

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА БІОМЕДИЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

УДК 621.396.1

«Допущено до захисту»

Завідувач кафедри біомедичної
інженерії та телекомунікацій
к.т.н., доц. Нікітчук Т. М.

« 14 » грудня 2021 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему «Дослідження системи
об'єктового попередження техногенних аварій»

за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка»
освітній ступінь «магістр»

Виконавець роботи
студент 2 курсу, гр. ТРм-20-1

13.12.2021

(дата, підпис)

Вашченко М. А.

Керівник роботи
к.т.н., доц.

13.12.2021

(дата, підпис)

Ципоренко В. Г.

Житомир
2021

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА БІОМЕДИЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної магістерської роботи

на тему «Дослідження системи
об'єктового попередження техногенних аварій»

Виконав: студент 2 курсу,
групи ТРМ-20-1 спеціальності
172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Ващенко М. А.

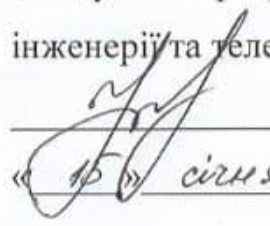
Керівник Ципоренко В. Г.

Рецензент Коломієць Р. О.

Житомир
2021

«Затверджено»

Завідувач кафедри біомедичної
інженерії та телекомунікацій

 Т. М. Нікітчук

« 15 » січня 2021 р.

Завдання на кваліфікаційну магістерську роботу

Ващенко Микола Андрійович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Дослідження системи об'єктового попередження техногенних аварій»
затверджено наказом по університету від « 08 » листопада 2021 р. № 546/с.

2. Мета дослідження: дослідження основних характеристик системи об'єктового попередження техногенних аварій

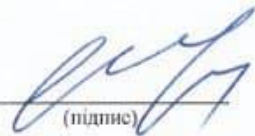
3. Вихідні дані (характеристики об'єкта, умов дослідження та ін.):
система функціонує в умовах населених пунктів при дії завад у автономному режимі з використанням неліцензованого діапазону частот.

4. Основні задачі дослідження: огляд науково-технічних джерел, аналіз особливостей побудови, дослідження швидкодії, дальності дії та завадозахищеності системи.

5. Термін подання роботи до захисту « 05 » грудня 2021 р.

6. Дата видачі завдання « 15 » січня 2021 р.

Науковий керівник


(підпис)

к.т.н., доц. Ципоренко В. Г.
(прізвище, ініціали)

Завдання прийняв
до виконання


(підпис)

Ващенко М. А.
(прізвище, ініціали)

АНОТАЦІЯ

Темою кваліфікаційної роботи є дослідження системи об'єктового попередження техногенних аварій. В процесі виконання було проаналізовано способи безпроводної передачі інформації для побудови даної системи. Було проаналізовано та обрано необхідні компоненти для побудови системи на основі LoRaWAN мережі. Також було проаналізовано дальність дії створеної системи, швидкодію та завадозахищеність. Також було перевірено дальність роботи та швидкодію системи в реальних умовах на міській та сільській територіях.

SUMMARY

The topic of the qualification work is the research of the system of object prevention of man-made accidents. In the process of implementation, the methods of wireless transmission of information for the construction of this system were analyzed. The necessary components for building a system based on the LoRaWAN network were analyzed and selected. The range of the created system, speed and noise protection were also analyzed. The range of operation and speed of the system in real conditions in urban and rural areas were also checked.

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна випускна робота спрямована на дослідження системи об'єктового попередження техногенних аварій, а саме її параметрів, таких як зона покриття радіосигналу, дальність передачі сигналу та швидкодію реагування, тобто час передачі сигналу про небезпеку у разі її виникнення.

Робота складається з трьох розділів, висновків, переліку використаних джерел та посилань, а також додатків.

Робота містить 117 сторінок, 70 рисунків, 11 таблиць, 33 джерела посилань та 4 додатки.

В першому розділі проведено пошук та аналіз літературних джерел про технології, які дають змогу краще реалізувати систему об'єктового попередження техногенних аварій та збільшити її дальність. Серед представлених варіантів було обрано найкращий – LoRa, оскільки дана технологія найкраще себе показала в плані дальності передачі серед інших та простоті розгортання такої мережі. Було досліджено архітектуру LoRaWAN мережі та визначено елементи системи, які необхідні для розгортання мережі.

У другому розділі було описано склад розробленої системи об'єктового попередження техногенних аварій та алгоритм її роботи. Було розраховано дальність передачі інформації в системі для міської, приміської та відкритої територій на основі моделі Окамура-Хата та першого рівняння радіозв'язку. Було запропоновано варіант побудови пакетів LoRa для досягнення найбільшої швидкодії при мінімальній необхідній кількості інформації, яка передається, а також розраховано час їх передачі через радіоефір.

У третьому розділі було проведено моделювання зони покриття одним диспетчерським приймачем у програмному середовищі Radio Mobile для міста Житомир. Було описано розроблене обладнання з відповідним програмним забезпеченням для дослідження дальності передачі інформації, а також швидкодії та на його основі досліджено дані параметри для міської та сільської місцевостей.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ.....	7
ВСТУП.....	8
1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ДЖЕРЕЛ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ.....	10
1.1 Огляд «інтернету речей»	10
1.2 Безпроводні технології для IoT	12
1.3 Технологія Sigfox.....	22
1.4 Технологія LoRa модуляції.....	23
1.5 Архітектура LoRaWAN мереж	30
2 ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ ОБ’ЄКТОВОГО ПОПЕРЕДЖЕННЯ ТЕХНОГЕННИХ АВАРІЙ	34
2.1 Аналіз побудови системи.....	34
2.2 Дослідження дальності дії системи	40
2.3 Аналіз швидкодії системи.....	58
2.4 Дослідження впливу завад на роботу системи	63
3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ ОБ’ЄКТОВОГО ПОПЕРЕДЖЕННЯ ТЕХНОГЕННИХ АВАРІЙ.....	76
3.1 Моделювання та дослідження зони покриття.....	76
3.2 Побудова та характеристики макету системи.....	92
3.3 Дослідження дальності дії в умовах селища.....	96
3.4 Дослідження дальності дії в умовах міста	100
3.5 Дослідження швидкодії системи.....	104
ВИСНОВКИ.....	107
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	110
ДОДАТОК А	114
ДОДАТОК Б	115
ДОДАТОК В	116
ДОДАТОК Г	117

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

АС – Абонентська станція.

БС – Базова станція.

BW – Bandwidth (ширина спектру).

CR – Coding rate (швидкість кодування).

CRC – Cyclic redundancy check (циклічний надлишковий код).

CSS – Chirp spread spectrum (метод розширення спектру).

DL – Down link (лінія вниз).

IoT – Internet of things (інтернет речей).

LPWAN – Low power wide area network (енергоефективна мережа дальнього радіусу дії).

M2M – Machine-to-Machine (машинна взаємодія).

PER – Packet error rate (показник частоти помилок пакетів).

RSSI – Received signal strength indicator (показник рівня прийнятого сигналу).

RX – Receiver (приймач).

SF – Spread factor (коефіцієнт розширення спектру).

SNR – Signal to noise ratio (відношення сигнал/шум).

TX – Transmitter (передавач).

UL – Up Link (лінія вгору).

WAN – Wide area network (глобальна мережа).

WLAN – Wireless local area network (безпроводна локальна мережа).

ВСТУП

Актуальність роботи. На всіх стадіях свого розвитку людство пов'язане з навколишнім світом і його середовищем існування. В наш час людство все більше і більше відчуває на собі проблеми, які виникли при проживанні в індустріальному суспільстві. Небезпечне втручання людини в природу різко підсилилось, збільшився об'єм цього втручання, воно стало різноманітніше і загрожує стати глобальною небезпекою для людства.

Проблема попередження і ліквідації техногенних аварій набувають все більш гострий і актуальний характер. Не тільки в Україні, але і в усьому світі нарастає занепокоєння у зв'язку зі зростаючою кількістю щорічно виникаючих надзвичайних ситуацій природного і техногенного характеру, збільшенням їх масштабів, зростанням втрат і збитків. Виникаюча обстановка потребує вживання заходів щодо вдосконалення управління безпекою. Але навіть найефективніші заходи щодо запобігання не можуть звести ризик виникнення надзвичайних ситуацій до нуля (принцип «ненульового», «прийнятного» ризику). Сьогодні відключити техногенні аварії неможливо, але можна значно знизити число, зменшити масштаби і пом'якшити наслідки таких ситуацій.

Діяльність з попередження техногенних аварій є більш важливою, ніж їх ліквідація. Пов'язано це з тим, що соціально-економічні результати превентивних дій із запобігання техногенних аварій (зниження втрат і збитків) можуть бути більш ефективними для громадян, суспільства і держави. З економічної точки зору це обходиться в десятки, а іноді і сотні разів дешевше, ніж ліквідація наслідків.

Мета роботи. Метою роботи є дослідження параметрів розробленої системи об'єктового попередження техногенних аварій, збільшення швидкої та дальності передачі інформації.

Об'єктом дослідження є система об'єктового попередження техногенних аварій.

Предметом дослідження є параметри системи (дальність дії, швидкодію). В ході роботи було досліджено дальність дії системи, тобто відстань, на яку можна передати інформацію про загрозу та час передавання сигналу.

Задачі для досягнення мети:

- дослідити дальність передачі сигналу;
- дослідити швидкість передачі сигналу;
- дослідити завадостійкість сигналу, який передається;
- підвищити швидкість передачі повідомлень.

1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ДЖЕРЕЛ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

1.1 Огляд «інтернету речей»

Існує безліч визначень терміну "Інтернет речей" (Internet of Things, IoT). У найбільш загальному випадку під цим поняттям мається на увазі єдина мережа фізичних об'єктів, що мають доступ до Глобальної мережі та використовують вбудовану технологію для вимірювання власних характеристик або параметрів зовнішнього середовища, аналізу даних, що збираються, і передачі отриманої інформації на інші пристрої. За прогнозами багатьох дослідницьких компаній, наприклад Forrester Research, до 2021 року кількість підключених до «Інтернету речей» пристроїв досягне 22 млрд штук, при цьому 60% з них ставитимуться до малопотужних пристроїв, що працюють у мережах WAN (Wide Area Network). За оцінками IndustryARC, до 2021 року оборот ринку Інтернету речей досягне 123 мільярдів доларів. В умовах жорсткої конкуренції все більше промислових та виробничих компаній почнуть запроваджувати технології Інтернету речей.

Ідея Інтернету речей здатна кардинально вплинути на розвиток сучасного світу, оскільки дозволить багатьом виробничим процесам відбуватись без участі людини. Виникає питання: як забезпечити надійне об'єднання цих пристроїв у мережі з можливістю масштабування без супутнього дво- чи триразового збільшення кількості базових станцій GSM-мереж та/або значного збільшення кількості точок доступу? Очевидна відповідь: впровадити стійкі мережі зв'язку на основі вузлів із збільшеним радіусом дії та максимальним часом автономної роботи, що дозволяють повністю відмовитись від застосування ретрансляторів.

Екосистема IoT складається з розумних пристроїв з підтримкою Інтернету, які використовують вбудовані системи, такі як процесори, датчики та комунікаційне обладнання, для збору, надсилання та дій з даними, які вони отримують із свого середовища. Пристрої IoT обмінюються даними датчиків, які вони збирають, підключаючись до шлюзу IoT або іншого крайового пристрою, де дані або надсилаються в хмару для їх аналізу або локального аналізу. Іноді ці пристрої взаємодіють з іншими пов'язаними пристроями та діють на основі

інформації, яку вони отримують один від одного. Пристрої виконують більшу частину роботи без втручання людини, хоча люди можуть взаємодіяти з пристроями, наприклад, для їх налаштування, надання їм інструкцій або доступу до даних.

Як правило, IoT найбільш поширений у виробничих, транспортних та комунальних організаціях, використовуючи датчики та інші пристрої IoT. Однак він також знайшов випадки використання для організацій, що займаються сільським господарством, інфраструктурою та галузями автоматизації будинків, що веде деякі організації до цифрової трансформації.

IoT може принести користь фермерам у сільському господарстві, полегшивши їм роботу. Датчики можуть збирати дані про кількість опадів, вологості, температури та вмісту ґрунту, а також про інші фактори, які допоможуть автоматизувати технології ведення сільського господарства.

Можливість моніторингу операцій навколо інфраструктури також є фактором, з яким може допомогти IoT. Наприклад, датчики можуть використовуватися для спостереження за подіями або змінами в структурних будівлях, мостах та іншій інфраструктурі. Це приносить із собою такі переваги, як економія коштів, заощаджений час, зміна робочого циклу якості та безпаперовий робочий процес. IoT торкається будь-якої галузі, включаючи бізнес у галузі охорони здоров'я, фінансів, роздрібної торгівлі та виробництва.

До переваг IoT можна віднести наступні чинники:

- можливість доступу до інформації з будь-якого місця в будь-який час на будь-якому пристрої;
- покращений зв'язок між підключеними електронними пристроями;
- передача пакетів даних через підключену мережу, економить час і гроші;
- автоматизація завдань, що сприяють підвищенню якості послуг бізнесу та зменшенню потреби в людському втручанні.

Незважаючи на велику користь IoT, дані мережі не позбавлені недоліків:

- зі збільшенням кількості під'єднаних пристроїв та передачею більше інформації між пристроями також збільшується ймовірність того, що хакер може викрасти конфіденційну інформацію;
- врешті-решт підприємствам доведеться мати справу з величезною кількістю - можливо, навіть мільйонами - пристроїв IoT, і збір та управління даними з усіх цих пристроїв буде складним завданням;
- якщо в системі є помилка, ймовірно, кожен підключений пристрій буде пошкоджений;
- оскільки для IoT не існує міжнародного стандарту сумісності, пристроям різних виробників важко взаємодіяти між собою [1].

1.2 Безпроводні технології для IoT

Невід'ємною й однією з найскладніших і витратних складових телекомунікаційних систем є лінії зв'язку (ЛЗ), якими передаються інформаційні сигнали від одного абонента (станції, передавача, регенератора) іншому (станції, приймачу, регенератору) та у зворотному напрямку.

Лінія зв'язку складається в загальному випадку з фізичного середовища, по якому передаються електричні інформаційні сигнали, апаратури передачі даних і проміжної апаратури. Синонімом терміну лінія зв'язку (line) є термін канал зв'язку (channel) [2].

Фізичне середовище передачі даних (medium) може являти собою кабель, тобто набір проводів, ізоляційних і захисних оболонок і сполучних рознімів, а також земну атмосферу чи космічний простір, через які поширюються електромагнітні хвилі [3].

Зважаючи на середовище поширення сигналів, лінії зв'язку можна поділити на 3 групи: радіолінії, проводові й оптичні. У радіолініях сигнали передаються у вільному просторі, в проводових лініях — металевими кабелями, хвильоводами, в оптичних лініях — волоконними світловодами або у вільному просторі [4]. Класифікацію цих ЛЗ наведено на рисунку 1.1.

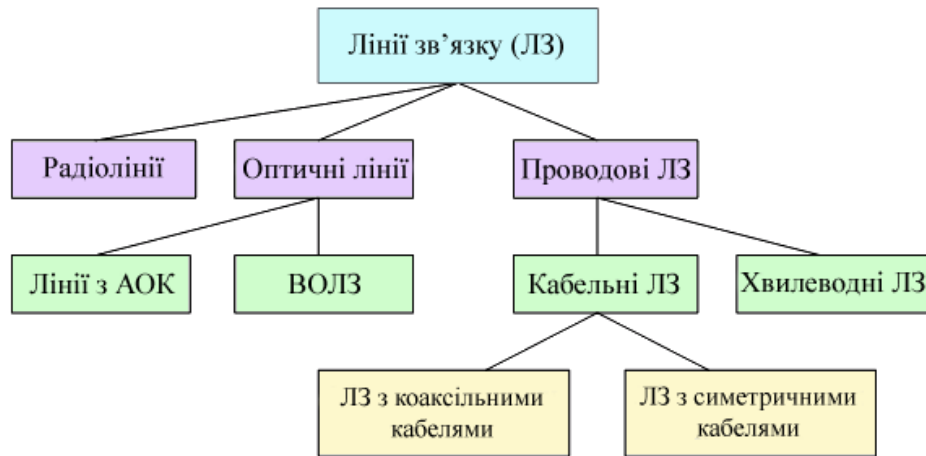


Рисунок 1.1 – Класифікація ліній зв'язку: АОК – атмосферний оптичний канал; ВОЛЗ – волоконно-оптична лінія зв'язку.

Провідні (повітряні) лінії зв'язку являють собою провід без якої-небудь ізоляції чи оплеток, які екранують, прокладений між стовпами і висячий в повітрі [3]. По таких лініях зв'язку традиційно передаються телефонні чи телеграфні сигнали, але при відсутності інших можливостей ці лінії використовуються і для передачі комп'ютерних даних. Швидкісні якості і перешкодозахищеність не краща. Сьогодні провідні лінії зв'язку швидко витісняються кабельними.

Кабельні лінії являють собою досить складну конструкцію. Кабель складається з провідників, укладених у кілька шарів ізоляції: електричної, електромагнітної, механічної, а також, можливо, кліматичної. Крім того, кабель може бути оснащений роз'ємами, що дозволяють швидко виконувати приєднання до нього різного устаткування. У комп'ютерних мережах застосовуються три основних типи кабелю: кабелі на основі скручених пар мідних проводів, коаксіальні кабелі з мідною жилою, а також волоконно-оптичні кабелі.

Скручена пара проводів називається кручений парою (twisted pair). Кручена пара існує в екранованому варіанті (Shielded Twistedpair, STP), коли пари мідних проводів обертається в ізоляційний екран, і неекранованому (Unshielded Twistedpair, UTP), коли ізоляційна обгортка відсутня. Скручування проводів знижує вплив зовнішніх перешкод на корисні сигнали, що передаються

по кабелю. Коаксіальний кабель (coaxial) має несиметричну конструкцію і складається з внутрішньої мідної жили й оплетки, відділеної від жили шаром ізоляції. Існує кілька типів коаксіального кабелю, що відрізняються характеристиками й областями застосування — для локальних мереж, для глобальних мереж, для кабельного телебачення і т.д. Волоконно-оптичний кабель (optical fiber) складається з тонких (5-60 мікрон) волокон, по яких поширюються світлові сигнали. Це найбільш якісний тип кабелю — він забезпечує передачу даних з дуже високою швидкістю (до 10 Гбіт/з і вище) і до того ж краще інших типів передавальної середовища забезпечує захист даних від зовнішніх перешкод.

Поряд із провідними лініями зв'язку широко використовуються радіолінії різних діапазонів (від сотень кГц до десятків ГГц). Ці лінії більш економічні й незамінні для зв'язку з рухомими об'єктами. Найбільше поширення для багатоканального радіозв'язку одержали радіорелейні лінії (РРЛ) метрового, дециметрового й сантиметрового діапазонів на частотах від 60 МГц до 15 ГГц [2].

Супутникові мережі

У безпроводовому зв'язку супутникові мережі використовують електромагнітні хвилі для передавання сигналів, але ці хвилі вимагають прямої видимості. Через форму землі важко досягти зв'язку на великій відстані.

Для вирішення цієї проблеми на Землі побудовані різні антени або станції. Сигнал надсилається від Землі прямо до космосу, тому Супутники зв'язку (CS) можуть ретранслювати і підсилювати сигнали, які розширюють силу сигналу. Потім сигнал буде відправлений в інше місце на Землі. Такими сигналами можуть бути телефонні дзвінки, інтернет-дані, радіо і навіть телевізійні передачі.

У супутниковому зв'язку, CS дозволяють здійснювати зв'язок у більшому діапазоні, наприклад, відстань зв'язку в GSM може бути до 35 км. Крім того, на основі швидкості підключення існують також різні комунікації, такі як GSM/GPRS/EDGE (2G), UMTS/HSPA (3G), LTE (4G) тощо.

Все має свою хорошу сторону і погану сторону, хоча стабільне з'єднання і універсальна сумісність відомі як переваги, але CS також вимагають високих

щомісячних витрат, щоб зберегти їх високе енергоспоживання. Всі ці переваги і недоліки слід враховувати під час розвитку IoT, тому супутник використовується в основному в промислових цілях [5].

Wi-Fi

WLAN також відомий як Wi-Fi, технологія IEEE 802.11. Перелік даних стандартів наведений в таблиці 1.1. Це бездротова локальна мережа (WLAN), яка дозволяє двом або більше мобільним пристроям використовувати Інтернет через безпроводне з'єднання. Це з'єднання базується на точці доступу, яка дозволяє користувачам переміщатися в межах певної зони покриття. На сьогоднішній день у нашому повсякденному житті широко використовується WiFi. Він простий у підключенні і доступний.

Таблиця 1.1. Стандарти IEEE 802.11

802.11 Протокол	Рік випуску	Частота, ГГц	Середня швидкість передачі даних	Максимальна швидкість передачі даних	Радіус передачі в приміщенні, м	Радіус передачі на відкритій місцевості,м
Legacy	1997	2,4	1 Мб/с	2 Мб/с	20	100
802.11a	1999	5	25 Мб/с	54 Мб/с	35	120
802.11b	1999	2,4	6,5 Мб/с	11 Мб/с	35	140
802.11g	2003	2,4	25 Мб/с	54 Мб/с	38	140
802.11n	2009	2,4 або 5	300 Мб/с	600 Мб/с	70	250
802.11ac	2014	5	1,3 Гб/с	6,9 Гб/с	45	91
802.11ax	2019	2,4 або 5	3 Гб/с	9,6 Гб/с	70	240

У стандартах IEEE 802.11 пристрій зазвичай «спілкується» в діапазонах частот 2.4, 3.6, 5 і 60 ГГц. Таблиця 1.1 показує основну інформацію, таку як швидкість передавання даних та діапазон зв'язку у стандартах 802.11. З даних таблиці не важко дізнатися, який з них є найкращим. Сьогодні IEEE 802.11n найчастіше використовується відповідно до високопродуктивних характеристик. Для того, щоб досягти високої якості, він також потребує більш високої

потужності. Відповідно до проблеми великого енергоспоживання, Wi-Fi не рекомендується використовувати для малопотужних пристроїв.

Більшість мереж IEEE 802.11 використовують діапазон частот 2,4 ГГц, центральні частоти 14 каналів рознесені на 5 МГц один від одного. Це показано на рис. 1.2, кожен канал має діапазон близько 22 МГц, і вони перекриваються. Серед всіх каналів тільки канали 1, 6 і 11 не перекриваються між собою. Багато виробників модемів використовують ці три канали як канали Wi-Fi за замовчуванням. Це налаштування може призвести до того, що канал може бути занадто навантаженим, якщо в регіоні є багато маршрутизаторів і користувачів Wi-Fi. Надійність також вважається важливою проблемою у Wi-Fi.

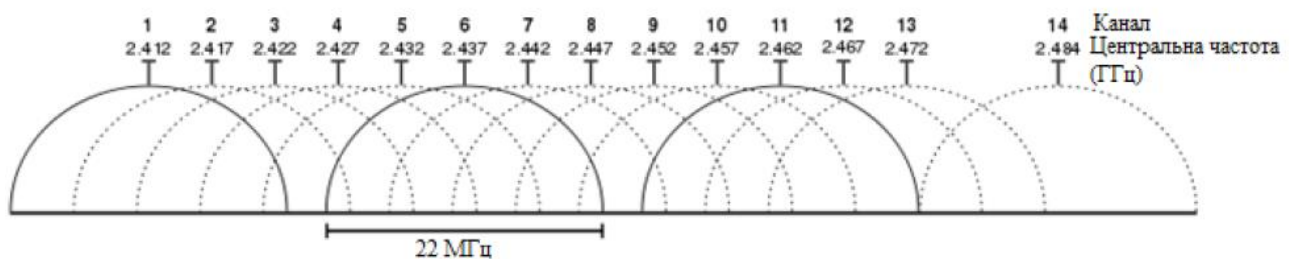


Рисунок 1.2 – Графічне представлення перекриття каналів Wi-Fi 2,4 ГГц

Wi-Fi не настільки захищений, як проводові мережі, тому безпека безпроводного зв'язку є ще одним важливим аспектом, який ми повинні розглянути. Ваш особистий Wi-Fi може бути відкритою мережею для всіх користувачів у регіоні, якщо його не захистити за допомогою заходів безпеки. Такими заходами можуть бути приховування SSID, фільтрація ідентифікаторів MAC-адрес, захист від Wired Equivalent Privacy (WEP), захищений доступ Wi-Fi (WAP) тощо [5].

Основні характеристики Wi-Fi:

- базується на основі стандартів. Найбільш поширеним є 802.11n (з підтримкою також b/g);
- працює в неліцензованих діапазонах 2,4 ГГц і 5 ГГц;
- потужність передавача Wi-Fi зазвичай становить від 15 до 20 дБ;

- використовує множинний доступ з контролем несучої і униканням колізій (CSMA/CA);
- діапазон до 100 м (але зазвичай 30-50 м);
- швидкість передавання даних: 150-200 Мбіт/с характерна для 802.11n (стандарт 802.11-ас пропонує від 500 Мбіт/с до 1 Гбіт/с);
- використовує WEP, WPA і WPA2 протоколи для мережного шифрування і протокол WPA2 включає шифрування AES;
- пропонує мережу розміром до 250 вузлів. Тим не менш, продуктивність істотно знижується, коли кількість під'єднаних пристроїв у мережі перевищує 40-60;
- має визначений процес сертифікації через Wi-Fi [5].

Bluetooth

Bluetooth - це технологія бездротового зв'язку, яка дозволяє здійснювати обмін даними на малій відстані між фіксованим обладнанням, мобільними пристроями та персональними мережами. Він використовує короткохвильову УВЧ-радіостанцію в діапазонах ISM між 2.4 і 2.485 ГГц (Bluetooth 2010).

Bluetooth дозволяє пристроям з'єднуватися, коли вони знаходяться один від одного в радіусі близько 100 м у старих версіях протоколу і до 1500 м починаючи з версії Bluetooth 5 [6]. Дальність сильно залежить від перешкод та перешкод, навіть в одному

Продукти Bluetooth (наприклад, навушники та годинники) містять невеликий комп'ютерний чіп, радіо та програмне забезпечення, що підтримують з'єднання Bluetooth. Коли два пристрої Bluetooth хочуть обмінюватися даними, їх потрібно спочатку об'єднати у пару. Зв'язок між пристроями Bluetooth здійснюється у тимчасовій мережі короткої відстані, також відомої як пікомережа. Мережа може підключатися до двох-восьми пристроїв. Коли створюється мережне оточення, один пристрій діє як головний пристрій, а інші - як підлеглі пристрої.

Робоча група по специфікації Bluetooth (CSWG) розробляє Bluetooth. В даний час існує два основних типи Bluetooth. Вони являють собою Bluetooth з

базовою швидкістю (BR) підвищеною швидкістю передавання даних (EDR) і Bluetooth з низьким енергоспоживанням (BLE). BR/EDR використовується в основному для динаміків і навушників, а BLE використовується для новітніх продуктів, таких як «розумний» будинок.

У версії Bluetooth 5.2 основною зміною стало покращення економії енергії під час використання Bluetooth. Якщо раніше низьке енергоспоживання було можливим лише при передачі невеликих обсягів даних (наприклад, дані про кількість пройдених кроків з фітнес-браслету на смартфон), зараз ситуація змінилася. Завдяки новій версії стандарту передача інформації вимагатиме набагато менших витрат часу та заряду акумулятора. Ця функція досягається завдяки тому, що дані ефективніше стискаються при передачі, а потім розпаковуються назад при отриманні.

Не менш важливою зміною стало використання ізохронних каналів. Завдяки їм користувач зможе підключати один гаджет (наприклад, Bluetooth-навушники) до кількох пристроїв одночасно (наприклад, до телефону, ноутбука та комп'ютера). Процес перемикання став автоматичним, і власнику не потрібно самостійно від'єднувати та під'єднувати навушники знову. Крім того, версія 5.2 дозволяє декількома програмами на смартфоні одночасно використовувати Bluetooth. Раніше технологія дозволяла лише одній програмі передавати дані, решта при цьому тимчасово блокувалися.

Нова версія Bluetooth не намагається кардинально змінити бездротову технологію даних. Вона спрямовані на поступове покращення її вже заявлених функцій. Можливості, до яких відносяться економія енергії та одночасне підключення кількох пристроїв, швидким темпом позбавляються своїх обмежень завдяки постійним оновленням і доробкам в нових версіях Bluetooth.

ZigBee

Розроблений на стандарті IEEE 802.15.4, ZigBee - це самостійний, безпечний, надійний протокол, що підтримує топологію «коміркова мережа». Він може розширюватися до тисяч вузлів у великих областях. ZigBee існує вже

близько 10 років і має приблизно 1 млрд пристроїв, розгорнутих у всьому світі. Специфікація продовжує розвиватися.

ZigBee – технологія, яка заснована на радіо стандарті IEEE 802.15.4 та призначена для стандартизації малопотужних M2M пристроїв різних виробників. З особливостей мережі можна виділити високу стійкість до відмов, тривалий термін служби кінцевих пристроїв від однієї батареї, підтримку великої кількості підключень і спільну роботу пристроїв різних виробників [7]. Стандарт може розширюватися до тисяч вузлів у великих областях. ZigBee існує вже близько 10 років і має приблизно 1 млрд пристроїв, розгорнутих у всьому світі.

З особливостей архітектури мережі: підтримка топології mesh, обов'язкова наявність координатора та, необов'язкове, роутера.

ZigBee передбачає передачу інформації у радіусі від 5 до 75 (на відкритій місцевості до 200) метрів із максимальною швидкістю 250 кбіт/с. Підтримує роботу в 27 каналах трьох частотних діапазонів:

- 2,4 ГГц (16 каналів);
- 915 МГц (10 каналів);
- 868 МГц (1 канал).

ZigBee підтримує декілька топологій мережі, включаючи точка-точка, точка-багатоточка, та коміркову мережі, рисунок 1.3.

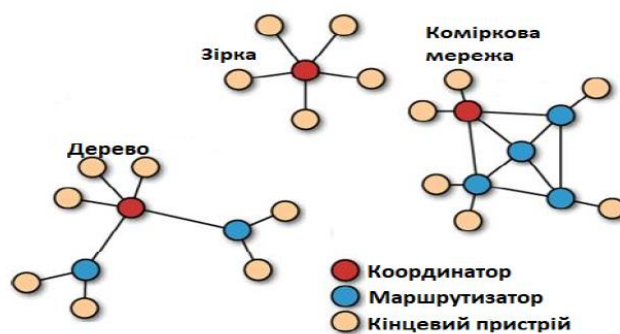


Рисунок 1.3 – Топологія «зірка», «дерево» і «коміркова мережа»

В архітектурі системи ZigBee є 3 типи пристроїв. Координатор ZigBee (ZC), маршрутизатор ZigBee (ZR) і кінцевий пристрій ZigBee (ZED). В мережі є тільки один координатор. Координатор вибирає топологію мережі, встановлює

мережу та керує інформацією про конфігурацію. Він виступає як шлюз в мережу і з неї, тому він бути ввімкненим і працювати постійно. Маршрутизатори ZigBee передають інформацію та переміщують дані через мережу. Вони також можуть функціонувати як сенсорний вузол. Оскільки маршрутизатори являють собою основу мережі, вони завжди повинні бути ввімкнені. Кінцевий пристрій знаходиться на краю мережі і є джерелом або користувачем мережних даних. Зазвичай він живиться від батареї і може знаходитися в режимі низького енергоспоживання протягом тривалого часу. Кінцевий пристрій зазвичай є найменш дорогим пристроєм у мережі.

Маршрутизація - це процес вибору шляху, який використовують для передачі повідомлення від кінцевого пристрою до пристрою призначення. Координатор ZigBee і маршрутизатор ZigBee відповідають за виявлення і підтримку маршрутів по всій мережі.

Основні характеристики ZigBee:

- працює на частоті 2,4 ГГц (для глобального використання), але також стандарт визначає радіоприймачі на частоті 868 МГц і 915 МГц;
- використовує множинний доступ з контролем несучої і униканням колізій (CSMA-CA), що дозволяє багатьом пристроям спільно використовувати один і той же частотний канал;
- підтримка швидкості передавання даних до 250 Кбіт/с, хоча вона, зазвичай, набагато нижча;
- використовує зв'язок з розширеним спектром для підвищення продуктивності в середовищах радіозв'язку з багатопроменевим, шумним та низьким рівнем сигналу;
- дозволяє використовувати діапазон від 10 до 100 метрів для програм ZigBee;
- підтримує до 65000 вузлів;
- використовує асоціацію і дисоціацію, щоб дозволити пристроям приєднуватися або виходити з мережі. Цей процес дає змогу самостійно формуватися і самовідновлюватися;

- використовує прив'язку для створення логічних зв'язків між відповідними програмами;
- забезпечує захист за допомогою 128-бітного шифрування AES для безпечних з'єднань даних .

Z-Wave

Z-Wave є запатентованим бездротовим протоколом зв'язку, розробленим для домашньої автоматизації, зокрема контролю та управління в житлових та комерційних об'єктах [8]. Технологія використовує малопотужні та мініатюрні радіочастотні модулі, які вбудовуються в побутову електроніку та різні пристрої, такі як освітлювальні прилади, опалювальні прилади, пристрої контролю доступу, розважальні системи та побутову техніку.

Z-Wave – це бездротова радіо технологія з низьким енергоспоживанням, розроблена спеціально для дистанційного керування. На відміну від Wi-Fi та інших IEEE 802.11 стандартів передачі даних, призначених в основному для великих потоків інформації, Z-Wave працює в діапазоні частот до 1 ГГц та оптимізована для передачі простих керуючих команд з малими затримками (наприклад, увімкнути/вимкнути, змінити гучність, яскравість тощо). Вибір низького радіочастотного діапазону для Z-Wave обумовлений малою кількістю потенційних джерел перешкод (на відміну від завантаженого діапазону 2,4 ГГц, в якому доводиться вдаватися до заходів, що зменшують можливі перешкоди від різних побутових бездротових пристроїв, що працюють — Wi-Fi, ZigBee, Bluetooth) .

Z-Wave призначений для створення недорогої та енергоефективної споживчої електроніки, у тому числі пристроїв на батарейках, таких як пульти дистанційного керування, датчики диму, температури, вологості, руху та інших датчиків безпеки.

Станом на 2018 рік Z-Wave підтримується більш ніж 700 виробниками по всьому світу та покриває широкий спектр споживчих та комерційних продуктів у США, Європі та Азії. Нижні шари протоколу, MAC і PHY, описуються ITU-T G.9959 і повністю сумісні. Радіочіпи Z-Wave поставляються компаніями Sigma

Designs та Mitsumi. Особливістю Z-Wave є те, що всі ці продукти сумісні між собою. Сумісність підтверджується процесом сертифікації Z-Wave чи Z-Wave Plus.

В основі рішення Z-Wave лежить сітка (mesh мережа), в якій кожен вузол або пристрій може приймати і передавати керуючі сигнали іншим пристроям мережі, використовуючи проміжні сусідні вузли. Mesh - це мережа, що самоорганізується, з маршрутизацією, що залежить від зовнішніх факторів, наприклад, при виникненні перешкоди між двома найближчими вузлами мережі сигнал піде через інші вузли мережі, що знаходяться в радіусі дії.

Розробник протоколу Z-Wave – данська компанія Zensys, яка з 2008 року належить американській компанії Sigma Designs.

1.3 Технологія Sigfox

SigFox – це ще одна нещодавня розробка в галузі технології LPWAN та однойменний сервіс підключення. До певної міри вона схожа на LoRa, але використовує інший спосіб досягнення аналогічних цілей. Технологія SigFox була розроблена та запатентована в 2009 р. невеликою французькою компанією (всього 80 осіб персоналу) з однойменною назвою, яка в області LPWAN співпрацює з рядом великих гравців ринку, таких як Texas Instruments, Silicon Labs та ON Semiconductor. По суті, SigFox є пропрієтарним протоколом бездротового мережевого зв'язку для IoT-пристроїв, що працюють в діапазонах до 1 ГГц, і надає мережу стільникових шлюзів, які забезпечують підключення до інтернету та хмари. Таким чином, це в цілому схоже на комерційні мережі LoRa, але не націлене на приватні мережі, де компанія встановлює і сама підтримує всю інфраструктуру мережі.

SigFox - це однострибкова радіальна, або, як її ще називають, зіркоподібна мережа зі шлюзами, які є контролерами цієї мережі. Подібно до LoRa, SigFox має великий діапазон покриття і їй властиво низьке енергоспоживання [9]. Але якщо розглядати SigFox як радіоканал передачі даних, вона радикально відрізняється від LoRa. Для передачі даних SigFox використовує надвузьку смугу частот, так

звану Ultra Narrowband (UNB) з дуже низькою швидкістю передачі даних. Протокол SigFox дуже простий. Він не вимагає обміну сигналами для встановлення зв'язку, тобто процедури подання або взаємного розпізнавання партнерів у зв'язку при встановленні з'єднання і передає пакети всього по 12 байт (плюс додаткові дані, такі як ідентифікатор радіозв'язку та час). Як було зазначено, передача ведеться у дуже тонкій смузі частот, у своїй використовується D-BPSK-модуляція (диференційна двійкова фазова маніпуляція) зі швидкістю 100 або 600 біт/с. Так, саме — 100 біт/с із шестисекундними циклами передачі. Однак така низька швидкість та вузький частотний спектр дозволяють заощаджувати енергію батарей та забезпечує великий радіус покриття.

Через вузьку смугу пропускання приймачі можуть мати дуже низький рівень власного шуму, тобто високу чутливість, що досягає порядку -140 дБм, та бюджети ліній зв'язку близько -160 дБ при використанні антен із посиленням. Це означає, що при застосуванні технології SigFox без кодування для інтернету речей, тобто за допомогою процесорів з невеликою обчислювальною потужністю, при низькій потужності передавача (14 дБм), низьких швидкостях передачі даних, коротких і нечастих, не більше 140 повідомлень на день, можна досягти більшої зони покриття та більш тривалого часу автономної роботи вузла мережі.

1.4 Технологія LoRa модуляції

LoRa (від англ. Long Range) - це досить новий метод модуляції та однойменна мережева технологія, що просувається відкритою некомерційною організацією LoRa Alliance (консорціум). У альянс входять багато провідних гравців ринку «Інтернету речей»: IBM, Semtech, Cisco, Inmarsat, Swisscom та ін [10].

Як правило, під LoRa зазвичай мається на увазі тип модуляції, а під LoRaWAN - відкритий мережевий протокол LoRa, який не треба безпосередньо асоціювати з LPWAN (як уже говорилося раніше, це будь-яка енергоефективна

мережа далекого радіусу дії). LoRaWAN використовується для передачі невеликих пакетів даних на далекі відстані. Така мережа була розроблена спеціально для розподілених мереж телеметрії, міжмашинної взаємодії, або так званого M2M та Інтернету речей. Мережа LoRa є однією з найперспективніших бездротових технологій, що забезпечують середовище збору даних з різного обладнання: датчиків, лічильників та сенсорів.

Залежно від регіональних розподілів, у такій мережі використовуються радіочастоти субгігерцового діапазону в спектрах частот, що не вимагають ліцензування, в діапазонах VHF (30–300 МГц), UHF (300 МГц — 3 ГГц) або 800–930 МГц. Оскільки технологія LoRa застосовує нижчі радіочастоти, ніж стандарти, що використовують частоти 2,4 або 5 ГГц, вона відрізняється від них і за радіочастотними характеристиками, при цьому сигнали LoRa можуть глибоко проникати в будівлі і в місця, недоступні більш високочастотним сигналам.

Модуляція LoRa сильно виділяється і є реальним досягненням у сфері радіочастотних технологій. Більшість стандартів ближнього радіусу дії використовує той чи інший різновид модуляцій FSK, OFDM, FHSS або DSSS з розширенням спектра. LoRa - це набір методів модуляції, запатентованих компанією Semtech, з розширенням спектра за допомогою лінійної частотної модуляції - Chirp Spread Spectrum (CSS). У цілому нині суть цього підходу у перебудові несучої частоти по лінійному закону [11].

Завдяки такій перебудові сигнал стає стійким до ефекту Допплера (для мобільних користувачів) і багатопроменевого замирання в радіочастотному середовищі, що відображає, а також отримує високий рівень перешкодостійкості. Крім того, за такого методу розширення спектра низькі бітові швидкості (до 300 біт/с) можуть уникнути впливу джерел вузькосмугових перешкод, таких як FSK-сигнали, та успішно відновитися на приймальному кінці. Це може дати лінії зв'язку LoRa перевагу 15 дБ порівняно з вузькосмуговим FSK-сигналом при використанні радіочастотних сигналів однакової потужності. Що стосується шумів, то LoRa може чудово і без проблем

працювати нижче за рівень навколишнього радіочастотного шуму і на 20 дБ або навіть ще нижче по відношенню до вузькосмугових джерел перешкод - через посилення, властиве цьому виду модуляції з розширеним спектром.

Також технологія LoRa дозволяє використовувати різні комбінації швидкості передачі даних та модуляції. Вони можуть бути обрані виходячи з різних міркувань: наприклад, для збільшення швидкості передачі даних (до 40 Кбіт/с) з меншим діапазоном покриття, коли швидкість передачі є критичним фактором, або для досягнення більшої дальності зв'язку з низькою радіочастотною потужністю в зашумлених середовищах. Справа в тому, що при зниженні швидкості передачі даних на один біт доводиться більше енергії і його легше розпізнати на приймальному кінці - отже, при одній і тій же потужності, що споживається, і чутливості приймача дальність зв'язку збільшується. Цікаво, що коефіцієнти розширення спектра LoRa, так звані SF, передачі даних можуть бути активні в одному каналі, не заважаючи при цьому один одному. Оскільки сигнал CSS простіше декодувати, ніж сигнали з іншими технологіями розширення спектра, це можна зробити і з меншою обчислювальною потужністю. Що, у свою чергу, призводить до збільшення часу автономної роботи пристроїв IoT, незважаючи на більш складне рішення в частині модуляції.

Технологія LoRa фокусується насамперед на фізичних (PHY) рівнях, тобто нижніх у структурі мережі від LoRa Alliance. А для вищих рівнів мережі консорціум визначає специфікації, що залежать від регіону. Дані передаються по каналах LoRa на шлюзи (концентратори): до них підключаються кінцеві пристрої, через які пристрої IoT підключаються до Інтернету та хмарних або прикладних серверів. Консорціум LoRa також визначає потрібне тестування та сертифікацію, щоб передбачити сумісність різних пристроїв LoRa у мережі. Для забезпечення безпеки мережі та даних у технології LoRa призначені захищені ключі зв'язку - як на рівні мережі, так і на рівні додатків, що стає необхідною умовою, коли радіосигнали поширюються у великій зоні покриття [12].

Фізичний радіоінтерфейс LoRa заснований на використанні широкосмугових радіосигналів з великою базою B багато більшої одиниці. Цей вид радіосигналів має дві основні особливості [13]:

- ширина спектра радіосигналу BW значно більша за швидкість передачі даних R_b ($BW \gg R_b$);
- кореляційна функція істотно вже кореляційної функції вузькосмугового радіосигналу з базою $B \sim 1$.

Частотна надмірність широкосмугового радіосигналу обумовлює його високу стійкість до перешкод, а вузька кореляційна функція – високу точність часової синхронізації.

Широкосмуговий радіосигнал LoRa є сигналом з лінійною частотною модуляцією (ЛЧМ) або CSS (Chirp Spread Spectrum). Частота CSS радіосигналу може збільшуватися (up-chirp), так і зменшуватися (down-chirp). Математично ЛЧМ сигнал подається у вигляді виразу:

$$x(t) = A_0 \cdot \cos\left(\omega_0 \cdot t + \frac{\mu}{2} \cdot t^2\right), \text{ де } \frac{T_S}{2} \leq t < \frac{T_S}{2}. \quad (1.1)$$

Сигнал описується наступними параметрами:

BW – ширина спектру радіосигналу;

$f_0, \omega_0 = 2\pi f_0$ – центральна (несуча) частота радіосигналу;

$f_n = f_0 - \frac{BW}{2}, \omega_n = 2\pi f_n$ – нижня частота радіосигналу;

$f_b = f_0 + \frac{BW}{2}, \omega_b = 2\pi f_b$ – верхня частота радіосигналу;

SF – коефіцієнт розширення спектру (від 7 до 12);

$T_S = \frac{2^{SF}}{BW}$ – тривалість передачі одного символу;

$\mu = \frac{BW}{T_S}$ – швидкість зміни частоти радіосигналу;

$B = BW \cdot T_S = 2^{SF}$ – база радіосигналу.

Тут коефіцієнт розширення спектру SF визначає розрядність символу даних (в бітах), який передається через радіоінтерфейс за час T_S .

Приймачі LoRa із великим радіусом дії гарантують простоту розгортання мережі, оскільки орієнтовані на використання топології «зірка» — найпростішої

архітектури з найменшою затримкою, що не вимагає транзитної передачі даних через ретранслятори рисунок 1.4. У зіркоподібній мережі легко розрахувати тривалість автономної роботи кожного вузла від батареї, що робить її ідеальною для застосування у різних інтелектуальних приладах обліку.

Сьогодні компанія Semtech пропонує порівняно недорогі LoRa-чіпсети, що використовуються в клієнтських модулях і реалізують рівень L0 (модуляція, демодуляція, синхронізація, M-послідовності та методи корекції помилок) за принципом чорної скриньки, надаючи користувачеві лише інтерфейс управління з певним набором спеціальних регістрів [14]. Найбільш популярною є лінійка SX1272/76/78/79, що має подібну архітектуру і відрізняється лише підтримуваними частотними діапазонами. Дані чіпсети відповідають стандарту ETSI EN 300 220.

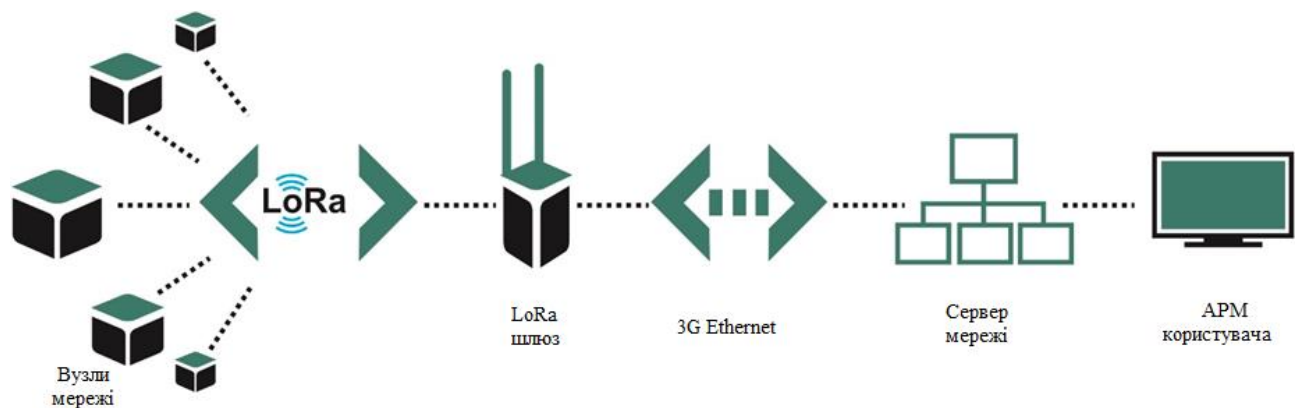


Рисунок 1.4 – Спрощена структура мережі з використанням чіпсетів на базі LoRa

Практично всі клієнтські LoRa-модулі різних виробників містять чіпсет від Semtech і мікроконтролер з керуючою програмою, що визначає функціонал модуля та його комерційні експлуатаційні характеристики (інтерфейс користувача, обмеження по частоті, потужності, часу безперервної передачі (TimeinAir) і т. д.). Існують також вироби, що містять тільки чіпсет з необхідною обв'язкою і SPI для роботи з програмою користувача, що надають розробнику максимальну гнучкість в управлінні.

Semtech опублікувала документацію з докладним описом регістрів, що управляють, і рекомендаціями по роботі з чіпсетом. Відкритою спільнотою розробників представлена значна кількість проектів під різні платформи, що дозволяють максимально використовувати ресурси чіпсету. Загальна блок-схема чіпсетів SX127x зображена на рисунку 1.5.

Чіпсет SX127x виконаний у корпусі QFN28 і як мінімальне обв'язке вимагає кварцовий резонатор 32 МГц, ланцюг узгодження антени та живлення. Інтерфейс управління виконаний у вигляді чотирипровідного SPI. Номінальна напруга живлення становить 3,3 В, споживаний струм - від 0,2 мкА в режимі сну, близько 10 мА в режимі постійного прийому і може досягати 150 мА за максимальної потужності 20 дБм (100 мВт) в тестовому режимі з добре узгодженою антеною [15].

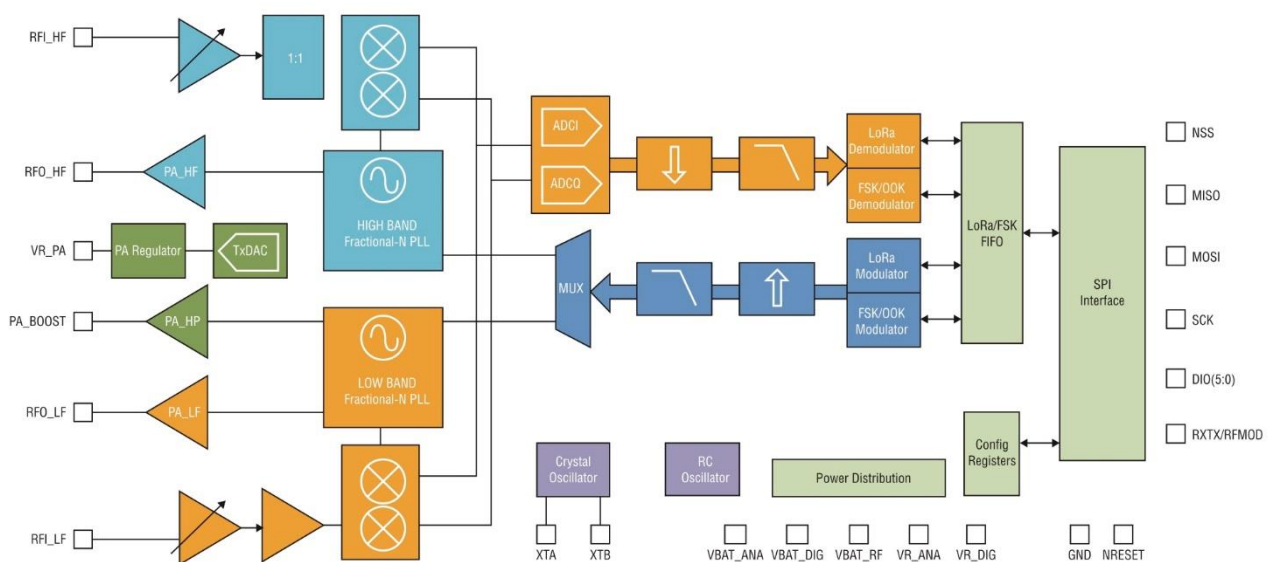


Рисунок 1.5 – Блок схема радіочіпсету SX127x

Дані передаються у вигляді пакетів, що містять преамбулу (мінімум чотири байти) та необов'язковий заголовок з контрольною сумою, а також періодичні синхровставки, що ще більше знижує корисну швидкість радіообміну, рисунок 1.6. Передбачено можливість вбудованої корекції помилок із надмірністю від 4/5 до 1/2.

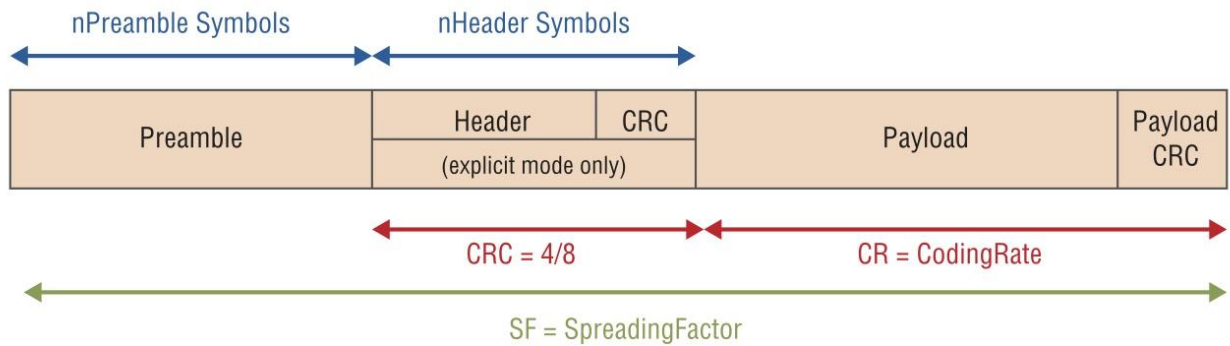


Рисунок 1.6 – Формат пакетів LoRa

Передбачено два режими пакетування: із явним та неявним заголовками (explicit & implicit header modes). У явному режимі заголовок містить розмір поля даних, контрольну суму та рівень корекції помилок. У неявному режимі заголовок не передається (це зменшує час в ефірі), тому зазначені параметри повинні бути попередньо узгоджені між передавальною та приймальною сторонами.

Важливою особливістю технології LoRa є висока стійкість до перешкод – для придушення радіоканалу необхідний або дуже потужний широкосмуговий сигнал, або спеціалізовані системи радіопридушення, що використовують псевдошумові послідовності, аналогічні LoRa (на сьогодні таких пристроїв у масовому виробництві не помічено), що також дозволяє використовувати її в системах, які вимагають підвищеної надійності передачі сигналу, такі як «система моніторингу стрілецького полігону» [16], або «система попередження техногенних аварій», [17]. Необхідно також відзначити, що LoRa - це радіоканал, на відміну від GSM, нечутливий до радіопридушення на стороні передавача, тому що не вимагає реєстрації та синхронізації з мережею. Це важливо, наприклад, у системах охорони в тому випадку, якщо зловмисник застосовує радіопридушення на самому об'єкті, а не диспетчерського пункту.

1.5 Архітектура LoRaWAN мереж

Розглянемо архітектуру LoRaWAN мереж. Типова мережа LoRaWAN складається з наступних елементів: кінцеві вузли, шлюзи, мережевий сервер та сервер додатків, рисунок 1.7 [18].

Кінцевий вузол (End Node) призначений реалізації керуючих чи вимірювальних функцій. Він містить набір необхідних датчиків та керуючих елементів.

Шлюз LoRa (Gateway/Concentrator) – пристрій, який приймає дані від кінцевих пристроїв за допомогою радіоканалу та передає їх у транзитну мережу. Такими мережами можуть виступати Ethernet, WiFi, стільникові мережі та будь-які інші телекомунікаційні канали. Шлюз та кінцеві пристрої утворюють мережеву топологію типу зірка. Зазвичай цей пристрій містить багатоканальні приймачі для обробки сигналів в декількох каналах одночасно або навіть декількох сигналів в одному каналі. Відповідно, кілька таких пристроїв забезпечує зону покриття мережі та прозору двонаправлену передачу даних між кінцевими вузлами та сервером.

Мережевий сервер (Network Server) призначений для керування мережею: завданням розкладу, адаптацією швидкості, зберіганням і обробкою даних, що приймаються.

Сервер програм (Application Server) може віддалено контролювати роботу кінцевих вузлів та збирати необхідні дані з них.

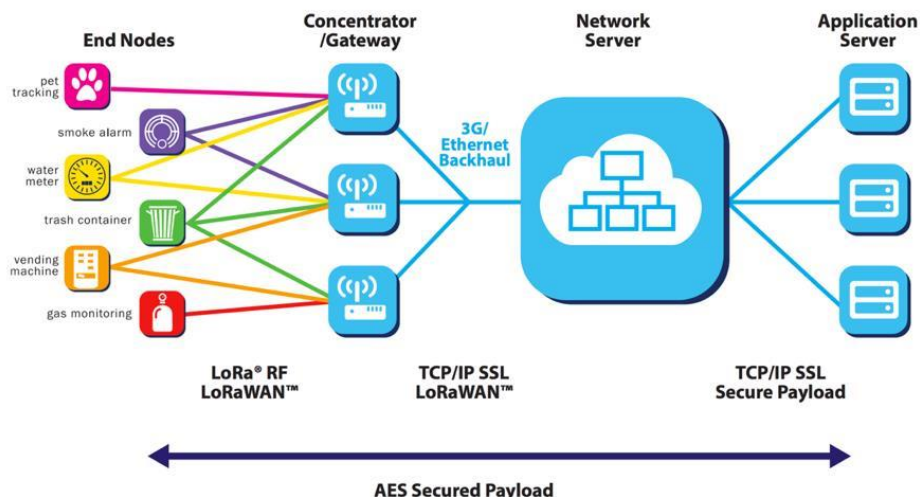


Рисунок 1.7 – Архітектура LoRaWAN мережі

Зрештою, LoRaWAN мережа має топологію зірка із зірок, має кінцеві вузли, які через шлюзи, що утворюють прозорі мости, обмінюються інформацією з центральним сервером мережі. За такого підходу зазвичай передбачається, що шлюзами і центральним сервером володіє оператор мережі, а кінцевими вузлами – абоненти. Абоненти мають можливість прозорі двонаправленої та захищеної передачі даних до кінцевих вузлів.

Так як LoRaWAN утворюють глобальну мережу, то розробники приділили особливу увагу безпеці та конфіденційності даних, які забезпечуються шифруванням AES на декількох рівнях:

- на мережному рівні за допомогою унікального ключа мережі (Unique Network key, EUI64).
- наскрізну безпеку на рівні програм за допомогою унікального ключа програми (Unique Application key, EUI64).
- спеціальний ключ пристрою (Device specific key, EUI128).

Для вирішення різних завдань та застосувань у мережі LoRaWAN передбачено три класи пристроїв, рисунок 1.8.

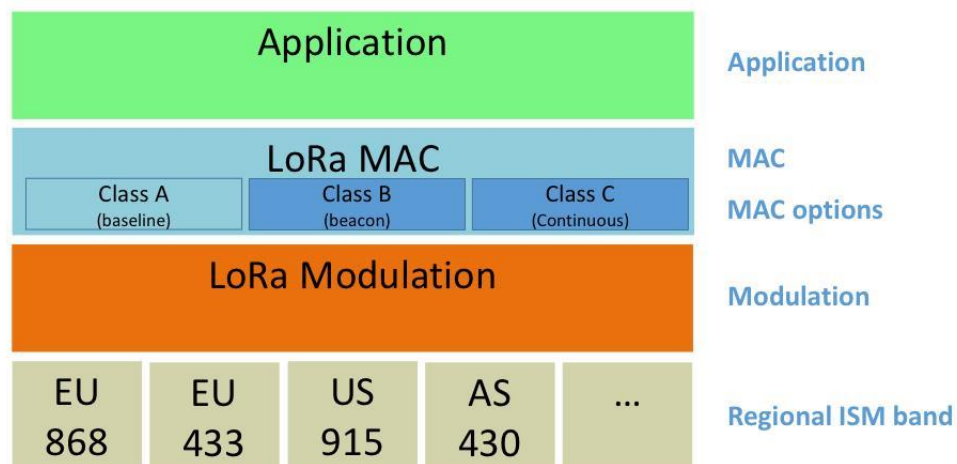


Рисунок 1.8 – Класи пристроїв в мережах LoRaWAN

- Двонаправлені кінцеві пристрої "класу А" (Bi-directional end-devices, Class A). Пристрої цього класу застосовуються, коли потрібна мінімальна споживана потужність при переважанні передачі даних до сервера. Як

ініціатор сеансу зв'язку виступає кінцевий вузол, відправляючи пакет з необхідними даними, а потім виділяє два вікна, протягом яких чекає даних від сервера. Таким чином, передача даних сервера можлива тільки після виходу на зв'язок кінцевого пристрою.

- Двонаправлені кінцеві пристрої "класу В" (Bi-directional end-devices, Class B). Основна відмінність від пристроїв класу А полягає у виділенні додаткового вікна прийому, яке пристрій відкриває за розкладом. Для складання розкладу кінцевий пристрій здійснює синхронізацію за спеціальним сигналом від шлюзу. Завдяки цьому додатковому вікну сервер має можливість розпочати передачу даних у заздалегідь відомий час.
- Двонаправлені кінцеві пристрої "класу С" з максимальним приймальним вікном (Bi-directional end-devices, Class C). Пристрої цього класу мають майже безперервне вікно прийому даних і закриває його лише на час передачі даних, що дозволяє їх застосовувати для вирішення завдань, що вимагають отримання великого обсягу даних.

Отже, LoRaWAN дозволяє будувати глобальні розподілені бездротові мережі з великою кількістю кінцевих вузлів. За заявами Semtech, один LoRa-шлюз допускає обслуговування до п'яти тисяч кінцевих пристроїв, що досягається за рахунок:

- топології мережі;
- адаптивної швидкості передачі даних і адаптивної вихідної потужності пристроїв, що задаються мережним сервером;
- тимчасовим розподілом доступу до середовища;
- частотним розподілом каналів;
- особливістю LoRa-модуляції, що дозволяє в одному частотному каналі одночасно демодулювати сигнали, що передаються на різних швидкостях.

Висновки

В даному розділі було проведено пошук, огляд та аналіз науково-технічної інформації про методи та засоби для безпроводної передачі інформації на відстань. В ході аналізу було визначено та найкращий спосіб безпроводної передачі інформації, який дозволяє передавати радіосигнал на значну відстань – LoRa. Також було розглянуто склад та архітектуру LoRaWAN мереж для побудови системи об'єктового попередження техногенних аварій.

2 ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ ОБ'ЄКТОВОГО ПОПЕРЕДЖЕННЯ ТЕХНОГЕННИХ АВАРІЙ

2.1 Аналіз побудови системи

Склад системи

Розроблена система об'єктового попередження техногенних аварій повністю автономна, тобто вона не використовує підключення до зовнішніх телекомунікаційних систем, мережі інтернет або покриття мобільних операторів. В мінімальній конфігурації система складається з одного об'єктового передавача та диспетчерського приймача, або з диспетчерського приймача та декількох об'єктових передавачів, рисунок 2.1.



Рисунок 2.1 – Конфігурація системи: а) один передавач; б) декілька передавачів

Диспетчерський приймач являє собою пристрій, призначений для приймання сигналу про тривогу. Він постійно знаходиться в активному стані та налаштований на постійний прийом сигналу, щоб вчасно зреагувати на нього. Він знаходиться у оператора. Можливе встановлення у будь-якому місці, але з умовою забезпечення стійкого прийому сигналу. У випадку, якщо приймач знаходиться у приміщенні з товстими стінами, а відповідно і з великим згасанням сигналу при проходженні через них, антену необхідно встановити ззовні приміщення та здійснити її підключення.

Диспетчерський приймач обладнаний інформаційним дисплеєм для виводу інформації. На дисплеї відображається інформація про ситуацію, яка склалася на об'єкті, тобто адресу об'єкта та які сповіщувачі спрацювали. Для привертання уваги оператора при надходженні сигналу було встановлено звуковий сповіщувач, який сигналізує про нове повідомлення. Це робить роботу з приймачем більш комфортною, оскільки усувається необхідність постійно слідкувати за екраном.

Структурна схема диспетчерського приймача зображена на рисунку 2.2, та має наступний склад:

- мікроконтролер;
- інформаційний дисплей;
- голосовий сповіщувач;
- кнопка підтвердження;
- джерело живлення;
- приймач;
- антена.

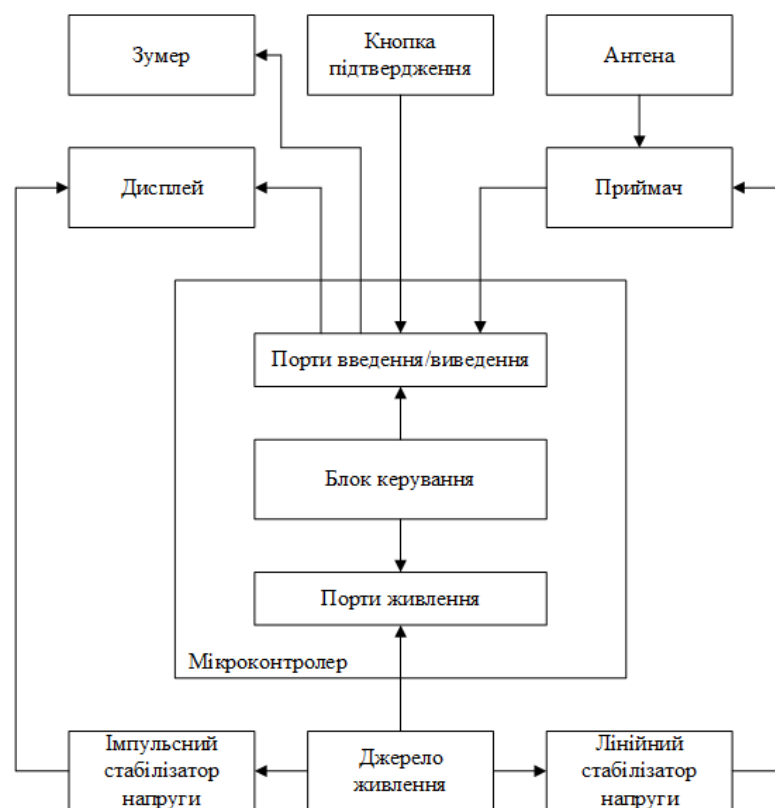


Рисунок 2.2 – Структурна схема диспетчерського приймача

Об'єктовий передавач встановлюється безпосередньо на об'єкті. До нього підключається датчик необхідного типу, а мікроконтролер програмується саме під цей датчик. Антена передавача виноситься назовні для кращої якості зв'язку.

Структурна схема об'єктового передавача зображена на рисунку 2.3 та включає такі компоненти:

- датчик;
- мікроконтролер;
- джерело живлення;
- передавач;
- антена.

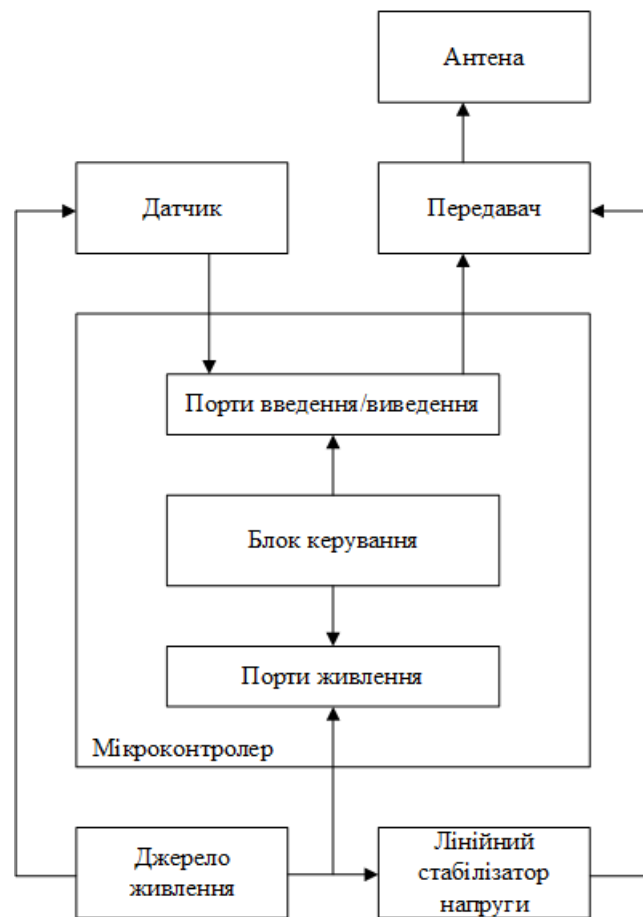


Рисунок 2.3 – Структурна схема об'єктового передавача

Всі складові частини системи об'єктового попередження техногенних аварій наведено на рисунку 2.4. Структурну схему всієї системи наведено на рисунку 2.5.

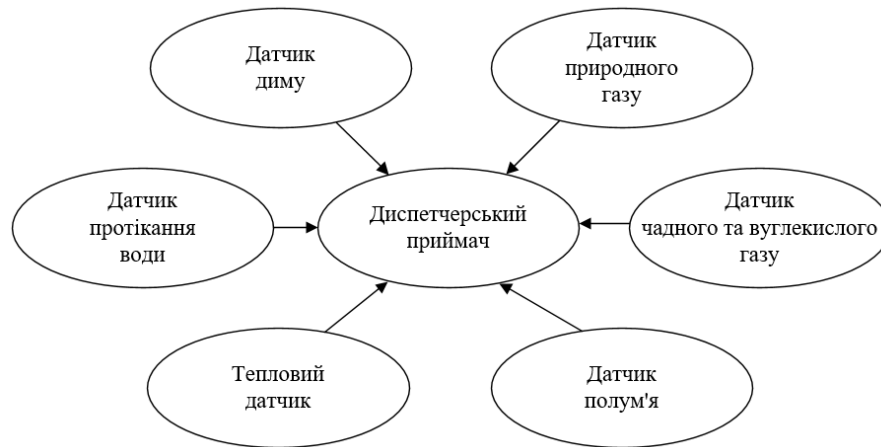


Рисунок 2.4 – Склад системи об’єктового попередження техногенних аварій

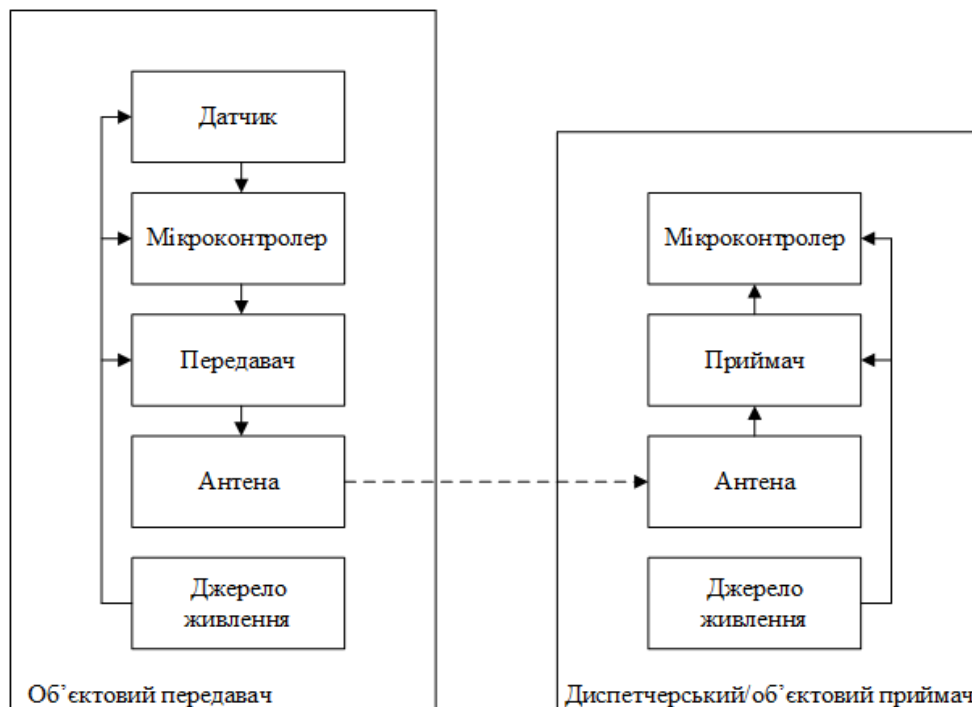


Рисунок 2.5 – Структурна схема системи об’єктового попередження техногенних аварій

Алгоритм роботи

Після виникнення небезпечної ситуації спрацьовує датчик та подає сигнал на мікроконтролер. В свою чергу мікроконтролер керує передавачем та передає сигнал через радіолінію. Диспетчерський приймач отримує сигнал та виводить інформацію на дисплей та інформує про нове повідомлення звуковим сигналом. Оператор бачить інформацію та приймає рішення про подальші дії (виклик

пожежників, газової служби, тощо). Алгоритм роботи системи зображено на рисунку 2.6



Рисунок 2.6 – Алгоритм роботи системи об'єктового попередження техногенних аварій

Оскільки це автономна система, то швидкодія в такій системі буде більшою у порівнянні з використанням мережі інтернет або послуг мобільних операторів. В даному випадку сигналу не потрібно проходити через декілька серверів, або від однієї базової станції до іншої, сигнал напряму надсилається до оператора. Також це вигідно з точки зору ціни користування системою, оскільки додаткові послуги (плата за інтернет, плата мобільним операторам) не використовуються, а система працює в неліцензійному безкоштовному діапазоні частот.

Опис радіомодулю

Першу тестову версію системи було побудовано на базі трансмітерів «SX1278», які встановлені в радіомодулі «RA-02», рисунок 2.7. Радіомодуль використовує технологію розширення спектру LoRa [19], що забезпечує велику дальність передачі інформації, але при низькій швидкості передачі.



Рисунок 2.7 – Радіомодуль «RA-02»

Короткі характеристики мікросхеми передавача [20]:

- вхідна напруга: 3,3В;
- споживаний струм до 120мА
- вихідна потужність передавача: 20 дБм;
- програмована швидкість передачі даних до 300 кбіт/с;
- висока чутливість приймача: -146,5 дБм;
- вбудований алгоритм CRC;
- підтримувані види модуляції: FSK, GFSK, MSK, GMSK, OOK, LORA.

В режимі очікування передавач споживає невеликий струм і максимальне споживання в 120мА відбувається лише пре передачі інформації. Звідси можна зробити висновок про енергоефективність модулю. Варто зазначити, що максимальна швидкість передачі досягається при передачі сигналу на невелику відстань. Для передачі на велику відстань радіомодуль необхідно сконфігурувати певним чином, а швидкість передачі при цьому суттєво зменшується.

2.2 Дослідження дальності дії системи

Для подальшого розрахунку дальності спершу потрібно розібратися з поняттям дальності роботи безліцензійних «LPWAN» мереж. «LPWAN» переводиться як «низько споживаюча мережа великої площі покриття», це означає, що споживання енергії, а отже і енергоефективність розглядається лише у зв'язку з дальністю роботи приладів. Дальність роботи «LPWAN» необхідна для здешевлення вартості інфраструктури мережі, щоб один шлюз-приймач міг обслуговувати якомога більше приладів і не сильно збільшував грошові затрати в перерахунок на один датчик.

Наприклад, якщо оцінювати дальність LoRaWAN в місті – близько 3,5 кілометрів [21], а Bluetooth – 35 метрів [6]. Тоді у Bluetooth площа покриття буде в 20 тисяч раз менше. При цьому енергія повідомлення LoRaWAN більше відносно Bluetooth приблизно в стільки ж разів – це означає, що енергоефективність приведена до площі покриття у LoRaWAN та Bluetooth мають приблизно однакові значення.

Такий результат повністю узгоджується з фізичними законами розповсюдження інформації по радіоканалу.

Теорема Шеннона-Гартлі

Теорема Шеннона-Гартлі теоретично описує найкраще, що можна зробити на основі ефективності пропускну здатності: чим більше використовується смуга пропускання, тим більша енергія на біт відносно спектральної щільності теплового шуму (E_b/N_0), яку можна отримати для безпомилкової демодуляції [22].

Зокрема теорема Шеннона-Гартлі ставить нижню межу для E_b/N_0 для безпомилкової демодуляції із заданою ефективністю спектру:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{2^\eta - 1}{\eta}, \quad (2.1)$$

де E_b/N_0 – енергія на біт відносно спектральної щільності теплового шуму;
 η – спектральна ефективність, виміряна в одиницях біт/Гц, нижня межа Шеннона.

Обмеження Шеннона на швидкість передачі інформації в ефірі можна трактувати в наступному формулюванні:

«Площа зони покриття приймача при інших рівних умовах обернено пропорційна швидкості передачі інформації і практично не залежить від типу використаної модуляції».

Bluetooth працює швидко, але на невеликі відстані. Для забезпечення зв'язку на площу покриття одного LoRaWAN шлюзу доведеться поставити велику кількість Bluetooth шлюзів, приблизно рівну відношенню площ покриття – 20 тисяч.

Дальність роботи LoRa

Дальність роботи LPWAN в першу чергу визначається чутливістю приймача шлюзу. Основним параметром, який характеризує загальну продуктивність системи в цілому, є бюджет каналу зв'язку, який формується з суми чутливості приймача та вихідної потужності передавача. Потужність передавача лімітована регламентуючими стандартами, через це очевидним шляхом покращення дальності зв'язку є підвищення чутливості приймача [23].

Чудова чутливість (до -148дБм) – ключова характеристика LoRa-приладів компанії Semtech, яка досягається завдяки використанню одноіменного методу модуляції, рисунок 2.8. Чутливість як функція швидкості передачі даних наведена на рисунку 2.9.

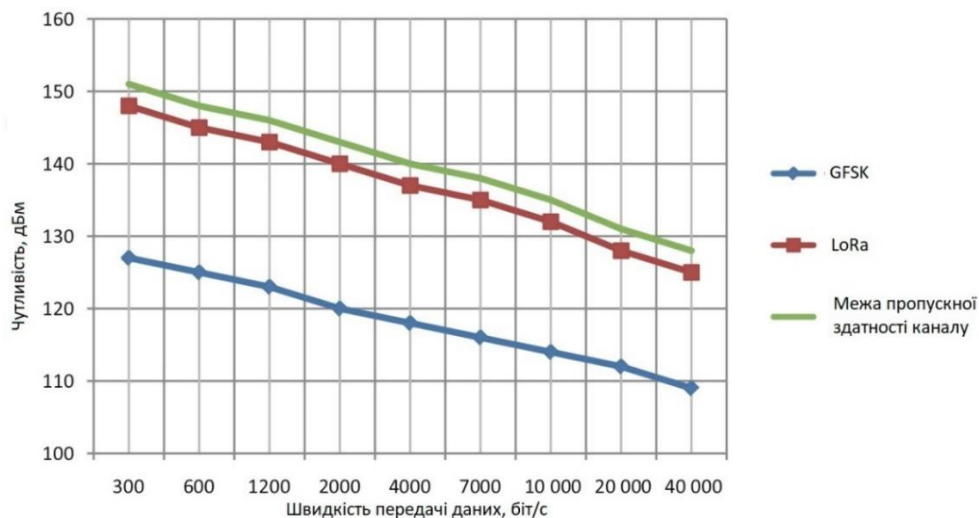


Рисунок 2.8 – Залежність чутливості приймачів до швидкості передачі даних для різних видів модуляції

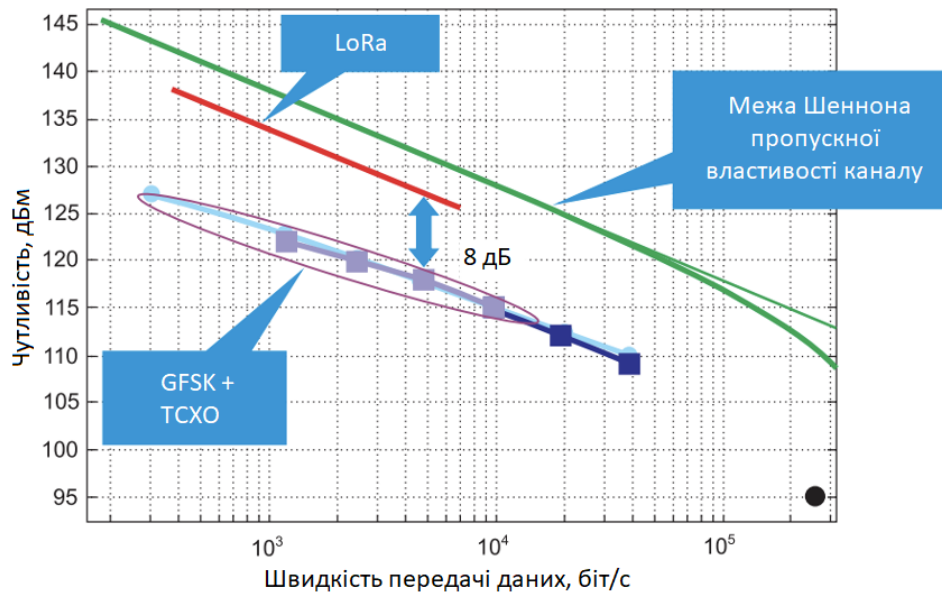


Рисунок 2.9 – Залежність чутливості від швидкості передачі даних для гаусівської частотної маніпуляції та розширенням спектру (LoRa)

Для перевірки унікальної чутливості сигналу на вході приймача було проведено дослід. Було взято комплект LoRa пристроїв та якісний чіп приймача в діапазоні 868 МГц з можливістю низької швидкості передачі інформації. Ідеальним варіантом під вибрані характеристики є приймач AX5243 виробництва «ON Semiconductor», який досліджувався на використаних модуляціях PSK та FSK. Зовнішній вигляд обраного приймача наведений на рисунку 2.10.



Рисунок 2.10 – Радіочастотний ресивер великої дальності дії на AX5243

Результати дослідження наведені в таблиці 2.1, а також побудовано графік, зображений на рисунку 2.11.

Таблиця 2.1. Характеристики чутливості LoRaWAN та AX5243

Швидкість кб/с	0,10	0,29	0,54	0,98	1,00	1,76	3,13	5,47	10,94	10,00	50,00	100,00
LoRaWAN, SF		SF12	SF11	SF10		SF9	SF8	SF7	SF6			
Чутливість, дБм												
Обмеження Шеннона	-154				- 144					-134		-124
LoRaWAN		-137	-135	-132		- 129	- 126	- 123	-118			
AX5243, PSK	-138				- 130					-120		-109
AX5243, FSK	-135				- 126					-117		-107

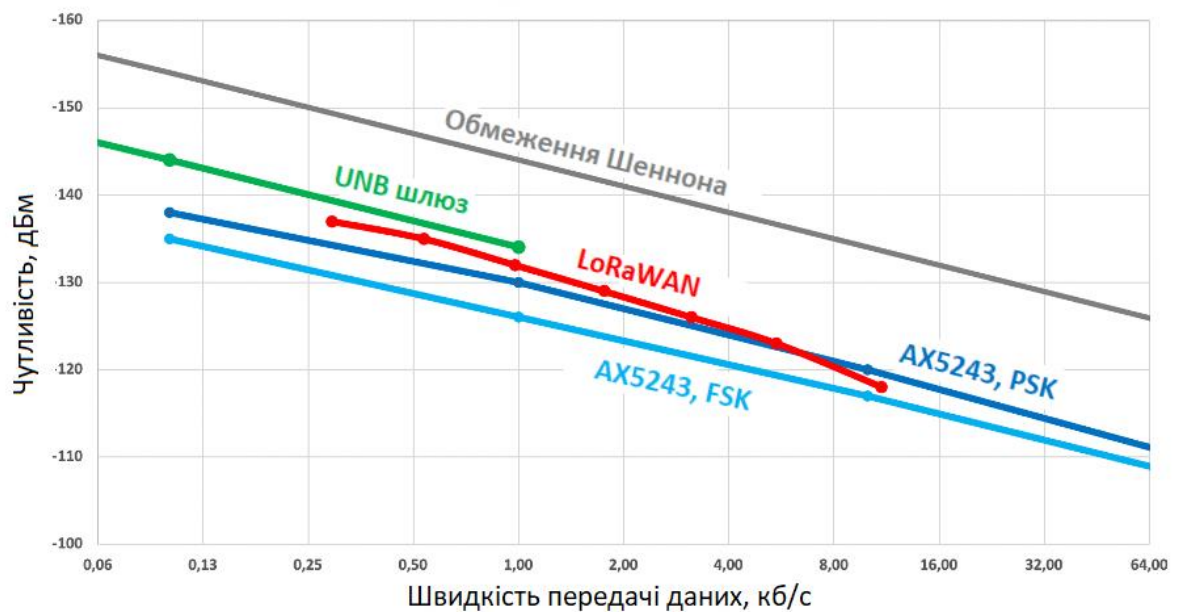


Рисунок 2.11 – Залежність чутливості приймача від швидкості передачі даних для LoRaWAN та AX5243

Графік, зображений на рисунку 2.11 відрізняється від графіку наведеного на рисунку 2.9. При порівнянні графіків, які відображають залежність чутливості

приймача від швидкості передачі даних видно, що різниця в чутливості приймачів незначна. З цього можна зробити висновок, який підтверджує, що чутливість сигналу на вході приймача обернено пропорційна швидкості передачі інформації та при правильно спроектованому приймачеві, не сильно залежить від використовуваного типу модуляції. Сучасна елементна база дозволяє проектувати приймачі шлюзу з чутливістю, яка наближається до обмеження Шеннона.

Ключовою перевагою чіпів LoRa є власне не висока чутливість на низьких швидкостях, а низькі вимоги до стабільності опорного генератору. На кінцевих приладах відпадає необхідність використання дорогих та енергозатратних компонентів для стабілізації частоти.

Модель Окамура-Хата

При проектуванні систем радіозв'язку з рухомими об'єктами виникає необхідність визначення зони обслуговування в якій буде забезпечена хороша якість зв'язку з заданою надійністю. Емпірична модель Окамура-Хата широко використовується при плануванні систем радіозв'язку з рухомими об'єктами, а також стільникових систем зв'язку. Через це в даній моделі часто замість термінів «передавач» та «приймач» часто використовуються терміни «базова станція» та «абонентська станція», «БС» та «АС» відповідно. [24].

Для розрахунку зони обслуговування БС в мережах мобільного зв'язку необхідно враховувати:

- потужності передавачів БС та АС;
- параметри антенно-фідерного тракту приймально-передавальної апаратури (характеристики діаграм спрямованості приймальної антени, висоти її встановлення, втрат в антенно-фідерному тракті і т. д.);
- рівень зовнішніх та внутрішніх шумів на вході приймача та його чутливість;
- статичні закономірності розповсюдження радіохвиль в умовах місцевості і міської забудови;
- параметри радіоканалу зв'язку (характер місцевості, ступінь урбанізації);

- електричні параметри використовуваної апаратури (робоча частота, тип модуляції, ширина смуги пропускання приймача).

Окрім того необхідно враховувати умови розповсюдження радіохвиль в місті та приміських територіях. Середній рівень сигналу головним чином залежить від технічних характеристик БС та АС а також відстанню між ними. Розрахунок середнього рівня втрат відбувається на основі емпіричної моделі Окамура-Хата.

В цьому випадку місцевість представляється квазіпласкою. Рельєф місцевості, а також будівлі, розміщені по прямій, яка з'єднує БС та АС, викликають дифракцію сигналу, який передається. В результаті через рух мобільних станцій зв'язку відбуваються коливання сигналу відносно середнього рівня (так звані повільні завмирання), які підпорядковуються логарифмічно-нормальному закону розподілення ймовірності (або гаусівському розподіленню в дБ). Також об'єкти (будинки, пагорби) які знаходяться в межах точки приймання сигналу викликають явище багатопроменевості, тобто в точку приймання окрім прямого сигналу від базової станції приходять багато сигналів відбитих від об'єктів. В результаті відбуваються коливання рівня сигналу підданого повільним завмиранням.

Таким чином, рівень прийманого сигналу абонентською станцією визначається середньою величиною затухання, яка залежить від відстані між БС та АС. Величина затухання має діапазон, який визначається повільними та швидкими завмираннями.

Модель Окамура-Хата дозволяє отримувати достатньо точні значення медіанних втрат на трасах наземного рухомого зв'язку при наступних обмеженнях:

- частота сигналу $f = 100 - 3\,000$ МГц;
- дальність зв'язку $R = 1 - 300$ км;
- висота підйому передавальної антени $h_{\text{БС}} = 30 - 200$ м;
- висота підйому антени абонентської станції $h_{\text{АС}} = 1 - 10$ м.

При цьому в моделі використовуються достатньо зручна класифікація типів місцевості:

- Великі міста. Дана зона характеризується наявністю установ та індустріальних підприємств, великим числом висотних побудов та хмарочосів. Рух автотранспорту надзвичайно оживлений практично для всього часу доби.
- Невеликі і середні міста. Щільно населена зона з великою кількістю установ, які включають висотні будівлі. Рух автотранспорту доволі інтенсивний та залежить від періоду доби.
- Приміська територія. Велика кількість забудов здебільшого дачного типу, а також підсобних приміщень (склад, невеликий магазин, гараж). Помірний рух автотранспорту.
- Сільська (відкрита) місцевість. Незабудована територія (відкрита місцевість) Необроблена або частково оброблена земля з невеликими спорудами, які знаходяться на значній відстані.

Міська територія

В загальному випадку втрати в радіоканалі в умовах міста визначаються за формулою [25]:

$$L_U = 69,55 + 26,16 \log_{10} f - 13,82 \log_{10} h_B - C_H + [44,9 - 6,55 \log_{10} h_B] \log_{10} d \text{ дБм}, \quad (2.2)$$

де L_U – втрати при розповсюдженні радіохвиль в міських районах, дБ;

h_B – висота підйому антени базової станції, м;

f – частота передачі радіосигналу, МГц;

C_H – поправочний коефіцієнт, який враховує висоту антени абонентської станції в залежності від місцевості, дБ;

d – відстань між базовою станцією та абонентською станцією, км.

Для малого або середнього міста поправочний коефіцієнт розраховується за наступною формулою:

$$C_H = 0,8 + (1,1 \log_{10} f - 0,7) h_M - 1,56 \log_{10} f, \quad (2.3)$$

де f – частота передачі радіосигналу, МГц;
 h_M – висота підйому антени абонентської станції, м.

Для великих міст поправочний коефіцієнт розраховується за одним з наступних виразів, в залежності від частоти передавання сигналу в радіоефір:

$$C_H = \begin{cases} 8,29(\log_{10}(1,54h_M))^2 - 1,1, & \text{if } 150 \leq f \leq 200 \\ 3,2(\log_{10}(11,75h_M))^2 - 4,97, & \text{if } 200 \leq f \leq 1500. \end{cases} \quad (2.4)$$

Приміська територія

Модель Окамура-Хата для приміських середовищ застосовується для передавання сигналу тільки за межами міст і в сільській місцевості, де є штучні споруди, але не такі високі та не такої великої щільності забудови, як у містах.

Точніше ця модель підходить там, де є будівлі, але абонентська станція не має значних змін у висоті. З урахуванням вище сказаних умов, визначення втрат розраховуватиметься за наступною формулою:

$$L_{SU} = L_U - 2 \left(\log_{10} \frac{f}{28} \right)^2 - 5,4, \quad (2.5)$$

де L_{SU} – втрати при розповсюдженні радіохвиль в приміських районах, дБ;
 L_U – втрати при розповсюдженні радіохвиль в міських районах, дБ;
 f – частота передачі радіосигналу, МГц.

Відкрита територія

Модель Окамура-Хата для сільського середовища застосовується для радіопередач на відкритих територіях, де жодні перешкоди не блокують лінію передачі. Вона виглядає наступним чином:

$$L_O = L_U - 4,78(\log_{10} f)^2 + 18,33(\log_{10} f) - 40,94, \quad (2.6)$$

де L_O – втрати при розповсюдженні радіохвиль на відкритих територіях, дБ,
 L_U – втрати при розповсюдженні радіохвиль в міських районах, дБ;
 f – частота передачі радіосигналу, МГц.

Розрахунок дальності LoRa для міської території

Величина зони покриття шлюзу LoRa буде визначатися найменшим значенням дальності зв'язку між шлюзом – кінцевим пристроєм (лінія вниз DL) та між кінцевим пристроєм – шлюзом (лінія вверх UL). Дальність зв'язку буде визначатися шляхом вирішення першого рівняння зв'язку:

$$P_{\text{КС}} = P_{\text{ВИП}} - L(d, h_B, h_M) - B_T - B_E, \quad (2.7)$$

де $P_{\text{КС}}$ [дБм] – рівень потужності корисного сигналу на вході приймальної антени;

$P_{\text{ВИП}}$ [дБм] – рівень ефективної ізотропної потужності передавача;

$L(d, h_B, h_M)$ [дБм] – втрати сигналу при розповсюдженні, визначені за допомогою моделі Окамура-Хата;

B_T [дБ] – додаткові втрати сигналу при роботі з портативною абонентською станцією, які становлять близько 3 дБ;

B_E [дБ] – додаткові втрати сигналу при роботі з портативною абонентською станцією в будинку або в автомобілі (для автомобіля близько 8 дБ, для будинку 15 дБ).

Рівень ефективної ізотропної потужності передавача розраховується за формулою:

$$P_{\text{ВИП}} = P_{\text{ПД}} - B_{\text{Ф ПД}} - B_{\text{Д ПД}} - B_{\text{К}} + G_{\text{ПД}}, \quad (2.8)$$

де $P_{\text{ПД}}$ [дБм] – рівень потужності передавача;

$B_{\text{Ф ПД}}$ [дБ] – втрати в фідері антени передавача;

$B_{\text{Д ПД}}$ [дБ] – втрати в дуплексорі на передачу;

$B_{\text{К}}$ [дБ] – втрати в комбайнері (пристрій додавання);

$G_{\text{ПД}}$ [дБі] – коефіцієнт підсилення антени передавача в напрямку зв'язку.

Для розрахунку дальності роботи LoRa в умовах міста, було використано модель Окамура-Хата для даного виду місцевості, формула 2.2. Для початку необхідно зрозуміти, яку чутливість сигналу на вході приймача LoRa можна

отримати. Дані параметри залежать від коефіцієнту розширення спектру та ширини спектру переданого радіосигналу. Їх можна отримати звернувшись до технічної документації на трансмітер SX1278 [15], де знаходиться інформація про всі налаштування використовуваної радіоапаратури, а саме налаштування, від яких залежить чутливість приймача. Звідти було отримано дані, зображені на рисунку 2.12.

Symbol	Description	Conditions	Min.	Typ	Max	Unit
IIP3_L_LF	3rd order Input Intercept point Unwanted tones are 1MHz and 1.995 MHz above the LO	Band 2 Highest LNA gain G1 LNA gain G2, 2.5dB sensitivity hit	- -	-22 -15	- -	dBm dBm
RFS_L10_HF	RF sensitivity, Long-Range Mode, highest LNA gain, <i>LnaBoost</i> for Band 1, using split Rx/Tx path 10.4 kHz bandwidth	SF = 6 SF = 7 SF = 8 SF = 11	- - - -	-131 -134 -138 -146	- - - -	dBm dBm dBm dBm
RFS_L62_HF	RF sensitivity, Long-Range Mode, highest LNA gain, <i>LnaBoost</i> for Band 1, using split Rx/Tx path 62.5 kHz bandwidth	SF = 6 SF = 7 SF = 8 SF = 9 SF = 10 SF = 11 SF = 12	- - - - - - -	-121 -126 -129 -132 -135 -137 -139	- - - - - - -	dBm dBm dBm dBm dBm dBm dBm
RFS_L125_HF	RF sensitivity, Long-Range Mode, highest LNA gain, <i>LnaBoost</i> for Band 1, using split Rx/Tx path 125 kHz bandwidth	SF = 6 SF = 7 SF = 8 SF = 9 SF = 10 SF = 11 SF = 12	- - - - - - -	-118 -123 -126 -129 -132 -133 -136	- - - - - - -	dBm dBm dBm dBm dBm dBm dBm
RFS_L250_HF	RF sensitivity, Long-Range Mode, highest LNA gain, <i>LnaBoost</i> for Band 1, using split Rx/Tx path 250 kHz bandwidth	SF = 6 SF = 7 SF = 8 SF = 9 SF = 10 SF = 11 SF = 12	- - - - - - -	-115 -120 -123 -125 -128 -130 -133	- - - - - - -	dBm dBm dBm dBm dBm dBm dBm
RFS_L500_HF	RF sensitivity, Long-Range Mode, highest LNA gain, <i>LnaBoost</i> for Band 1, using split Rx/Tx path 500 kHz bandwidth	SF = 6 SF = 7 SF = 8 SF = 9 SF = 10 SF = 11 SF = 12	- - - - - - -	-111 -116 -119 -122 -125 -128 -130	- - - - - - -	dBm dBm dBm dBm dBm dBm dBm

Рисунок 2.12 – Залежність чутливості приймача від ширини спектру та коефіцієнту розширення

В стовбці «Symbol» знаходиться коротка інформація про ширину спектру сигналу, який передається. В стовбці «Description» знаходиться інформація про налаштування радіоапаратури, та точне значення ширини спектру. В стовбці «Conditions» міститься інформація про коефіцієнт розширення спектру сигналу.

І нарешті в стовбці «Тур» знаходиться інформація, про чутливість приймача в дБм, яку можна отримати при використанні значень ширини спектру та коефіцієнту розширення з двох попередніх колонок.

Було проведено розрахунок чутливості приймача для найкращого показника чутливості, а саме при значеннях:

$$BW = 10,4 \text{ кГц},$$

$$SF = 11.$$

Судячи з таблиці, зображеної на рисунку 2.12 чутливість радіоприймача становитиме -146 дБм. Проведемо розрахунок дальності використовуючи модель Окамура-Хата для малого міста та перше рівняння зв'язку. Висота підйому антени базової станції становитиме 35 метрів, а абонентської станції – 3 метри (умови першого поверху будинку включаючи фундамент будівлі). Частота передачі радіосигналу – 868 МГц.

Розрахунок поправочного коефіцієнту:

$$\begin{aligned} C_H &= 0,8 + (1,1 \log_{10} f - 0,7)h_M - 1,56 \log_{10} f = \\ &= 0,8 + (1,1 \log_{10}(868) - 0,7) \cdot 3 - 1,56 \log_{10}(868) = 1,281. \end{aligned} \quad (2.9)$$

Розрахунок втрат в просторі:

$$\begin{aligned} L_U &= 69,55 + 26,16 \log_{10} f - 13,82 \log_{10} h_B - C_H + \\ &+ [44,9 - 6,55 \log_{10} h_B] \log_{10} d = 69,55 + 26,16 \log_{10}(868) - \\ &- 13,82 \log_{10}(35) - 1,281 + [44,9 - 6,55 \log_{10}(35)] \log_{10}(6,73) = \\ &= 150 \text{ дБм}. \end{aligned} \quad (2.10)$$

Розрахунок рівню ефективної ізотропної потужності передавача:

$$\begin{aligned} P_{\text{вип}} &= P_{\text{пд}} - B_{\text{ф пд}} - B_{\text{д пд}} - B_{\text{к}} + G_{\text{пд}} = \\ &= 20 - 0,9 - 0 - 0 + 3 = 22 \text{ дБ}. \end{aligned} \quad (2.11)$$

Для розрахунку втрат в антенному фідері було використано SMA кабель «RAD-CON-SMA-N-SS - 2867403» довжиною 2 метри, який має затухання 0,9 дБ при частоті 900 МГц [26]. Заокруглимо дане значення до 1 дБ і використаємо в якості затухання в антенно-фідерному тракті. Втратами в інших частинах

передавача було знехтувано при теоретичному розрахунку, а значення коефіцієнту підсилення антени становить 3 дБі.

Розрахунок рівню потужності корисного сигналу на вході антени приймача:

$$\begin{aligned} P_{\text{КС}} &= P_{\text{ВИП}} - L(d, h_B, h_M) - B_T - B_E = \\ &= 22 - 150 - 3 - 15 = -146 \text{ дБм.} \end{aligned} \quad (2.12)$$

Згідно проведених розрахунків для дальності передачі в міській території при висоті підвісу антени шлюзу 35 метрів, а кінцевого пристрою – 3 метри та при коефіцієнтах підсилення антени 3 дБі сигнал можна передати на відстань 6,74 кілометри. При цьому обладнання необхідно налаштувати таким чином, щоб чутливість сигналу на вході приймача становила -146 дБм, а потужність передавача становила 20 дБм.

Також було проведено розрахунок дальності в залежності від чутливості приймача. Ширина спектру сигналу напряму впливає на чутливість приймача. Чим вузький спектр, тим більша чутливість, це видно з рисунку 2.12. Для досягнення найкращих показників дальності коефіцієнт розширення спектру при обраних значеннях чутливості становить $SF = 11$ для ширини спектру $BW = 10,4$ кГц та $SF = 12$ для всіх інших значень. В результаті було обчислено значення дальності, а результати обчислень занесені до таблиці 2.2.

В таблиці 2.2 поле «TX Power» відповідає за значення потужності передавача в децибел-міліватах. Всього було проведено розрахунки для трьох значень потужності. При переведенні з децибел-міліват в мілівати буде отримано наступні значення: 20 дБм = 100 мВт, 17 дБм = 50 мВт, 10 дБм = 10 мВт.

Для зручного сприйняття інформації про отримані розрахунки було побудовано графік залежностей дальності для міських умов розповсюдження радіохвиль, який зображено на рисунку 2.13.

Таблиця 2.2. Залежність дальності передачі від ширини спектру та потужності передавача для міської території

Ширина спектру	10,4 кГц	62,5 кГц	125 кГц	250 кГц	500 кГц
Чутливість приймача	-146 дБм	-139 дБм	-136 дБм	-133 дБм	-130 дБм
TX Power = 20 дБм	6,73 км	4,24 км	3,48 км	2,84 км	2,33 км
TX Power = 17 дБм	5,53 км	3,47 км	2,85 км	2,33 км	1,91 км
TX Power = 10 дБм	3,48 км	2,18 км	1,79 км	1,47 км	1,19 км

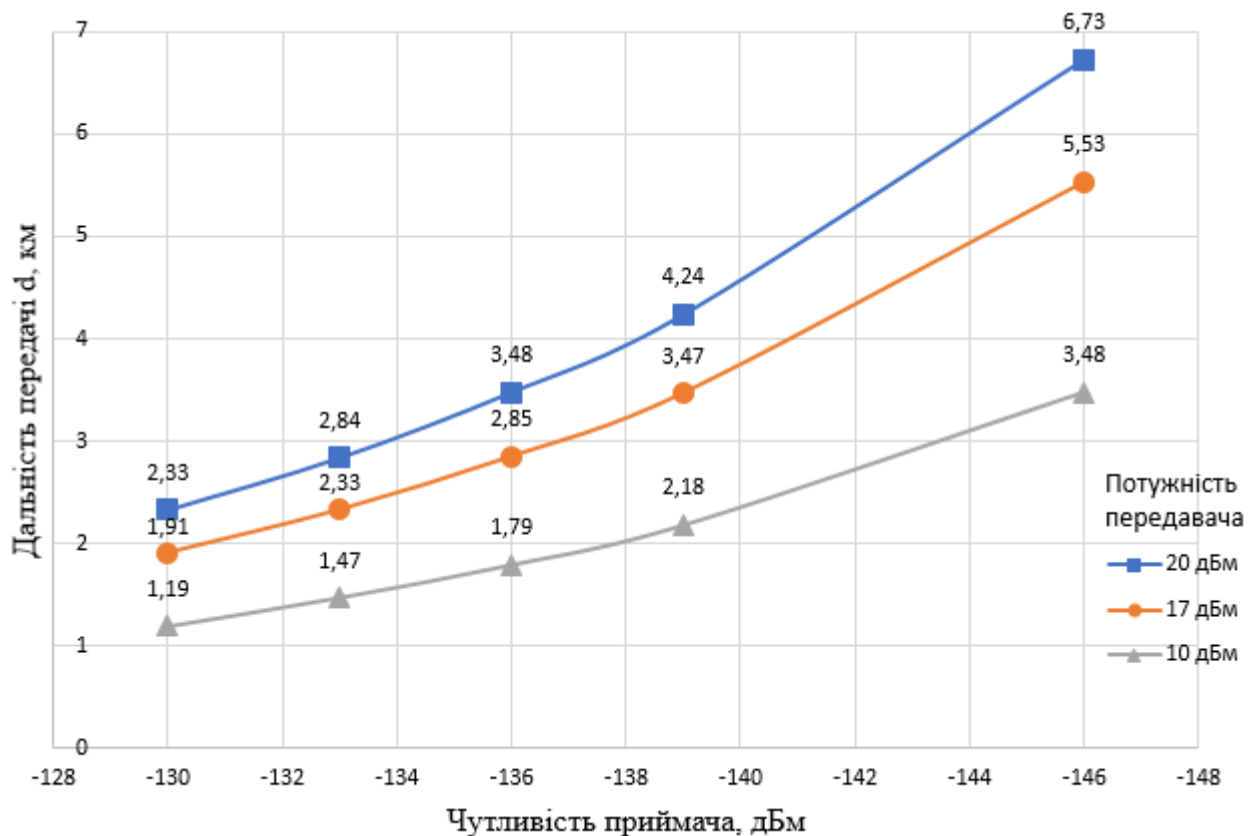


Рисунок 2.13 – Залежність дальності передачі від чутливості приймача та потужності передавача для міських умов

З графіку видно, що найбільша дальність досягається при більшій потужності передавача. При сталій чутливості приймача -146 дБм дальність

становить 6,73 кілометри, якщо передавач буде випромінювати сигнал потужністю 20 дБм. При потужності сигналу 17 дБм, що відповідає 50 мВт, тобто половині максимальної потужності передавача, сигнал вдасться передати на відстань 5,43 кілометри. Зі зменшенням потужності передавача до 10 дБм (10 мВт) сигнал буде передано на відстань 3,48 кілометри.

Розрахунок дальності LoRa для приміської території

При розрахунку дальності передачі радіосигналу в приміській території необхідно використовувати додатковий поправочний коефіцієнт, формула 2.5. Висота підвісу антен, як і в попередньому випадку 35 метрів для шлюзу та 3 метри для кінцевого пристрою. Чутливість приймача -146 дБм. Розрахунок максимальної дальності наведено на наступних формулах:

$$\begin{aligned} L_U &= 69,55 + 26,16 \log_{10} f - 13,82 \log_{10} h_B - C_H + \\ &+ [44,9 - 6,55 \log_{10} h_B] \log_{10} d = 69,55 + 26,16 \log_{10}(868) - \\ &- 13,82 \log_{10}(35) - 1,281 + [44,9 - 6,55 \log_{10}(35)] \log_{10}(12,94) = \\ &= 159,95 \text{ дБм.} \end{aligned} \quad (2.13)$$

$$\begin{aligned} L_{SU} &= L_U - 2 \left(\log_{10} \frac{f}{28} \right)^2 - 5,4 = \\ &= 159,95 - 2 \left(\log_{10} \frac{988}{28} \right)^2 - 5,4 = 150 \text{ дБм.} \end{aligned} \quad (2.14)$$

$$\begin{aligned} P_{\text{ВИП}} &= P_{\text{ПД}} - B_{\text{Ф ПД}} - B_{\text{Д ПД}} - B_{\text{К}} + G_{\text{ПД}} = \\ &= 20 - 0,9 - 0 - 0 + 3 = 22 \text{ дБ.} \end{aligned} \quad (2.15)$$

$$\begin{aligned} P_{\text{КС}} &= P_{\text{ВИП}} - L(d, h_B, h_M) - B_T - B_E = \\ &= 22 - 150 - 3 - 15 = -146 \text{ дБм.} \end{aligned} \quad (2.16)$$

Згідно проведених розрахунків у приміській території буде забезпечено дальність передачі 12,94 кілометри. Також було розраховано дальність передачі

в залежності від чутливості приймача та потужності передавача. Результати розрахунків занесено до таблиці 2.3.

Таблиця 2.3. Залежність дальності передачі від ширини спектру та потужності передавача для приміської території

Ширина спектру	10,4 кГц	62,5 кГц	125 кГц	250 кГц	500 кГц
Чутливість приймача	-146 дБм	-139 дБм	-136 дБм	-133 дБм	-130 дБм
TX Power = 20 дБм	12,94 км	8,14 км	6,67 км	5,46 км	4,48 км
TX Power = 17 дБм	10,57 км	6,65 км	5,46 км	4,48 км	3,67 км
TX Power = 10 дБм	6,67 км	4,19 км	3,44 км	2,82 км	2,31 км

За результатами обчислень, занесених до таблиці 2.3 було побудовано графік залежностей, зображений на рисунку 2.14.

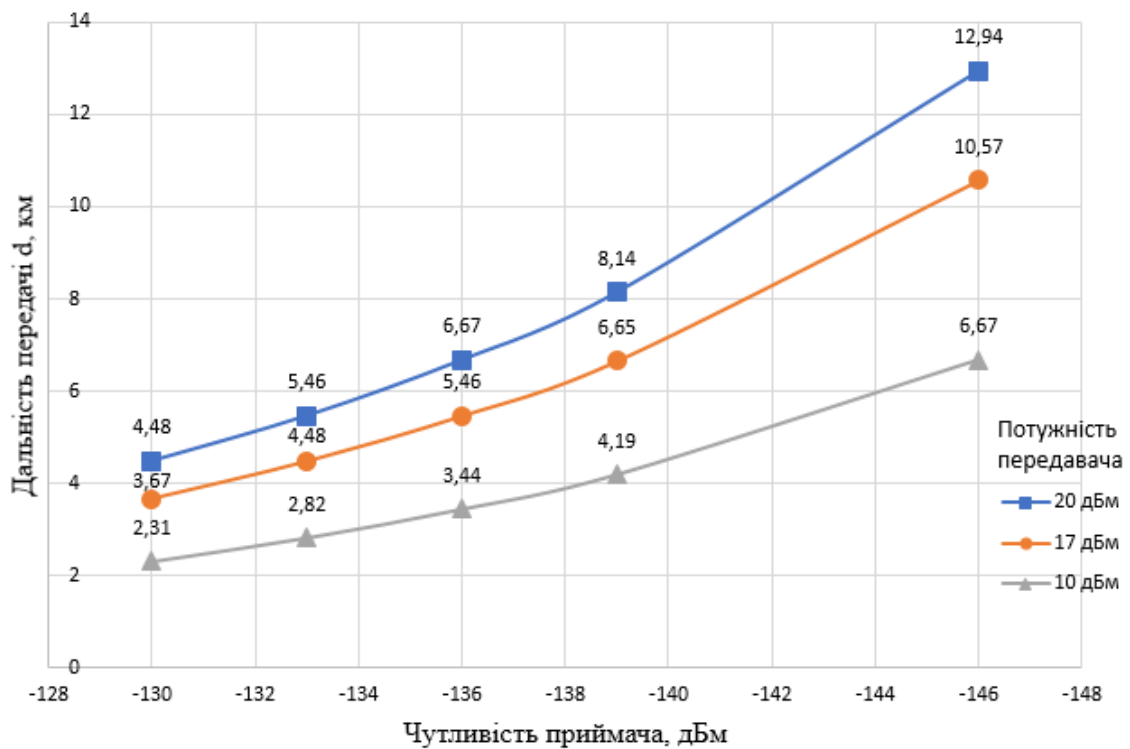


Рисунок 2.14 – Залежність дальності передачі від чутливості приймача та потужності передавача для приміських умов

На графіку, який наведено на рисунку 2.14 зображено залежності, які були отримані при розрахунках дальності для приміської території. Найбільша відстань передачі становить 12,94 кілометри при потужності передачі 20 дБм та чутливості приймача -146 дБм. Якщо зменшити потужність передавача в два рази, тобто вона буде становити 17 дБм, дальність передачі при цьому зменшиться трохи більше ніж на 2 кілометри і буде становити 10,57 кілометрів. Якщо зменшити потужність передавача в 10 разів, тобто до 10 дБм, дальність передачі зменшиться майже в два рази і буде становити 6,67 кілометрів.

Зменшення потужності передавача до мінімально можливої виглядає перспективним у випадках, коли немає необхідності передавати сигнал на значну відстань. А виграш у енергоспоживанні від цього буде великий. Окрім того, мала потужність випромінювання сигналу шлюзом буде менше заважати роботі інших шлюзів LoRa, які працюють в даній частоті.

Розрахунок дальності LoRa для відкритої території

Як показує практика, чим менше перешкод на шляху радіосигналу, тим далі його можна передати. На відкритій території модуляція LoRa показує дуже високі показники дальності передачі, а саме 10 кілометрів, або навіть більше. Розрахунок дальності передачі на відкритій території при чутливості приймача в -146 дБм наведено на наступних формулах:

$$\begin{aligned}
 L_U &= 69,55 + 26,16 \log_{10} f - 13,82 \log_{10} h_B - C_H + \\
 &+ [44,9 - 6,55 \log_{10} h_B] \log_{10} d = 69,55 + 26,16 \log_{10}(868) - \\
 &13,82 \log_{10}(35) - 1,281 + [44,9 - 6,55 \log_{10}(35)] \log_{10}(44) = \\
 &178,439 \text{ дБм.}
 \end{aligned} \tag{2.17}$$

$$\begin{aligned}
 L_O &= L_U - 4,78(\log_{10} f)^2 + 18,33(\log_{10} f) - 40,94 = 178,439 - \\
 &4,78(\log_{10}(868))^2 + 18,33(\log_{10}(868)) - 40,94 = 150 \text{ дБм.}
 \end{aligned} \tag{2.18}$$

$$\begin{aligned}
 P_{\text{вип}} &= P_{\text{пд}} - B_{\text{ф пд}} - B_{\text{д пд}} - B_{\text{к}} + G_{\text{пд}} = \\
 &= 20 - 0,9 - 0 - 0 + 3 = 22 \text{ дБ.}
 \end{aligned} \tag{2.19}$$

$$\begin{aligned}
 P_{\text{КС}} &= P_{\text{ВИП}} - L(d, h_B, h_M) - B_T - B_E = \\
 &= 22 - 150 - 3 - 15 = -146 \text{ дБм}.
 \end{aligned}
 \tag{2.20}$$

В результаті, максимальна дальність передачі на відкритій території становить 44 кілометри. Важливо, що модель Окамура-Хата коректно працює тільки у випадку плоского рельєфу місцевості, з антеною шлюзу, розташованою над дахами найближчих будівель, та для дальності 1-20 кілометрів. Розраховане значення дальності для відкритої території виходить за межі 20 кілометрів, але для примірної оцінки отримані цифри достатньо адекватні, оскільки висота підвісу антени достатньо висока (35 метрів), а на шляху проходження радіосигналу майже немає ніяких перешкод.

Дальність передачі також розрахована і для інших чутливостей приймача та потужностей передавача, дані розрахунків занесено до таблиці 2.4.

Таблиця 2.4. Залежність дальності передачі від ширини спектру та потужності передавача для відкритої території

Ширина спектру	10,4 кГц	62,5 кГц	125 кГц	250 кГц	500 кГц
Чутливість приймача	-146 дБм	-139 дБм	-136 дБм	-133 дБм	-130 дБм
TX Power = 20 дБм	44 км	27,52 км	22,56 км	18,50	15,16
TX Power = 17 дБм	35,88 км	22,57 км	18,49 км	15,17 км	12,41 км
TX Power = 10 дБм	22,56 км	14,19 км	11,64 км	9,54 км	7,82 км

За даними таблиці 2.4 було подудовано графік залежностей дальності при передачі сигналів на відкритій території, рисунок 2.15.

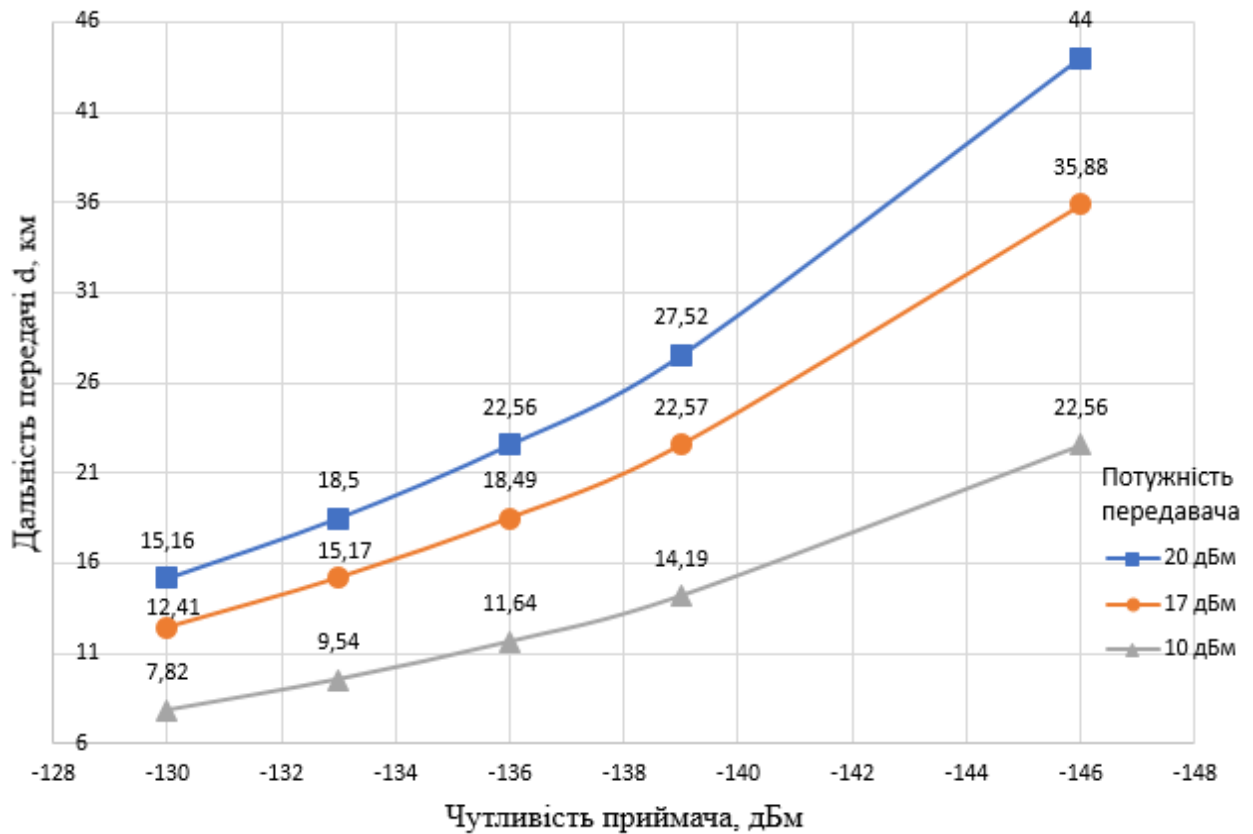


Рисунок 2.15 – Залежність дальності передачі від чутливості приймача та потужності передавача для приміських умов

З графіку, який зображено на рисунку 2.15 видно, що при зменшенні потужності передавача в 10 разів, максимальна дальність передачі зменшується приблизно в два рази і становить 22,56 кілометри. При зменшенні потужності передавача у два рази від максимального значення, дальність передачі становить 35,88 кілометрів.

В даному випадку було отримано дуже непогані значення дальності, вони кращі ніж ті, про які заявляла компанія Semtech і в найкращому випадку перевищують обіцяне значення в чотири рази. Це може бути пов'язано через відносно високу висоту підвісу антени шлюзу, де на шляху радіосигналу на відкритій території не повинно бути перешкод.

2.3 Аналіз швидкодії системи

В даному підрозділі було досліджено швидкість передачі інформації в системі об'єктового попередження техногенних аварій.

Швидкість передачі інформації в системах, які використовують технологію модуляції LoRa визначається за формулою [15]:

$$R_S = \frac{BW}{2^{SF}}, \quad (2.21)$$

де R_S [біт/с] – кількість біт в секунду;
 BW [кГц] – ширина спектру сигналу;
 SF – коефіцієнт розширення спектру.

Інформація передається пакетами, які включають не лише інформацію корисного навантаження (інформація, яку необхідно передати), а й службову інформацію, таку як преамбулу, заголовок та циклічний надлишковий код. Вигляд одного пакету інформації зображено на рисунку 2.16.

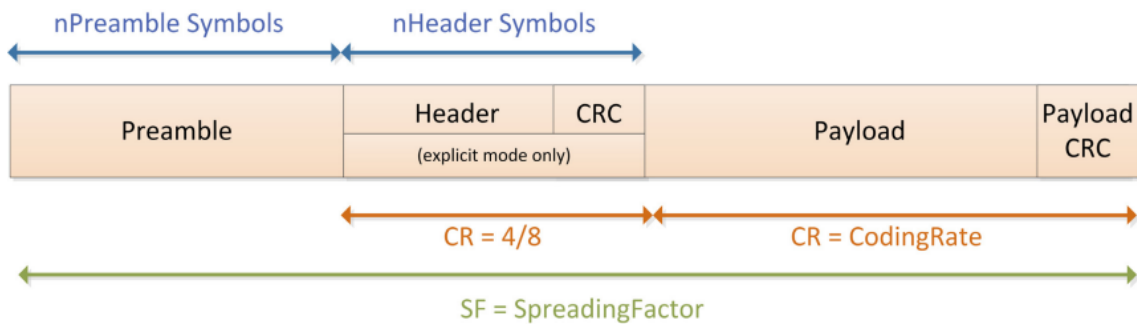


Рисунок 2.16 – Пакет в системах передачі LoRa

Час передачі одного символу інформації в мілісекундах розраховується за формулою:

$$T_S = \frac{1}{R_S}, \quad (2.22)$$

де T_S [мс] – тривалість передачі одного біту;
 R_S [символ/с] – швидкість передачі інформації.

Час передачі преамбули розраховується за формулою:

$$T_{preamble} = (n_{preamble} + 4,25)T_S, \quad (2.23)$$

де $T_{preamble}$ [мс] – час передачі преамбули;
 $n_{preamble}$ – кількість символів преамбули;
 T_S [мс] – час передачі одного символу.

Кількість символів повідомлення, яка буде передаватися після передачі преамбули розраховується за формулою:

$$n_{payload} = 8 + \max \left(\text{ceil} \left(\frac{8PL - 4SF + 28 + 16CRC - 20IH}{4(SF - 2DE)} (CR + 4) \right) \right), \quad (2.24)$$

де $n_{payload}$ – кількість символів вихідного повідомлення;
 PL – кількість символів корисного навантаження (від 1 до 255);
 SF – коефіцієнт розширення спектру;
 $IH = 0$ якщо заголовок ввімкнений, $IH = 1$ якщо вимкнений;
 $DE = 1$ якщо ввімкнена опція LowDataRateOptimize, інакше $DE = 0$;
 CR – швидкість кодування (1 відповідає швидкості 4/5, 4 відповідає швидкості 4/8).

Враховуючи потенційно велику тривалість пакету при високих коефіцієнтах розширення спектру, надається можливість покращити надійність передачі зміною частоти протягом тривалості передачі та прийому пакетів. Для цього встановлюється значення біту *LowDataRateOptimize*, яке збільшує надійність зв'язку LoRa при низьких швидкостях передачі даних. Його використання є обов'язковим коли тривалість символу перевищує 16 мілісекунд. При цьому передавач та приймач повинні мати однакові налаштування даного біту [15].

Тривалість передачі символів після преамбули визначається за формулою:

$$T_{payload} = n_{payload} \cdot T_S, \quad (2.25)$$

де $T_{payload}$ [мс] – тривалість передачі символів повідомлення;
 $n_{payload}$ – кількість символів повідомлення;
 T_S [мс] – час передачі одного символу.

Час перебування пристрою в ефірі або тривалість передачі пакету розраховується як сума тривалості пакету та тривалості повідомлення:

$$T_{packet} = T_{preamble} + T_{payload}, \quad (2.26)$$

де T_{packet} [мс] – тривалість передачі пакету;

$T_{preamble}$ [мс] – тривалість преамбули;

$T_{payload}$ [мс] – тривалість передачі символів повідомлення.

На початку розробки системи об'єктового попередження техногенних аварій повідомлення в системі передавалися довгими строками, що призводило до довгого пересилання пакетів інформації та низької швидкодії. Під час аналізу швидкодії було встановлено, що її можна підвищити пересилаючи не цілі строки з текстом, а біти. При цьому для невеликої кількості пристроїв цілком достатньо лише одного байту інформації (8 біт).

Виходячи з умови, що якщо датчик не спрацював, то він нічого не передає, то для факту встановлення спрацювання датчика достатньо лише відправити інформацію про сам датчик. В цій інформації може бути лише номер датчику. По отриманому номеру датчику шлюз повинен сам розпізнати тип датчику та місце його встановлення. Інформація про це додається в мікроконтролер, який керує шлюзом.

Такий спосіб передачі інформації зменшує кількість інформації, яка передається, а отже і збільшує швидкодію. При встановленні нового датчику в систему об'єктового попередження техногенних аварій кожен датчик має запрограмований індивідуальний номер. Розпізнавання датчику відбувається на стороні шлюзу. Після того як було встановлено новий датчик інформацію про нього необхідно додати в шлюз для подальшого розпізнавання типу та місця встановлення.

Для системи, яка має невелику кількість датчиків достатньо одного байта інформації. Оскільки в 1 байті знаходиться 8 біт, то склавши всі можливі комбінації чисел «0» та «1» було отримано число 256. Це і є кількість датчиків,

які можна встановити із забезпеченням успішного розпізнавання датчику при використанні одного байту даних.

Максимальне значення кількості датчиків, які можна встановити розраховується за формулою:

$$k = 2^N = 2^8 = 256, \quad (2.27)$$

де k – максимальна кількість датчиків;

N – кількість біт у переданому корисному навантаженні.

Такої кількості датчиків достатньо для більшості випадків, а у разі необхідності збільшення кількості, можна збільшити кількість байтів, які передаються у системі. Так, при збільшенні кількості байтів всього на 1 можна отримати 65536 датчиків:

$$k = 2^N = 2^{16} = 65536. \quad (2.28)$$

Перейдемо до розрахунку швидкодії системи. Розрахуємо швидкість передачі інформації в системі:

$$R_s = \frac{BW}{2^{SF}} = \frac{62,5}{2^{12}} = 0,015 \text{ біт/с}. \quad (2.29)$$

Час передачі одного біту в мілісекундах буде становити:

$$T_s = \frac{1}{R_s} = \frac{1}{0,015} = 65,536 \text{ мс}. \quad (2.30)$$

Згідно документації на технологію модуляції LoRa [15], стандартна кількість символів преамбули становить 8. Тоді тривалість передачі преамбули буде становити:

$$T_{preamble} = (n_{preamble} + 4,25)T_s = (8 + 4,25) \cdot 65,536 = 802,816 \text{ мс}. \quad (2.31)$$

Якщо в якості корисного навантаження використовується всього один байт інформації, то кількість символів в пакеті повідомлення буде розраховано за наступною формулою:

$$n_{payload} = 8 + \max \left(\text{ceil} \left(\frac{8PL - 4SF + 28 + 16CRC - 20IH}{4(SF - 2DE)} (CR + 4) \right) \right) =$$

$$= 8 + \max \left(\text{ceil} \left(\frac{8 \cdot 8 - 4 \cdot 12 + 28 + 16CRC - 20 \cdot 1}{4(12 - 2 \cdot 1)} (4 + 4) \right) \right) = 24 \text{символи.} \quad (2.32)$$

Тривалість передачі символів повідомлення було розраховано за наступною формулою:

$$T_{payload} = n_{payload} \cdot T_S = 24 \cdot 65,536 = 1573 \text{ мс.} \quad (2.33)$$

Сумарна тривалість передачі одного пакету з даними буде визначатися за формулою:

$$T_{packet} = T_{preamble} + T_{payload} = 802,816 + 1573 = 2375,816 \text{ мс.} \quad (2.34)$$

Таким чином час від початку передачі пакету з повідомленням до завершення передачі становить 2375,816 мілісекунди, або майже 2,4 секунди.

Оскільки швидкість передачі інформації залежить від ширини спектру сигналу, то було досліджено тривалість передачі одного пакету при різних значеннях ширини спектру. Отримані дані занесено до таблиці 2.5.

Таблиця 2.5. Залежність тривалості передачі пакету від ширини спектру

Ширина спектру BW, кГц	Час передачі пакету, с
7,8	19035,9
10,4	14276,92
62,5	2375,816
125	1187,84
250	593,92
500	296,96

За отриманими даними було побудовано графік залежності, зображений на рисунку 2.17.

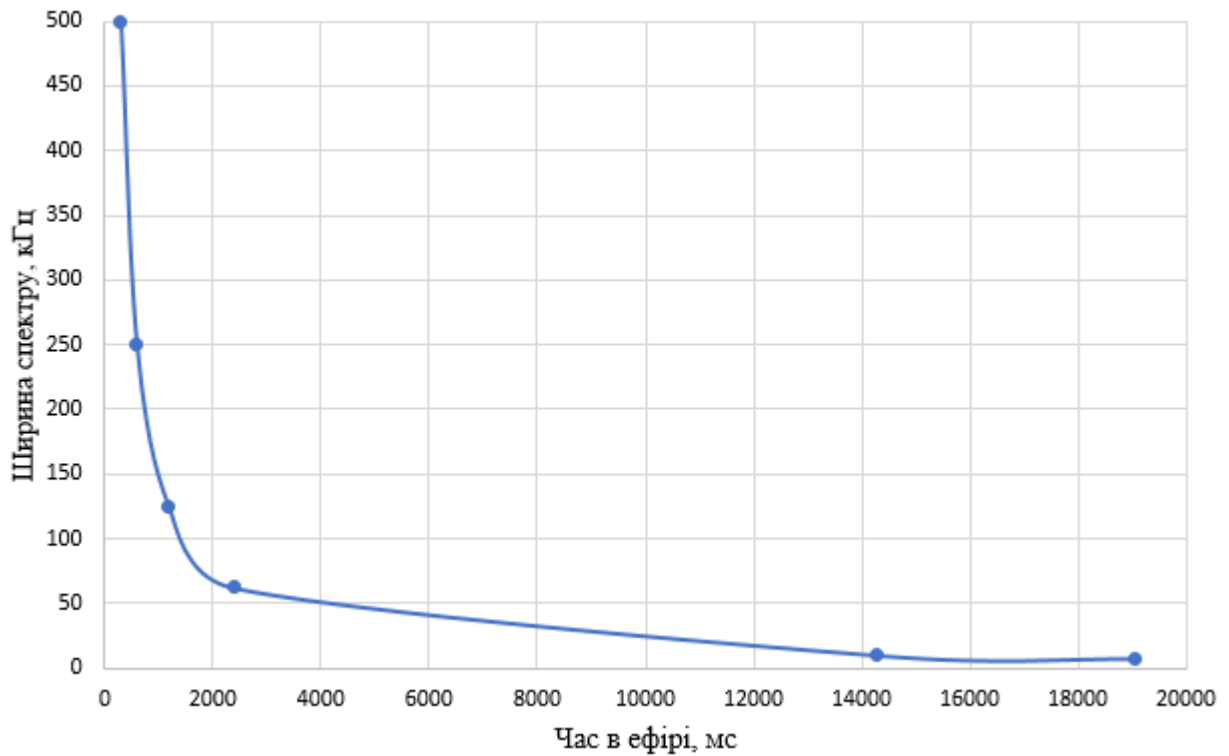


Рисунок 2.17 – Залежність часу передачі пакету від ширини спектру при $SF = 12$

З графіку видно, що при значенні ширини спектру менше 62,5 час передачі одного пакету значно збільшується збільшується і при ширині 7,8 кГц тривалість передачі становить 19 секунд, що значно зменшує швидкодію системи. Найоптимальнішим варіантом буде передача радіосигналу з шириною спектру 62,5 кГц. Дана ширина спектру не дуже сильно зменшує чутливість приймача, а швидкість передачі одного пакету в системі становить 2,38 секунди.

Якщо є можливість забезпечити успішний радіоприйом при великих значеннях ширини спектру, то це значення доцільно зменшити. Швидкодію вдасться підвищити в декілька разів та зменшити витрати електроенергії під час передачі повідомлення.

2.4 Дослідження впливу завад на роботу системи

Лінійна частотна модуляція LoRa, або CSS (Chirp Spread Spectrum) дозволяє генерувати символи в залежності від значення SF для заданої ширини

спектру BW . В CSS кодування символів та модуляція засновані на значеннях SF в межах фіксованого значення BW .

Аналогічно маніпуляції, SF відповідає кількості бітів на символ. Відповідно, при $SF = 7$ можливо закодувати 128 символів за період часу T_S в межах спектру BW [27]. Для того щоб відрізнити символи один від одного за допомогою ЛЧМ-сигналу, використовується циклічне зміщення cs (cyclic shift):

$$cs = \frac{sv}{2^{SF}} T_S, \quad (2.35)$$

де sv відповідає значенню символу (від 0 до $2^{SF} - 1$).

Вихідний символ являє собою ЛЧМ-сигнал з позитивним нахилом при $sv = 0$. Таке кодування зі зміщенням збільшує кількість символів в 2^{SF} рази. При $sv = 16$ відхилення від початкового ЛЧМ-сигналу становить $16/128$ від T_S . Рисунок 2.7 демонструє спектрограми для двох значень sv : 16 та 112 при $SF = 7$.

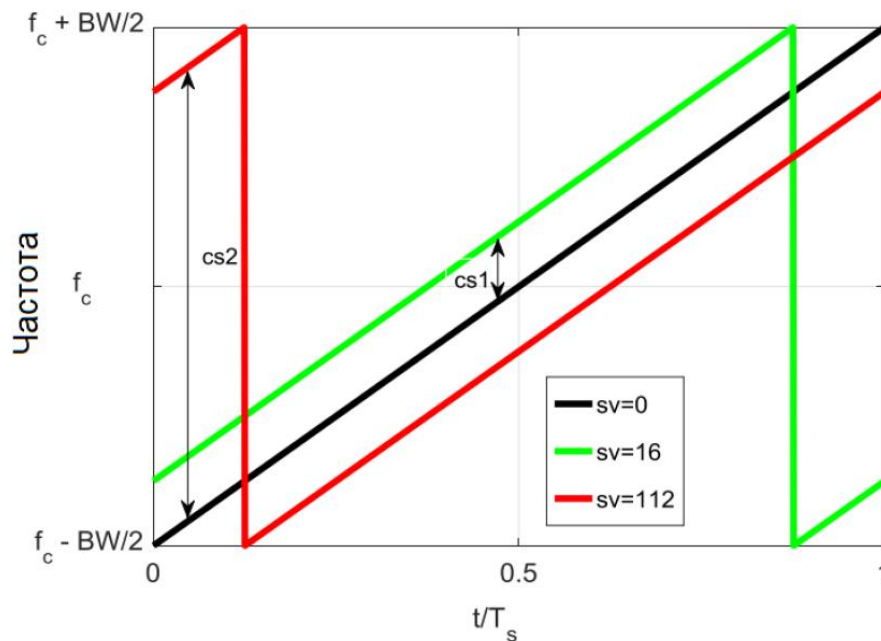


Рисунок 2.18 – Циклічне зміщення ЛЧМ-сигналу при $SF = 7$

Таким чином, sv відповідає затримці у часі, яка прив'язана до T_S . Ця характеристика дає можливість детектувати і декодувати 2^{SF} символів ефективним у обчислювальному плані методом.

Процес CSS демодуляції LoRa заснований на простій ідеї когерентної демодуляції. На рисунку 2.19 представлена блок схема обробки сигналу по запропонованому методу, де $d[n]$ визначається так:

$$d[n] = r[n] \cdot s^*[n], \quad (2.36)$$

де $r[n]$ – прийнятий ЛЧМ-сигнал;

$s^*[n]$ – комплексно-спряжене $s[n]$, наприклад, ЛЧМ-сигнал з негативним нахилом при $sv = 0$.

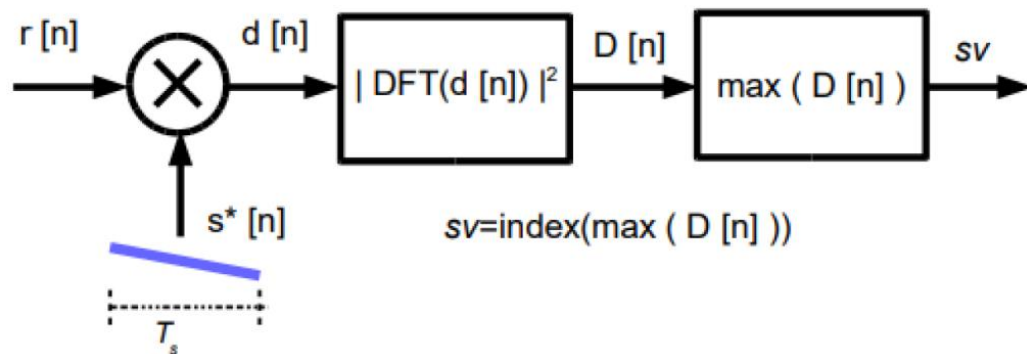


Рисунок 2.19 – Концепція CSS-детектування LoRa

Оскільки SF рівно 7, то $r[n]$ складається з 128 можливих значень (від 0 до 127). Таким чином, циклічне зміщення cs , введене в процесі кодування, встановлює коректне декодування символів.

На рисунку 2.20 показана блок схема ЛЧМ. Відображення символів здійснюється згідно закону Грея, який гарантує, що в комбінації бітів суміжні символи розташовуються з різницею лише в одну позицію.

Вихідний ЛЧМ-сигнал cs залежить від коефіцієнту розширення спектру SF , несучої частоти f та ширини спектру BW . Модель каналу заснована на адаптивному білому гаусівському шумі (АБГШ) з регульованим відношенням сигнал/шум. Блок, обведений пунктирною лінією, який складається з демодулятора та декодера, працює по алгоритму, зображеному на рисунку 2.19.

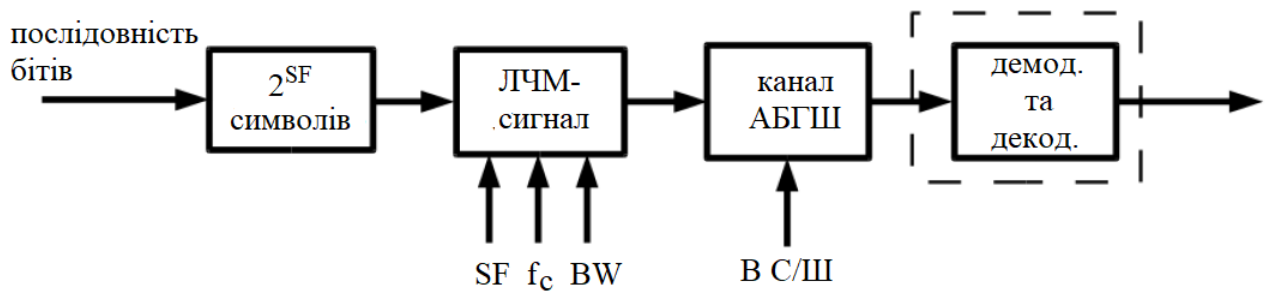


Рисунок 2.20 – Блок-схема ЛЧМ

При постановці навмисних завад основне завдання полягає в тому, щоб позбавити супротивника надійного зв'язку й при цьому звести матеріальні витрати до мінімуму. Завдання приймача й передавача – створити систему зв'язку, стійку до завад, ґрунтуючись на наступних припущеннях:

- абсолютна стійкість до завад неможлива;
- станція-постановник навмисних завад забезпечена інформацією про основні параметри системи (частотний діапазон, час сеансів зв'язку, обсяг переданої інформації і т.д.);
- станція-постановник навмисних завад не має апіорної інформації про послідовність стрибків частоти або псевдовипадкових кодах.

Сигнал передавача повинен бути сформований таким чином, щоб єдиною можливістю для придушення сигналу було створення широкосмугового гаусівського шуму. Інакше кажучи, необхідно, щоб застосування ускладнених методів придушення сигналу не давало ніяких переваг. Основне правило при створенні завадостійкої системи зв'язку – зробити процес придушення сигналу максимально дорогим.

Для придушення зв'язку можливе використання різних сигналів [28]. Вибір залежить від системи зв'язку, сигнал якої потрібно придушити. На рисунку 2.21 зображені графіки спектральної щільності потужності різних типів навмисних завад, накладених на тонові сигнали системи зв'язку з M -арною частотною маніпуляцією й стрибкоподібним переналаштуванням частоти (FH/MFSK). Область по осі абсцис являє собою смугу розширеного спектру W_{SS} . Три стовпці

графіків відповідають трьом моментам часу передачі символів (стрибкам частоти), у які відбувається передача символів зі спектрами G_1 , G_2 та G_3 .

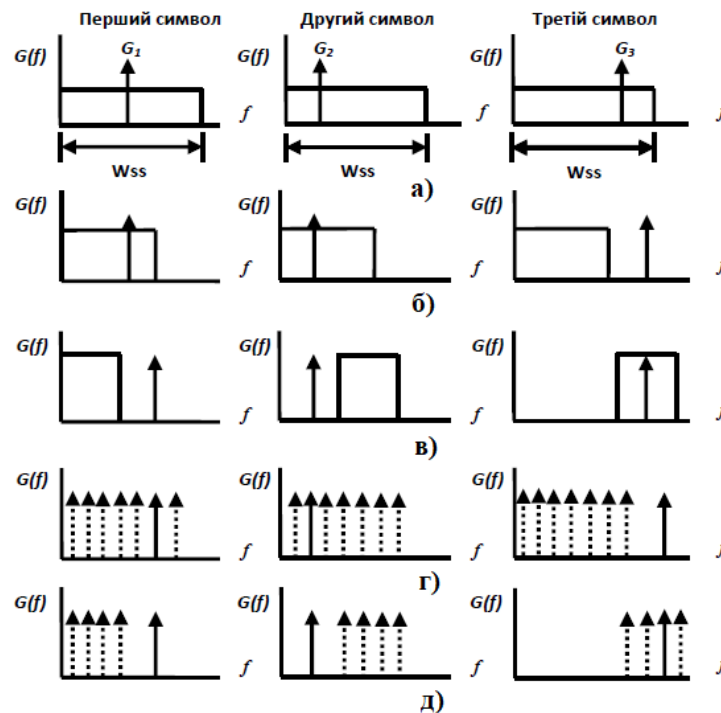


Рисунок 2.21 – Типи навмисних завад: а) широкосмуговий шум; б) вузькосмуговий шум; в)східчастий шум; г) вузькосмугові тонові завади; д) східчасті тонові завади; W_{ss} – смуга розширеного спектру

Рисунок 2.21 а) ілюструє роботу станції навмисних завад порівняно малої потужності, що створює шуми по всій області розширеного спектра.

На рисунку 2.21 б) ширина покриття діапазону навмисними завадами зменшується, але при цьому збільшується потужність самих завад (при цьому площа, яку обмежує крива потужності шумів, залишається сталою). У цьому випадку область шумів не завжди співпадає із сигналом. Однак якщо це все-таки відбувається, негативний вплив на сигнал може бути значним.

На рисунку 2.21 в) завади створюються в окремих частинах діапазону у випадково обрані відрізки часу. Використання такого методу не дозволяє системі зв'язку адаптуватися до наявності завад.

У двох випадках, що залишилися, для придушення зв'язку використовується вже не безперервна смуга частот, а набір тонових сигналів,

переданих у певних точках діапазону (рисунок 2.21 г), які можуть розміщатися з певним кроком (рисунок 2.21 д). Останній метод звичайно застосовується для придушення зв'язку в системах зі стрибкоподібним переналаштуванням частоти.

Ще один метод – створення імпульсно-модульованого шуму з обмеженою шириною смуги. Надалі будемо вважати (якщо не обговорено протилежне), то для придушення зв'язку використовується широкосмуговий шум, який постійно покриває всю смугу W_{ss} .

Дослідження захищеності каналів зв'язку на основі технології розширення спектру до різних типів навмисних завад

Широкосмугові

Розглянемо створення навмисних завад, які можуть бути змодельовані за допомогою стаціонарного гаусівського шуму з нульовим середнім і рівномірним розподілом спектральної щільності потужності (принаймні, у розглянутій області частот). Якщо генератор, використовуючи всю свою потужність, створює завади у всьому діапазоні розширеного спектра, його називають широкосмуговим постановником завад (broadband jammer).

Єдина можливість зменшити вплив завад полягає в збільшенні коефіцієнта розширення спектру сигналу. На рисунку 2.22 зображено вплив коефіцієнту розширення спектру на стійкість до адаптивного білого гаусівського шуму (АБГШ).

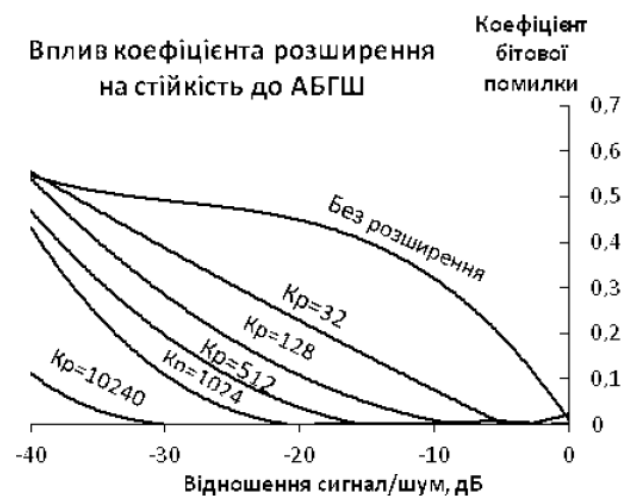


Рисунок 2.22 – Вплив коефіцієнту розширення спектру на стійкість до адаптивного білого гаусівського шуму

Корисний сигнал (вся його прийнята потужність) на виході аналізатору спектру потрапляє в один певний частотний канал, а потужність широкосмужової завади розподіляється по багатьом каналам. У найкращому випадку потужність широкосмужової завади буде розподілятися по всім каналам, які формує аналізатор. Тому в сигнальному каналі відношення сигнал/завада буде краще, ніж на вході аналізатору спектру. В ідеальному випадку покращення відношення сигнал/завада (коефіцієнт завадозахищеності K_3) буде дорівнювати кількості корисних вузькосмужових каналів аналізатору спектру, що кількісно дорівнює добутку тривалості часу аналізатора на ширину смуги аналізатору, тобто базі ЛЧМ-сигналу. База ЛЧМ-сигналу LoRa розраховується за формулою:

$$B = BW \cdot T_S = 2^{SF}, \quad (2.37)$$

де B – база ЛЧМ-сиглау;
 BW – ширина спектру сигналу;
 T_S – тривалість передачі одного символу;
 SF – коефіцієнт розширення спектру (від 7 до 12).

Тоді коефіцієнт завадозахищеності ЛЧМ сигналу LoRa залежатиме від коефіцієнту розширення спектру і визначатиметься за формулою:

$$K_3 = 2^{SF}. \quad (2.37)$$

У модуляції LoRa коефіцієнт розширення спектру може становити від 7 до 12. На основі даних значень було розраховано коефіцієнт завадозахищеності при різних значеннях коефіцієнту розширення спектру. Результати занесено до таблиці 2.6 та побудовано графік залежності на рисунку 2.23.

Таблиця 2.6. Розраховані коефіцієнти завадозахищеності

SF	K_3	SF	K_3	SF	K_3
7	128	9	512	11	2048
8	256	10	1024	12	4096

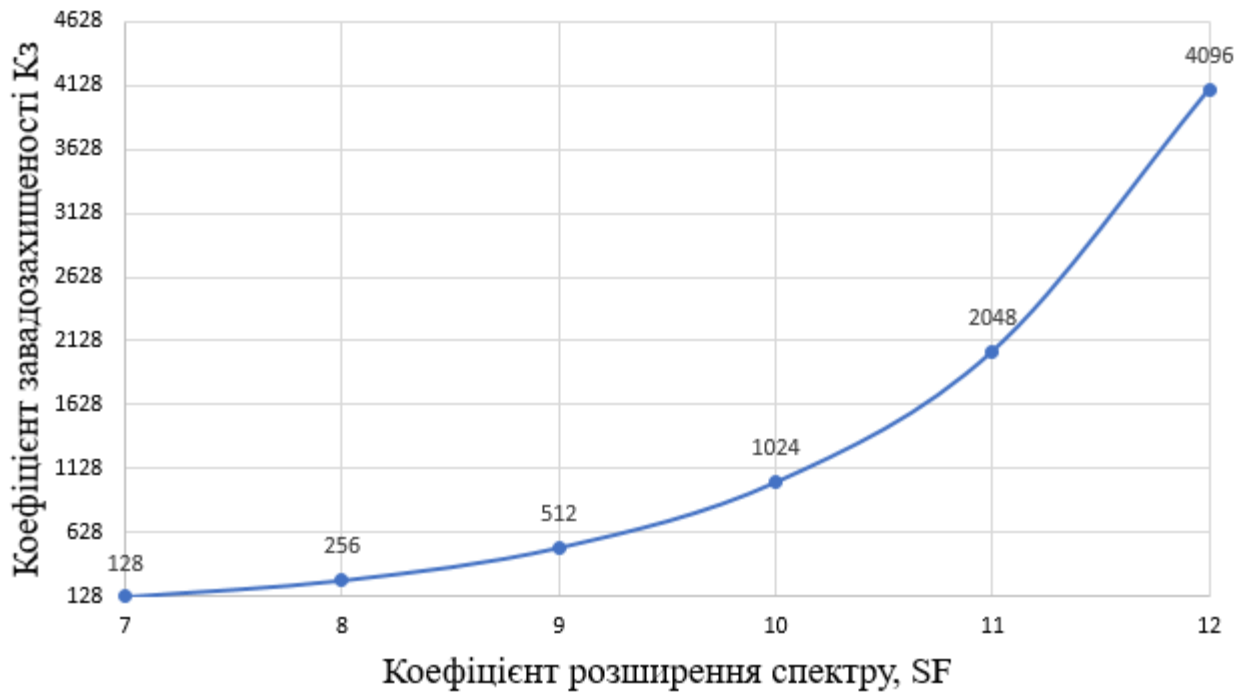


Рисунок 2.23 – Залежність коефіцієнту завадозахищеності K_3 від коефіцієнту розширення спектру SF

Вузькосмугові

Негативний вплив постановника завад на систему зв'язку зі стрибкоподібним переналаштуванням частоти найчастіше може бути збільшений за рахунок використання вузькосмугових завад. Покриваючи меншу частину діапазону, генератор має можливість збільшувати в ній потужність завад. Негативний вплив на сигнал значно вищий при використанні вузькосмугових шумів порівняно із широкосмуговими. Зменшити цей вплив можна за допомогою методу прямого виправлення помилок (forward error correction — FEC) шляхом чергування [29]. Фактично для кодів з досить низькою інтенсивністю (метод FEC) може привести до того, що постановник вузькосмугових завад буде завдавати максимальної шкоди тільки при роботі в широкосмуговому режимі [30].

У випадку наявності вузькосмугової завади, її потужність не буде розділена між всіма вузькосмуговими каналами аналізатору спектру. Потужність сигналу такої завади буде розподілятися лише в тих каналах, які мають таку саму частоту, як і завада. В такому випадку, зі зменшенням ширини спектру завади по

відношенню до ширини спектру сигналу коефіцієнт завадозахищеності буде визначатися добутком бази ЛЧМ-сигналу та відношення ширини спектру завади до ширини спектру сигналу і визначатиметься за формулою:

$$K_3 = 2^{SF} \cdot \frac{BW_{ЗАВАДИ}}{BW_{СИГНАЛУ}}, \quad (2.38)$$

де $BW_{ЗАВАДИ}$ – ширина спектру завади;

$BW_{СИГНАЛУ}$ – ширина спектру сигналу.

На рисунку 2.24 зображено графік залежності коефіцієнту завадозахищеності від відношення ширини спектру завади до ширини спектру сигналу при використанні коефіцієнту розширення спектру $SF = 12$.

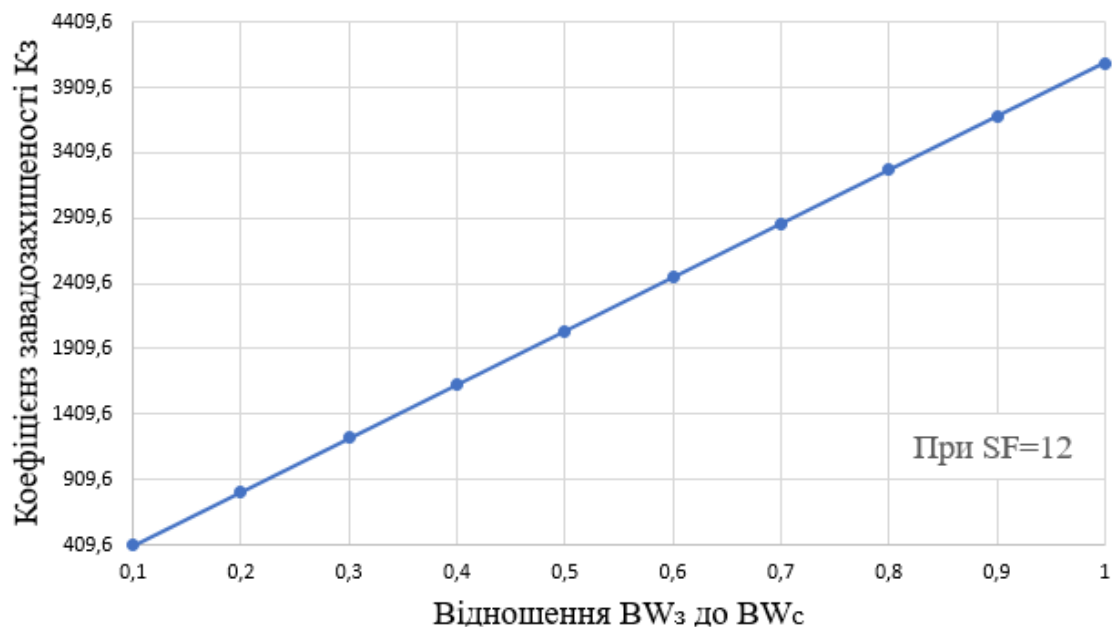


Рисунок 2.24 – Залежність коефіцієнту завадозахищеності K_3 від

$$\text{відношення } \frac{BW_{ЗАВАДИ}}{BW_{СИГНАЛУ}}$$

Також було розраховано коефіцієнт завадозахищеності від частоти завади, яка потрапляє в діапазон спектру сигналу. Якщо частота завади знаходиться на нижній, або верхній частоті сигналу, тоді коефіцієнт завадозахищеності дорівнює базі ЛЧМ-сигналу. Якщо частота співпадає з несучою частотою сигналу, тоді коефіцієнт завадозахищеності дорівнює половині бази ЛЧМ-сигналу, рисунок 2.25.



Рисунок 2.25 – Залежність коефіцієнту завадозахищеності K_3 від розташування частоти завади у спектрі сигналу

Різнотонові

При створенні різнотонових завад станція-постановник ділить повну отриману потужність J між безперервними тонами, що мають випадкову фазу й рівними по потужності. Ці сигнали розподіляються в діапазоні розширеного спектру W_{SS} у певному порядку. Аналіз впливу тонових завад на сигнал значно складніше, чим у випадку шумів, особливо для систем DS. Часто тонові завади розглядають як гаусівський шум. Продуктивність некогерентної системи зв'язку FH/FSK вважається однаковою як при вузькосмугових тонових завадах, так і при вузькосмуговому шумі. Однак застосування вузькосмугових тонових завад для придушення сигналу FH/FSK більш ефективне. Причина в тому, що використання безперервних тонових завад дозволяє більш ефективно ввести енергію в некогерентні детектори.

На рисунку 2.26 а) та б) представлено вісімкову схему FSK зі стрибкоподібним переналаштуванням частоти й без рознесення сигналу, а також система зі швидким стрибкоподібним переналаштуванням частоти з

використанням багаторазової ($N = 4$) передачі даних і обмеження елементарних сигналів [28]. Сигнал, який надійшов у накопичувач позначається вектором. Як видно з рисунку 2.26 а), при окремому стрибку частоти смуга даних зайнята отриманим символом з потужністю S . Якщо тонова завада з отриманою потужністю J ($J > S$) випадково потрапить у діапазон даних, детектор буде не в змозі правильно визначити отриманий символ.

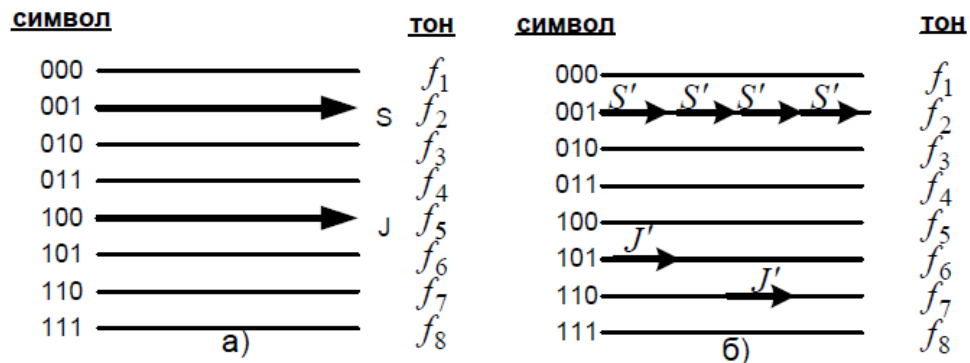


Рисунок 2.26 – Багаторазова передача символів зі швидкими стрибками при наявності тонових завад: а) окремий стрибок частоти; б) чотири стрибки частоти

На рисунку 2.26 б) чотири елементарні сигнали (довжина кожного вектора є мірою потужності обмеженого елементарного сигналу S') підсумуються й повністю заповнюють накопичувач. Якщо тонові завади випадково потрапляють у спектральну область сигналу, це не вплине на роботу детектора, оскільки потужність завад обмежується до одного рівня з елементарними сигналами зв'язку ($J' = S'$). У прикладі, наведеному на рис. 2.26 б) два сигнали тонових завад потрапляють у діапазон даних. Однак завдяки обмеженню потужності ніяких сумнівів при визначенні отриманого символу не виникає.

Імпульсні

Розглянемо роботу системи зв'язку DS/BPSK (з прямим розширенням спектру та двійковою фазовою маніпуляцією) при придушенні сигналу імпульсними завадами. Станція навмисних завад генерує імпульси білого гаусівського шуму у вузькій смузі частот. Припустимо, що генератор шумів може визначити центральну частоту й смугу, які використовуються для передачі

даних. Припустимо також, що потужність завад може бути збільшена за рахунок зменшення часу передачі. Тоді протягом використовуваного часу спектральна щільність потужності постановника зростає.

Отже, негативний вплив на систему DS/BPSK (без застосування кодування) при однаковій вихідній потужності буде значно відчутнішим при використанні імпульсних завад. Результат такого впливу аналогічний впливу вузькосмугових завад на систему зв'язку FH/BFSK (зі стрибкоподібним переналаштуванням частоти та двійковою частотною маніпуляцією) без використання кодування. В обох випадках ефективне придушення сигналу досягається за допомогою концентрації потужності генератора завад для "глушіння" певної частини переданих символів. Кодування із прямим виправленням помилок і використанням чергування може практично повністю відновити вихідну якість сигналу [28].

При визначенні рівня стійкості не враховувалася швидкість переналаштування частоти. Інтуїтивно можна припустити, що чим частіше відбуваються перегони частот, тим простіше "сховати" сигнал від навмисних завад.

Ретрансляційні

При визначенні рівня стійкості не враховувалася швидкість переналаштування частоти. Інтуїтивно можна припустити, що чим частіше відбуваються перегони частот, тим простіше «сховати» сигнал від навмисних завад. Вважалось, що швидкість переналаштування частоти досить велика, так що генератор завад не встигає простежити за процесом передачі й, відповідно, змінити свою тактику. Проте, існують умови при яких це припущення може бути невірним.

Крім уже розглянутих, існують "інтелектуальні" постановники завад, так звані постановники ретрансляційних завад (repeat-back jammer), здатні простежити процес передачі сигналу, що, як правило, робиться за допомогою бічного променя передавальної антени. Такі генератори характеризуються високою швидкістю обробки сигналу, а також здатністю приймання сигналів у

широкій області спектра. Це дозволяє сконцентрувати потужність завад у безпосередній близькості від сигналу системи FH/FSK. Перевага постановника завад такого типу перед широкосмуговим очевидна, оскільки завади можуть бути сконцентровані в тій смузі діапазону, яка використовується для зв'язку в кожний момент часу. Слід зазначити, що такий метод придушення сигналу ефективний тільки стосовно систем розширеного спектру зі стрибкоподібним переналаштуванням частоти, оскільки в системах, що використовують метод прямої послідовності, не існує миттєвого вузькосмугового сигналу, який можна було б запеленгувати [28].

Одним з можливих шляхів для зменшення негативного впливу постановника ретрансляційних завад може бути збільшення швидкості переналаштування частоти настільки, щоб протягом часу, потрібного генератору завад для обробки отриманого сигналу й створення завад, система переналаштовувалась на нову частоту. У такому випадку завади не зможуть вплинути на якість зв'язку.

Висновки

В даному розділі було проведено розрахунок дальності передачі інформації LoRaWAN мережі для міської, приміської та відкритої територій. В ході досліджень було знято залежності дальності дії від різних параметрів, а саме коефіцієнту розширення спектру та ширини спектру сигналу. Для досягнення високої швидкодії було створено формат пакету LoRa, який має найбільшу швидкість надсилання при достатній кількості інформації для розпізнавання датчику. Також було досліджено завадозахищеність LoRa сигналів та встановлено, що вузькосмугові завади мають гірший вплив, ніж широкосмугові, оскільки потужність такої завади не розподіляється між всіма каналами аналізатору спектру, а концентрується в одному або декількох каналах.

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ ОБ'ЄКТОВОГО ПОПЕРЕДЖЕННЯ ТЕХНОГЕННИХ АВАРІЙ

3.1 Моделювання та дослідження зони покриття

В даному підрозділі було змодельовано зону покриття шлюзом LoRa для міста Житомир. Для моделювання було обрано програму Radio Mobile [31]. Radio Mobile це програмне забезпечення, яке використовується для прогнозування ефективності радіосистеми. Воно використовує цифрові дані про висоту місцевості для автоматичного визначення профілю шляху між передавачем та приймачем. Приклад даного профілю зображений на рисунку 3.1.

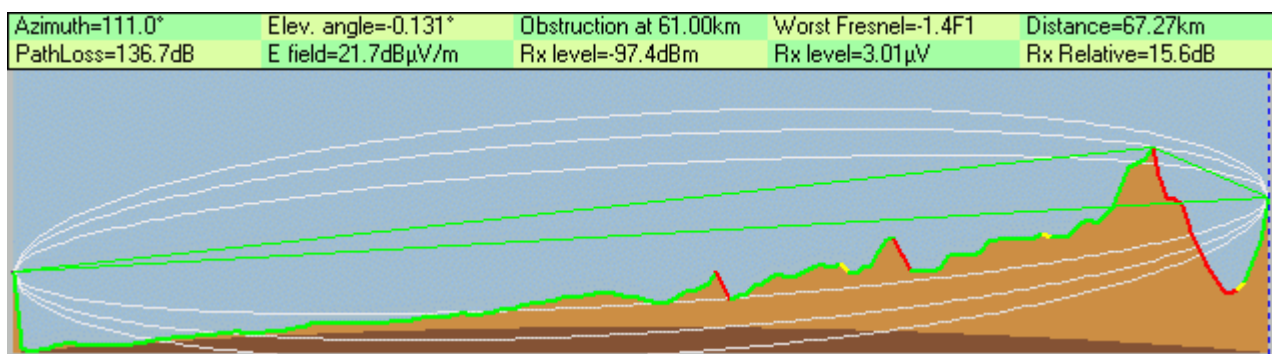


Рисунок 3.1 – Приклад профілю шляху радіосигналу

В програмі наявні дані про висоту для більшої частини світу. Програмне забезпечення також може створювати 3D-види, стереоскопічні зображення та анімацію. Фонове зображення можна об'єднати з відсканованою картою або супутниковою фотографією, що дає можливість з легкістю визначити межі зони покриття. Головною перевагою даного програмного забезпечення є те, що воно безкоштовне і не вимагає ліцензії для користування.

Завантажити програмне забезпечення та отримати інструкцію щодо встановлення його на комп'ютер можна за посиланням [31]. Після встановлення програмного забезпечення Radio Mobile Core необхідно також завантажити пакет мов, який містить файли запуску програми. Виконання даного пункту обов'язкове, оскільки без пакету мов запустити програму не вдасться. Всі необхідні файли, які потрібно було встановити зображені на рисунку 3.2. За запуск програми відповідає файл «rmwend.exe».

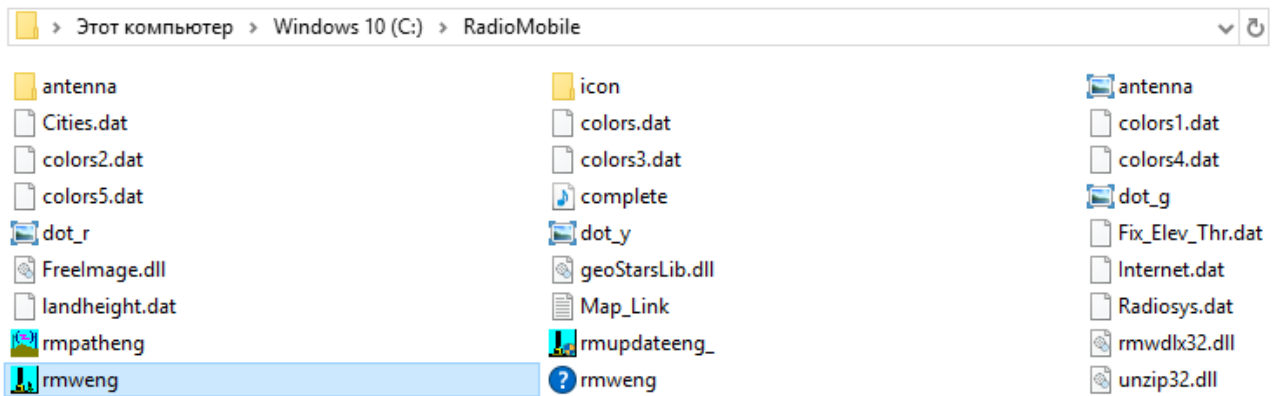


Рисунок 3.2 – Каталог файлів програмного забезпечення Radio Mobile

Після встановлення програмного забезпечення необхідно завантажити файли з антенами, оскільки вони відсутні у встановленому програмному пакеті [32]. Моделювання зони покриття LoRa буде виконуватися для системи з частотою радіосигналу 868 МГц, тому було завантажено файл антени «GP 868 C» з частотою роботи 868 МГц та коефіцієнтом підсилення 4,55 дБі, рисунок 3.3. Завантажений файл антени необхідно помістити в папку «antenna», яка знаходиться в головному каталозі програмного забезпечення, рисунок 2.3.2.

Sirio Antennas

Antenna file	Gain (dBd)	H (°)	V (°)	Tilt (°)	frequency (MHz)	
GP 868 C	4,55	42		0	868	
GP 900 C	2,05	43	64	0	890	
GP 901 C	3,6	27	64	0	890	
SCO-868-4	2,15			0	868-870	
SCO-868-6	4,05			0	868-870	
						
						

<http://www.sirioantenne.it/en/>

Рисунок 3.3 – Файли антен для частоти 868 МГц

Для коректного отримання карти висот через інтернет необхідно задати деякі налаштування. Спершу необхідно створити папку «Geodata» в головній директорії програмного забезпечення. В середині цієї папки необхідно створити ще 7 папок: «srtm3», «srtm1», «srtmthird», «Landcover», «OpenStreetMap», «Terraserver», «Toporama». Далі необхідно вказати джерело файлу SRTM в налаштуваннях програми. Для цього необхідно перейти в меню «Options –

Internet» та на вкладці «SRTM» вказати джерело завантаження файлів – Інтернет. Також необхідно вказати папку для завантаження файлів «srtm3», яка була створена в попередньому кроці. Правильність виконання даних дій зображено на рисунку 3.4.



Рисунок 3.4 – Налаштування джерела завантаження файлів

Перед початком роботи необхідно отримати карту місцевості для якої буде проведено моделювання. Після запуску програми необхідно натиснути клавішу «F8» та в блоці «Centre» ввести центральні координати карти. В блоці «Size (pixel)» вводиться розмір карти в пікселях, а в «Size (km)» - діаметр карти в кілометрах.

Моделювання буде проведено для міста Житомир, тому в програмі було задано координати центру даного міста:

широта: 50.261448°,

довгота: 28.677007°.

Розмір карти в пікселях було встановлено 2000x2000 пікселів, а діаметр карти – 20 кілометрів. Також необхідно встановити джерело карти висот, для файлу SRTM була вказана папка «srtm3», а також встановлений прапорець ігнорування відсутніх файлів. Дані налаштування зображені на рисунку 3.5.

Properties of ..\default.map

Centre
 00°00'00,0"N 000°00'00,0"E
 JJ00AA
 Latitude Longitude
 50.261448 28.677007
 Use cursor position
 World map
 Select a city name
 Enter LAT LON or QRA
 Select a unit

Size (pixel)
 Width(pixels) Height (pixels)
 2000 2000
 Extract
 Cancel

Size (km)
 Width(km) Height (km)
 20,00 20

Elevation data source
 Drive or path Top layer
 SRTM omobile\geodata\srtm3 Browse...
 None c Browse...
 None c Browse...
 None c Browse...
 None c Browse...
 Ignore missing files Bottom layer
 Initialize matrix with elevation (m) 0

Top Left
 00°05'24"N
 000°05'24"W
 Top Right
 00°05'24"N
 000°05'24"E
 Bottom Left
 00°05'24"S
 000°05'24"W
 Bottom Right
 00°05'24"S
 000°05'24"E
 Resolution
 10,0 m/pixel
 0,32 arcsecond

☐ Adjust units elevation
☐ Merge pictures
☐ Force gray scale

Рисунок 3.5 – Налаштування координат місцевості

Карта висот завантажується після натискання клавіші «Extract». Отриману карту висот зображено на рисунку 2.3.6.

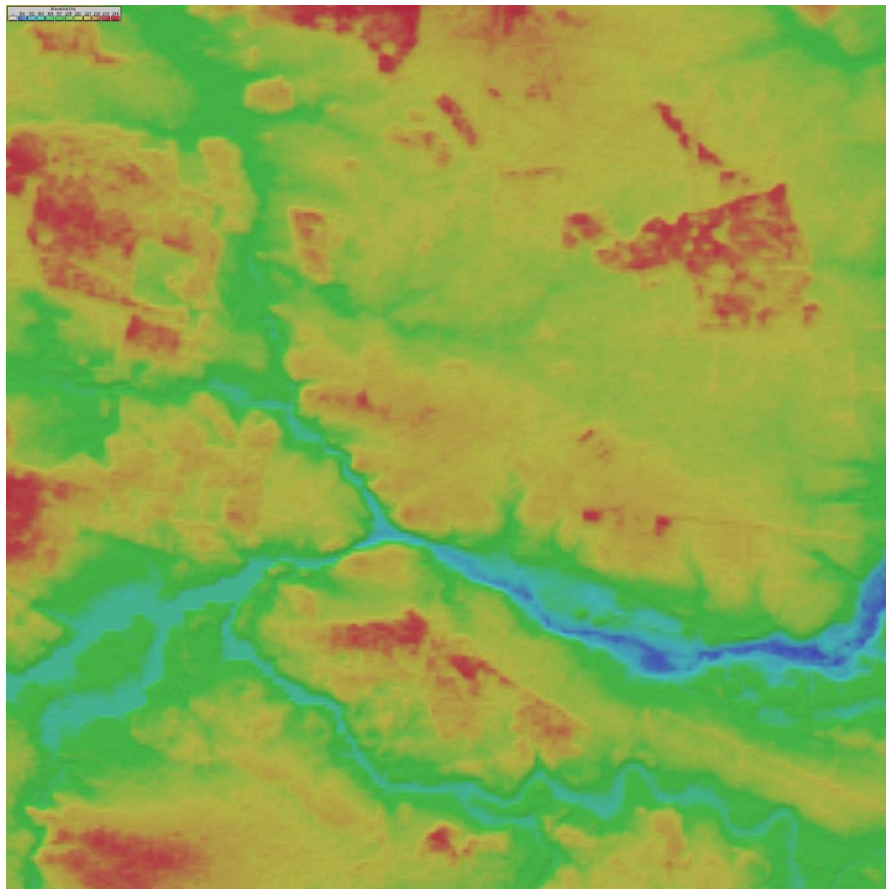


Рисунок 3.6 – Карта висот для міста Житомир та навколишніх територій

Карту висот можна замінити на більш практичну для використання карту місцевості. Для цього необхідно натиснути клавішу «F7» та обрати пункт «Internet OpenStreetMap». Далі необхідно натиснути клавішу «Draw». В результаті було отримано карту місцевості міста, яка зображена на рисунку 3.7.

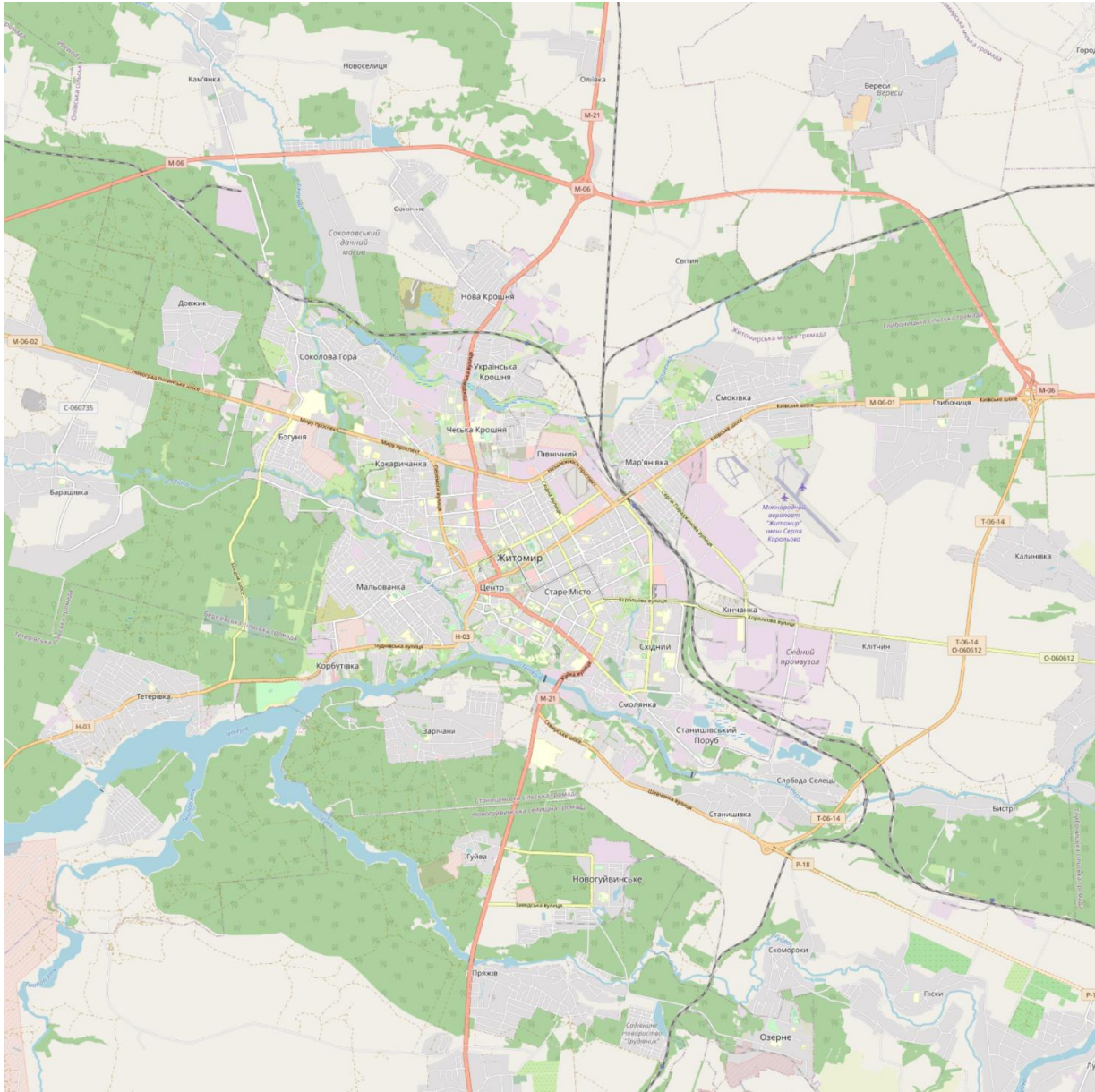


Рисунок 3.7 – Карта міста Житомир

Створимо мережу, яка буде складатися з одного шлюзу та декількох кінцевих пристроїв. Додамо шлюз та кінцеві пристрої скориставшись меню «File – Unit Properties». Всього було додано три кінцевих пристрої: «Node 1», «Node 2» та «Node 4», а також шлюз «Gateway», який знаходиться в центрі міста. Розміщення пристроїв на карті зображено на рисунку 3.8 та в додатку А.

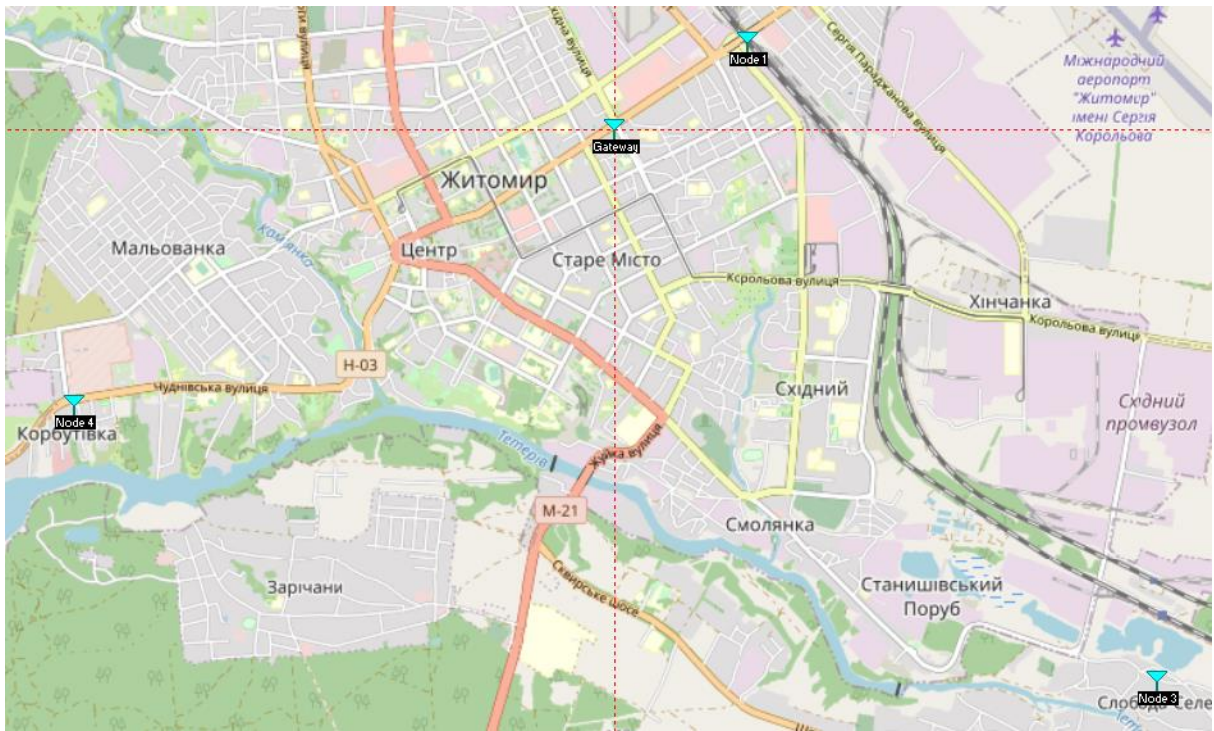


Рисунок 3.8 – Розміщення пристроїв на карті

Створимо мережу та налаштуємо її. Для цього скористаємося меню «File – Network properties». Налаштування мережі показано на рисунку 2.3.9. Якщо середня частота передачі складає 868 МГц, а ширина спектру сигналу – 62,5 кГц, то нижня та верхня частоти сигналу розраховуються за наступними формулами:

$$f_H = f_0 - \frac{BW}{2}, \quad (3.1)$$

$$f_V = f_0 + \frac{BW}{2}, \quad (3.2)$$

де f_H [МГц] – нижня частота передачі;
 f_V [МГц] – верхня частота передачі;
 f_0 [МГц] – середня частота передачі;
 BW [кГц] – ширина спектру сигналу.

Було розраховано нижню та верхню частоти передачі:

$$f_H = 868 - \frac{0,0625}{2} = 868 - 0,03125 = 867,96875 \text{ МГц.} \quad (3.3)$$

$$f_V = 868 + \frac{0,0625}{2} = 868 + 0,03125 = 868,03125 \text{ МГц.} \quad (3.4)$$

Значення даних частот необхідно ввести у відповідні поля, рисунок 2.3.8.

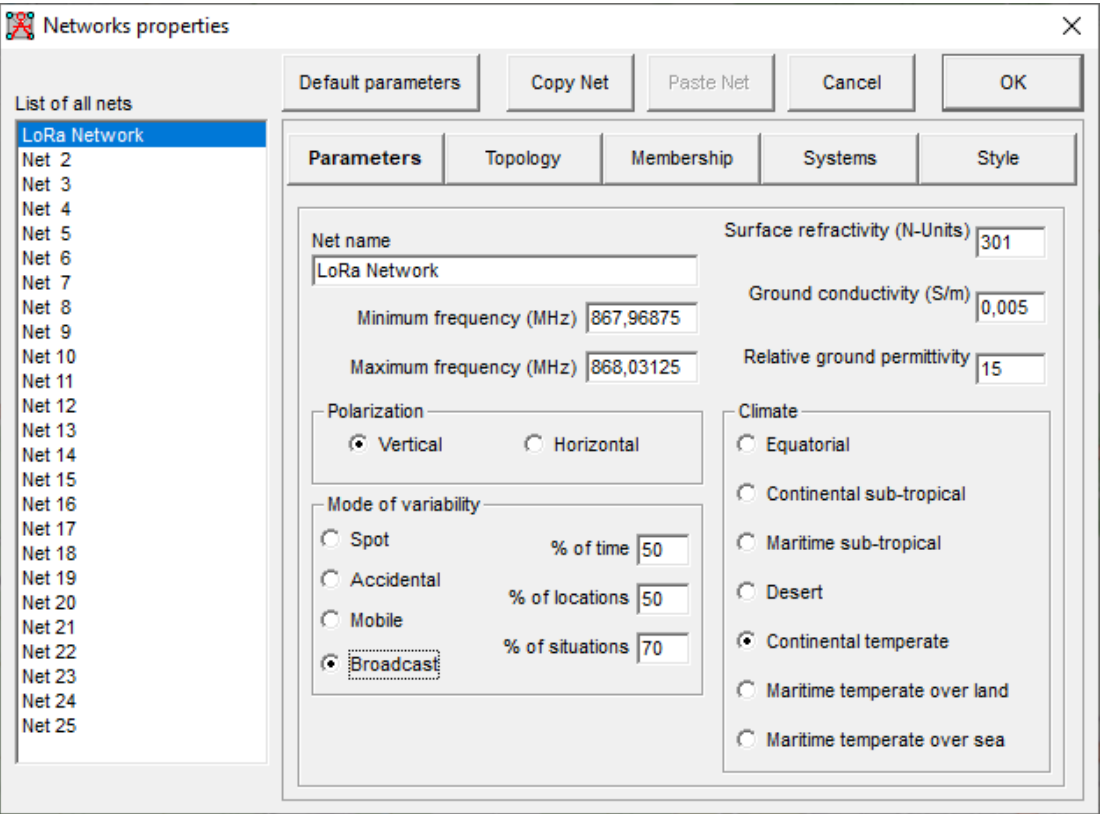


Рисунок 3.9 – Створення нової мережі

На вкладці «Membership» необхідно обрати пристрої, які були створені, вони будуть брати участь у моделюванні мережі. На вкладці «Systems» необхідно задати параметри передавача, приймача та антен. Дане налаштування показано на рисунку 2.3.10.

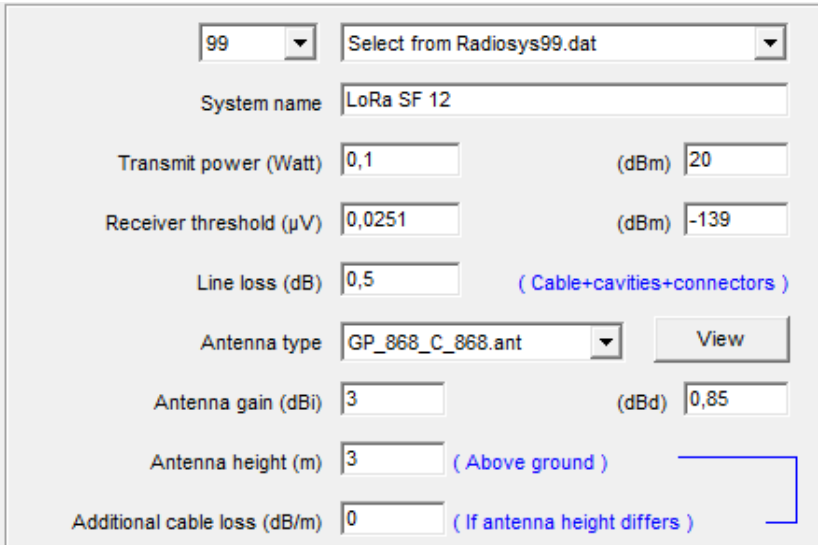


Рисунок 3.10 – Налаштування створених пристроїв

Gateway – Node 1

Дослідимо шлях радіосигналу від шлюзу до пристрою «Node 1». Для цього необхідно натиснути кнопку «Radio Link», яка знаходиться на верхній панелі програми. Шлях проходження радіосигналу зображено на рисунку 3.11, а поперечний переріз на рисунку 3.12.

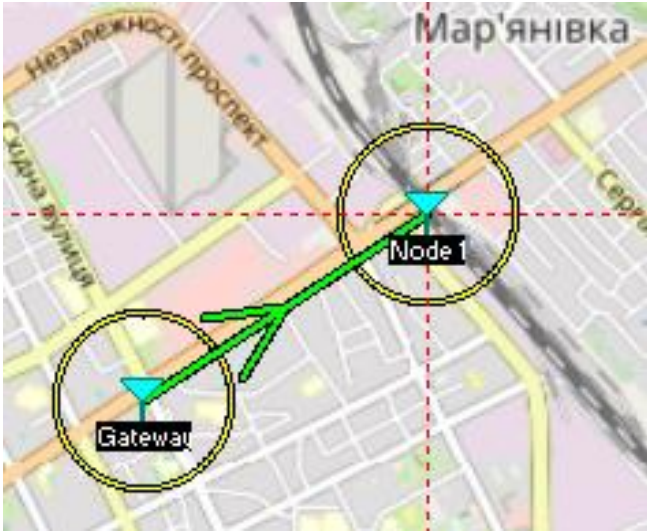


Рисунок 3.11 – Шлях радіосигналу Gateway – Node 1

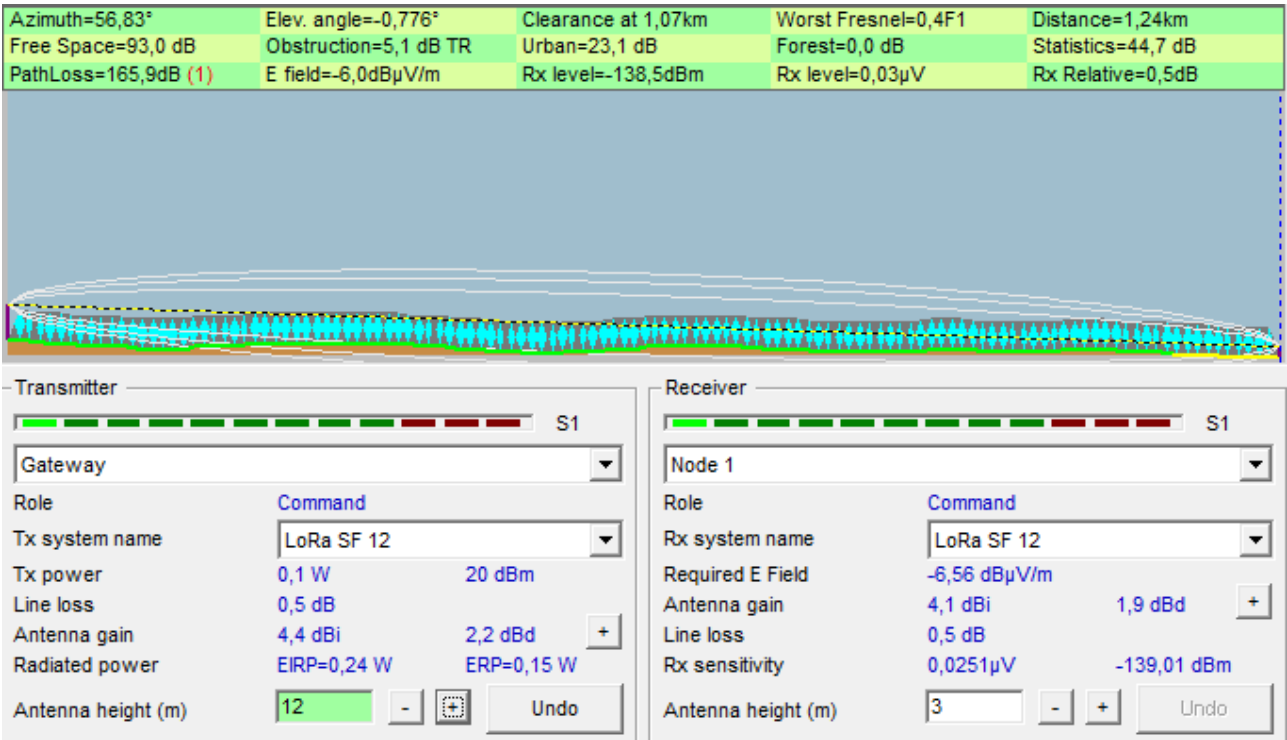


Рисунок 3.12 – Поперечний переріз проходження радіосигналу Gateway – Node 1

У вікні програми, яке зображено на рисунку 3.12 можна змінювати висоту антен приймача та передавача. При висоті антени передавача 12 метрів, а приймача 3 метри сигнал на вході приймача буде становити -138,5 дБм. Інформація про потужність сигналу відображається зверху у полі під назвою «Rx level». Розрахована відстань між передавачем та приймачем становить 1,24 кілометри і відображається в полі «Distance».

У даному випадку на вході приймача потужність сигналу мінімально можлива для приймання і зі зменшенням висот антен сигнал не буде прийнято. Дослідимо вплив підвісу антени на потужність прийнятого сигналу. Отримані дані занесемо до таблиці 3.1.

Таблиця 3.1. Залежність рівня прийнятого сигналу від висоти антени

Висота антени передавача, м	Рівень прийнятого сигналу, дБм
12	-138,5
14	-135,9
16	-133
18	-130,5
20	-128,3
25	-123,9
30	-119,9
35	-117
40	-115,1
50	-114

За отриманими даними було побудовано графік, зображений на рисунку 3.13.

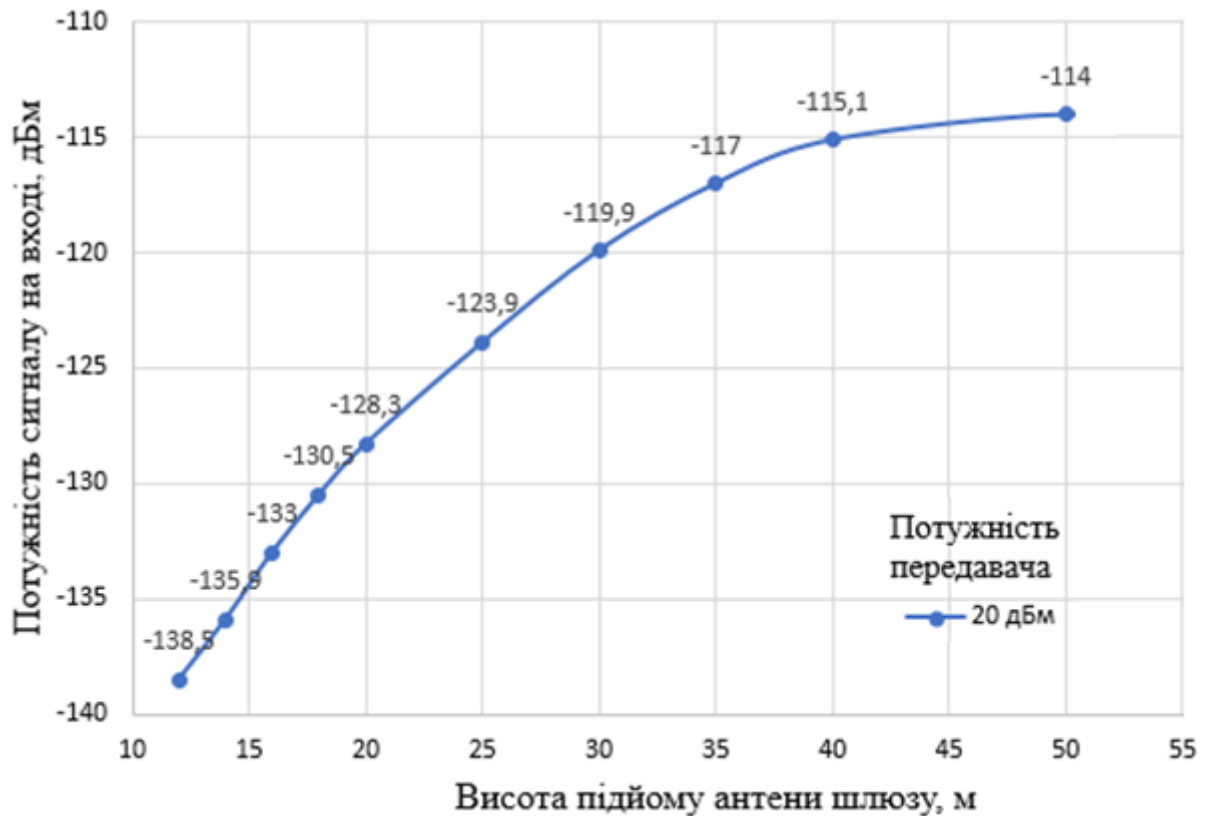


Рисунок 3.13 – Залежність рівня прийнятого сигналу від висоти підвісу антени

З графіку видно, що в місці встановлення кінцевого пристрою сигнал буде успішно прийнятий з мінімально можливою висотою встановлення антени 12 метрів. Але в такому випадку потужність прийнятого сигналу буде на межі чутливості приймача. Зі збільшенням висоти підвісу збільшується і потужність прийнятого сигналу, але після досягнення висоти в 50 метрів і з подальшим збільшенням рівень прийнятого сигналу падає.

Gateway – Node 3

Тепер дослідимо шлях радіосигналу від шлюзу до пристрою «Node 3», який знаходиться на найбільшій відстані в 6,04 кілометри.

Шлях проходження радіосигналу зображено на рисунку 3.14, а поперечний переріз на рисунку 3.15.

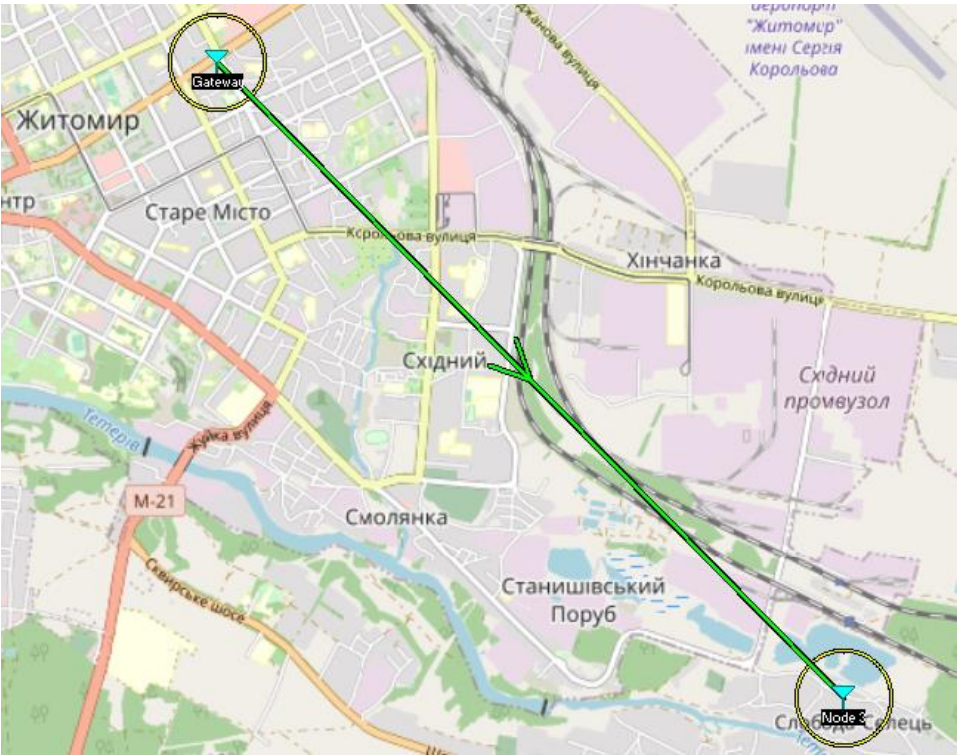


Рисунок 3.14 – Шлях радіосигналу Gateway – Node 3

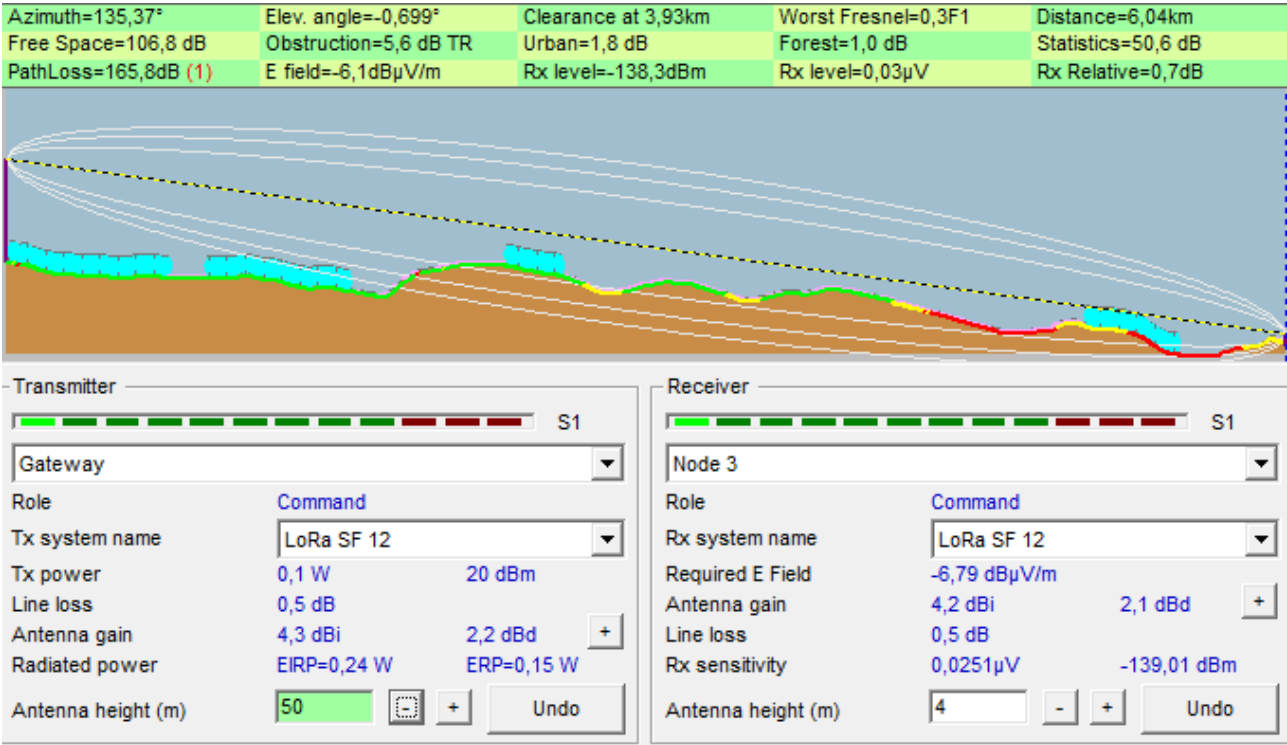


Рисунок 3.15 – Поперечний переріз проходження радіосигналу
Gateway – Node 3

З рисунку 3.15 видно, що для успішного прийому сигналу в даній точці необхідні значні висоти підвісу антен. Висоту підвісу антени кінцевого

пристрою Node 3 довелося підняти на 1 метр і тепер вона становить 4 метри. А висоту антени шлюзу довелося підняти аж до 50 метрів.

Також було знято залежність потужності прийнятого сигналу від висоти підйому антени приймача. Отримані дані занесено до таблиці 3.2, а також побудовано графік на рисунку 3.16.

Таблиця 3.2. Залежність рівня прийнятого сигналу від висоти антени приймача

Висота антени приймача, м	Рівень прийнятого сигналу, дБм	Висота антени приймача, м	Рівень прийнятого сигналу, дБм
4	-138,3	10	-134,1
5	-137,9	11	-133,6
6	-137,1	12	-132
7	-136,3	13	-131,5
8	-135,4	14	-130,1
9	-134,7		

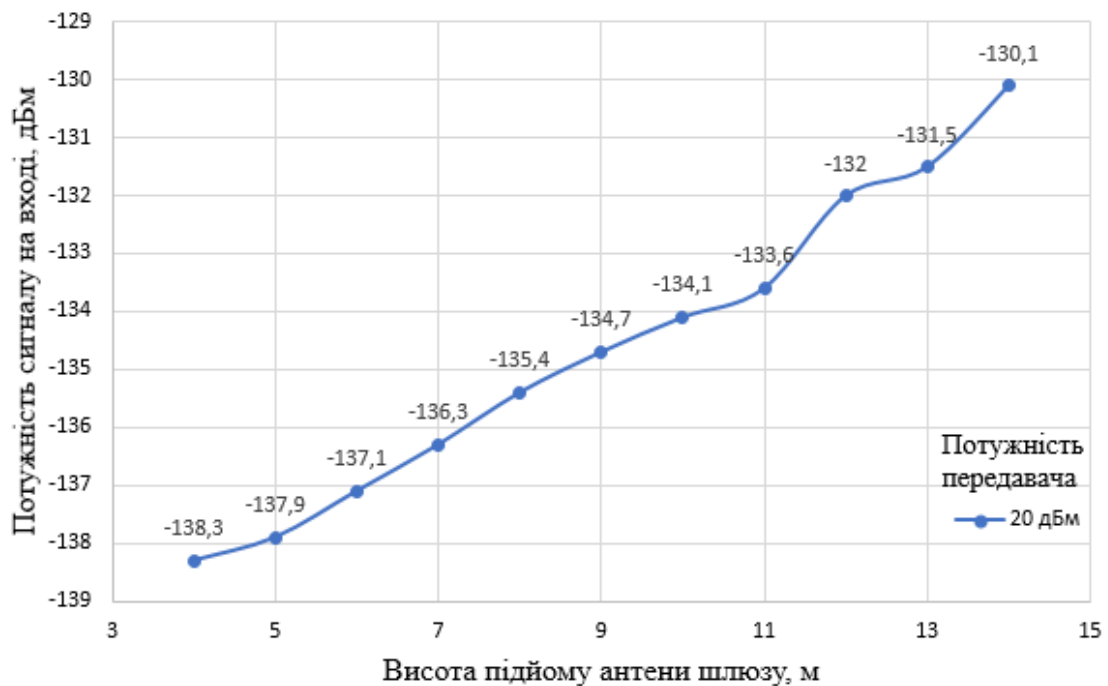


Рисунок 3.16 – Залежність потужності прийнятого сигналу від висоти антени приймача

З графіку видно, що збільшивши висоту антену приймача на 10 метрів рівень прийнятого сигналу становить -130,1, що значно краще, ніж при висоті антени 4 метри. Значення висоти в 10 метрів невелике, але виграш від цього майже 10 децибел, сигнал при цьому не буде знаходитися на межі чутливості.

Gateway – Node 4

Дослідимо шлях проходження радіосигналу від шлюзу до кінцевого пристрою Node 4. Шлях проходження радіосигналу зображено на рисунку 3.17, а поперечний переріз на рисунку 3.18.

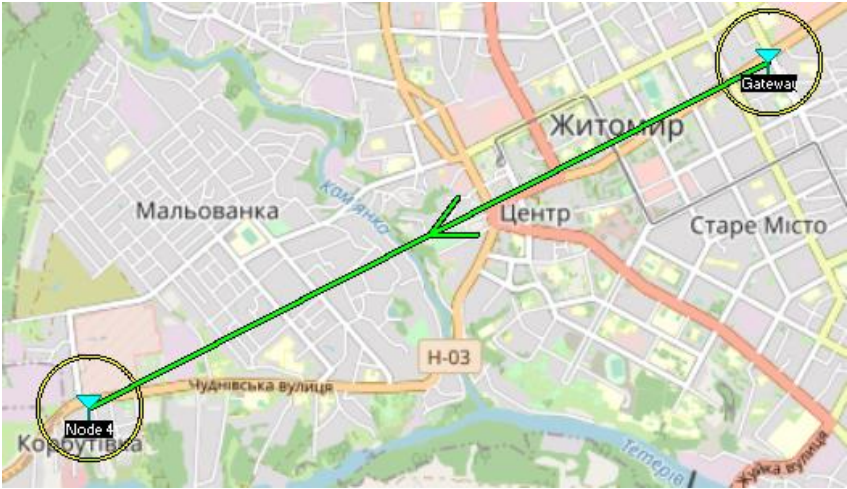


Рисунок 3.17 – Шлях радіосигналу Gateway – Node 4

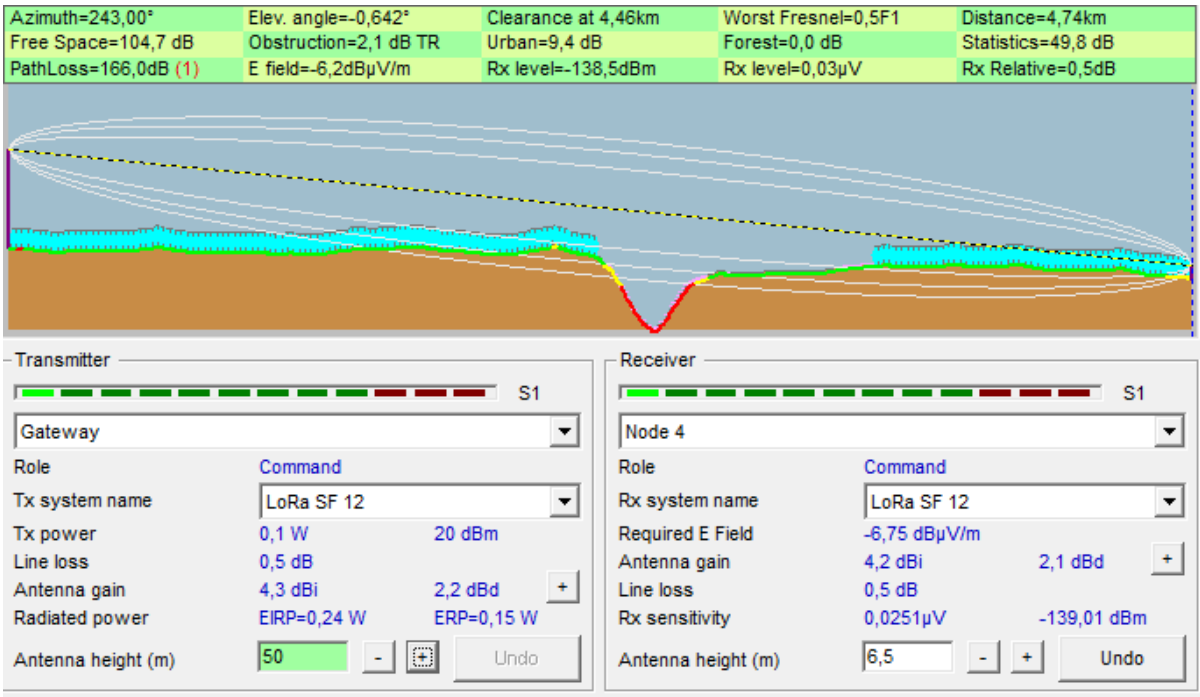


Рисунок 3.15 – Поперечний переріз проходження радіосигналу Gateway – Node 3

З рисунку 3.15 видно, що успішний прийом радіосигналу вдалося забезпечити при висоті підйому антени передавача 50 метрів, а антени приймача – 6,5 метрів. При цьому рівень потужності прийнятого сигналу знаходиться на межі чутливості приймача. Відстань між приймачем та передавачем становить 4,74 кілометри. При збільшенні висоти підйому антени приймача до 11 метрів вдалося збільшити рівень прийнятого сигналу на 10 дБм.

Зона покриття шлюзом Gateway

Для отримання зображення зони обслуговування кінцевих пристроїв шлюзом Gateway необхідно скористатися клавішою «Polar radio coverage», яка знаходиться на верхній панелі інструментів. Далі необхідно вказати точку, звідки буде відбуватися передача сигналу, в даному випадку це «Gateway». Далі необхідно задати точку кінцевого пристрою, наприклад, «Node 3». Це необхідно для налаштування точок приймання сигналу. В даному випадку, висота підвісу антени в точці приймання сигналу буде скопійована з кінцевого пристрою «Node 3». У вікні зображеному на рисунку 3.16 також необхідно вказати мережу, в даному випадку «LoRa Network», а також шлях проходження сигналу від передавача до приймача. Інші налаштування можна залишити так, як зображено на рисунку.

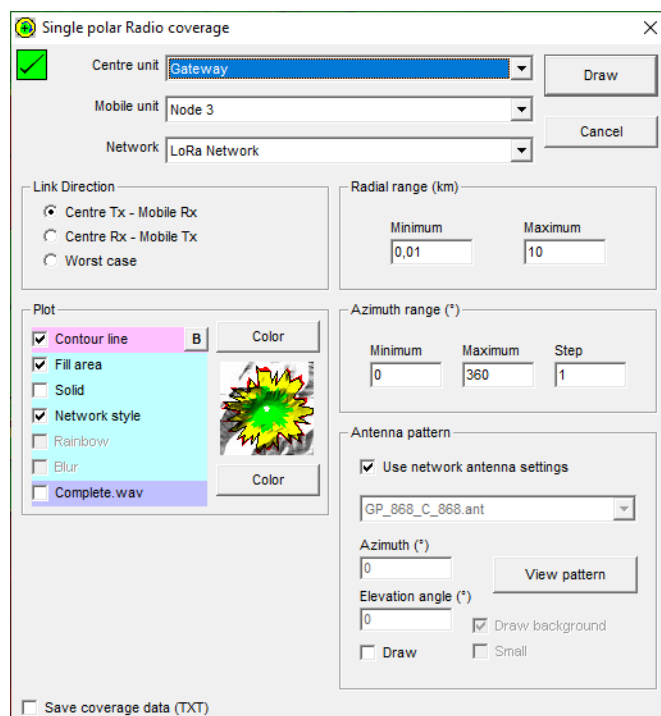


Рисунок 3.16 – Налаштування отримання зони покриття

При цьому на карту місцевості будуть нанесені зелені, жовті та червоні зони, які відповідають рівням сигналу, зображеним на рисунку 3.17.



Рисунок 3.17 – Рівні сигналу на карті

В результаті було отримано два зображення зони покриття шлюзу. На рисунку 3.18 та в додатку Б зображено зону покриття при висоті підвісу антени передавача 40 метрів, а на рисунку 3.19 при висоті підвісу антени 50 метрів. Висота підйому антени в точці приймання при цьому становить 3 метри.

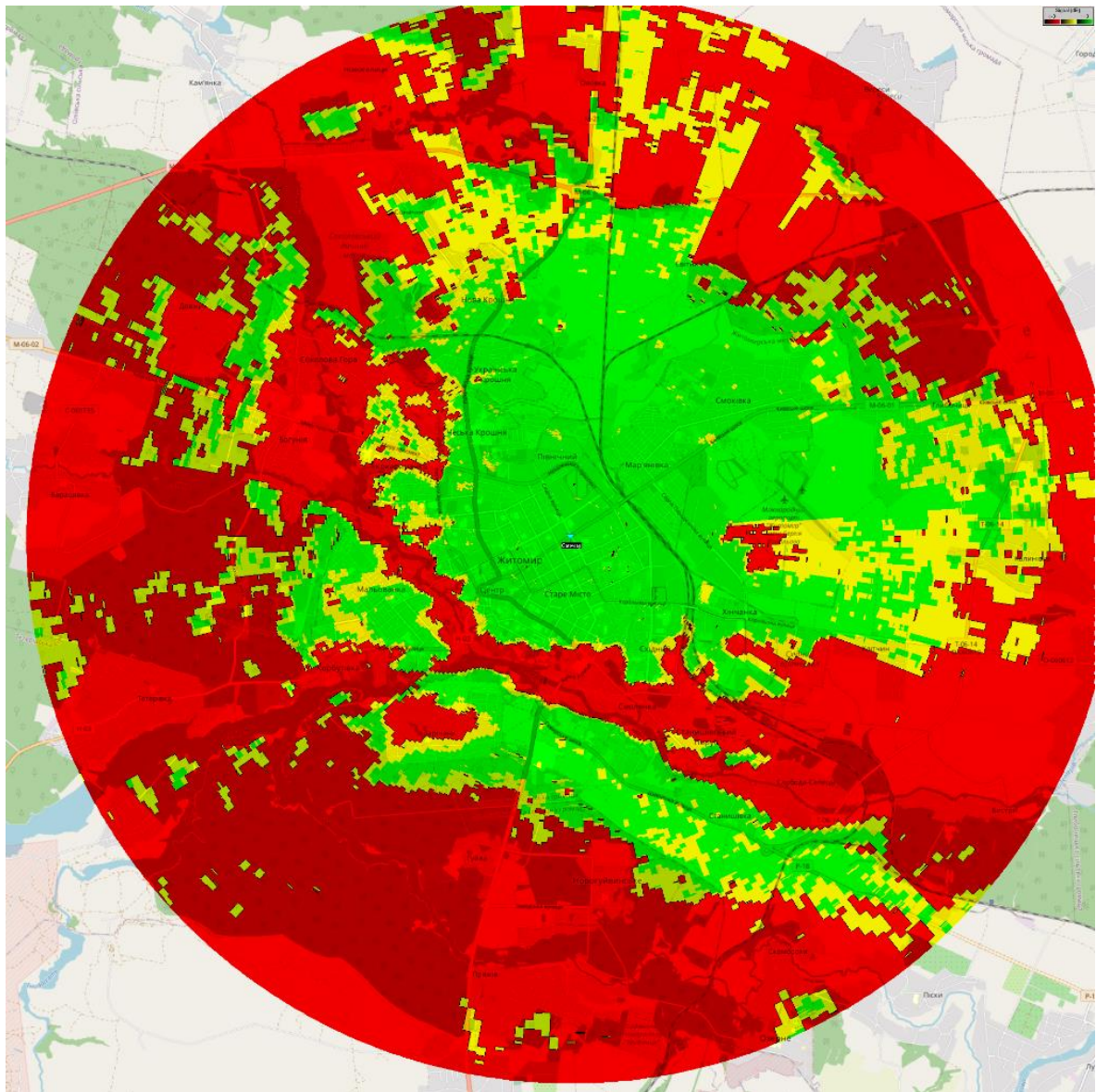


Рисунок 3.18 – Зона покриття м. Житомир при висоті підвісу антени 40 метрів

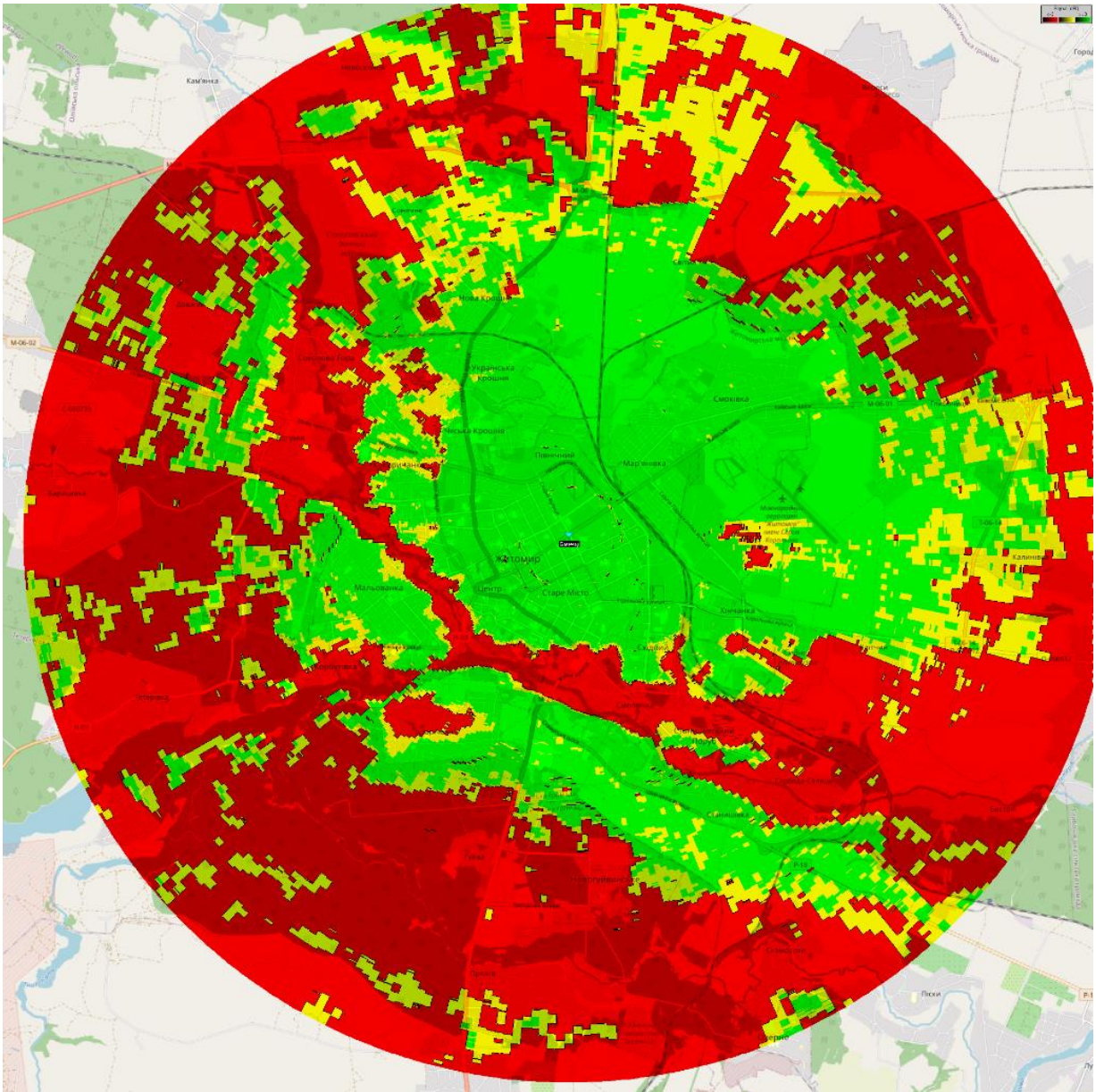


Рисунок 3.19 – Зона покриття м. Житомир при висоті підвісу антени 50 метрів

На рисунках 3.18 та 3.19 зеленим кольором зображено місця, де має бути забезпечений успішний прийом сигналу. Жовтим кольором відображаються території, де потужність прийнятого сигналу буде на межі чутливості приймача, -139 дБм. Червоним кольором відображається територія, де сигнал взагалі не можна буде прийняти.

При збільшенні висоти підйому антени на 10 метрів не спостерігається значного збільшення зони покриття. Можна зробити висновок, що немає сенсу встановлювати антену занадто високо. Окрім неможливості встановити антену занадто високо, при великих висотах підйому можуть виникати втрати

потужності випромінюваного сигналу, які будуть виникати через затухання у антенному кабелі. У таких випадках кращим варіантом буде встановлення багатьох шлюзів, які будуть рознесені по радіочастотних каналах так, щоб не заважати роботі один одного.

3.2 Побудова та характеристики макету системи

Для проведення дослідження дальності в реальних умовах було розроблено комплект приймача та передавача. Передавач розміщується на стіні будинку, або всередині та передає інформацію на кінцевий пристрій.

Передавач побудований на мікроконтролері Arduino Nano з радіомодулем RA-02. На мікроконтролері було налаштовано керування радіомодулем через інтерфейс SPI. Зовнішній вигляд передавача зображено на рисунку 3.20.

Живлення пристрою відбувається від роз'єму на платі передавача або через «Mini USB» роз'єм на платі мікроконтролера Arduino Nano. Для живлення необхідно подавати стабілізовану напругу 5В. Даний передавач передбачає підключення зовнішньої антени, для чого на радіомодулі є відповідний роз'єм в форматі IPEX. Для підключення антени необхідно використовувати перехідних, що дозволяє винести антену на зовні для покращення радіозв'язку.

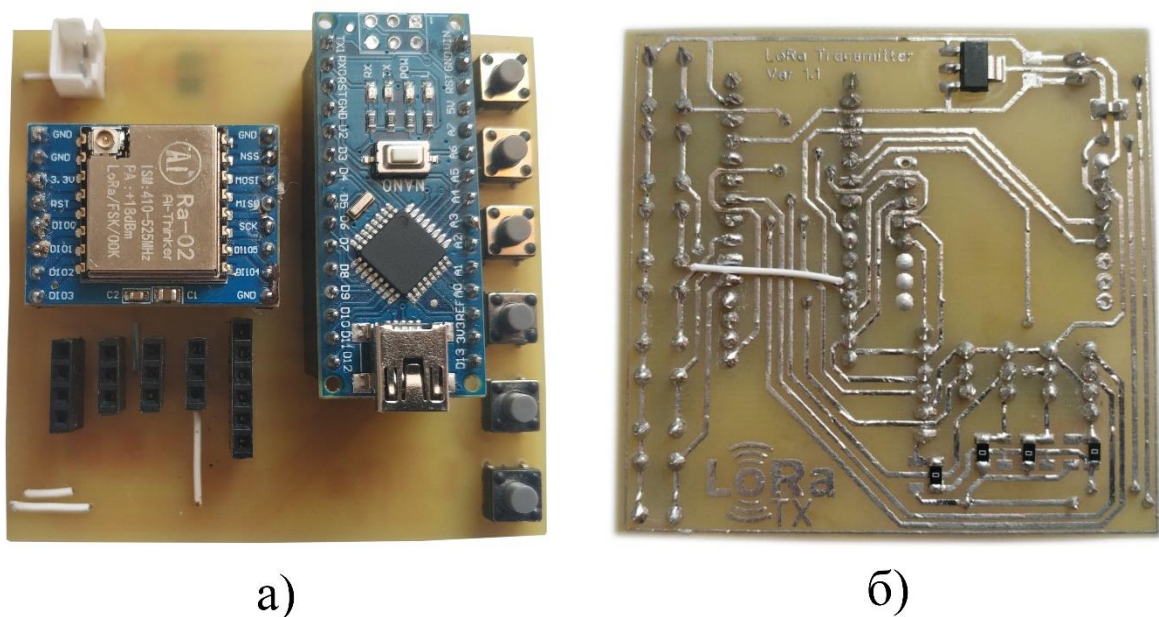


Рисунок 3.20 – Зовнішній вигляд передавача: а) вигляд зверху; б) вигляд знизу

Також було побудовано кінцевий пристрій. Він являє собою закінчений диспетчерський приймач з екраном для відображення інформації. Загалом конструкція передавача та приймача відрізняються лише наявністю екрану. В обох приладах використовується мікроконтролер Arduino Nano та радіомодуль RA-02. Зовнішній вигляд приймача зображений на рисунку 3.21.

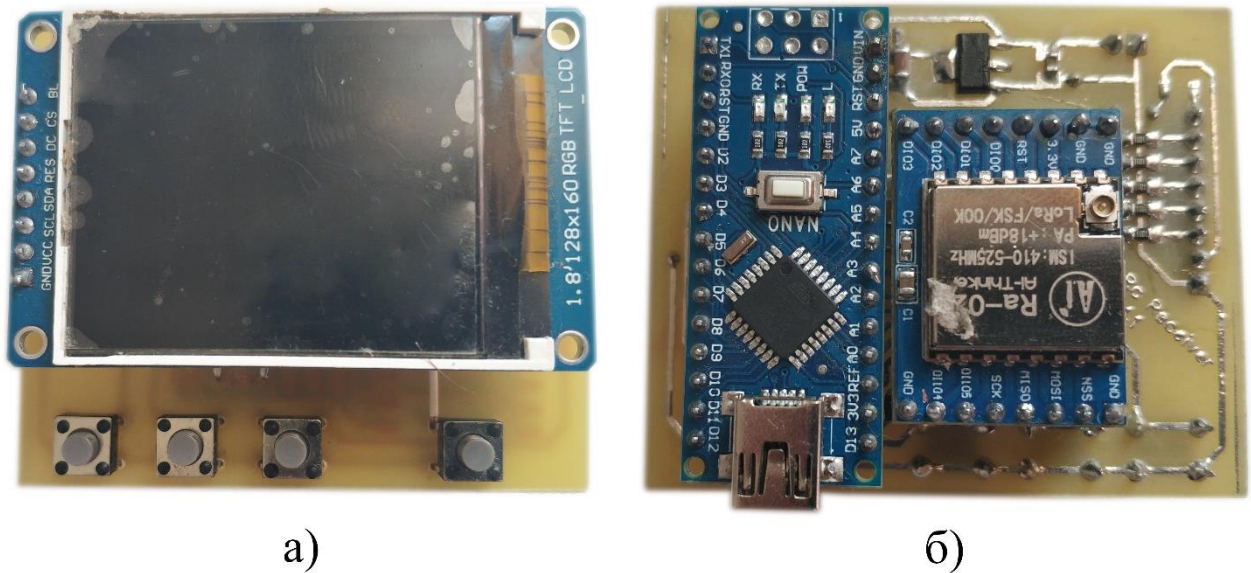


Рисунок 3.21 – Зовнішній вигляд приймача: а) вигляд зверху; б) вигляд знизу

До приймача та передавача було підключено штирьові антени, які мають коефіцієнт підсилення 3 дБм на частоті 433 МГц, рисунок 3.22.



Рисунок 3.22 – Антена 433 МГц, 3 дБі

Алгоритм роботи

Алгоритм роботи наступний. Передавач постійно шле попередньо задані пакети на приймач без затримки у часі. Дані, які передаються у пакеті являють собою лічильник чисел від 1 до 32767. Кількості відправлених пакетів цілком достатньо для проведення досліджень тривалістю в декількох годин при умові, що передавач налаштовано на ширину спектру 62,5 кГц або більше. Після переповнення лічильника він почне рахувати з початку та надсилати пакети далі.

Для приймача було написано програму, яка отримує пакети та розшифровує інформацію. Для відображення досліджених даних на дисплей приймача виводиться інформація, зображена на рисунку 3.23, а саме:

- частоту передачі сигналу;
- коефіцієнт розширення спектру;
- ширину спектру сигналу;
- швидкість кодування;
- корисну інформацію прийнятого пакету;
- лічильник загальної кількості пакетів;
- лічильник успішно отриманих пакетів;
- лічильник пропущених пакетів;
- середнє значення SNR у місці розміщення приймача;
- середнє значення RSSI у місці розміщення приймача;
- відношення кількості пропущених пакетів до загальної кількості відправлених пакетів у відсотках;
- час, витрачений на прийом одного пакету інформації.

Для визначення можливості успішного приймання пакетів у місці знаходження приймача було використано показник частоти помилок пакетів PER [33]. Він показує співвідношення у відсотках кількості пакетів, які не були отримані приймачем до загальної кількості пакетів, які надіслав передавач.

Вимога до показника частоти помилок пакетів – встановлення відсотку PER, який не повинен бути перевищений, щоб отримати успішний результат. Діапазон даного показника встановлюється від 0,1% до 15%.

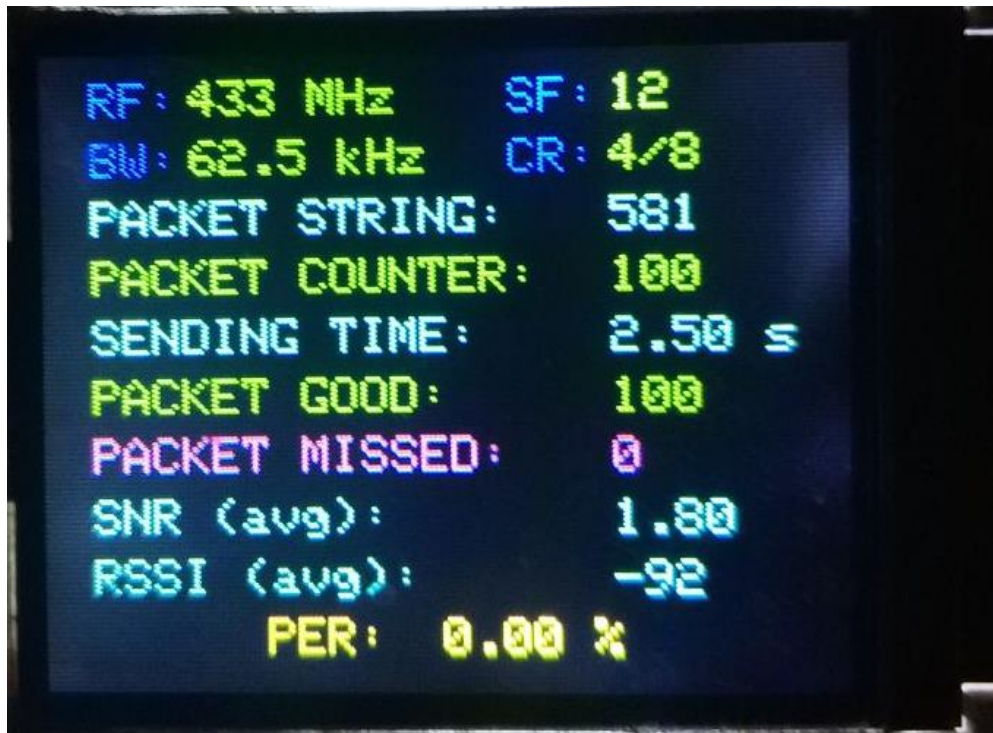


Рисунок 3.23 – Дисплей отримання інформації

При проведенні дослідження для можливості зробити висновок про успішний прийом сигналу у місці встановлення приймача параметр частоти помилок пакетів було встановлено 5% і у випадку, якщо даний показник перевищував встановлене значення, приймалося рішення про неможливість успішного прийому сигналу і даній точці.

Визначенні загальної кількості пакетів було реалізовано простим способом. Передавач постійно надсилає інформацію з лічильника. В програмі приймача перше успішно отримане значення записується в програму. Загальна кількість пакетів визначається різницею номеру останнього успішного прийнятого пакету від номеру першого отриманого пакету і визначається формулою:

$$N_{\text{ЗАГ}} = N_B - N_A, \quad (3.5)$$

де $N_{\text{ЗАГ}}$ – загальна кількість пакетів;

N_B – номер останнього прийнятого пакету;

N_A – номер першого прийнятого пакету.

Показник частоти помилок пакетів визначається за формулою:

$$PER = \frac{N_M}{N_{3AG}} \cdot 100\%, \quad (3.6)$$

де PER – показник частоти помилок пакетів;

N_M – кількість пропущених пакетів;

N_{3AG} – загальна кількість пакетів.

3.3 Дослідження дальності дії в умовах селища

Перше дослідження по дальності передачі радіосигналу було проведено на території селища міського типу Пулини, Житомирської області. Було обрано відрізок території, де відсутні щільні забудови та високі споруди, які будуть заважати проходженню радіосигналу при відносно невеликій висоті підвісу антени передавача.

Антену передавача було встановлено на максимально можливу висоту в 7 метрів. Антена приймача знаходилася на висоті 1,5 метри. На передавачі було налаштовано передачу сигналу потужністю 20 дБм з шириною спектру $BW = 62,5$ кГц та коефіцієнтом розширення спектру $SF = 12$ та швидкістю кодування $CR = 4/8$.

Загалом було досліджено три різні точки в одному напрямку:

1. 813 метрів;
2. 848 метрів;
3. 1,19 кілометри.

Розташування точки передавача та точок приймання радіосигналу зображено на рисунку 3.24 та у додатку В.

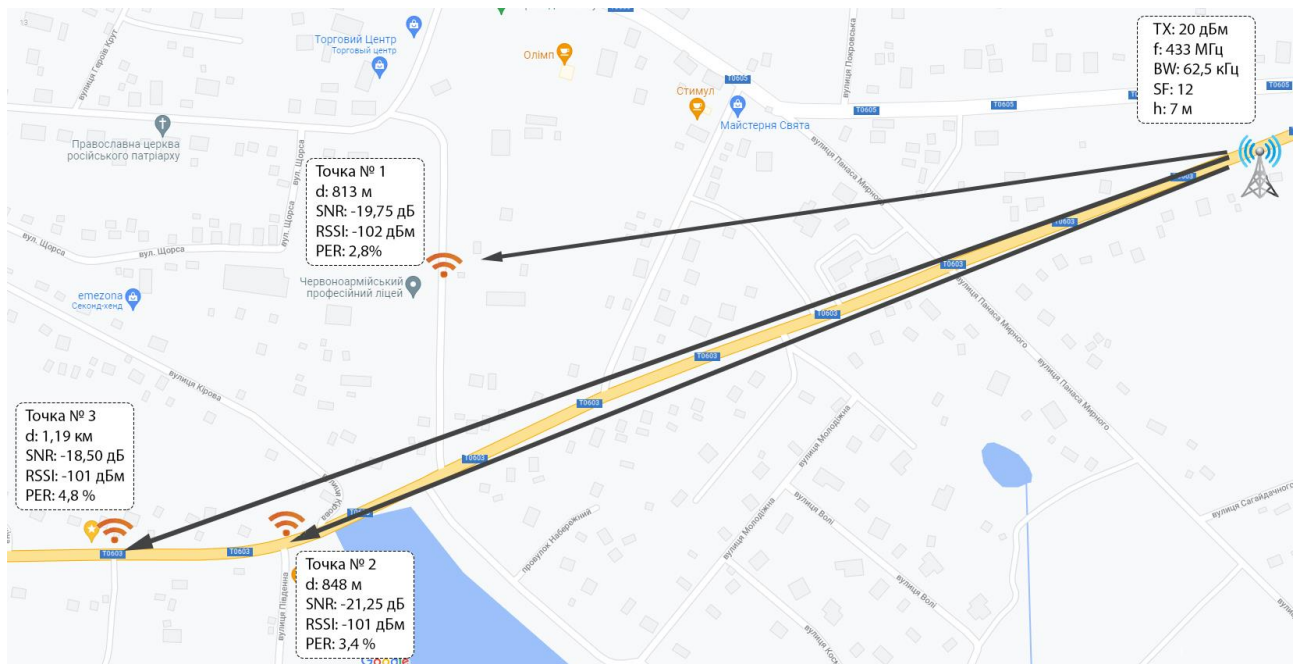


Рисунок 3.24 – Досліджувана територія смт. Пулини

Точка прийому №1 знаходиться на відстані 813 метрів від передавача та немає прямої видимості радіосигналу. Всього на шляху розташовано 6 будинків, більшість з яких – багатоповерхові. В даній точці вдалося успішно прийняти сигнал з потужністю на вході -102 дБм, а відношення SNR становило -19,75 дБ. Всього було відправлено 500 пакетів з лічильником та досліджено параметр PER. Не вдалося прийняти всього 14 пакетів даних, що вважається середнім результатом. Значення PER було розраховано за формулою:

$$PER_1 = \frac{N_M}{N_{ЗАГ}} \cdot 100 = \frac{14}{500} \cdot 100\% = 2,8\%. \quad (3.7)$$

Профіль рельєфу на шляху радіосигналу до даної точки зображений на рисунку 3.25.

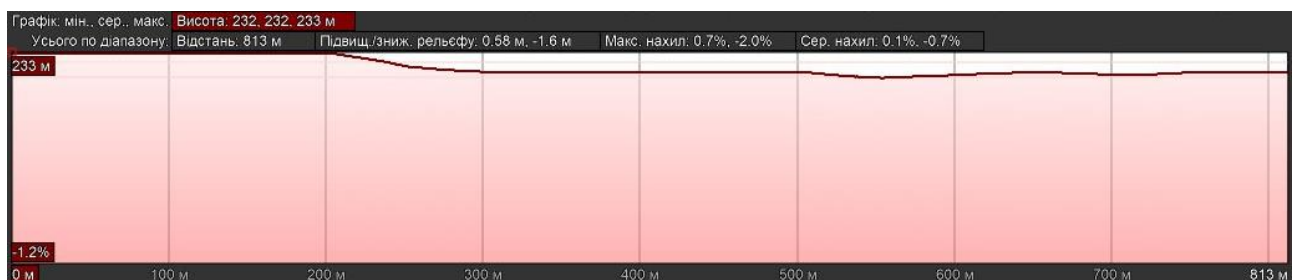


Рисунок 3.25 – Профіль рельєфу до точки №1

Точка прийому №2 знаходиться на відстані 848 метрів від місця встановлення передавача. Хоча радіопередача сигналу велась вздовж дороги, прямої видимості між антенами не було, оскільки вона має згин, а по обидві сторони знаходиться велика кількість одноповерхових будинків.

Потужність сигналу на вході приймача в даній точці було -101 дБм, що приблизно відповідає значенню, яке було виміряно для точки №1. Значення SNR становить -21,25 дБ. Профіль рельєфу вздовж якого передавався сигнал в точку №2 зображено на рисунку 3.26. Було розраховано значення PER для прийому сигналу в даній точці:

$$PER_2 = \frac{N_M}{N_{ЗАГ}} \cdot 100 = \frac{17}{500} \cdot 100\% = 3,4\%. \quad (3.8)$$

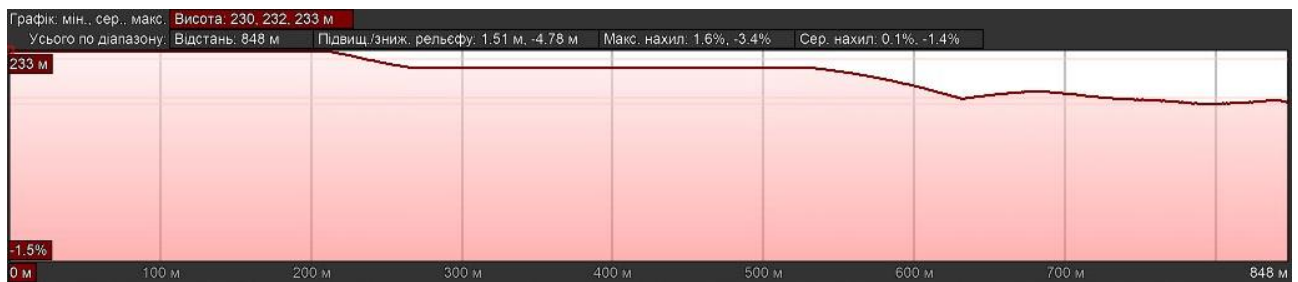


Рисунок 3.26 – Профіль рельєфу до точки №2

Точка прийому №3 знаходиться на найдовшій відстані, яку вдалося досягти не перевищуючи значення PER більше ніж 5%. Відстань до точки прийому становить 1,19 кілометри. Профіль рельєфу до точки №3 зображено на рисунку 3.27. Потужність сигналу на вході приймача становила -101 дБм, а значення SNR: -18,50 дБ. Для даної точки було розраховано значення PER:

$$PER_3 = \frac{N_M}{N_{ЗАГ}} \cdot 100 = \frac{24}{500} \cdot 100\% = 4,8\%. \quad (3.9)$$

При дослідженні інших точок приймання радіосигналу з більшою відстанню передавання отриманий сигнал не завжди вдавалося прийняти в точці прийому. Значення PER для таких точок перевищувало 5% і в деяких випадках досягало 20%, тому такі точки не було занесено до дослідження і зроблено

висновок, що максимальна дальність передачі радіосигналу на території міського типу для даного радіообладнання становить 1,19 кілометри. Отримані дані з усіх точок прийому сигналу було занесено до таблиці 3.3.



Рисунок 3.27 – Профіль рельєфу до точки №3

Таблиця 3.3. Результати дослідження в смт. Пулини

Номер точки	Відстань, км	Потужність прийнятого сигналу RSSI, дБм	Співвідношення сигнал/шум SNR, дБ	Показник частоти помилок PER, %
1	0,813	-102	-19,75	2,8
2	0,848	-101	-21,25	3,4
3	1,19	-101	-18,50	4,8

За отриманими даними було побудовано графік залежностей співвідношення сигнал/шум (рисунок 3.28) та показника частоти помилок (рисунок 3.29) від дальності передачі.

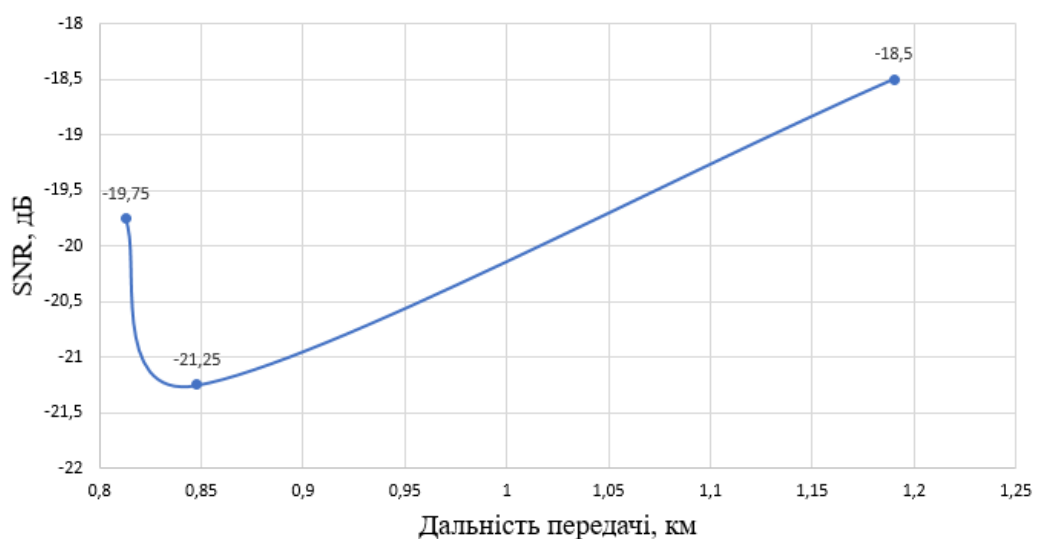


Рисунок 3.28 – Залежність SNR від дальності

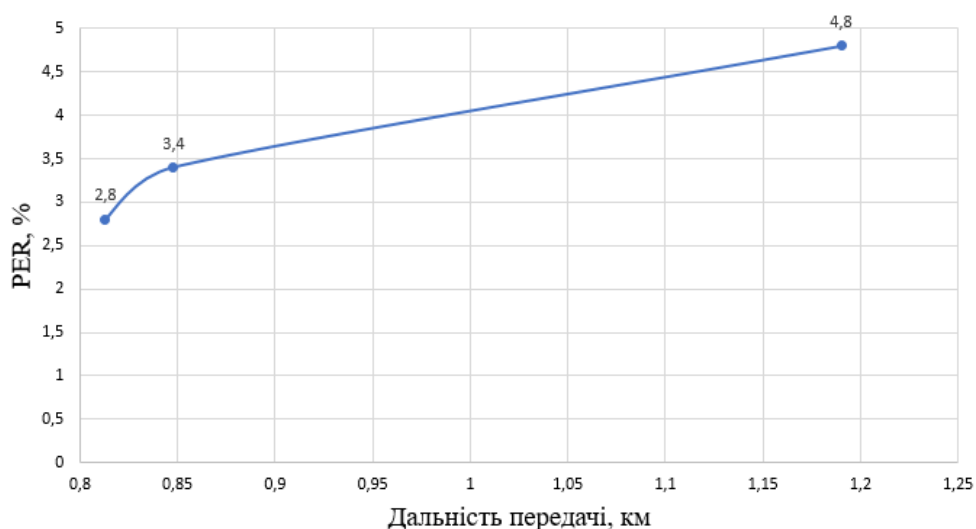


Рисунок 3.29 – Залежність PER від дальності

Потужність прийнятого сигналу у всіх трьох точках була майже однаковою, але змінювалося співвідношення сигнал/шум отриманого сигналу та показник частоти помилок. При аналізі отриманих графіків не було помічено взаємозв'язку між співвідношенням сигнал/шум SNR та показником частоти помилок пакетів PER, як мало бути. На отримані результати міг вплинути незначний рух антени приймача в просторі, оскільки вона не була жорстко закріплена на штативі та знаходилася в руках оператора, а також перешкоди у вигляді металевих конструкцій невеликої висоти, достатньої для того, щоб вплинути на згасання сигналу у межі прямої видимості та високовольтні лінії електропередачі, які знаходилися безпосередньо у місці прийому сигналу.

3.4 Дослідження дальності дії в умовах міста

В даному підрозділі було досліджено дальність передачі радіосигналу LoRa в міській території. При проведенні досліджень було використано той самий комплект радіоапаратури, що й у підрозділі 3.3 та такі самі антени. Параметри сигналу, який передається та потужність передавача було залишено ті самі.

В умовах міста передати радіосигнал на велику відстань складніше, ніж в селищі міського типу, або на відкритій території через велику щільність забудови

та велику кількість багатоповерхових будинків, які ускладнюють проходження радіосигналу. З іншого боку, встановити антену радіопередавача можна на більшій висоті, наприклад, на стіні найвищого поверху, або на даху. Незважаючи на це, якщо поряд будуть будинки, які мають більшу висоту, ніж висота встановлення антени передавача, це серйозно вплине на максимальну дальність передачі сигналу. Для досягнення найбільшої дальності передачі антену необхідно встановлювати на даху найвищого будинку, який знаходиться поблизу, якщо це можливо.

Дослідження дальності в міській території було проведено в місті Житомир, в декількох кілометрах від центра міста через те, що встановити там передавач було неможливо. Антену та передавач було встановлено на висоті десятого поверху (приблизно 35 метрів) будинку, який знаходиться за адресою вул. Чуднівська 103Б.

Для дослідження було обрано напрямок вздовж вулиці Чуднівська в сторону, де менша кількість багатоповерхівок. Загалом було досліджено 9 точок приймання сигналу через кожні 100 метрів та визначено середні значення потужності прийнятого сигналу, співвідношення сигнал/шум та показника частоти помилок пакетів. Досліджувана територія міста зображена на рисунку 3.30 та додатку Г.



Рисунок 3.30 – Досліджувана територія міста Житомир

Після відстані радіопередачі 500 метрів потужність прийнятого сигналу залишалась -101 дБм та лише в останній точці вимірів зменшилася до -105 дБм.

Максимальна дальність передачі, яку вдалося досягти в даному напрямку становить 900 метрів. На шляху радіосигналу знаходиться багато багатоповерхових будинків, які заважають якісному прийому сигналу. Після відстані 300 метрів показник PER почав збільшуватися і деякі пакети не були отримані.

Прийняти сигнал на відстань більше ніж 900 метрів не вдалося. Остання точка прийому сигналу знаходиться на згині вулиці, тож шлях проходження радіосигналу перестав проходити вздовж неї. Отримані дані занесено до таблиці 3.4.

Таблиця 3.4. Результати дослідження в м. Житомир

Номер точки	Відстань, м	Потужність прийнятого сигналу RSSI, дБм	Співвідношення сигнал/шум SNR, дБ	Показник частоти помилок PER, %
1	100	-92	1,8	0,0
2	200	-93	4,5	0,0
3	300	-98	0,54	0,0
4	400	-99	-13,26	1,2
5	500	-101	-4,1	0,4
6	600	-101	-15,17	3,0
7	700	-101	-12,45	3,2
8	800	-101	-18,44	4,6
9	900	-105	-19,45	4,8

Графік залежності потужності прийнятого сигналу від відстані радіопередачі зображено на рисунку 3.31. Графік залежності співвідношення сигнал/шум зображено на рисунку 3.32. Графік залежності показника частоти помилок зображено на рисунку 3.33.

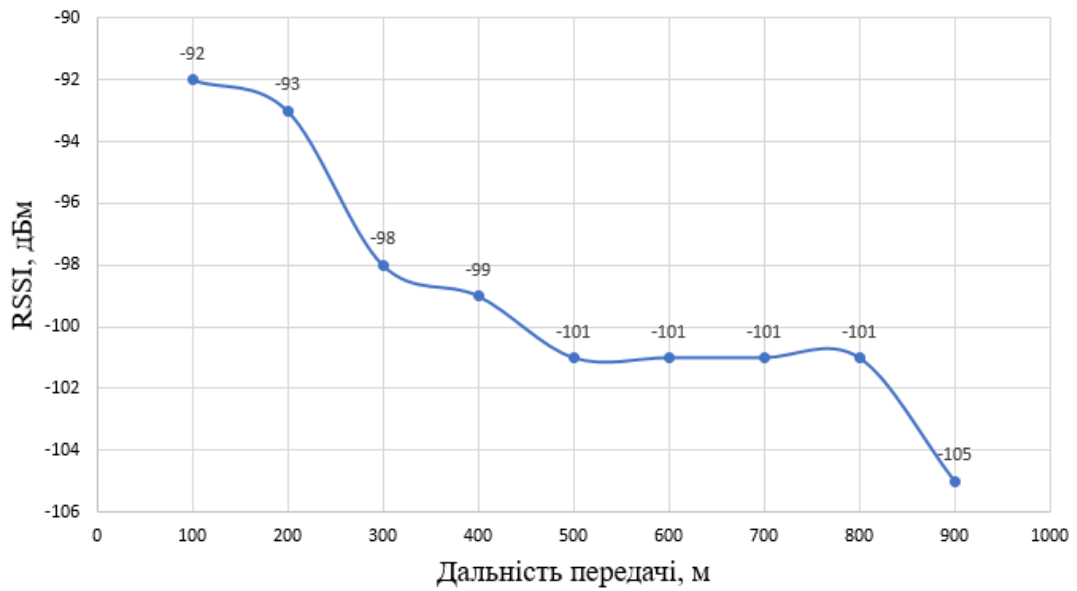


Рисунок 3.31 – Залежність RSSI від дальності

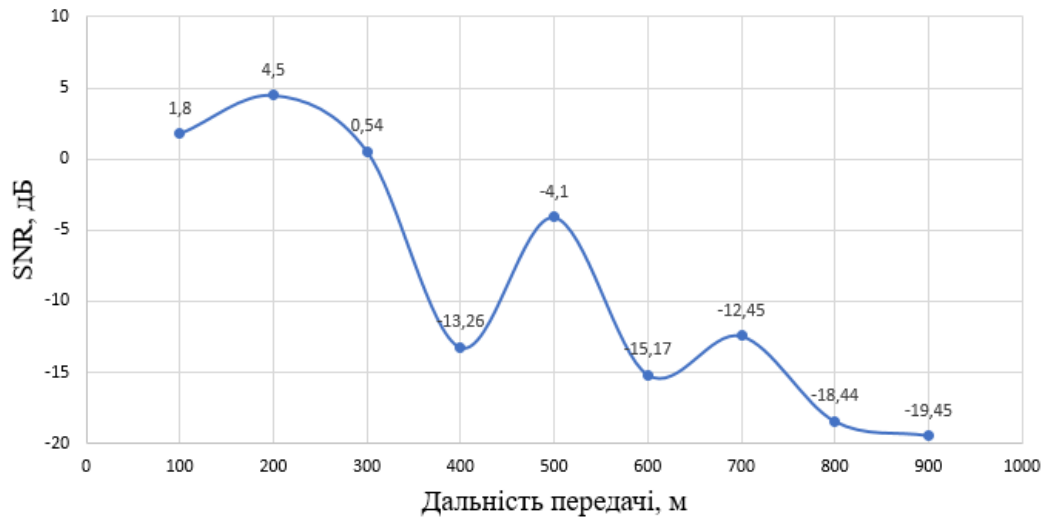


Рисунок 3.32 – Залежність SNR від дальності

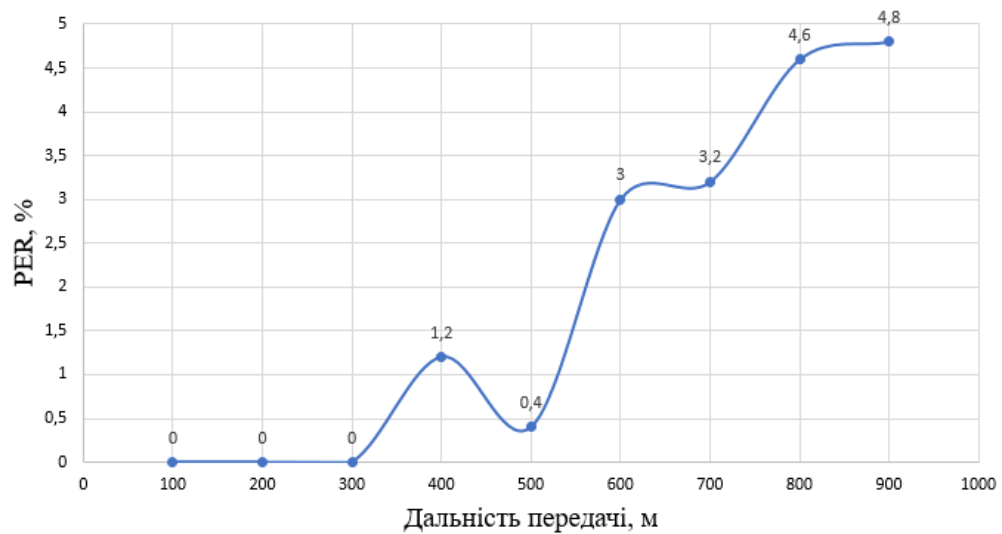


Рисунок 3.33 – Залежність PER від дальності

Після аналізування графіків було зроблено висновок, що зі збільшенням дальності передачі зменшується потужність прийнятого сигналу у всіх випадках. Співвідношення сигнал/шум збільшується зі збільшенням дальності, але не має прямої залежності від дальності. Наприклад, є точки в яких співвідношення сигнал/шум було більше, ніж на точках, які знаходяться далі. Це може бути пов'язано з зашумленістю радіочастотного ефіру в місці. На сигнал можуть впливати інші прилади, які працюють в тому ж діапазоні частот, що і передавач, а також інші джерела завад.

З графіків, зображених на рисунках 3.32 та 3.33 видно, що показник частоти помилок пакетів залежить від співвідношення сигнал/шум. Чим більше співвідношення сигнал/шум, тим менше пакетів було пропущено приймачем.

3.5 Дослідження швидкодії системи

Для дослідження часу передавання радіосигналу було написано просту програму в середовищі Arduino IDE. Лістинг програми зображено на рисунку 3.34.

```
void loop() {
    // 8 bit data
    String data = String(255, BIN); // 11111111

    // send packet
    unsigned long st_ms = millis(); // sending start time
    LoRa.beginPacket();
    LoRa.write(destinationAddress);
    LoRa.write(localAddress);
    LoRa.write(data.length());
    LoRa.print(data);
    LoRa.endPacket();
    unsigned long en_ms = millis(); // sending end time
    int air_ms = en_ms - st_ms;      // time difference

    // display info
    Serial.print("Start ms: ");
    Serial.println(st_ms);
    Serial.print("End ms: ");
    Serial.println(en_ms);
    Serial.print("Air time: ");
    Serial.println(air_ms);
    Serial.println("");
}
```

Рисунок 3.34 – Лістинг програми для дослідження часу передавання

Визначення часу передавання пакету полягає у визначенні різниці часу коли було почато надсилання та часу, коли надсилання було закінчене. Після визначення різниці часу інформація виводиться в серійний монітор у вигляді, зображеному на рисунку 3.35.

```

Start ms: 2399
End ms: 4775
Air time: 2376

Start ms: 4776
End ms: 7154
Air time: 2378

Start ms: 7155
End ms: 9532
Air time: 2377

```

Рисунок 3.35 – Час передавання 8 біт корисного навантаження

Для дослідження реального точного часу передавання повідомлення було визначено середнє арифметичне значення, отримане після передавання 10 пакетів інформації. Дані занесено до таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Час надсилання пакетів

Номер пакету	Час надсилання, мс	Номер пакету	Час надсилання, мс
1	2377	6	2378
2	2377	7	2376
3	2376	8	2378
4	2377	9	2377
5	2377	10	2378

Середній час передачі одного пакету з корисним навантаженням розміром 8 біт розраховано за формулою:

$$t = \frac{2377 + 2377 + 2376 + 2377 + 2378 + 2376 + 2378 + 2377 + 2378}{10} = 2377,1 \text{ мс.} \quad (3.10)$$

Також було досліджено час отримання одного пакету даних на відстані 200 метрів від точки встановлення передавача, результат зображено на рисунку 3.36. Інформація про час знаходиться в строці «SENDING TIME». Час відображається в секундах та заокруглений до сотої частини.



Рисунок 3.36 – Час отримання пакету повідомлення

Час витрачений на отримання одного пакету даних було розраховано як різницю часу отримання одного пакету повідомлення та часу отримання наступного пакету. При проведенні досліджень було встановлено, що на відстані передачі до 900 метрів, час на приймання одного пакету даних однаковий і не змінювався.

Висновки

В даному розділі було проведено моделювання зони радіопокриття LoRaWAN мережі в програмному забезпеченні Radio Mobile. Також досліджено дальність дії побудованої системи в реальних умовах та швидкодію системи. За результатами проведених досліджень зроблено висновок про необхідність використання якісних налаштованих на частоту антен та якісних радіомодулів для передавача та приймача для забезпечення розрахованої дальності дії.

ВИСНОВКИ

У випускній кваліфікаційній роботі проведено огляд безпроводних технологій, які дозволяють здійснювати передачу інформації на порівняно великі відстані. Серед технологій, які надають найбільшу дальність передачі було описано LoRa та Sigfox. В результаті аналізування технологій було обрано найпростішу з точки зору простоти розгортання системи технологію – LoRa. Дана технологія набула більшого поширення, ніж Sigfox, та краще досліджена в різних аспектах. Було розглянуто технологію модуляції LoRa та склад системи мережі LoRaWAN, а також визначено набір необхідних компонентів для розгортання мережі.

На основі дослідження LoRaWAN мережі було розроблено систему об'єктового попередження техногенних аварій, описано її склад та алгоритм роботи.

Для створеної системи було проаналізовано дальність передачі сигналу в умовах міської, приміської та відкритої територій. За проведеними розрахунками, при висоті підвісу антени передавача 35 метрів, а висоти підвісу антени приймача 3 метри в умовах міської території можна досягти дальності передачі сигналу в 6,73 кілометри. Розрахунок було проведено за умови, що чутливість сигналу на вході приймача буде становити -146 дБм. Для досягнення цієї чутливості необхідно налаштувати радіомодулі на випромінювання сигналу потужністю 20 дБм з шириною спектру $BW = 10,4$ та коефіцієнтом розширення $SF = 11$. Для приміської території при таких самих налаштуваннях дальність передачі інформації становить 12,94 кілометри. Для відкритої – 44 кілометри. Розрахунки було проведено на основі моделі Окамура-Хата та першого рівняння радіозв'язку.

При дослідженні технології модуляції було виявлено, що висока чутливість сигналу на вході приймача досягається завдяки великому коефіцієнту розширення спектру та ширини спектру. Зміна даних параметрів впливає не лише на чутливість приймача, а й на швидкість передавання інформації. Так, зі

збільшенням коефіцієнту розширення спектру та звуженням ширини спектру швидкість передачі інформації зменшується. Регулюючи дані параметри можна отримати оптимальне відношення швидкості передачі даних до необхідної дальності передачі. Було досліджено вплив широкосмугових та вузькосмугових завад на ЛЧМ-сигнал LoRa та встановлено, що широкосмугові завади мають більший вплив, оскільки їх потужність зосереджується в певній частині спектру сигналу, а не розподіляється між усім спектром, що дозволяє підвищити потужність завади на встановленій частоті.

Також було проведено аналіз швидкодії системи. Для підвищення швидкодії було запропоновано структуру пакету LoRaWAN, який має достатню кількість інформації для розпізнавання та найменший час передачі. Для цього було запропоновано кодувати адресу кожного датчика одним бітом інформації. Одного біту інформації вистачає для розпізнавання 255 датчиків, а час передачі інформації при ширині спектру $BW = 62,5$ кГц та коефіцієнту розширення спектру $SF = 12$ становить 2376 мілісекунд.

Окрім цього було проведено моделювання зони покриття одного диспетчерського приймача в місті Житомир. За результатами моделювання один приймач при висоті підвісу антени 40 метрів покриває майже весь центр міста, окрім місцевостей, які розташовані на підвищенні. При збільшенні висоти підвісу антени значного збільшення зони покриття не було, звідки зроблено висновок про необхідність встановлення декількох передавачів в різних частинах міста з урахуванням рельєфу місцевості.

Для дослідження роботи системи в реальних умовах було розроблено макет передавача та приймача. Було досліджено максимальну дальність передачі в умовах міста та сільської місцевості. Так, в умовах сільської місцевості найбільшу дальність, яку вдалося досягти – 1,19 кілометри при висоті підвісу антени передавача 7 метрів, а антени приймача 1,5 метри. Радіомодулі при цьому було налаштовано на $BW = 62,5$ кГц та $SF = 12$. Сигнал випромінювався з потужністю 20 дБм. В міських умовах вдалося передати сигнал на відстань 900

метрів при підвісі антени передавача 35 метрів та таких самих налаштуваннях радіомодулів.

В процесі дослідження побудованого макету було виявлено, що неможливо прийняти сигнал з шириною спектру BW менше 62,5 кГц. При аналізі літератури та документації на радіочіпсети SX127х було встановлено, що для передачі сигналу з малою шириною спектру необхідно використання термокомпенсованих кварцових генераторів для вирішення проблем нестабільності частоти. Також було отримано значно гірші результати дальності передачі сигналу, на що могли вплинути використання великого значення ширини спектру та неналаштовані антени, які не були перевірені на коректну роботу в заданому діапазоні частот.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Internet of Things (IoT) [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.techopedia.com/definition/28247/internet-of-things-iot>.
2. Системи, канали та мережі зв'язку [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://studfile.net/preview/1583224/page:2/>.
3. Типи ліній зв'язку. Апаратура ліній зв'язку. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://studfile.net/preview5797715/page:19/>.
4. Поповський В. В. Телекомунікаційні системи та мережі. Структура та основні функції [Електронний ресурс] / В. В. Поповський // СМІТ. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.znanius.com/3534.html>.
5. Wu Mengdi. Wireless communication technologies in Internet of Things (IOT) / Wu Mengdi. – University of Vaasa: Vaasa, 2016.
6. Afaneh M. How to Achieve Ranges of over 1 Km using Bluetooth Low Energy (LE Coded PHY) [Електронний ресурс] / Mohammad Afaneh – Режим доступу до ресурсу: <https://www.novelbits.io/long-range-bluetooth-coded-phy/>.
7. Zigbee 101: керівництво для початківців [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://habr.com/ru/post/535658/>.
8. Технологія Z-Wave: розумний будинок [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://skomplekt.com/technology/z_wave.htm/.
9. Narrowband IoT (NB-IoT): Cellular Technology for the Hyperconnected IoT [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.datatec.de/media/pdf/43/g0/46/5992-2360en.pdf>.
10. "LoRaWAN: The Definitive Guide" [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://cdn-shop.adafruit.com>
11. "LoRaWAN for IoT" [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://cdn-shop.adafruit.com>

12. "LoRaWAN: A Comprehensive Guide to the Internet of Things" [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://cdn-shop.adafruit.com>
13. "LoRaWAN Network Design and Implementation" [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://cdn-shop.adafruit.com>
14. Гаєвський С. Чипсети SX127x радіоканалом LoRa: застосування в системах зв'язку / Сергій Гаєвський. – 2017. – №2.
15. Semtech SX1276/77/78/79 datasheet [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://cdn-shop.adafruit.com/product-files/3179/sx1276_77_78_79.pdf.
16. Ципоренко В.Г. Система моніторингу стрілецького полігону / В.Г. Ципоренко, І.В. Меньшикова, М.А. Ващенко // XII Міжнародна науково-технічна конференція «Інформаційно-комп'ютерні технології – 2021», 1-3 квітня 2021р. м. Житомир, Державний університет «Житомирська політехніка». С. 119.
17. Ципоренко В.Г. Система попередження техногенних аварій / В.Г. Ципоренко, І.В. Меньшикова, М.А. Ващенко // IV МВсеукраїнська науково-практична інтернет-конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених «Інформаційно-комп'ютерні технології: стан, досягнення та перспективи – 2021», 25-26 листопада 2021р. м. Житомир, Державний університет «Житомирська політехніка».
18. Технологія LoRa [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://habr.com/ru/amp/post/304312/>.
19. What Is LoRa? [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.semtech.com/lora/what-is-lora>.
20. Беспровідний трансивер LoRa Ra-02 на чипі SX1278 (410-525МГц) [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.mini-tech.com.ua/lora-ra-02>.

- 21.LoRa модуляція — тест на дальність передачі даних [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://lo-ra.ru/lora-moduljacija-test-na-dalnost-peredachi-dannyh/>.
- 22.Myers T. Back to Basics: The Shannon-Hartley Theorem [Електронний ресурс] / Ted Myers – Режим доступу до ресурсу: <https://www.ingenu.com/2016/07/back-to-basics-the-shannon-hartley-theorem/>.
23. Козлов В.І. Використання LoRaWAN у промислових додатках / В.І. Козлов, О.Ю. Смірнов, Н.П. Верещагін // VI Міжнародна науково-технічна конференція «Телекомунікаційні системи та мережі – 2018», 5-7 травня 2018р. м. Київ, Національний технічний університет України. С. 75-80.
24. Петренко А.В. Дослідження ефективності LoRaWAN мережі в міських умовах / А.В. Петренко, М.М. Іванченко, Т.С. Коваленко // XI Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні проблеми телекомунікацій – 2019», 2-4 квітня 2019р. м. Харків, Харківський національний університет радіоелектроніки. С. 102-108.
- 25.Rappaport T. S. Wireless Communications: Principles and Practice Subsequent Edition / Theodore S. Rappaport. – New Jersey: Prentice Hall, 2002. – (2).
- 26.Антенний кабель - RAD-CON-SMA-N-SS - 2867403 [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.phoenixcontact.com/online/portal/ru?uri=pxc-oc-itemdetail:pid=2867403&library=ruru&tab=1>.
- 27.Laveyne J. Application of LoRaWAN for Smart Metering: An Experimental Verification / J. Laveyne, G. Van Eetvelde, L. Vandeveld. // International Journal of Contemporary ENERGY. – 2018. – №1.
- 28.Sklar B. Digital Communications: Fundamentals and Applications, 2nd Edition / Bernard Sklar. – New Jersey: Prentice Hall, 2001. – (2).
- 29.Simon M. Coherent Detection of Frequency-Hopped Quadrature Modulations in the presence of Jamming. Part I. QPSK and QASK; Part II QPR class I Modulation / M. Simon, A. Polydoros. // IEEE Transactions on Communications. – 1981. – №29.

30. Stark W. Coding for Frequency-Hopped Spread-Spectrum Communication with Partial-Band Interference: Part II. Coded Performance / Wayne Stark. // IEEE Transactions on Communications. – 1985. – №10.
31. Radio Mobile [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.ve2dbe.com/rme.html>.
32. RFSee [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: http://radiomobile.rfsee.nl/?Radio_Mobile.
33. Packet Error Rate (PER) Measurement Description [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: https://rfmw.em.keysight.com/rfcomms/refdocs/1xevdo/1xevdo_meas_cperror_desc.html.

ДОДАТОК А

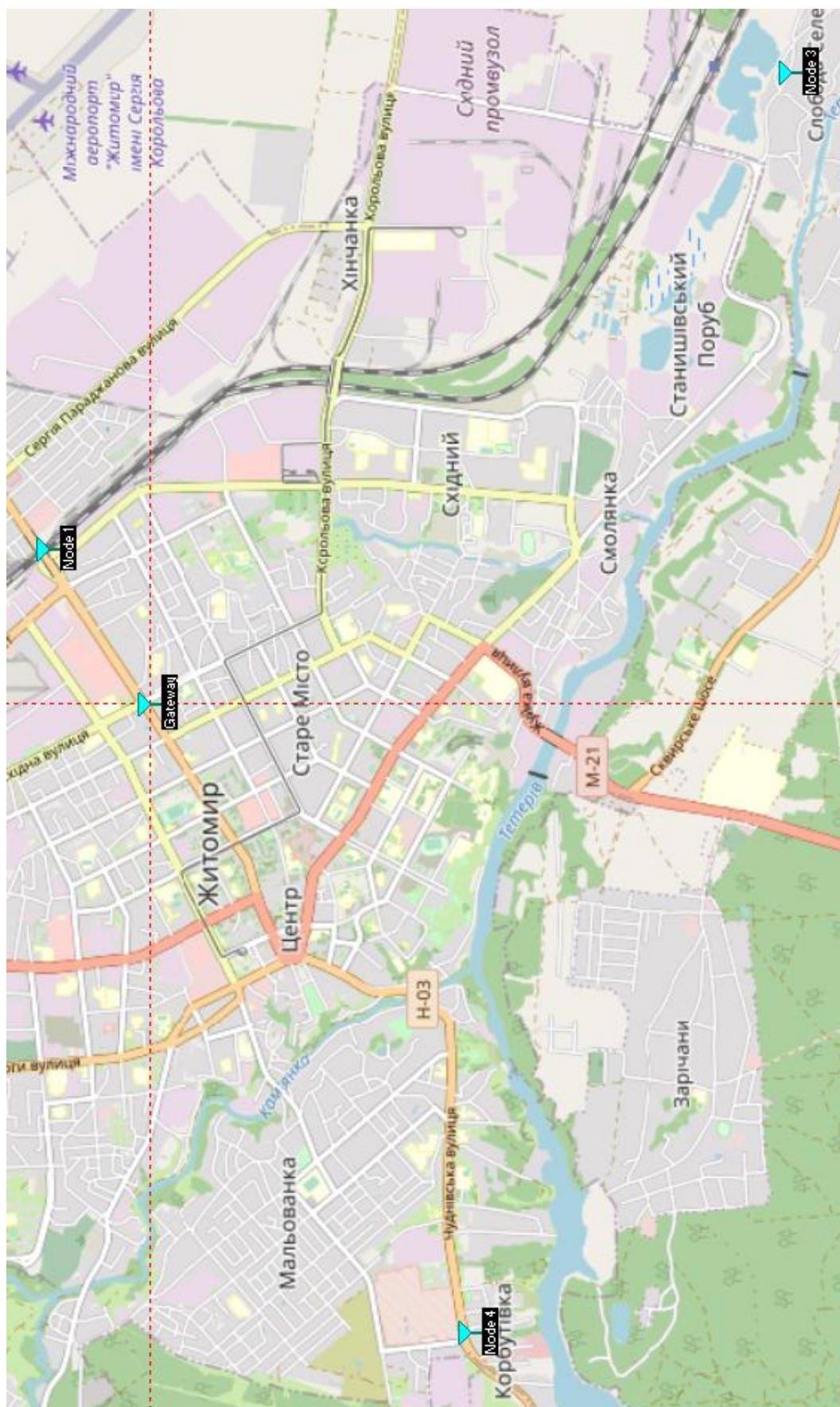


Рисунок 3.8 – Розміщення пристроїв на карті в м. Житомир

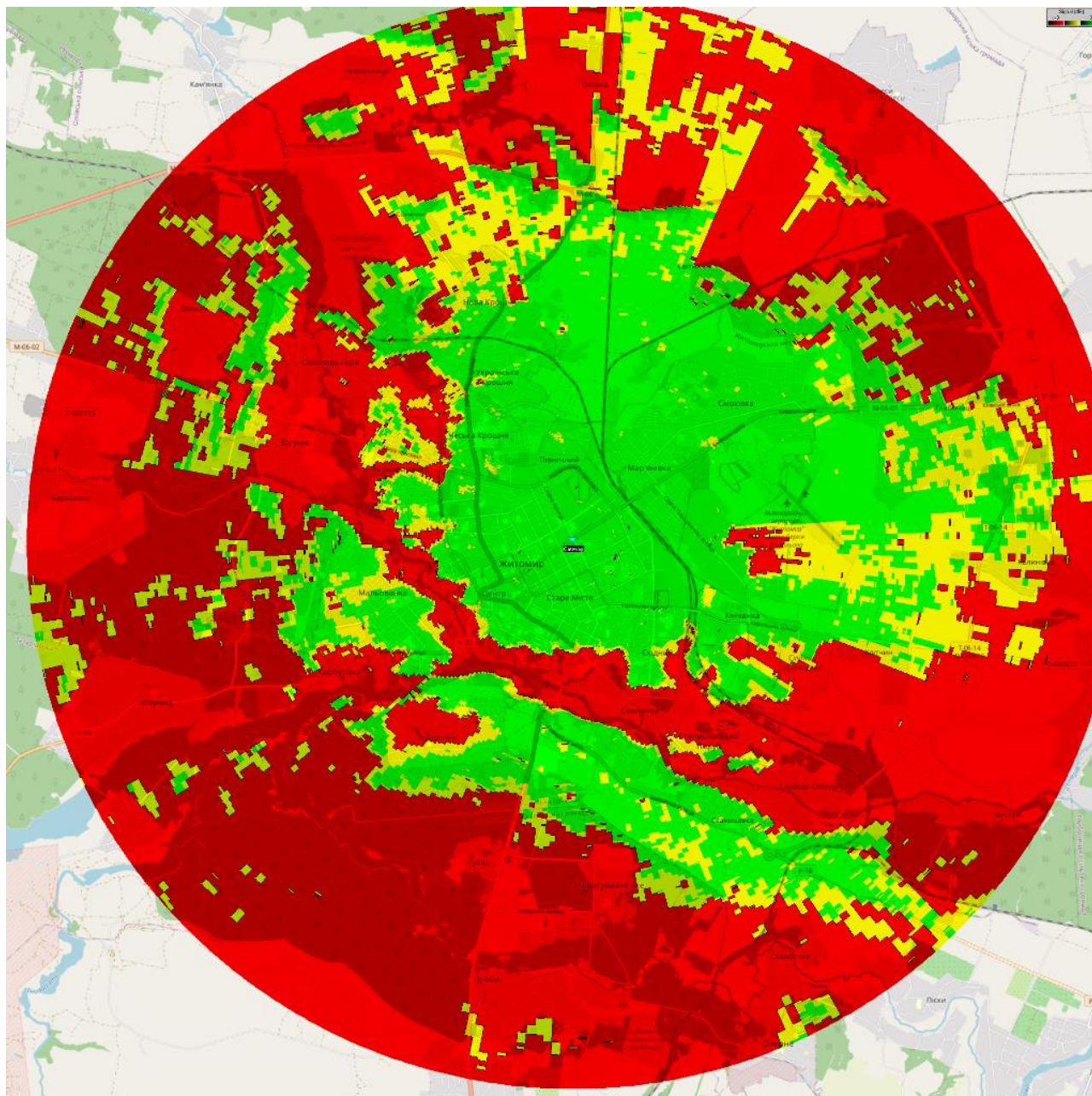


Рисунок 3.8. – Зона покриття м. Житомир при висоті
підвісу антени 40 м.

ДОДАТОК В

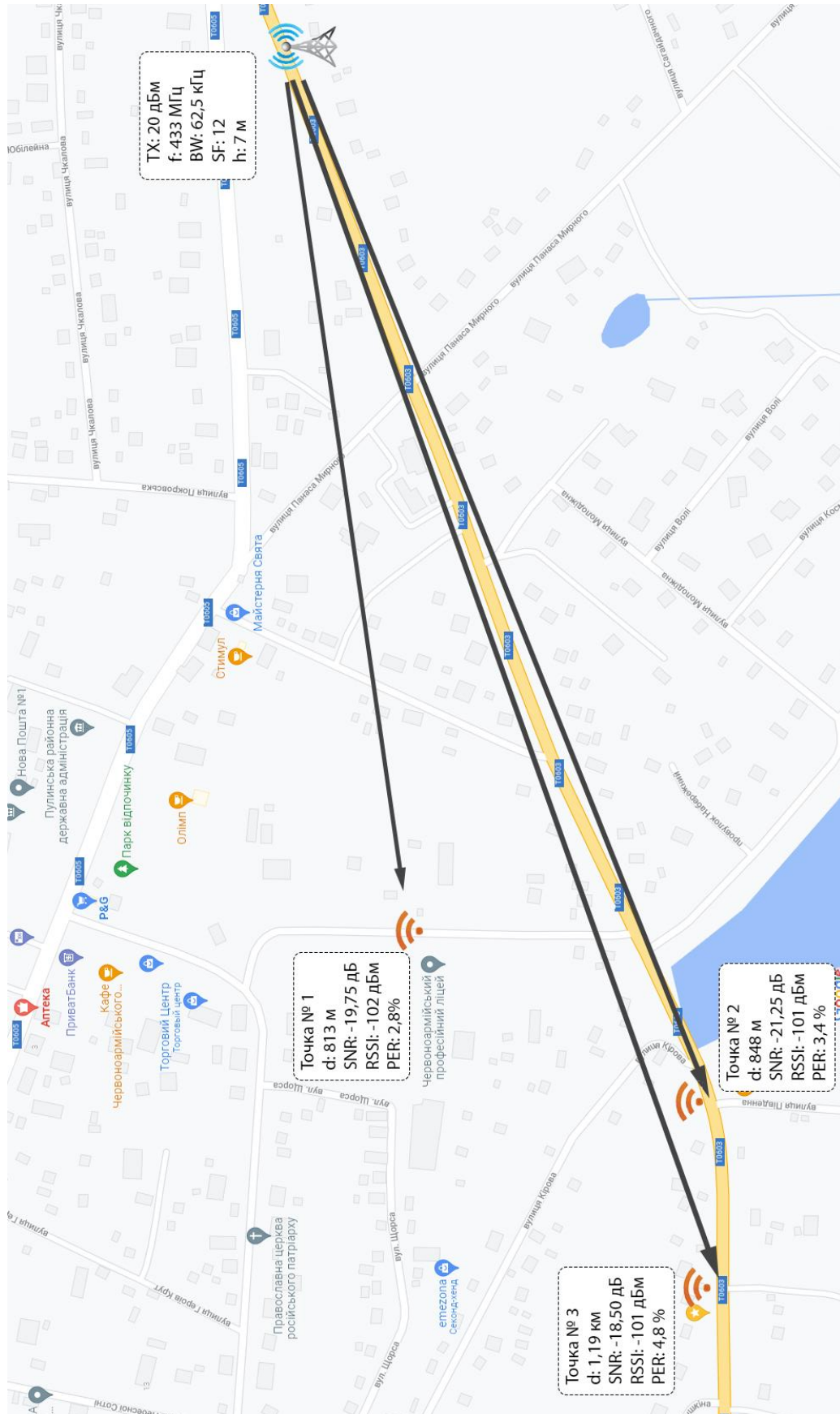


Рисунок 3.24 – Досліджувана територія смт. Пулини



Рисунок 3.30 – Досліджувана територія міста Житомир