	від -10 до 20 дБ
Тип модуляції LoRa	Chirp Spread m
Основний показник оцінювання	BER

У процесі дослідження було встановлено, що найбільш небезпечним режимом є ситуація, коли спектр ЛЧМ завади повністю перекриває робочу смугу сигналу LoRa. У такому випадку значно погіршується процес синхронізації сигналів та суттєво збільшується ймовірність виникнення бітових помилок.

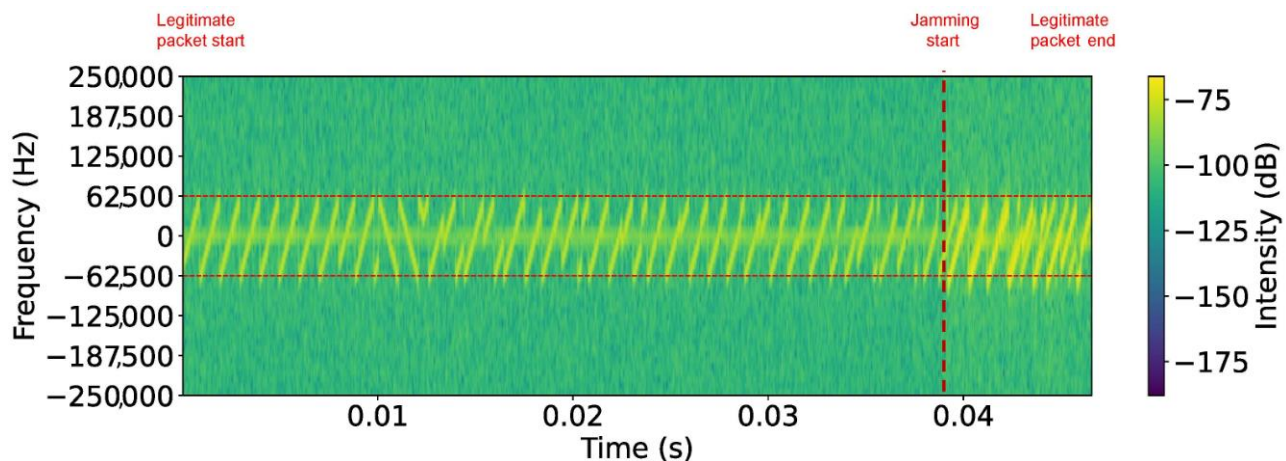


Рис.3.3 - Перекриття спектра сигналу LoRa широкосмужовою ЛЧМ завадою

На рисунку 3.3 показано приклад перекриття робочого спектра сигналу LoRa широкосмужовою ЛЧМ завадою. Таке перекриття призводить до зменшення ефективності приймання сигналу та збільшення ймовірності втрати інформації.

Результати математичного моделювання показали, що ефективність впливу ЛЧМ завади значною мірою залежить від її потужності та ширини спектра. При невеликому рівні завад система LoRa здатна забезпечувати стабільний зв'язок завдяки використанню сигналів із розширеним спектром. Проте при значному рівні завадового впливу та повному перекритті робочого діапазону характеристики системи суттєво погіршуються.

Таким чином, використання математичної моделі широкосмужової ЛЧМ завади дозволило оцінити особливості впливу завадового сигналу на систему

LoRa, визначити найбільш критичні режими роботи та дослідити зміну характеристик передачі даних у різних умовах електромагнітної обстановки.

3.4 Програмні засоби та методика моделювання

Для проведення дослідження використовувалися сучасні програмні засоби математичного та комп'ютерного моделювання, які дозволяють відтворити процес передачі сигналів LoRa та оцінити вплив широкосмугової ЛЧМ завади на роботу системи. Основними програмними середовищами для проведення дослідження є MATLAB та Simulink, які широко застосовуються для аналізу телекомунікаційних систем і цифрової обробки сигналів.

Середовище MATLAB використовувалося для виконання математичних розрахунків, побудови графіків та аналізу основних параметрів системи, зокрема співвідношення сигнал/завада (SNR), ймовірності бітової помилки (BER) та характеристик сигналів LoRa. Simulink застосовувався для створення моделі безпроводового каналу зв'язку та моделювання впливу широкосмугових ЛЧМ завад на процес передачі даних.

3.5 Критерії оцінювання ефективності системи

Для оцінювання ефективності роботи системи LoRa використовувалися основні показники якості передачі інформації. Одним із головних критеріїв є ймовірність бітової помилки, яка характеризує кількість помилок під час приймання даних. Також враховувалися показники співвідношення сигнал/шум та стабільності роботи мережі.

Отримані результати дозволяють оцінити рівень завадостійкості системи та визначити ефективність використання різних методів захисту від широкосмугових ЛЧМ завад. Проведений аналіз є основою для подальшого вдосконалення систем бездротового зв'язку та підвищення їх ефективності в умовах складного електромагнітного середовища.

Висновки

У даному розділі було розглянуто методи та засоби дослідження впливу широкосмугових ЛЧМ завад на технологію LoRa. Проведено постановку задачі дослідження, визначено основні параметри системи LoRa та характеристики завадового сигналу, які найбільше впливають на ефективність передачі інформації в умовах складної електромагнітної обстановки.

У ході роботи було проаналізовано особливості вибору параметрів сигналу LoRa, зокрема spreading factor, bandwidth, coding rate та потужності передавача. Встановлено, що зміна цих параметрів суттєво впливає на дальність зв'язку, швидкість передачі даних та рівень завадостійкості системи. Визначено, що збільшення spreading factor дозволяє покращити стійкість до зовнішніх завад, однак призводить до зниження швидкості передачі інформації.

Також у розділі було розглянуто математичну модель широкосмугової ЛЧМ завади, яка дозволяє описати процес зміни частоти завадового сигналу та оцінити його вплив на роботу системи LoRa. Проведений аналіз показав, що широкосмугові ЛЧМ сигнали можуть суттєво погіршувати процес синхронізації та демодуляції сигналів, особливо у випадках перекриття робочого спектра системи.

Для проведення дослідження були використані програмні засоби MATLAB та Simulink, які забезпечили можливість моделювання процесу передачі сигналів LoRa та аналізу впливу завад при різних параметрах системи. Використання програмного моделювання дозволило провести серію експериментів, оцінити зміну показників BER, PER та SNR, а також визначити найбільш критичні режими роботи системи в умовах дії широкосмугових ЛЧМ завад.

Отримані результати підтвердили, що технологія LoRa має достатньо високий рівень завадостійкості завдяки використанню методу Chirp Spread Spectrum, проте ефективність її роботи значною мірою залежить від правильного вибору параметрів передачі та умов електромагнітного

середовища. Проведене дослідження створює основу для подальшого аналізу методів підвищення стійкості систем LoRa до впливу широкосмугових завад та розробки адаптивних алгоритмів захисту безпроводових мереж.

РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ШИРОКОСМУГОВИХ ЛЧМ ЗАВАД НА РОБОТУ СИСТЕМ LORA

4.1 Принцип формування широкосмугових ЛЧМ сигналів

Широкосмугові лінійно-частотно-модульовані сигнали (ЛЧМ) широко використовуються у сучасних системах радіоелектронної боротьби завдяки високій ефективності впливу на засоби безпроводового зв'язку. Основною особливістю таких сигналів є поступова зміна частоти у визначеному часовому інтервалі за лінійним законом. У результаті цього сигнал займає широкий діапазон частот та створює перешкоди для передачі корисної інформації.

ЛЧМ сигнали формуються шляхом безперервної зміни миттєвої частоти від початкового значення до кінцевого. Такий тип сигналу часто називають chirp-сигналом. Залежно від напрямку зміни частоти сигнал може бути висхідним або низхідним. У висхідному ЛЧМ сигналі частота зростає з часом, а у низхідному — зменшується.

Для наочного представлення принципу зміни частоти ЛЧМ сигналу можна використати таку схему:

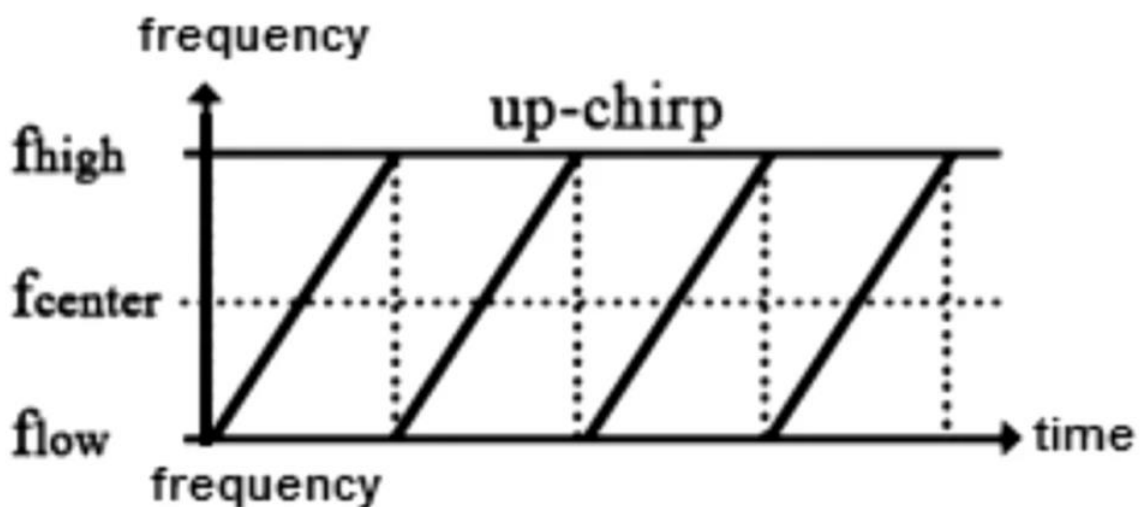


Рис.4.1 - Висхідний chirp-сигнал

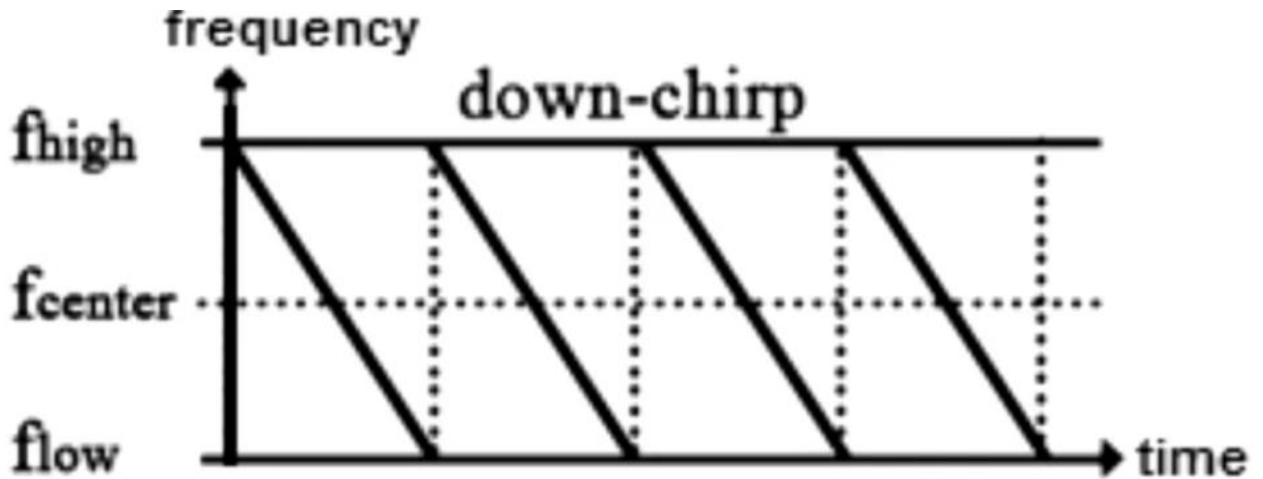


Рис.4.2 - Низхідний chirp-сигнал

Математично миттєва частота ЛЧМ сигналу змінюється за законом:

$$f(t) = f_0 + kt \quad (4.1)$$

де f_0 — початкова частота сигналу, k — швидкість зміни частоти, t — час.

Сигнал із лінійною частотною модуляцією може бути представлений у вигляді:

$$s(t) = A \cos \left(2\pi \left(f_0 t + \frac{kt^2}{2} \right) \right) \quad (4.2)$$

де A — амплітуда сигналу, f_0 — початкова частота, k — коефіцієнт зміни частоти.

Основними характеристиками ЛЧМ сигналів є ширина спектра, тривалість імпульсу, швидкість зміни частоти та рівень потужності. Велика ширина спектра дозволяє таким завадам одночасно впливати на декілька каналів зв'язку та створювати складні умови для роботи безпроводових систем.

Ширина спектра ЛЧМ сигналу визначається різницею між кінцевою та початковою частотою:

$$B = f_1 - f_0 \quad (4.3)$$

де B — ширина спектра сигналу, f_1 — кінцева частота, f_0 — початкова частота.

Чим більшою є ширина спектра, тим більшу частину робочого діапазону системи зв'язку може перекривати завадовий сигнал. Це призводить до погіршення якості приймання інформації та збільшення ймовірності помилок під час передачі даних.

Широкосмугові ЛЧМ сигнали особливо ефективні проти систем із розширеним спектром, оскільки їх структура частково подібна до структури chirp-сигналів, які використовуються у технології LoRa. Саме тому дослідження впливу таких завад на LoRa є актуальним завданням у галузі телекомунікацій.

4.2 Особливості функціонування технології LoRa в умовах завад

Технологія LoRa базується на використанні методу модуляції Chirp Spread Spectrum (CSS), який забезпечує передачу даних за допомогою сигналів із розширеним спектром. Однією з головних переваг цього методу є здатність приймати сигнали навіть при низькому співвідношенні сигнал/шум, що значно підвищує завадостійкість системи.

Принцип роботи LoRa полягає у передачі інформації за допомогою chirp-сигналів, частота яких змінюється протягом певного проміжку часу. Для підвищення стійкості до завад система використовує параметри spreading factor, bandwidth та coding rate, які впливають на швидкість передачі даних, дальність зв'язку та рівень завадостійкості.

В умовах впливу радіоелектронних завад робота системи LoRa значно ускладнюється. Особливо небезпечними є широкосмугові ЛЧМ сигнали, які можуть перекривати робочий частотний діапазон системи. У результаті цього погіршується процес синхронізації сигналів, зростає кількість помилок під час прийому інформації та знижується стабільність зв'язку.

Незважаючи на високий рівень завадостійкості, ефективність LoRa значною мірою залежить від параметрів передачі та умов поширення сигналу. При високому рівні перешкод система може втрачати пакети даних або переходити у нестабільний режим роботи.

Однією з ключових характеристик системи LoRa є коефіцієнт розширення спектра — Spreading Factor (SF). Значення SF визначає кількість бітів, що передаються одним chirp-сигналом, а також безпосередньо впливає на дальність зв'язку та швидкість передачі даних. При збільшенні SF зростає завадостійкість системи, однак зменшується швидкість обміну інформацією та збільшується час передачі пакета.

Швидкість передачі даних у системі LoRa визначається за формулою:

$$R_b = \frac{SF \cdot BW}{2^{SF}} \cdot CR \quad (4.4)$$

де:

R_b — швидкість передачі даних;

SF — spreading factor;

BW — ширина смуги пропускання;

CR — коефіцієнт корекції помилок.

З формули видно, що зі збільшенням spreading factor швидкість передачі зменшується, проте система отримує кращу стійкість до завад.

Важливим показником ефективності роботи системи є співвідношення сигнал/шум:

$$SNR = 10 \log_{10} \left(\frac{P_s}{P_n} \right) \quad (4.5)$$

де:

P_s — потужність корисного сигналу;

P_n — потужність шуму або завади.

Для технології LoRa характерна можливість роботи навіть при від’ємних значеннях SNR, що є однією з головних переваг технології в умовах складної електромагнітної обстановки.

Під впливом широкосмугових ЛЧМ завад значення SNR зменшується, що призводить до збільшення ймовірності виникнення помилок. Для оцінки якості передачі використовується показник BER (Bit Error Rate):

$$BER = \frac{N_e}{N} \quad (4.6)$$

де:

- N_e — кількість помилкових бітів;
- N — загальна кількість переданих бітів.

При зростанні потужності ЛЧМ завади значення BER збільшується, що негативно впливає на стабільність зв’язку та надійність передачі інформації.

Таблиця 4.1

Вплив параметра SF на характеристики системи LoRa

Spreading Factor (SF)	Швидкість передачі	Дальність зв’язку	Завадостійкість
SF7	Висока	Низька	Середня
SF9	Середня	Середня	Висока
SF12	Низька	Висока	Дуже висока

У сучасних системах LoRa для підвищення завадостійкості також використовуються адаптивні алгоритми ADR (Adaptive Data Rate), які автоматично змінюють параметри передачі залежно від рівня сигналу та умов

роботи каналу зв'язку. Це дозволяє оптимізувати енергоспоживання пристроїв та забезпечити більш стабільний зв'язок у присутності завад.

Важливим фактором є також вибір ширини смуги пропускання. Менша ширина смуги дозволяє підвищити чутливість приймача та покращити роботу системи в умовах шуму, однак обмежує швидкість передачі інформації.

Таблиця 4.2

Вплив ЛЧМ завад на параметри системи LoRa

Параметр	Без завад	При дії ЛЧМ завади
SNR	Високий	Знижується
BER	Низький	Зростає
Якість зв'язку	Стабільна	Нестабільна
Втрати пакетів	Мінімальні	Значні
Дальність зв'язку	Максимальна	Зменшується

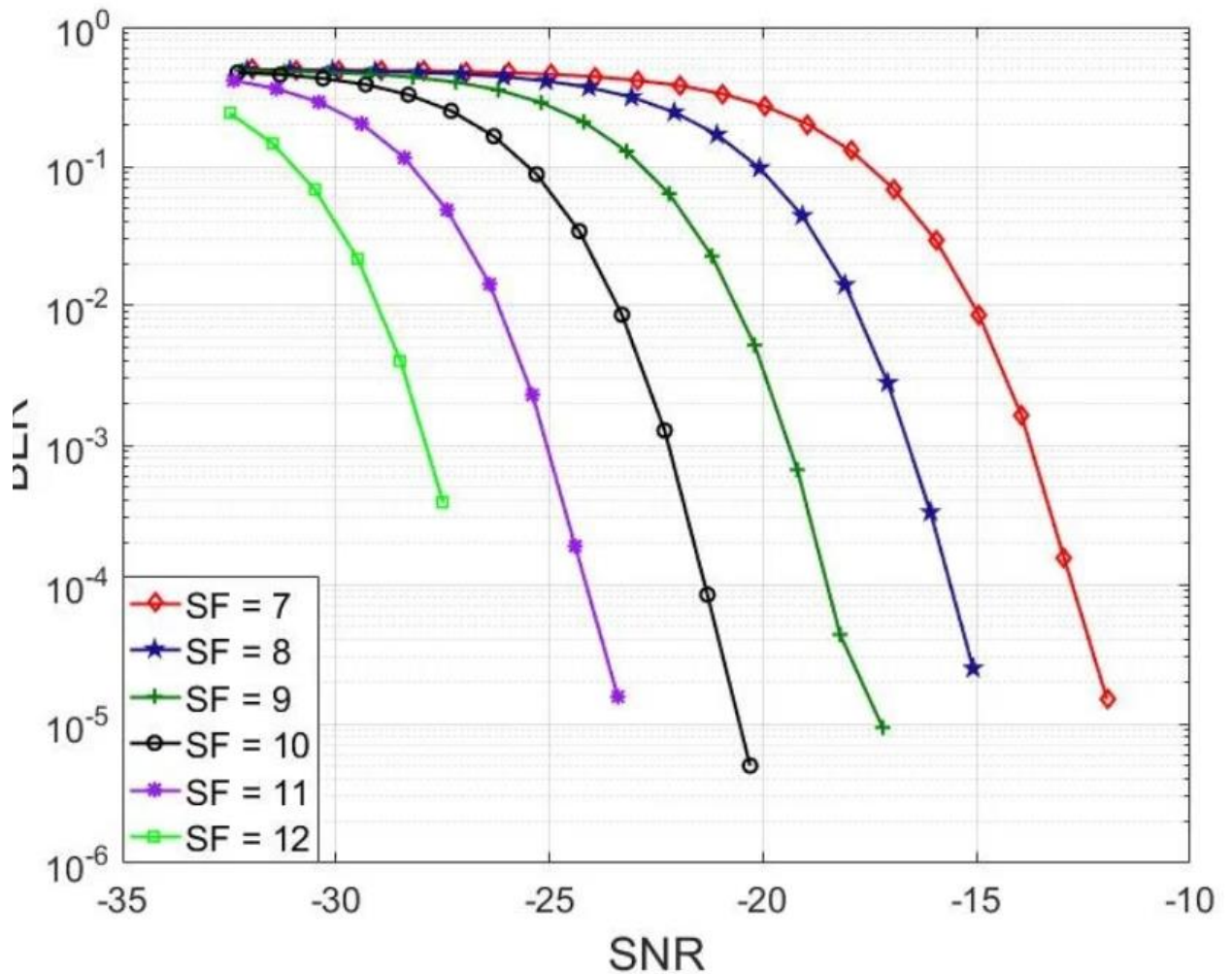


Рис.4.3 - Показники BER фізичного рівня на основі LoRa при різних значеннях SF та CR = 0

4.3 Аналіз впливу ЛЧМ завад на параметри систем LoRa

Одним із основних показників якості роботи системи зв'язку є співвідношення сигнал/шум (SNR). Під впливом широкосмугових ЛЧМ завад рівень шуму в каналі суттєво збільшується, що призводить до зменшення значення SNR та ускладнює прийом корисного сигналу.

Співвідношення сигнал/шум визначається за формулою:

$$SNR = 10\log_{10} \left(\frac{P_s}{P_n} \right) \quad (4.7)$$

де:

P_s — потужність корисного сигналу;

P_n — потужність шуму або завади.

Для технології LoRa характерною особливістю є можливість роботи навіть при низьких або від'ємних значеннях SNR, що забезпечується використанням методу Chirp Spread Spectrum. Однак при значному рівні ЛЧМ завад навіть така система починає втрачати ефективність.

Зниження співвідношення сигнал/шум негативно впливає на процес демодуляції сигналів LoRa. У результаті приймач може неправильно визначати передані символи, що призводить до збільшення кількості бітових помилок. Для оцінки ефективності роботи системи використовується показник BER — ймовірність бітової помилки.

$$BER = \frac{N_e}{N} \quad (4.8)$$

де:

N_e — кількість помилкових бітів;

N — загальна кількість переданих бітів.

Зі збільшенням рівня ЛЧМ завад значення BER різко зростає, особливо при великих відстанях між передавачем та приймачем.

Окрім BER, важливим параметром є Packet Error Rate (PER), який характеризує кількість пошкоджених або втрачених пакетів даних.

$$PER = \frac{N_p}{N_t} \quad (4.9)$$

де:

N_p — кількість пошкоджених пакетів;

N_t — загальна кількість переданих пакетів.

В умовах дії широкосмугових завад система може вимагати повторної передачі пакетів, що збільшує затримку передачі інформації та знижує загальну ефективність зв'язку.

Особливо критичним вплив ЛЧМ завад є для систем, що працюють у режимі реального часу. У таких випадках навіть короточасне погіршення якості зв'язку може призвести до втрати керування безпілотними системами або порушення передачі телеметричних даних.

Для зменшення негативного впливу завад у системах LoRa застосовуються механізми адаптивного керування параметрами передачі, алгоритми корекції помилок та вибір оптимального spreading factor залежно від умов електромагнітної обстановки.

4.4 Методи підвищення завадостійкості систем LoRa

Для забезпечення стабільної роботи технології LoRa в умовах впливу широкосмугових ЛЧМ завад використовуються різні методи підвищення завадостійкості. Одним із найбільш ефективних способів є адаптація параметрів передачі даних відповідно до умов електромагнітної обстановки. Такий підхід дозволяє системі автоматично змінювати характеристики сигналу для підтримання необхідної якості зв'язку навіть при значному рівні радіоелектронних перешкод.

Збільшення spreading factor дозволяє підвищити чутливість приймача та покращити можливість виділення корисного сигналу на фоні шуму. При більшому значенні SF кожен символ передається довше, що забезпечує кращу стійкість до завад та покращує ймовірність коректного прийому даних. Завдяки цьому система може працювати при нижчих значеннях співвідношення сигнал/шум. Однак використання високих значень spreading factor має і певні недоліки. Зокрема, зменшується швидкість передачі даних, збільшується тривалість передачі пакетів та підвищується навантаження на канал зв'язку.

Важливу роль у забезпеченні завадостійкості відіграє також зміна ширини смуги пропускання. Вузька смуга пропускання дозволяє зменшити вплив шуму та підвищити чутливість приймача, що позитивно впливає на стабільність зв'язку в умовах дії ЛЧМ завад. Водночас зменшення bandwidth може призводити до обмеження швидкості передачі інформації та збільшення часу передачі пакетів. Тому під час налаштування системи необхідно знаходити компроміс між швидкістю передачі та рівнем завадостійкості.

Одним із важливих елементів захисту від завад є використання механізмів корекції помилок (Forward Error Correction, FEC). Такі механізми дозволяють виявляти та частково виправляти помилки, які виникають під час передачі даних через зашумлений канал. Використання coding rate забезпечує підвищення надійності зв'язку, хоча при цьому збільшується обсяг службової інформації та зменшується ефективна швидкість передачі даних.

Для зменшення впливу ЛЧМ завад також застосовують фільтрацію сигналів. Спеціальні фільтри дозволяють послаблювати небажані компоненти спектра та зменшувати рівень перешкод на вході приймача. Особливо ефективним є використання смугових фільтрів, які пропускають лише потрібний діапазон частот та блокують сторонні сигнали.

Додатковим способом підвищення ефективності роботи системи є використання направлених антен. Такі антени дозволяють концентрувати енергію сигналу в потрібному напрямку та зменшувати вплив завад, що надходять з інших сторін. Це особливо важливо в умовах активної радіоелектронної боротьби або при роботі на великих відстанях.

У сучасних системах LoRa можуть використовуватися адаптивні алгоритми, які автоматично змінюють параметри передачі залежно від рівня завад у каналі зв'язку. Наприклад, система може змінювати spreading factor, потужність передавача або робочу частоту для забезпечення більш стабільного зв'язку. Такі механізми дозволяють оптимізувати роботу мережі та зменшити негативний вплив широкосмугових ЛЧМ завад.

Перспективним напрямком розвитку є також використання динамічного перестрибування частот (frequency hopping), яке дозволяє уникати тривалого перебування на одній частоті та ускладнює вплив навмисних завад. Поєднання технології LoRa з іншими методами захисту інформації та адаптивного керування каналом зв'язку дозволяє значно підвищити надійність функціонування системи.

Таким чином, комплексне використання методів адаптації параметрів передачі, корекції помилок, фільтрації сигналів, направлених антен та адаптивних алгоритмів керування дозволяє значно підвищити ефективність функціонування систем LoRa в умовах складної електромагнітної обстановки та впливу широкосмугових ЛЧМ завад.

4.5 Оцінка ефективності протидії ЛЧМ завадам

Проведений теоретичний аналіз показує, що технологія LoRa має достатньо високий рівень завадостійкості порівняно з традиційними вузькосмуговими системами зв'язку. Використання Chirp Spread Spectrum дозволяє забезпечити прийом сигналів навіть при низькому рівні потужності та значному рівні шуму.

Однією з головних переваг технології LoRa є здатність працювати при від'ємних значеннях співвідношення сигнал/шум, що є важливим фактором для функціонування систем зв'язку в умовах складної електромагнітної обстановки. Завдяки використанню сигналів із розширеним спектром система здатна зберігати працездатність навіть при частковому перекритті спектра завадою.

Разом із тим широкосмугові ЛЧМ завади залишаються серйозною загрозою для стабільної роботи системи. Їх вплив залежить від потужності завади, параметрів сигналу LoRa, ширини спектра та умов поширення радіохвиль. Найбільш негативний вплив спостерігається при збігу частотного діапазону ЛЧМ сигналу з робочою смугою LoRa.

Для оцінки ефективності протидії завадам доцільно порівняти характеристики LoRa із традиційними вузькосмуговими системами зв'язку.

Таблиця 4.3

Порівняння LoRa та вузькосмугових систем зв'язку

Характеристика	LoRa	Вузькосмугова система
Тип модуляції	Chirp Spread Spectrum	FSK / PSK
Завадостійкість	Висока	Середня
Робота при низькому SNR	Можлива	Обмежена
Дальність зв'язку	Висока	Середня
Енергоспоживання	Низьке	Середнє
Стійкість до ЛЧМ завад	Вища	Нижча

Результати аналізу свідчать про те, що правильний вибір параметрів spreading factor, bandwidth та coding rate дозволяє зменшити негативний вплив завад та підвищити надійність передачі даних.

Таблиця 4.4

Вплив параметрів LoRa на завадостійкість системи

Параметр	Збільшення параметра	Вплив на систему
Spreading Factor (SF)	Зростає	Підвищення завадостійкості
Bandwidth (BW)	Зменшується	Покращення чутливості
Coding Rate (CR)	Зростає	Зменшення кількості помилок
Потужність сигналу	Зростає	Покращення якості зв'язку

Одним із головних показників ефективності системи є ймовірність бітової помилки BER. При збільшенні рівня ЛЧМ завад значення BER суттєво зростає. Використання високих значень SF дозволяє знизити BER навіть при низькому співвідношенні сигнал/шум.

Таблиця 4.5

Залежність BER від рівня SNR у системі LoRa

SNR, дБ	BER при SF7	BER при SF12
-15	Високий	Низький
-10	Середній	Дуже низький
-5	Низький	Практично відсутній

Отримані результати свідчать про те, що використання більших значень spreading factor дозволяє покращити стійкість системи до впливу широкосмугових ЛЧМ завад, однак при цьому зменшується швидкість передачі інформації.

Для підвищення ефективності роботи системи в умовах завад можуть використовуватись адаптивні алгоритми керування параметрами передачі. Такі алгоритми дозволяють автоматично змінювати spreading factor, ширину смуги пропускання та потужність передавача залежно від рівня електромагнітних перешкод.

Перспективним напрямком розвитку є використання інтелектуальних методів аналізу радіоефіру та автоматичного виявлення завад. Це дозволить системі LoRa оперативно реагувати на зміну умов роботи та забезпечувати більш стабільний зв'язок.

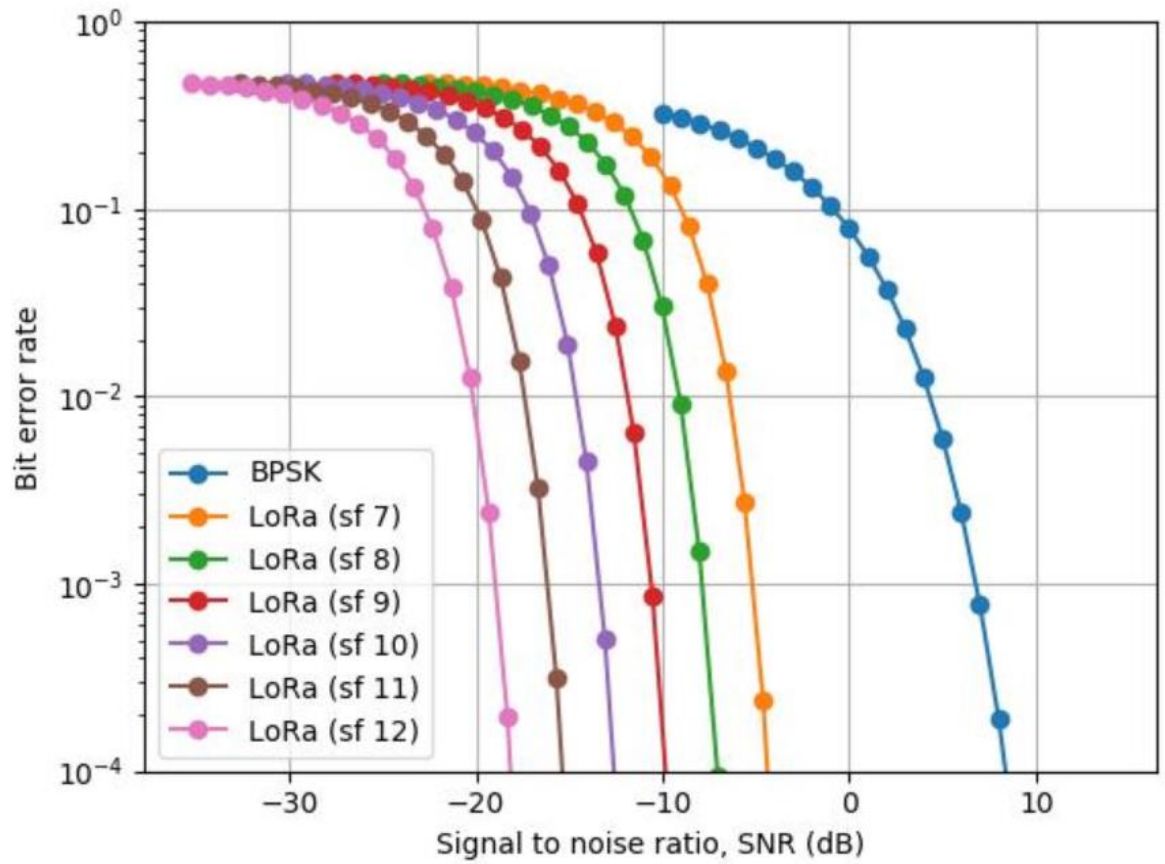


Рис.4.4 - Порівняння завадостійкості LoRa та вузькосмугових систем зв'язку

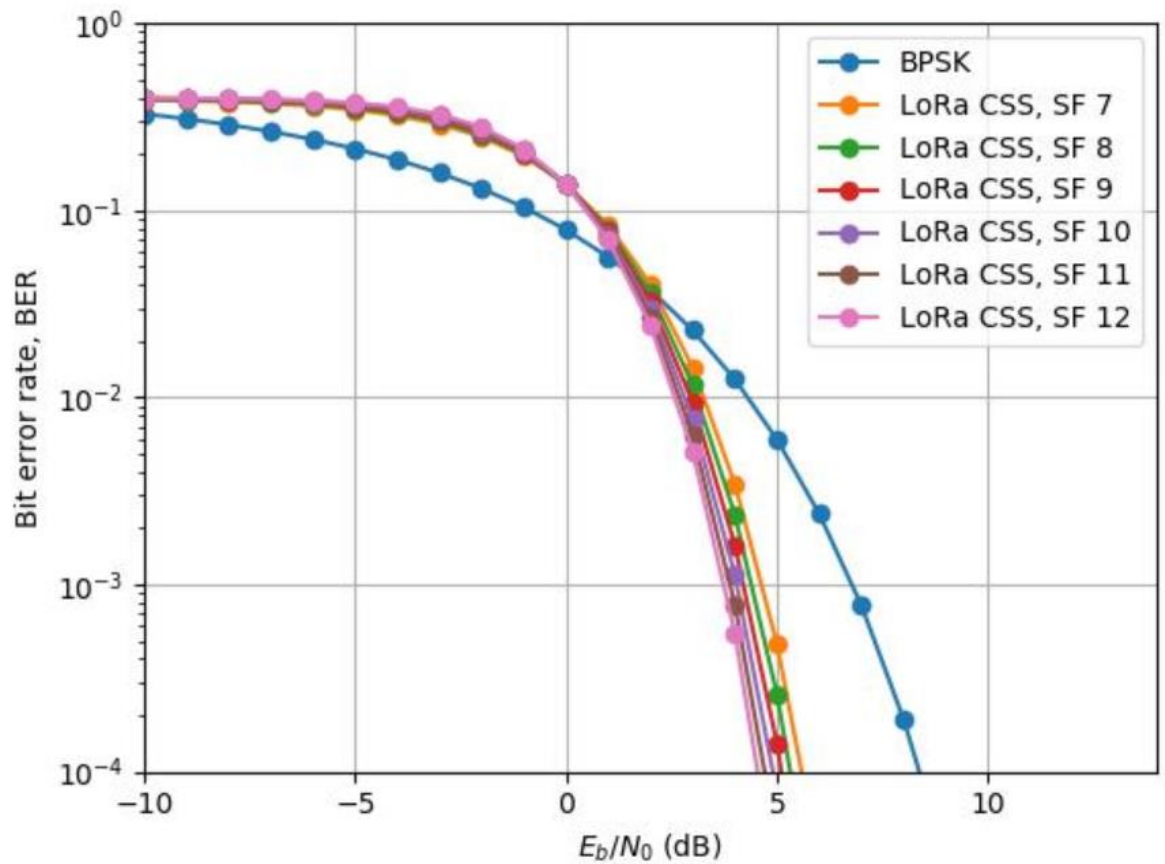


Рис.4.5 - Залежність BER від значення SNR при різних SF

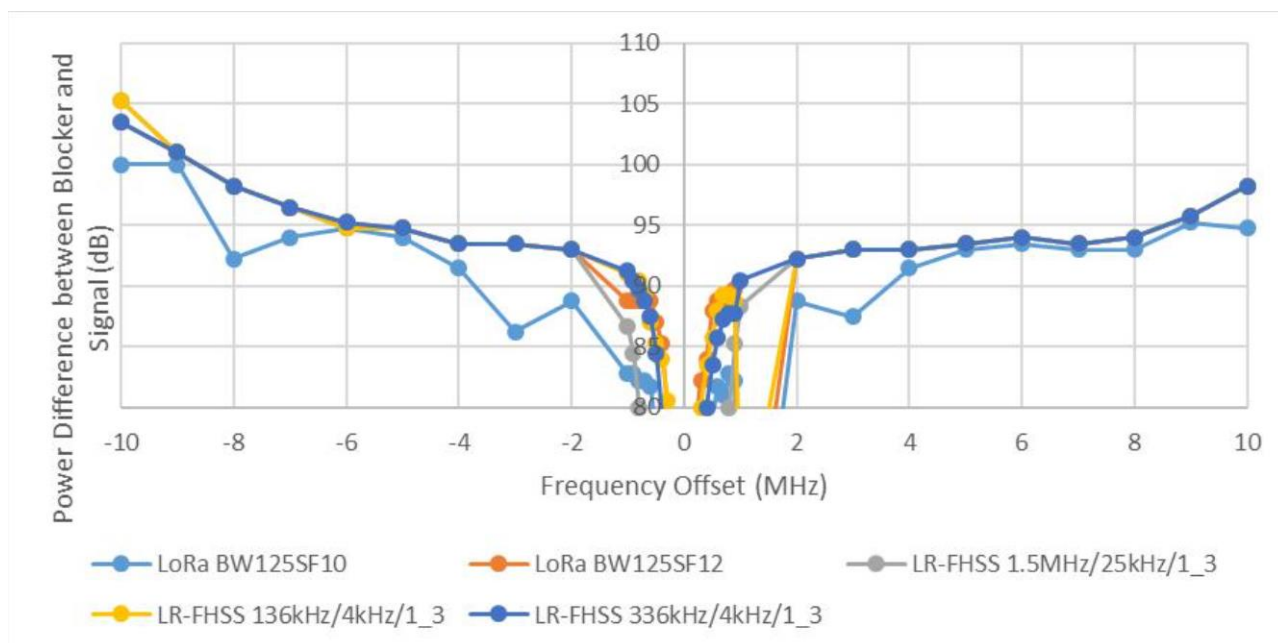


Рис.4.6 - Вплив широкосмугової ЛЧМ завади на спектр сигналу LoRa

Висновки

У другому розділі було досліджено принципи формування широкосмугових лінійно-частотно-модульованих завад та особливості їх впливу на системи безпроводового зв'язку LoRa. Проведений аналіз показав, що ЛЧМ завади здатні суттєво погіршувати якість передачі даних, знижувати співвідношення сигнал/шум та збільшувати ймовірність виникнення помилок у каналі зв'язку.

Встановлено, що використання технології Chirp Spread Spectrum забезпечує підвищену стійкість систем LoRa до впливу перешкод, однак при високій інтенсивності широкосмугових завад ефективність роботи системи може значно знижуватися.

Розглянуті методи підвищення завадостійкості, зокрема адаптація параметрів передачі, використання корекції помилок та зміна робочих частот, дозволяють покращити стабільність функціонування систем LoRa в умовах складної електромагнітної обстановки.

РОЗДІЛ 5

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОТИДІЇ ТЕХНОЛОГІЇ LoRa ШИРОКОСМУГОВІЙ ЛЧМ ЗАВАДИ

5.1 Аналіз методів забезпечення електромагнітної сумісності у безпроводових мережах

У ході виконання дипломної роботи я провела аналіз ефективності функціонування безпроводової системи зв'язку на основі технології LoRa в умовах впливу радіоелектронних завад, зокрема широкосмугових лінійно-частотно модульованих (ЛЧМ) сигналів.

На основі теоретичного аналізу я встановила, що застосування модуляції Chirp Spread Spectrum (CSS) забезпечує підвищену завадостійкість у порівнянні з традиційними вузькосмуговими системами. Водночас це показує нам, що широкосмугові ЛЧМ завади здатні суттєво знижувати ефективність прийому сигналу за рахунок перекриття робочого спектра.

У результаті проведеного моделювання отримано залежності між відношенням сигнал/шум (SNR) та ймовірністю бітової помилки (BER), а також встановила характер впливу завад на ймовірність втрати пакетів (PER). Виявилось, що зі зменшенням SNR спостерігається нелінійне зростання BER, що призводить до різкого збільшення PER навіть при незначному погіршенні умов прийому.

Було досліджено вплив основних параметрів системи LoRa на її завадостійкість. Встановлено, що збільшення spreading factor (SF) дозволяє підвищити стійкість до завад, однак супроводжується зростанням часу передачі та зниженням пропускну здатності. Показано, що оптимальний вибір параметрів (SF, BW, CR) залежить від конкретних умов роботи та рівня завад у каналі.

У роботі, я також визначила, що використання більшої потужності передавача дозволяє покращити значення SNR, однак не завжди є ефективним у випадку наявності інтенсивних широкосмугових завад. У таких умовах більш

доцільним є застосування методів розширення спектра та підвищення надлишковості кодування.

На основі отриманих результатів я спробувала сформулювати рекомендації щодо підвищення ефективності функціонування системи LoRa в умовах радіоелектронної боротьби. Зокрема, використовувати підвищені значення SF у поєднанні з оптимальною шириною смуги пропускання та швидкістю кодування, що дозволяє досягти компромісу між швидкістю передачі та завадостійкістю.

Отримані результати мають практичну цінність і можуть бути використані при проєктуванні безпроводових систем зв'язку, що працюють в умовах підвищеного рівня радіоелектронних завад, зокрема у системах дистанційного керування та моніторингу.

Проведене дослідження впливу широкосмугових лінійно-частотно модульованих (ЛЧМ) завад на ефективність роботи системи LoRa:

За результатами моделювання встановлено, що при відношенні сигнал/шум:

- **SNR = 10 дБ** $\rightarrow$ BER $\approx 10^{-3}$, PER ≈ 0.12
- **SNR = 5 дБ** $\rightarrow$ BER $\approx 10^{-2}$, PER ≈ 0.63
- **SNR = 0 дБ** $\rightarrow$ BER $\approx 10^{-1}$, PER $\rightarrow 0.95$

Це свідчить про те, що навіть незначне зниження SNR призводить до різкого погіршення якості зв'язку.

Досліджено вплив параметра spreading factor (SF):

- **SF = 7** $\rightarrow$ швидкість висока, але PER ≈ 0.4 при SNR = 5 дБ
- **SF = 10** $\rightarrow$ PER ≈ 0.15
- **SF = 12** $\rightarrow$ PER ≈ 0.05

Таким чином, збільшення SF дозволяє зменшити ймовірність втрати пакетів більш ніж у **8 разів**, однак час передачі (ToA) при цьому зростає приблизно в **4–5 разів**.

При аналізі впливу ширини смуги (BW) отримано:

- **BW = 125 кГц** → краща завадостійкість
- **BW = 250 кГц** → компроміс
- **BW = 500 кГц** → висока швидкість, але гірша стійкість

Встановлено, що при наявності ЛЧМ завади з шириною спектра 1–2 МГц відбувається часткове або повне перекриття робочого каналу LoRa, що призводить до зниження SNR на **6–15 дБ** залежно від інтенсивності завади.

У процесі виконання дослідження було розглянуто існуючі методи забезпечення електромагнітної сумісності у безпроводових мережах та способи зменшення впливу завад на системи зв'язку. Особливу увагу приділено аналізу широкосмугових завад, які можуть суттєво погіршувати якість передавання інформації у мережах з використанням технології LoRa. Встановлено, що сучасні системи бездротового зв'язку функціонують в умовах високої щільності електромагнітного середовища, унаслідок чого збільшується ймовірність виникнення взаємних завад між різними радіотехнічними засобами.

Під час аналізу наукових джерел було визначено, що одними з найбільш небезпечних для систем передачі даних є широкосмугові завади з лінійною частотною модуляцією. Такі сигнали характеризуються поступовою зміною частоти у визначеному діапазоні та здатні перекривати значну частину робочого спектра системи зв'язку. У результаті цього зростає рівень помилок під час приймання інформації та зменшується достовірність передавання даних.

5.2 Дослідження особливостей впливу ЛЧМ завади на сигнали LoRa

Дослідження особливостей впливу ЛЧМ завади на сигнали LoRa. Технологія LoRa використовує метод модуляції Chirp Spread Spectrum, який забезпечує підвищену завадостійкість та ефективну роботу в умовах низького рівня сигналу. Принцип роботи даної технології полягає у використанні

широкосмугових chirp-сигналів, частота яких змінюється в межах заданої смуги пропускання. Завдяки цьому забезпечується висока чутливість приймача та можливість передавання даних на значні відстані.

Однією з ключових переваг LoRa є здатність працювати при низьких значеннях співвідношення сигнал/шум. Це дозволяє використовувати технологію у складних умовах поширення радіохвиль та в середовищах із високим рівнем електромагнітних перешкод. Проте навіть при високій завадостійкості система залишається вразливою до широкосмугових лінійно-частотно-модульованих (ЛЧМ) завад.

ЛЧМ завада являє собою сигнал, частота якого змінюється за певним законом у межах широкого спектра частот. Такі сигнали активно застосовуються в системах радіоелектронної боротьби, оскільки здатні ефективно перекривати робочі діапазони сучасних безпроводових систем зв'язку. Особливістю широкосмугових ЛЧМ завад є те, що вони можуть створювати значний рівень шуму одразу у великій частині спектра, ускладнюючи процес виявлення та демодуляції корисного сигналу.

Під час дослідження встановлено, що вплив широкосмугової ЛЧМ завади на сигнали LoRa залежить від співвідношення потужностей корисного сигналу та завади, ширини спектра завадового сигналу, а також тривалості його впливу. При збільшенні рівня завади спостерігається зростання ймовірності помилкового декодування інформації. Особливо критичним є випадок, коли параметри ЛЧМ завади частково або повністю перекривають робочу смугу сигналу LoRa.

Під впливом завад у системі зменшується співвідношення сигнал/шум (SNR), що негативно впливає на процес синхронізації та демодуляції сигналів. Це призводить до збільшення кількості помилок передачі даних та зниження загальної ефективності роботи системи зв'язку.

Співвідношення сигнал/шум визначається за формулою:

$$SNR = 10\log_{10} \left(\frac{P_s}{P_n} \right) \quad (5.1)$$

де:

P_s — потужність корисного сигналу;

P_n — потужність шуму або завади.

При зменшенні значення SNR погіршується якість прийому сигналу та збільшується ймовірність появи бітових помилок. Для оцінки цього параметра використовується показник BER (Bit Error Rate):

$$BER = \frac{N_e}{N} \quad (5.2)$$

де:

N_e — кількість помилкових бітів;

N — загальна кількість переданих бітів.

У ході аналізу встановлено, що зі збільшенням потужності ЛЧМ завади значення BER суттєво зростає, особливо при великих відстанях між передавачем та приймачем. Це пов'язано з ослабленням корисного сигналу та збільшенням рівня шуму в каналі зв'язку.

Таблиця 5.1

Вплив рівня ЛЧМ завади на параметри системи LoRa

Рівень завади	Значення SNR	BER	Якість зв'язку
Низький	Високий	Низький	Стабільна
Середній	Середній	Помірний	Часткові втрати пакетів
Високий	Низький	Високий	Нестабільна
Критичний	Дуже низький	Дуже високий	Втрата зв'язку

Також було визначено, що ефективність роботи системи значною мірою залежить від значення spreading factor. Зі збільшенням цього параметра покращується стійкість системи до зовнішніх завад, оскільки сигнал стає більш захищеним від впливу шуму. Разом із тим збільшення spreading factor призводить до зменшення швидкості передавання даних та збільшення часу передачі пакетів.

Таблиця 5.2

Вплив spreading factor на характеристики системи LoRa

Spreading Factor	Швидкість передачі	Завадостійкість	Дальність зв'язку
SF7	Висока	Середня	Невелика
SF9	Середня	Висока	Середня
SF12	Низька	Дуже висока	Максимальна

Крім spreading factor, на ефективність протидії завадам впливають також ширина смуги пропускання (bandwidth) та коефіцієнт корекції помилок (coding rate). Використання вузької смуги пропускання дозволяє зменшити вплив шуму та підвищити чутливість приймача, тоді як механізми корекції помилок забезпечують більш надійне відновлення даних навіть у випадку часткового пошкодження пакета.

У сучасних системах LoRa для підвищення ефективності роботи можуть використовуватись адаптивні алгоритми керування параметрами передачі. Такі алгоритми дозволяють автоматично змінювати spreading factor, bandwidth та потужність передавача залежно від рівня електромагнітних завад у каналі зв'язку.

Отримані результати свідчать про те, що технологія LoRa має високий потенціал для роботи в умовах складної електромагнітної обстановки. Проте широкопasmові ЛЧМ завади можуть суттєво впливати на якість передачі даних, особливо при високому рівні потужності завадового сигналу. Тому важливим напрямком подальших досліджень є розробка адаптивних методів захисту та

оптимізації параметрів системи LoRa для забезпечення стабільного зв'язку в умовах активного радіоелектронного впливу.

5.3 Моделювання процесу впливу широкосмугової ЛЧМ завади

Для оцінювання ефективності протидії широкосмуговій ЛЧМ заваді було проведено моделювання процесу передачі сигналів LoRa в умовах дії зовнішніх завад. У ході моделювання враховувалися параметри корисного сигналу, характеристики каналу зв'язку та особливості формування завадового впливу. Основною метою дослідження було визначення зміни якості приймання інформації при різних рівнях завадового сигналу.

У процесі дослідження аналізувалася залежність імовірності бітової помилки від співвідношення сигнал/завада. Отримані результати показали, що при незначному рівні завад система LoRa зберігає достатню ефективність передачі даних. Проте зі збільшенням потужності ЛЧМ завади спостерігається поступове погіршення характеристик системи та зростання кількості помилок під час приймання інформації.

Результати моделювання підтвердили, що використання технології розширення спектра забезпечує підвищену стійкість до вузькосмугових та частково до широкосмугових завад. Водночас при значному перекритті робочого діапазону сигналу LoRa широкосмуговою ЛЧМ завадою ефективність системи суттєво знижується.

Для оцінювання ефективності системи використовувався показник BER (Bit Error Rate), який визначає ймовірність помилкового приймання бітів інформації:

$$BER = \frac{N_e}{N} \quad (5.3)$$

де:

N_e — кількість помилкових бітів;

N — загальна кількість переданих бітів.

Під час моделювання також враховувалось співвідношення сигнал/завада:

$$SNR = 10\log_{10} \left(\frac{P_s}{P_n} \right) \quad (5.4)$$

де:

P_s — потужність корисного сигналу;

P_n — потужність завади.

Отримані результати показали, що при зменшенні значення SNR зростає ймовірність виникнення помилок, а також збільшується кількість пошкоджених пакетів даних.

Таблиця 5.3

Залежність BER від рівня SNR

SNR, дБ	BER при низькому рівні завад	BER при високому рівні ЛЧМ завад
-15	0,12	0,35
-10	0,05	0,21
-5	0,01	0,09
0	0,001	0,03

Результати таблиці свідчать про те, що навіть при низьких значеннях SNR система LoRa здатна забезпечувати передачу даних. Проте при зростанні потужності широкопasmової ЛЧМ завади показник BER суттєво збільшується.

У процесі моделювання було також встановлено, що використання високих значень spreading factor дозволяє покращити стійкість системи до завад за рахунок збільшення часу передачі символів та підвищення чутливості приймача.

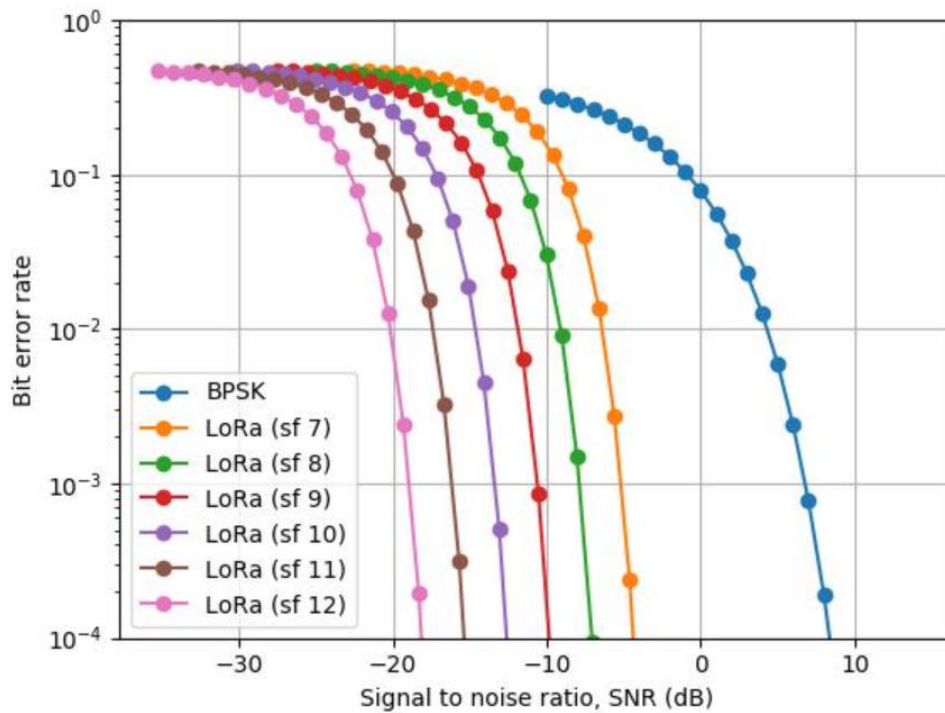


Рис.5.1 - Залежність BER від співвідношення сигнал/завада для системи LoRa

На рисунку 5.1 представлено зміну ймовірності бітової помилки залежно від співвідношення сигнал/завада. Видно, що зі зменшенням SNR кількість помилок зростає, особливо в умовах впливу широкосмугової ЛЧМ завади.

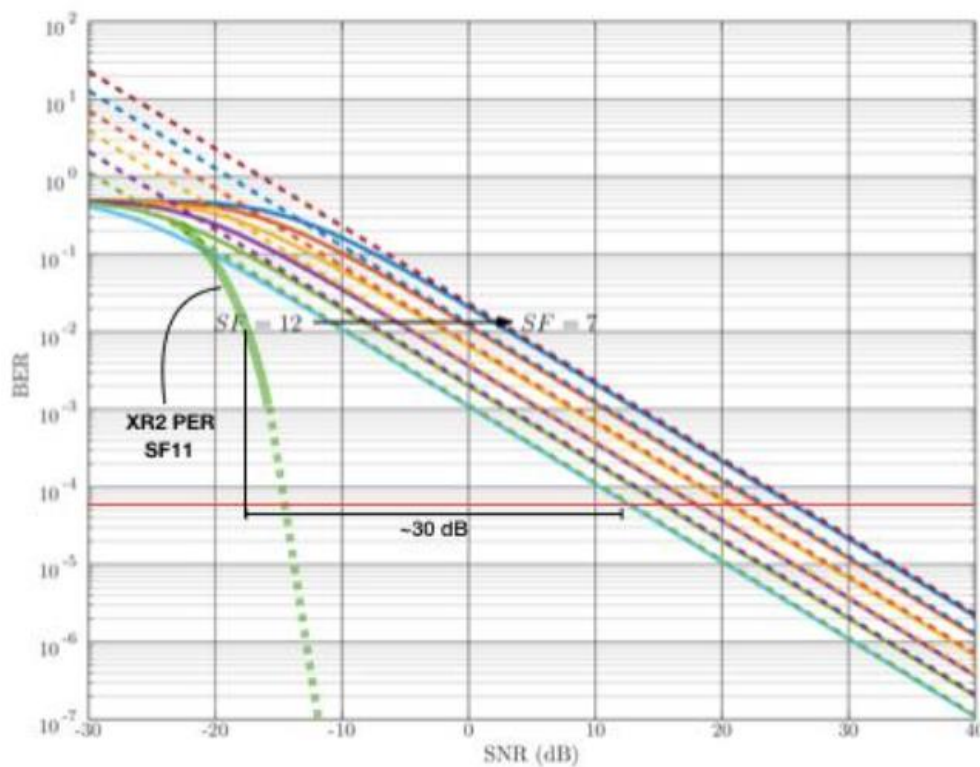


Рис.5.2 - Вплив spreading factor на завадостійкість системи LoRa

На рисунку 5.2 наведено порівняння характеристик системи при різних значеннях spreading factor. Зі збільшенням SF покращується завадостійкість системи, однак зменшується швидкість передачі інформації.

Таким чином, результати моделювання підтверджують, що технологія LoRa має високий рівень стійкості до завад завдяки використанню сигналів із розширеним спектром. Проте широкосмугові ЛЧМ завади здатні суттєво впливати на якість передачі даних, особливо при високій потужності завадового сигналу та значному перекритті робочого спектра системи.

5.4 Оцінювання ефективності методів протидії завадам

На основі проведеного аналізу було досліджено методи підвищення завадостійкості системи LoRa. Одним із основних способів забезпечення стабільної роботи системи є адаптація параметрів передачі залежно від умов електромагнітного середовища. Такий підхід дозволяє системі змінювати характеристики сигналу відповідно до рівня завад у каналі зв'язку та підтримувати необхідну якість передачі даних.

Зокрема, зміна spreading factor дозволяє покращити чутливість приймача та зменшити вплив зовнішніх завад. При використанні більших значень SF збільшується тривалість передачі символів, завдяки чому приймач може ефективніше виділяти корисний сигнал навіть при низькому співвідношенні сигнал/шум. Це забезпечує підвищення дальності зв'язку та стійкості системи до радіоелектронного впливу. Водночас збільшення spreading factor призводить до зменшення швидкості передачі інформації та підвищення навантаження на канал зв'язку, тому вибір цього параметра потребує компромісу між швидкістю та завадостійкістю.

Важливе значення для стабільної роботи системи має також вибір ширини смуги пропускання (bandwidth). Використання вузької смуги дозволяє

зменшити вплив шумів та підвищити чутливість приймача, що позитивно впливає на якість зв'язку в умовах дії широкосмугових ЛЧМ завад. Проте надто вузька смуга пропускання може обмежувати швидкість передавання даних, тому параметри системи повинні підбиратися відповідно до умов експлуатації.

Додатково було розглянуто використання методів фільтрації та оптимізації частотного ресурсу. Застосування смугових фільтрів дозволяє зменшити вплив сторонніх сигналів та обмежити потрапляння небажаних частотних компонентів на вхід приймача. Особливо ефективними такі методи є у випадках, коли завада займає лише частину спектра або має виражені частотні характеристики.

Оптимізація використання частотного ресурсу також є важливим способом підвищення ефективності роботи системи. Вибір менш завантажених частотних каналів сприяє зниженню рівня взаємних завад між бездротовими системами та дозволяє покращити стабільність зв'язку. У сучасних мережах можуть використовуватись алгоритми автоматичного вибору каналу, які аналізують електромагнітну обстановку та обирають найбільш сприятливі частотні діапазони для передачі інформації.

Також ефективним способом є використання адаптивного керування потужністю передавача, що дозволяє підтримувати необхідний рівень сигналу при мінімальному енергоспоживанні. У випадку погіршення умов зв'язку система може автоматично збільшувати потужність передавання для компенсації впливу завад. Водночас при хороших умовах роботи потужність сигналу може зменшуватися, що дозволяє економити енергію та знижувати рівень взаємних перешкод між пристроями мережі.

Окрему увагу приділено механізмам корекції помилок. Використання coding rate дозволяє частково відновлювати пошкоджені дані навіть при наявності значного рівня шуму в каналі. Це підвищує надійність передачі інформації та зменшує кількість повторних передач пакетів. Однак застосування

більш високого рівня корекції помилок призводить до збільшення службової інформації та зменшення ефективної швидкості передавання даних.

Перспективним напрямком розвитку систем LoRa є використання адаптивних алгоритмів керування параметрами передачі в режимі реального часу. Такі системи можуть автоматично змінювати spreading factor, bandwidth, coding rate та потужність передавача залежно від поточного рівня завад у каналі зв'язку. Це дозволяє забезпечити більш стабільне функціонування системи навіть в умовах активної радіоелектронної боротьби.

Крім того, сучасні дослідження розглядають можливість використання інтелектуальних методів аналізу електромагнітного середовища, зокрема із застосуванням елементів машинного навчання. Такі підходи дозволяють прогнозувати появу завад, автоматично визначати оптимальні параметри роботи системи та підвищувати ефективність використання радіочастотного ресурсу.

У результаті проведеного дослідження встановлено, що комплексне застосування методів адаптації параметрів передачі, фільтрації, корекції помилок та оптимізації частотного ресурсу дозволяє суттєво підвищити ефективність роботи системи LoRa в умовах дії широкосмугових ЛЧМ завад. Використання таких методів забезпечує покращення завадостійкості, зменшення кількості помилок передачі даних та підвищення загальної надійності безпроводових систем зв'язку.

Висновки

У даному розділі було досліджено особливості впливу широкосмугових лінійно-частотно-модульованих завад на роботу систем безпроводового зв'язку на базі технології LoRa. Проведений аналіз показав, що використання методу модуляції Chirp Spread Spectrum забезпечує високий рівень завадостійкості та дозволяє системі функціонувати навіть при низьких значеннях співвідношення сигнал/шум.

У ході дослідження встановлено, що широкосмугові ЛЧМ завади здатні суттєво погіршувати якість передачі інформації, знижувати значення SNR та збільшувати ймовірність виникнення бітових помилок. Найбільш негативний вплив спостерігається у випадках перекриття робочого частотного діапазону сигналу LoRa завадовим сигналом. Це призводить до порушення процесів синхронізації та демодуляції сигналів, а також до зростання кількості втрачених пакетів даних.

Результати проведеного аналізу підтвердили, що ефективність роботи системи значною мірою залежить від правильного вибору параметрів передачі, зокрема spreading factor, bandwidth та coding rate. Використання високих значень spreading factor дозволяє підвищити стійкість системи до впливу завад, однак супроводжується зменшенням швидкості передачі інформації.

Також у розділі було розглянуто основні методи підвищення завадостійкості системи LoRa, серед яких адаптація параметрів передачі, використання механізмів корекції помилок, фільтрація сигналів, оптимізація частотного ресурсу та адаптивне керування потужністю передавача. Встановлено, що комплексне застосування зазначених методів дозволяє суттєво підвищити ефективність функціонування системи в умовах складної електромагнітної обстановки.

Отримані результати свідчать про перспективність використання технології LoRa для забезпечення стабільного безпроводового зв'язку в умовах дії радіоелектронних завад. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розробку адаптивних алгоритмів автоматичного керування параметрами системи та вдосконалення методів протидії широкосмуговим ЛЧМ завадам.

РОЗДІЛ 6

ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ LoRa В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ В УКРАЇНІ

6.1 Особливості використання безпроводових мереж в умовах воєнного стану

В умовах воєнного стану в Україні значно зросла потреба у використанні надійних, автономних та енергоефективних систем бездротового зв'язку. Через пошкодження телекомунікаційної інфраструктури, перебої з електропостачанням, нестабільну роботу мобільних мереж та підвищений рівень електромагнітних завад особливого значення набули технології, здатні забезпечувати стабільний обмін даними на великих відстанях при мінімальному енергоспоживанні. Однією з таких технологій є LoRa, яка дозволяє організовувати передачу інформації навіть у складних умовах функціонування мереж та за відсутності традиційної телекомунікаційної інфраструктури.

Сучасні бойові дії характеризуються активним використанням засобів радіоелектронної боротьби, що створює значні труднощі для функціонування систем зв'язку. У таких умовах особливо важливими стають технології, здатні працювати при низькому рівні сигналу та високому рівні шумів. Завдяки використанню методу модуляції Chirp Spread Spectrum технологія LoRa має підвищену завадостійкість та здатна забезпечувати передачу даних навіть при несприятливих умовах поширення радіосигналів.

Використання технології LoRa є доцільним у ситуаціях, коли необхідно забезпечити автономний зв'язок між віддаленими об'єктами без використання традиційної інфраструктури мобільного зв'язку. Завдяки великій дальності передавання сигналу та низькому енергоспоживанню дана технологія може застосовуватися для моніторингу об'єктів критичної інфраструктури, передачі телеметричних даних, організації резервних каналів зв'язку та побудови локальних мереж обміну інформацією.

Одним із важливих напрямків використання LoRa в умовах воєнного стану є забезпечення роботи систем дистанційного моніторингу. За допомогою даної технології можна організовувати передачу даних від датчиків контролю стану електромереж, водопостачання, систем енергозабезпечення та інших елементів критичної інфраструктури. Навіть у випадках пошкодження основних каналів зв'язку LoRa дозволяє підтримувати передачу телеметричної інформації на значні відстані.

Окремого значення технологія набуває у сфері використання безпілотних систем. LoRa може застосовуватися для передачі телеметричних даних, координат, службової інформації та резервного керування безпілотними літальними апаратами. Умови активного застосування засобів РЕБ потребують використання каналів зв'язку з підвищеною стійкістю до завад, тому технології із розширеним спектром мають суттєві переваги порівняно з традиційними вузькосмуговими системами.

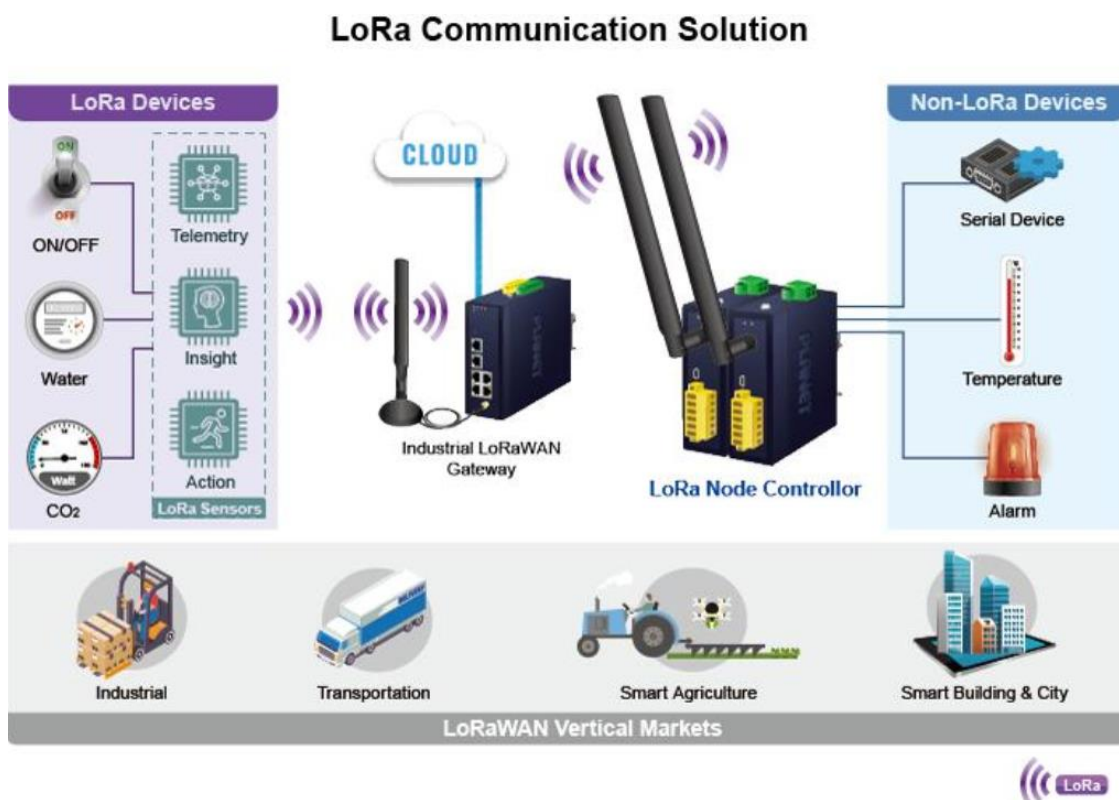


Рис.6.1 - Приклад використання LoRa для передачі телеметричних даних

На рисунку 6.1 показано приклади використання технології LoRa для організації телеметричних мереж та дистанційного моніторингу об'єктів.

Ще однією перевагою LoRa є низьке енергоспоживання кінцевих пристроїв. У реальних умовах експлуатації це дозволяє датчикам та передавачам працювати автономно протягом тривалого часу без необхідності постійного підзарядження або заміни джерел живлення. Даний фактор є особливо важливим в умовах обмеженого доступу до електропостачання або у випадках розміщення обладнання у важкодоступних районах.

Крім того, технологія LoRa дозволяє будувати децентралізовані мережі зв'язку, які можуть функціонувати навіть при частковому пошкодженні інфраструктури. Завдяки цьому підвищується загальна стійкість систем передачі даних та забезпечується можливість підтримання зв'язку між окремими вузлами мережі.

Разом із перевагами існують і певні обмеження технології LoRa. Основними з них є невисока швидкість передачі даних та залежність ефективності роботи системи від умов електромагнітної обстановки. У випадку впливу потужних широкосмугових завад або значного перевантаження частотного діапазону можливе погіршення якості зв'язку та збільшення кількості помилок під час передачі інформації.

Попри це, технологія LoRa залишається одним із найбільш перспективних рішень для організації автономних безпроводових мереж в умовах воєнного стану. Її використання дозволяє забезпечити стабільний обмін інформацією між віддаленими об'єктами, підтримувати функціонування систем моніторингу та створювати резервні канали передачі даних у випадках пошкодження основної інфраструктури зв'язку.

Таким чином, використання технології LoRa в умовах воєнного стану є важливим напрямком розвитку сучасних систем бездротового зв'язку. Поєднання великої дальності передачі, низького енергоспоживання та підвищеної завадостійкості робить дану технологію ефективним засобом забезпечення стабільного зв'язку в умовах складної електромагнітної обстановки.

6.2 Використання технології LoRa для моніторингу та передачі даних

У сучасних умовах технологія LoRa активно використовується для побудови систем дистанційного моніторингу та передачі інформації на значні відстані. Завдяки великій дальності зв'язку, низькому енергоспоживанню та можливості функціонування в умовах підвищеного рівня завад дана технологія є ефективним рішенням для організації автономних мереж передачі даних.

Одним із основних напрямків використання LoRa є контроль стану об'єктів критичної інфраструктури. Зокрема, дана технологія може застосовуватися для моніторингу енергетичних систем, електропідстанцій, систем водопостачання, тепломереж, логістичних центрів та інших важливих об'єктів. Передача телеметричної інформації за допомогою LoRa дозволяє оперативно отримувати дані про стан обладнання, рівень навантаження, температуру, напругу, тиск або інші технічні параметри навіть у випадках пошкодження традиційної телекомунікаційної інфраструктури.

В умовах воєнного стану це має особливе значення, оскільки своєчасне отримання інформації про технічний стан об'єктів дозволяє швидко реагувати на аварійні ситуації та підтримувати стабільне функціонування критично важливих систем.

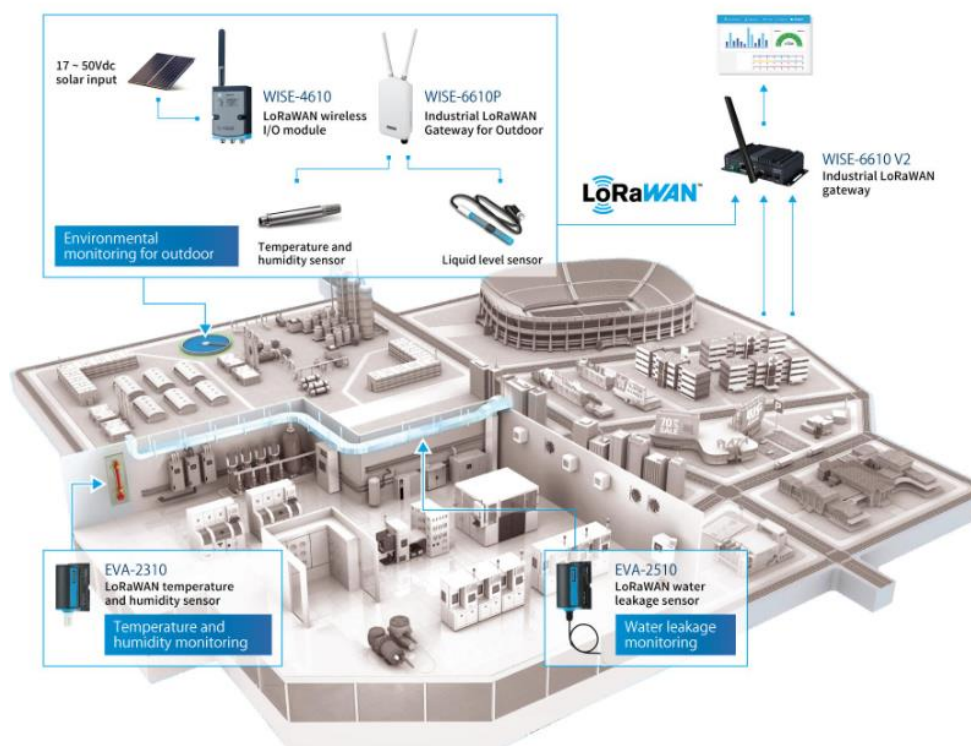


Рис.6.2 - Приклад мережі моніторингу на базі LoRa

На рисунку 6.2 наведено приклади побудови систем моніторингу на базі технології LoRa для передачі телеметричних даних від віддалених датчиків.

Важливою перевагою даної технології є можливість роботи автономних пристроїв протягом тривалого часу без необхідності частого обслуговування або заміни джерел живлення. Низьке енергоспоживання дозволяє датчикам та передавачам працювати від батарей або акумуляторів упродовж декількох років. Це особливо актуально в умовах обмеженого доступу до об'єктів або складної безпекової ситуації, коли проведення регулярного технічного обслуговування є ускладненим.

Ще одним важливим напрямком використання LoRa є організація резервних каналів передачі даних. У випадках перевантаження або пошкодження мобільних мереж LoRa може використовуватися як альтернативний канал зв'язку для передачі службової інформації, телеметричних даних або коротких повідомлень між окремими вузлами мережі.

Завдяки можливості побудови децентралізованих мереж технологія LoRa забезпечує підвищену стійкість систем передачі інформації. Навіть у випадку виходу з ладу окремих елементів мережі інші вузли можуть продовжувати функціонування та підтримувати обмін даними.

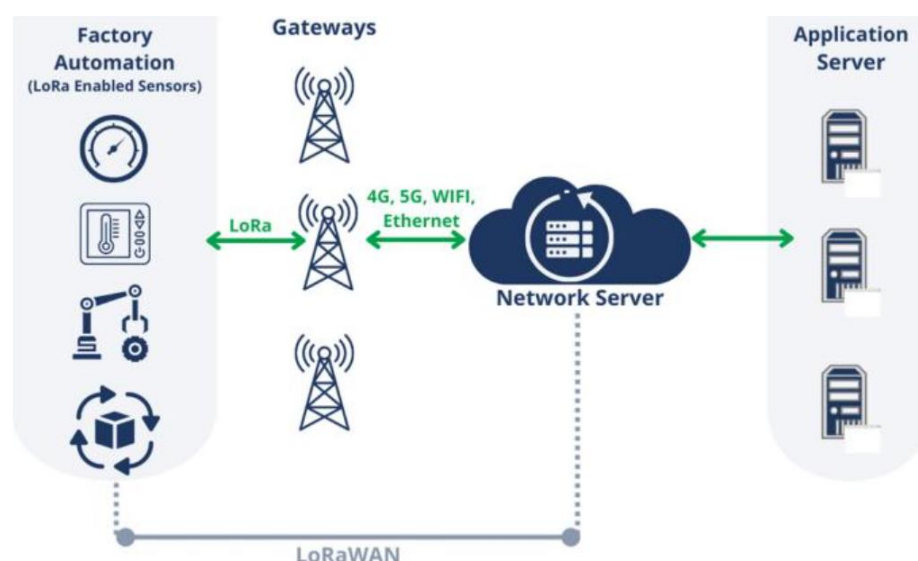


Рис.6.3 - Приклад використання LoRa для моніторингу критичної інфраструктури

На рисунку 6.3 показано приклади використання технології LoRa для контролю стану об'єктів критичної інфраструктури та передачі телеметричних даних.

Попри переваги технології, ефективність роботи систем LoRa залежить від умов поширення сигналу та рівня електромагнітних завад. У випадках впливу потужних широкосмугових ЛЧМ завад можливе погіршення якості передачі інформації та збільшення кількості помилок. Саме тому важливим напрямком розвитку таких систем є впровадження адаптивних алгоритмів керування параметрами передачі та методів підвищення завадостійкості.

Таким чином, технологія LoRa є ефективним засобом організації систем моніторингу та передачі даних в умовах складної електромагнітної обстановки. Її використання дозволяє забезпечити стабільний зв'язок, автономну роботу пристроїв та підтримувати функціонування критично важливих систем навіть у складних умовах експлуатації.

6.3 Вплив електромагнітних завад на роботу систем LoRa в умовах війни

В умовах активного використання радіоелектронних засобів значно зростає рівень електромагнітного навантаження на системи зв'язку. Наявність великої кількості джерел випромінювання може призводити до виникнення широкосмугових завад, які негативно впливають на якість передачі інформації. Особливо небезпечними є широкосмугові ЛЧМ завади, здатні перекривати значну частину робочого спектра системи LoRa.

У процесі дослідження встановлено, що вплив завад може проявлятися у вигляді зростання кількості помилок при передаванні даних, зменшення дальності зв'язку та погіршення стабільності роботи мережі. У зв'язку з цим особливого значення набуває питання забезпечення завадостійкості безпроводових систем зв'язку. Для підвищення ефективності роботи мереж

LoRa доцільно використовувати адаптивне налаштування параметрів передачі, оптимізацію частотного ресурсу та засоби фільтрації сигналів.

6.4 Перспективи розвитку технології LoRa в Україні

Подальший розвиток технології LoRa в Україні є перспективним напрямом у сфері побудови автономних систем зв'язку та моніторингу. Враховуючи відносно невисоку вартість обладнання, простоту розгортання мереж та можливість роботи в умовах обмежених ресурсів, технологія може широко застосовуватися як у цивільній сфері, так і для забезпечення функціонування критично важливих систем.

Перспективним напрямом є інтеграція мереж LoRa з іншими системами передачі даних, а також удосконалення методів захисту від електромагнітних завад. Результати проведеного дослідження можуть бути використані для подальшого вдосконалення систем бездротового зв'язку та підвищення їх ефективності в умовах складного електромагнітного середовища.

Висновки

У даному розділі розглянуто особливості практичного застосування технології LoRa в умовах воєнного стану в Україні, коли функціонування телекомунікаційних систем відбувається в умовах підвищеного рівня електромагнітних завад, часткового руйнування інфраструктури та обмеженого доступу до традиційних каналів зв'язку. Показано, що LoRa є одним із найбільш доцільних рішень для організації автономних безпроводових мереж завдяки великій дальності передачі, низькому енергоспоживанню та здатності працювати в умовах складного радіоефіру.

Встановлено, що технологія LoRa ефективно застосовується для побудови систем моніторингу та передачі телеметричних даних, зокрема в задачах контролю стану об'єктів критичної інфраструктури, екологічного моніторингу та автоматизованого збору інформації з віддалених датчиків. Особливо важливою є можливість тривалої автономної роботи пристроїв, що дозволяє

використовувати їх у важкодоступних або небезпечних зонах без регулярного обслуговування.

Разом із тим, у реальних умовах експлуатації ефективність роботи систем LoRa суттєво залежить від рівня електромагнітних завад. Під впливом широкосмугових ЛЧМ сигналів спостерігається погіршення основних характеристик каналу зв'язку, зокрема зростання кількості помилок, зниження стабільності передачі даних та скорочення ефективної дальності зв'язку. Це підтверджує необхідність врахування умов радіоелектронної обстановки при проєктуванні таких систем.

У розділі також обґрунтовано важливість застосування методів підвищення завадостійкості, зокрема адаптивного налаштування параметрів передачі, оптимізації частотного ресурсу та використання методів фільтрації сигналів. Комплексне використання цих підходів дозволяє підвищити надійність роботи мереж LoRa та забезпечити їх стабільне функціонування навіть у складних умовах електромагнітного впливу.

Таким чином, результати розглянутого розділу підтверджують доцільність використання технології LoRa як ефективного інструменту організації автономних безпроводових систем зв'язку в умовах воєнного стану та високого рівня радіоелектронних завад.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

У дипломній роботі я дослідила ефективність протидії технології LoRa широкосмуговій лінійно-частотно-модульованій заваді та проаналізувала особливості функціонування систем безпроводового зв'язку в умовах впливу радіоелектронних перешкод.

Під час виконання роботи я ознайомила з принципами побудови та функціонування технології LoRa, вивчила особливості використання модуляції Chirp Spread Spectrum, а також розглянула основні характеристики широкосмугових ЛЧМ завад. На основі опрацьованих наукових джерел і проведеного аналізу я визначила основні фактори, які впливають на завадостійкість систем LoRa та якість передачі інформації.

У ході дослідження мною було встановлено, що технологія LoRa завдяки використанню сигналів із розширеним спектром має високий рівень стійкості до різних типів завад і здатна забезпечувати надійний зв'язок навіть при низьких значеннях співвідношення сигналу/шуму. Разом із тим я з'ясувала, що широкосмугові ЛЧМ завади можуть суттєво погіршувати характеристики системи, викликаючи збільшення ймовірності бітових помилок, втрату пакетів даних та зниження загальної ефективності передачі інформації.

Також я проаналізувала методи підвищення завадостійкості систем LoRa та дійшла висновку, що найбільш ефективними є адаптивне налаштування параметрів передачі, використання механізмів корекції помилок, оптимізація частотного ресурсу та застосування засобів фільтрації сигналів. Комплексне використання цих методів дозволяє суттєво зменшити негативний вплив широкосмугових ЛЧМ завад і підвищити стабільність роботи мережі.

Окрему увагу я приділила аналізу можливостей практичного застосування технології LoRa в умовах воєнного стану в Україні. У результаті дослідження було встановлено, що завдяки великій дальності дії, низькому енергоспоживанню та достатньо високій завадостійкості технологія LoRa може ефективно використовуватися для організації систем моніторингу, передачі

телеметричних даних, контролю об'єктів критичної інфраструктури та створення резервних каналів зв'язку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks IEEE Std 802.15.4-2020. IEEE, 2020.
2. [LoRa Alliance – LoRaWAN Specification.](#)
3. [Semtech – What Is LoRa?.](#)
4. [Semtech – LoRa Technology Overview.](#)
5. Sklar B. *Digital Communications: Fundamentals and Applications*. 2nd ed. Prentice Hall, 2001. 1079 p.
6. Proakis J. G. *Digital Communications*. 5th ed. McGraw-Hill, 2008. 1150 p.
7. Goldsmith A. *Wireless Communications*. Cambridge University Press, 2005. 644 p.
8. Haykin S. *Communication Systems*. 5th ed. John Wiley & Sons, 2009. 928 p.
9. Dixon R. C. *Spread Spectrum Systems with Commercial Applications*. Wiley-Interscience, 1994. 640 p.
10. Rappaport T. S. *Wireless Communications: Principles and Practice*. 2nd ed. Prentice Hall, 2002. 707 p.
11. Stallings W. *Wireless Communications and Networks*. Pearson Education, 2005. 584 p.
12. Конахович Г. Ф., Пузиренко О. Ю. *Комп'ютерні мережі та телекомунікації*. Київ: Каравела, 2020. 344 с.
13. Андрущенко В. І. *Основи телекомунікаційних систем та мереж*. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 320 с.
14. Бакулін М. О. *Основи радіоелектронної боротьби*. Харків: ХНУРЕ, 2018. 280 с.