

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

УДК 621.37:621.391

«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
моніторингу стрілецького полігону»

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

Виконавець роботи

студент 2 курсу, гр.ТРм-20-1

10.12.2021

(дата, підпис)

Меньшикова І. В.

Керівник роботи

к.т.н., доц.

10.12.2021

(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
моніторингу стрілецького полігону»

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

Меньшикова І. В..

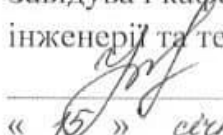
Керівник Ципоренко В. Г.

Рецензент Чухов В. В.

Житомир
2021

«Затверджено»

Завідувач кафедри біомедичної
інженерії та телекомунікацій

 Т. М. Нікітчук
« 15 » січня 2021 р.

Завдання на кваліфікаційну магістерську роботу

Меньшикова Іванна Василівна
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Дослідження системи моніторингу стрілецького полігону»
затверджено наказом по університету від «08» листопада 2021 р. № 546/с
2. Мета дослідження: дослідження основних характеристик системи моніторингу стрілецького полігону
3. Вихідні дані (характеристики об'єкта, умов дослідження та ін.):
система функціонує в умовах стрілецького полігону, що має 10-100 мішеней на відстані 50-2000 м та використовує неліцензованого діапазону частот.
4. Основні задачі дослідження: огляд науково-технічних джерел, аналіз особливостей побудови та методів прийому сигналу, дослідження швидкодії, дальність дії та завадозахищеності системи.
5. Термін подання роботи до захисту грудень 2021 р.
6. Дата видачі завдання «15» січня 2021 р.

Науковий керівник


(підпис)

Ципоренко В.Г.
(прізвище, ініціали)

Завдання прийняв
до виконання


(підпис)

Меньшикова І.В.
(прізвище, ініціали)

АНОТАЦІЯ

Темою даної кваліфікаційної роботи є дослідження системи моніторингу стрілецького полігону.

Система дозволяє відслідковувати влучання в ціль і інформувати про це користувача, підраховувати кількість пострілів, кількість влучень і промахів та відображати результати користувачеві. Під час дослідження системи було виконано аналіз побудови та функціонування системи, досліджений алгоритм приймання системи, теоретично та практично розраховано швидкодію системи, досліджено завадостійкість.

SUMMARY

The topic of the qualification work is the research of a shooting range monitoring system.

The system allows you to track hits on the target and inform the user, count the number of shots, the number of hits and misses and display the results to the user. While the system was being research, the analysis of the construction and functioning of the system was performed, the algorithm of system acceptance was investigated, the speed of the system was theoretically and practically calculated, noise immunity was investigated.

РЕФЕРАТ

Меньшикова І. В. Дослідження периферійного передавача системи моніторингу стрілецького тиру: магістерська кваліфікаційна робота.: 171 Електроніка. Житомир, Державний університет «Житомирська політехніка», 2021.

Робота складається з трьох розділів, висновків, переліку літературних джерел та посилань.

Робота містить 73 сторінки, 51 рисунок, 2 таблиці, 22 джерела літературних посилання .

В першому розділі було виконано роботу з пошуку та аналізу вітчизняних та зарубіжних літературних джерел. На основі цього було обрано стрілецький тир з можливістю дистанційного керування при використанні радіоканалу. Найкращою технологією, що поєднує швидкість передавання, собівартість, низьке енергоспоживання та відносну високу дальність передавання, є технологія LoRa.

Другий розділ описує склад та алгоритм роботи розробленої системи моніторингу стрілецького полігону. Було удосконалено існуючий алгоритм приймання сигналів. Також досліджено швидкодію та тривалість всієї сесії системи, проведено аналіз параметрів системи моніторингу та особливостей радіопокриття LoRa.

У третьому розділі було проведено дослідження завадостійкості, а також проведено дослідження макету. Було виміряно значення сигнал/шум та показника рівня прийнятого сигналу, в залежності від відстані між приймачем та передавачем та значення коефіцієнта розширення спектру.

Ключові слова: стрілецький тренажер, безпроводний протокол, швидкодія, LoRa, передавач, LoRaWAN.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ.....	7
ВСТУП.....	8
1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ДЖЕРЕЛ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ.....	10
1.1 Опис існуючих стрілецьких систем	10
1.2 Стрілковий тренажер СКАТТ	13
1.3 Лазерний стрілецький комплекс «Рубін» (Патріот)	15
1.4 Лазерні стрілецькі тренажери	18
2 ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ СТРІЛЕЦЬКОГО ПОЛІГОНУ	21
2.1 Аналіз побудови і функціонування системи моніторингу стрілецького полігону	21
2.2 Теоретичний аналіз системи	24
2.3 Аналіз параметрів системи моніторингу	27
2.4 Дослідження алгоритму приймання сигналів	37
2.5 Дослідження методів виявлення та розрізнення серії радіоімпульсів	41
2.6 Дослідження швидкодії системи радіомоніторингу.....	45
2.7 Особливості радіопокриття LoRa	51
3 ПРАКТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ СТРІЛЕЦЬКОГО ПОЛІГОНУ	55
3.1 Дослідження завадостійкості прийому системи моніторингу стрілецького полігону	55
3.2 Дослідження точності оцінки амплітуди сигналу	58
3.3 Дослідження швидкодії	60
3.4 Дослідження макету	63
ВИСНОВКИ.....	69
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	71

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

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).

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).

ВСТУП

Актуальність роботи. Важливою складовою якісної підготовки військовослужбовців Збройних Сил України є ефективне володіння стрілецькою зброєю.

Особливу увагу тактико-стрілецькій підготовці приділяють у силових структурах – для підготовки різних спеціалізованих загонів, у галузі спорту – для тренування спортсменів різного профілю, а також у розважальній індустрії.

Сучасні тенденції вимагають регулярної розробки і покращення існуючих систем. Так була розроблена система моніторингу стрілецького полігону, з використанням технології LoRa. Дана система дозволяє передавати інформацію на більші відстані, ніж існуючі системи, а також використовувати до 100 мішеней.

Поряд з перевагами системи, вплив внутрішніх та зовнішніх завад на систему з використанням протоколу LoRaWAN наразі не є достатньо вивченим. Стає очевидним, що без інформації про вплив кількості мішеней на швидкодію системи, неможливо говорити про кінцеву кількість мішеней.

Для вирішення цього питання в межах написання кваліфікаційної роботи, були проведені дослідження, які допоможуть в подальшому у впровадженні систем моніторингу стрілецького полігону з використання технології LoRa. А також в провадженні інших систем з використанням цієї технології. LoRa займе свою нішу в галузі, в якій вимагається мінімальне енергоспоживання та забезпечення безперебійного передавання даних.

Мета і завдання дослідження. *Метою* дослідження периферійного передавача системи моніторингу стрілецького полігону. Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі *завдання*:

- проаналізувати структуру існуючих вітчизняних та закордонних стрілецьких тирів та систем стрілецького полігону;
- дослідити процес передачі даних з периферійного передавача.
- дослідити завадостійкість системи;

- дослідити швидкодію системи.

Об’єкт дослідження - безпроводна телекомунікаційна технологія LoRa.

Предмет дослідження – система моніторингу стрілецького полігону.

Практичним результатом роботи є те, що отримано відомості та здобуто знання про вплив внутрішніх шумів системи моніторингу стрілецького полігону на саму ж систему, а також досліджено вплив збільшення відстані та кількості мішеней на швидкість передавання. Отримані дані можна використовувати під час розгортання системи моніторингу стрілецького полігону, а також під час розроблення або впровадження аналогічних систем, використовуючи технологію LoRa.

1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ДЖЕРЕЛ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

1.1 Опис існуючих стрілецьких систем

Для вирішення існуючих протиріч доцільно застосовувати навчально-тренувальні комплекси, що використовують в своїй основі пристосування і тренажери для навчальної та імітаційної стрільби без використання штатних боєприпасів. Вони призначені для навчання і тренування в стрільбі зі штатної стрілецької зброї, ручних протитанкових гранатометів, а також в метанні ручних осколкових гранат. До них відносяться: оптико-електронний тренажер ОЕТ, пристосування для навчальної стрільби з ручних протитанкових гранатометів ПУС-7М, ПУС-9, ПУС-18, навчально-імітаційні ручні гранати.

Навчально-тренувальні комплекси мають ряд істотних переваг, основними з яких є:

- суттєве полегшення засвоєння правил стрільби і техніки здійснення пострілу;
- можливість негайної об'єктивної оцінки якості виконання прийомів стрільби, своєчасна фіксації допущених помилок і їх усунення;
- можливість створювати для учнів різноманітну обстановку сучасного бою, максимально наближаючи її до реальних умов, включаючи розробку індивідуальних вправ для кожного учня;
- продуктивне використання навчального часу за рахунок скорочення переїздів на полігони і стрільбища.

Основною перевагою стаціонарних тирів та полігонів є об'єктивна можливість набуття навичок володіння реальною стрілецькою зброєю [1, 2]. Вміле володіння особистою зброєю досягається тільки за допомогою ефективного навчання стрільбі в ході навчальних занять і додаткових тренувань під час самостійної роботи, проведення яких вимагає спеціально обладнаних приміщень (стрілецьких тирів) і значної витрати дорогих боєприпасів. У такій ситуації доцільно і вигідно застосовувати стрілецькі тренажери, які набувають все більшого поширення.

Найбільш виправданим застосування стрілецьких тренажерів представляється на початковому етапі навчання, під час якого навчаються засвоюють основні правила поводження зі зброєю. Досвід використання стрілецьких тренажерів показує, що тренувалися з їх застосуванням навчаються досягали практично тих же результатів, що і навчаються, що використали для тренувань особисту зброю з бойовими патронами.

Основним завданням, яке вирішують розробники стрілецьких тренажерів є досягнення якомога вищого рівня наближення умов тренування до реальних умов.

Коротка класифікація стрілецьких тренажерів

Все різноманіття сучасних моделей стрілецьких тренажерів можна розділити на дві основні групи :

- стрілецькі тренажери виду «стрілець-мішень»,
- стрілецькі тренажери виду «стрілець-стрілець».

Стрілецькі тренажери «стрілець-стрілець» істотно відрізняються від тренажерів виду «стрілець-мішень». Тут стрілок імітує вогонь не по мішені, а по такому ж стрілку. Обидва стрілка відповідним чином екіпіровані: на зброю встановлені випромінювачі, а спорядження забезпечено фотоприймачами і індикаторами поразки.

В якості основного ознаки, за яким здійснюється класифікація тренажерів виду «стрілець- мішень», вважається їх здатність визначати точку попадання в мішень. В умовах звичайного тренування з використанням реальних боєприпасів єдиною можливою і доступною інформацією про якість дій стрілка (його наготові, хваті зброї, обробці спуску курка і т. д.) Є розташування пробієни в мішені. Вся інша отримана інформація є суб'єктивною і її правильна оцінка залежить від психофізіологічних характеристик стрілка і його практичного досвіду.

Тренажери виду «стрілець-мішень» можна розділити на три основні групи:

- тренажери, які не встановлюють точку попадання в мішень;
- тренажери, умовно визначають точку попадання в мішень;

- тренажери, що визначають точку попадання в мішень.

Зброя при цьому забезпечена лазерним або оптико-електронним випромінювачем. Випромінювач за допомогою спеціальних перехідників (каліброваних вставок) монтується в стовбурі зброї. Можливий варіант установки випромінювача із застосуванням універсального кронштейна під стволом зброї. При попаданні в мішень фотоприймач уловлює випромінювання і мішень вважається ураженою. Індикація попадання в мішень в таких тренажерах відображається світловим (світлодіодний індикатор) або звуковим сигналом. У деяких моделях тренажерів може проводитися підрахунок загальної кількості влучень в мішень і встановлюватися обмеження часу на стрільбу. До їх переваг слід віднести невисоку вартість, простоту конструкції і можливість роботи при відсутності напруги живлення. Основний недолік - низька інформативність (відсутність вказівки реальної точки попадання).

Тренажери «потрапив - не потрапив» найдоцільніше використовувати при тренуванні в бойовою стрільбою. При цьому вельми ефективним засобом навчання слід вважати бойову стрільбу по декільком мішенях, встановленим на повертаються або рухомі підстави.

Тренажери, умовно визначають точку попадання в мішень, дають стрілку лише приблизну інформацію про точку попадання. Ці тренажери є як би перехідною моделлю від стрілецьких тренажерів «потрапив - не потрапив» до тренажерів, що дозволяє визначати точку попадання в мішень. Пояснимо, в чому ж полягає умовність визначення точки попадання в мішень.

Індикація точки попадання здійснюється наступним чином: при попаданні імпульсу лазерного випромінювання в електронну мішень на її табло з'являється результат попадання (наприклад, «вісімка») та вказується напрямок відхилення від центру мішені. Таким чином, дана форма представлення результатів стрільби не дає стрілку візуальної інформації про точне місце попаданні «кулі» в мішень. Він отримує лише приблизну інформацію про точку попадання в мішень [3].

Як правило, електронні стрілкові тренажери це імітатори зброї або випромінююча насадка, яка встановлюється на бойовий зразок, плюс приймач

імпульсу і комп'ютер, за допомогою якого обробляється результат. Однак якщо зброя (або його макет) пов'язано з'єднувальним кабелем з персональним комп'ютером, то це виключає можливість проведення тренувань зі стрільбиною з різних положень, з перебіжками, з витяганням, наприклад, пістолета з кобури або переведенням зброї з похідного положення в бойове. З цієї причини в даний час найбільш перспективними вважаються стрілецькі тренажери, в яких зброя не має ніяких сполучних кабелів. Випромінювач при цьому розміщений в стовбурі, а електронна схема, і елементи живлення, найчастіше - всередині магазину. Така схема дає стрілку повну свободу пересування на вогневому рубежі, не змінює габаритні і вагові характеристики зброї.

Електронні стрілецькі тренажери дозволяють об'єктивно оцінювати стійкість зброї, яка з об'єкта пильного спостереження стрілка і його суб'єктивних оцінок перетворюється в реальний предмет для вдосконалення [4].

1.2 Стрілковий тренажер СКАТТ

Для роботи з тренажером, стрілок закріплює на зброю датчик який постійно, з високою точністю стежить за переміщеннями зброї щодо мішені. Інформація від датчика надходить в комп'ютер де перетворюється програмою Скатт і відображається у вигляді траєкторії переміщення точки прицілювання на тлі мішені. Момент пострілу фіксується на екрані у вигляді пробоїни.

Вся інформація про прицілюванні і координати пробоїни зберігаються в пам'яті комп'ютера для подальшого аналізу.

Таким чином, виникає ефект зворотного зв'язку, коли стрілок може виявити свої помилки, допущені під час прицілювання і в момент пострілу [4].

Область застосування даного тренажера не обмежується тільки заняттями по ПВП (початковій військовій підготовці). Електронний тир придатний також і для стрілецьких клубів, причому як для початківців, так і досвідчених стрільців, а також для навчання і тренувань кадетів, курсантів, військовослужбовців і співробітників силових структур, при проведенні змагань з військово-прикладних видів спорту і т. Д.

Конструктивно тренажер складається з сенсора, що кріпиться на зброю, персонального комп'ютера, з'єднувального кабелю і мішені. Сенсор СКАТТ МХ ПВП - «серце» тренажера, яка провадить «електронний постріл» - може встановлюватися на самих різних моделях зброї або на його макетах, найрізноманітнішими способами (на ложе, під стовбуром, вставляючи в стовбур, в імітатор ПБС або надульного пристрої). Він підключається 3-х метровим USB-кабелем до будь-якого сучасного персонального комп'ютера, що працює під управлінням Windows, MAC OS або Linux і на який встановлено відповідне програмне забезпечення.

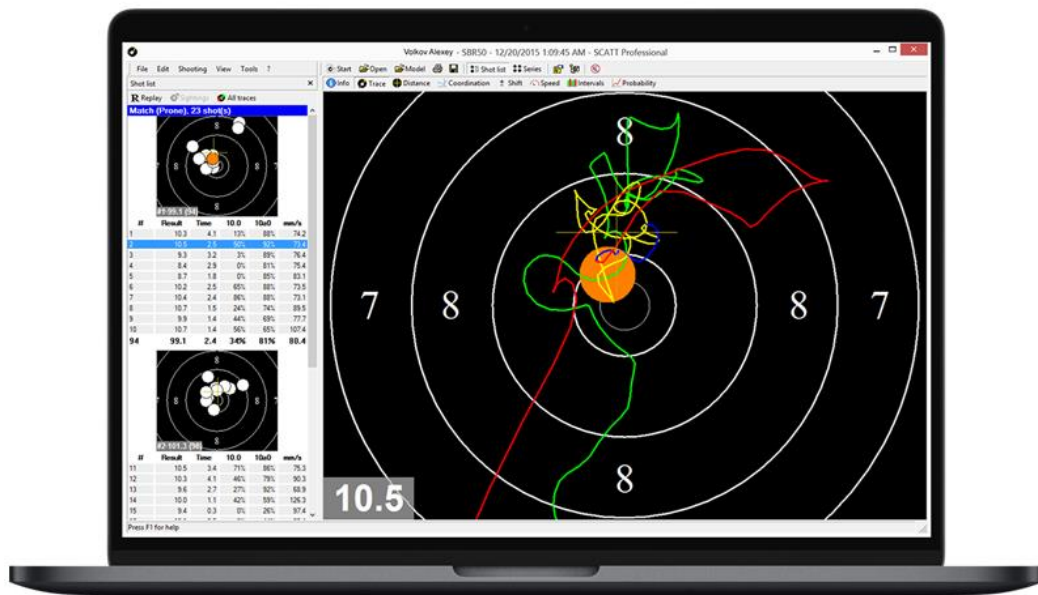


Рисунок 1.1 – Вікно програми

Говорячи про програму для тренажера СКАТТ ПВП варто сказати про всі її можливості: сучасна комп'ютерна техніка дозволяє повністю автоматизувати процес оцінки, підрахунку, обробки результатів, реєстрацію учасників, друк протоколів і мішеней і багато іншого. Важливо: програмне забезпечення дає можливість не тільки фіксувати результати стрільби, але і спостерігати віртуальну траєкторію прицілювання. До пострілу вона підфарбовується зеленим (за секунду до пострілу) і жовтим (останню секунду перед пострілом) кольором, а після пострілу виділяється червоним кольором.

Таким чином, СКАТТ ПВП стає підмогою для навчання і тренувань, виявляючи типові помилки учнів, пов'язані з «смикання» спуску, затримкою дихання, неправильної приготуванням тощо. Позитивна сторона тиру - його універсальність: СКАТТ ПВП може працювати як в приміщенні, так і на відкритому повітрі, як на стандартних (5 або 10 м), так і довільних дистанціях, за рахунок масштабування мішеней при виведенні на друк.

Корисним є і додаткове обладнання, що поставляється виробником і розширює можливості СКАТТ ПВП. Крім різних засобів кріплення сенсора, мішеней і ламп для їх підсвічування, є рішення з доопрацювання зброї і макетів, розроблені фірмою для підвищення ефективності тренажера. Зокрема, розробники електронного тиру оснастили серійну гвинтівку МР-512с спеціальним механізмом, який дає можливість зводити УСМ і проводити холостий спуск без «переломлення» зброї, що вимагає зміни напоготові і додатки значного зусилля для зведення пружини поршня.

При цьому гвинтівка не втрачає можливість стрільби кулями і може бути за 5 хвилин перероблена для звичайного режиму стрільби. Подібним за призначенням пристроєм може оснащуватися і макет автомата АК-74: встановлене в пістолетної рукоятки пристосування робить непотрібним пересмикування затвора після кожного спуску, необхідне для зведення УСМ (ударно-спускового механізму). Замість реального спуску виконується лише його імітація. Це зберігає ресурс макета і економить час на тренуваннях і змаганнях [5,7].

1.3 Лазерний стрілецький комплекс «Рубін» (Патріот)

На сьогоднішній день існує кілька різновидів лазерних тирів, але всі вони працюють за однією схемою.

Як екран для лазерного тиру може бути використана рівна біла поверхня (наприклад: вінілова (банерна) тканина, гіпсокартон, пофарбований у білий колір, ну і безпосередньо спеціалізований екран для проектора). Проектор і камера-уловлювач встановлюються навпроти екрану на підставці, або кріпляться

до стелі за допомогою спеціально кріплення. Комп'ютер через проектор виводить на проекційний екран тренувальні вправи (або інтерактивні ігри). Стрілок з лазерної зброї веде стрілянину по спроектованій мішеневій обстановці, або бере участь в інтерактивних іграх [8]

За допомогою проектора на великому екрані розгортається ігровий відеосюжет. Гравець стріляє зі зброї, оснащеної лазерним випромінювачем) по рухомих на екрані мішенях. У момент пострілу фотоприймальний пристрій, підключений до комп'ютера, зчитує лазерну пляму на екрані і визначає його координати[6].

У момент пострілу, в точці прицілювання лазер проектує червону крапку, яку фіксує камера-уловлювач і передає отримані координати в комп'ютер. Виходячи з цих даних, керуюча програма розраховує положення точки і робить постріл в необхідних координатах. Залежно від точності прицілювання стрілець в реальному часі може бачити результат свого пострілу (отвори в мішенях, або зміна ходу інтерактивного сюжету). Підключена до комп'ютера акустична система відтворює звуки пострілу.

Лазерний електронний тир Рубін - Патріот призначений для використання на заняттях з початкової військової підготовки (НВП, ОБЖ), а також для проведення контрольних стрільб і змагань в загальноосвітніх установах, школах, кадетських корпусах, суворовських училищах, військово-патріотичних організаціях. Для лазерних стрільб по паперових мішенях для виконання нормативів зі стрільби.

Призначення:

- Навчання початкової стрілецької підготовки (відпрацювання правильної стійки, дихання, утримання зброї, прицілювання, плавного спуску курка з бойового взводу);
- Вивчення умов і порядку виконання вправ;
- Проведення початкових, навчальних, контрольних стрільб і змагань;

- Вивчення матеріальної частини зброї (основні частини, робота частин і механізмів пістолета Макарова та автомата Калашникова);
- Вивчення заходів безпеки при поводженні зі зброєю;
- Імітація дальності стрільби до 25 метрів для пістолета та до 50 метрів для автомата;
- Одночасно можуть тренуватися до 10-ти стрільців;

Переваги:

- Повна травмобезпека - використовується лазерне бездротова зброя;
- Лазерна зброя виробів Лазер Класу 1 (лазерні вироби безпечні при експлуатації);
- Автоматичний пошук, визначення меж і масштабу всіх мішеней;
- Автоматичне регулювання параметрів і режимів роботи лазерної камери;
- Похибка визначення координат «лазерної» точки на мішені не більше 0,25 мм;
- Використання бездротових технологій дозволяє проводити навчання з різних положень з місця і в русі [9].

Принцип дії

Комплекс розміщується в звичайному навчальному класі. Імітаційна стрільба ведеться по стандартним мішеням макетів зброї, оснащених лазерним випромінювачем. Також система дозволяє використовувати при стрільбі видиме і невидиме лазерне випромінювання. Є можливість використання власного мультимедійного обладнання.

В момент вистрілу лазерна камера визначає координати лазерної точки і передає їх в комп'ютер, є автоматична калібрування мішені. Одночасно на екран виводяться зображення мішеней з пробоїнами від пострілів. Вбудована акустична система створює реальний звуковий супровід. Результати стрільби вважаються автоматичними і зберігаються в протоколі, можуть бути роздруковані на принтері [9].

Комплектація даного стрілецького комплексу зображена на рисунку 2 [10].



Рисунок 1.2 – Комплектація стрілецького комплексу

1.4 Лазерні стрілецькі тренажери

Стрілецький лазерний тренажер з відображенням траєкторії точки прицілювання містить навчальну зброю з автономним електричним живленням та спусковим механізмом, який споряджений контактом, що замикає електричне коло при натисканні на спусковий гачок, лазерний випромінювач, встановлений в дуло зброї, проекційний екран, встановлений навпроти екрана чотирьохканальний оптико-електронний приймач, що містить дві пари смугових діафрагм, фоконів і фотоприймачів, розташованих під кутом 90° один до

одного, а також підсилювачі фотоструму, аналого-цифрові перетворювачі, обчислювач з акустичною системою, пристрій відображення результатів пострілу (монітор). Додатково введені модулятор, який змінює інтенсивність лазерного випромінювання, перемикач режимів та чотири вузькосмугові фільтри. Перший вхід модулятора з'єднаний з спусковим механізмом навчальної зброї, другий його вхід з'єднаний з виходом перемикача режимів, а вихід модулятора з'єднаний з входом лазерного випромінювача. При цьому виходи фотоприймачів, що входять до складу чотириканального оптико-електронного приймача, з'єднані з входами вузькосмугових фільтрів, виходи яких з'єднані з входами підсилювачів фотоструму [11, 12].

Удосконалений лазерний стрілецький тренажер містить навчальну зброю із спусковим механізмом, спорядженим контактом, що замикає електричне коло при натисканні на спусковий гачок, лазерний випромінювач, установлений на зброї, екран тренажера, на якому лазерним випромінювачем формують світлову пляму, розміщений позаду екрана оптично зв'язаний з екраном приймальний фотодіод, формувач відеоімпульсів, вхід якого підключений до виходу фотодіода, лічильник кількості влучень, вхід якого підключений до виходу формувача відеоімпульсів, послідовно підключений до виходу лічильника цифровий індикатор кількості влучень, блок керування, перший вихід якого підключений до другого входу лічильника кількості імпульсів, а другий вихід до входу сигнального світлодіода. Перед екраном встановлений оптичний фільтр з кільцями різної прозорості, послідовно з другим виходом формувача імпульсів введений вимірювач амплітуд, другий вхід якого підключений до виходу блока керування, до виходу вимірювач амплітуд паралельно підключені другий цифровий індикатор і суматор результатів стрільби за сеанс, до виходу суматора результатів підключений третій цифровий індикатор [13].

Висновки:

В цьому розділі виконано аналіз існуючих систем стрілецьких тренажерів. Розглянуто існуючі варіанти таких систем як Wi-Fi тири та лазерні

тренажери. Показана перспективність створення нової системи стрілецького полігону. Беззаперечним плюсом таких систем є мобільність та висока швидкодія

2 ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ СТРІЛЕЦЬКОГО ПОЛІГОНУ

2.1 Аналіз побудови і функціонування системи моніторингу стрілецького полігону

Для дослідження буде використана система моніторингу стрілецького полігону, розроблена Меньшиковою І. В., під час написання кваліфікаційної роботи бакалавра в 2020 році, структурна схема якої представлена на рисунку 2.1. Спроектвана система моніторингу стрілецького полігону реагує на влучення та підраховує їхню кількість. Ця система орієнтована на загальноосвітні заклади, заклади вищої освіти, військові училища та інститути. Для контролю влучень в системі наявний лише один датчик, а саме – датчик вібрації, який надсилатиме інформацію про влучення.

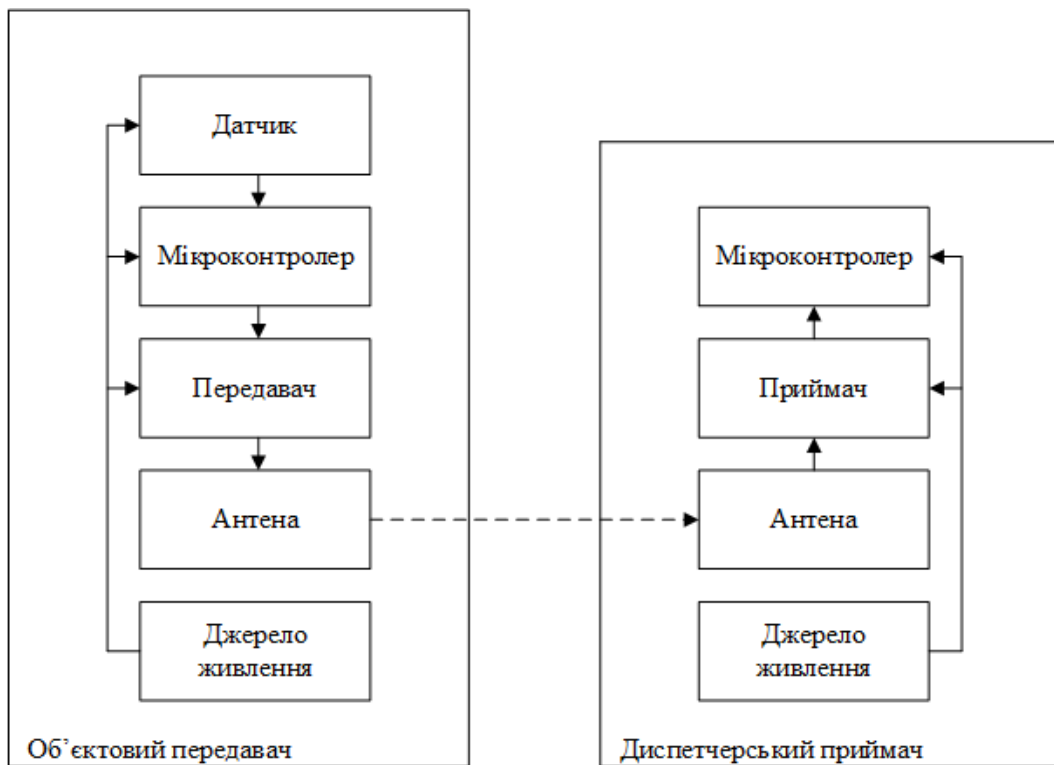


Рисунок 2.1 – Структурна схема системи моніторингу стрілецького полігону

Найголовнішими елементами систем моніторингу є датчики. В системі моніторингу стрілецького полігону використовується датчик вібрації. Він встановлюється на мішень, коли відбувається влучення, виникають вібрації, для найкращої їх передачі, матеріал з якого виготовлено мішені – метал. При влученні, вона опускатиметься, що дасть змогу стрільцеві зі значних відстаней бачити інформацію стосовно влучення. Датчик уловлює вібрації, які виникатимуть на поверхні мішені, і надсилає сповіщення про влучення на мікроконтролер. В свою чергу, він надсилає сигнал на приймач.

Складається система із приймача, передавача, мішеней та стрілецької зброї. Всього в системі 10 цілей, біля кожної розміщений передавач. До периферійного передавача підключається датчик вібрації для підрахунку влучень. Приймач оснащений цифровим екраном і невеликою кількістю клавіш. Перед кожною спробою стрільцеві необхідно натиснути клавішу активації, яка оновлює лічильник пострілів до нуля, якщо він був не пустим і запускає новий.

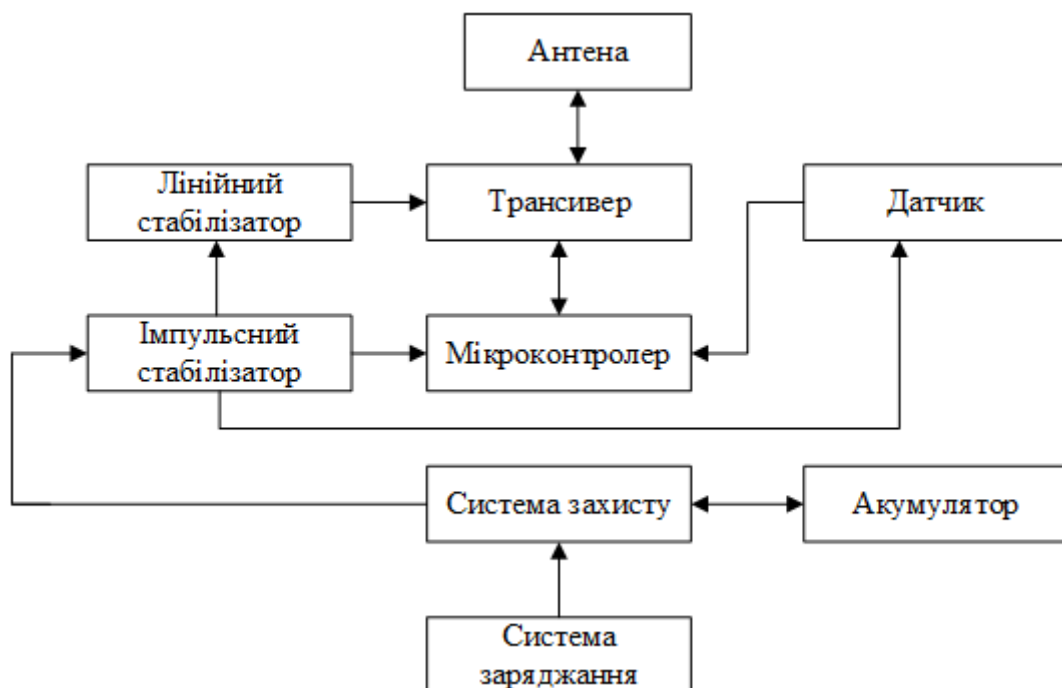


Рисунок 2.2 – Структурна схема периферійного передавача системи моніторингу стрілецького полігону

Для реалізації алгоритму, зображеного на рисунку 2.2 використовується трансивер. Для керування ним необхідно використовувати мікроконтролер. Для забезпечення переносного режиму передавача необхідно використовувати живлення від акумулятора. Датчик підключається до мікроконтролера, а вже від датчика надсилається сигнал про влучення.

Трансивери SX1276 / 77/78/79 оснащені модемом великого діапазону LoRaTM, який забезпечує широкий спектр зв'язку, мінімізуючи при цьому споживання струму.

На рисунку 2.3 розміщена структурна схема мікросхеми SX1278, на якій наочно видно, що вона є трансивером. Даний трансивер вже є вбудованим в готовий модуль «RA-02» з усіма необхідними елементами для правильного функціонування. Дана мікросхема використовує напівдуплексний зв'язок.

Використовуючи запатентовану технологію модуляції LoRaTM від Semtech SX1276 / 77/78/79, можна досягти чутливості понад -148 дБм, також він оптимальний для будь-яких застосувань, що вимагають дальності або міцності. LoRaTM надає значні переваги як у блокуванні, так і у вибірковості порівняно із звичайними методами модуляції, вирішуючи традиційний компромісний дизайн між діапазоном, захищеністю від перешкод та споживанням енергії [14].

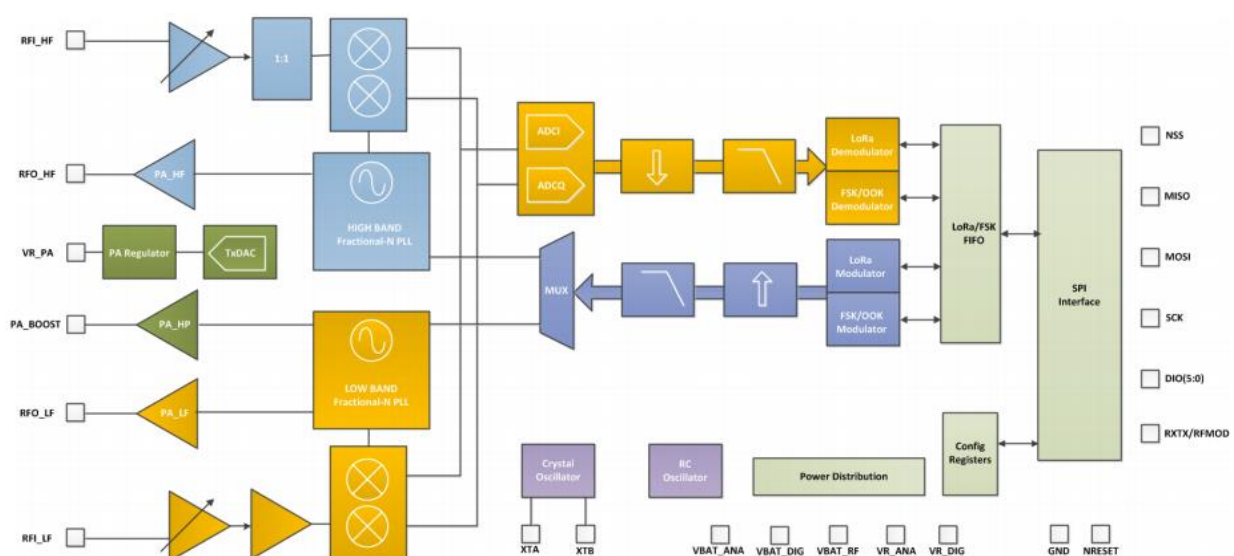


Рисунок 2.3 – Структурна схема трансивера SX1278

В результаті проведених робіт, була розроблена наступна схема, зображена на рисунку 2.4. Варто зауважити, що для обраної нами технології, кінцева кількість приймачів не є принциповою, і може бути рівною 10, 20 чи навіть 100.

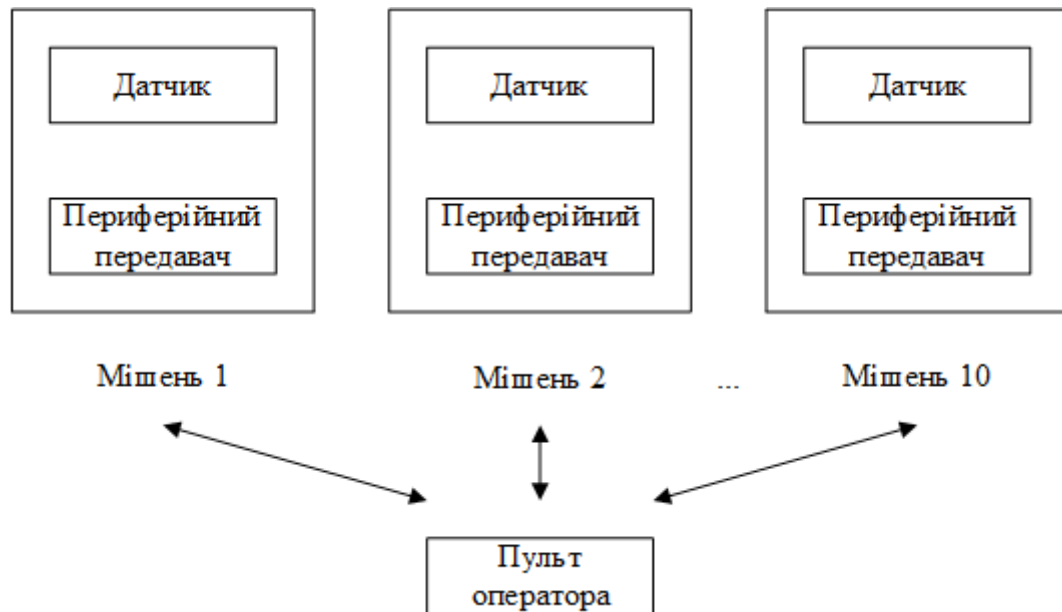


Рисунок 2.4 - Схема зв'язку елементів системи на стрілецькому полігоні

2.2 Теоретичний аналіз системи

Топологія LoRaWAN

LoRaWAN заснований на топології зірки. В цьому відношенні можна сказати, що він підтримує зірку топології зірок. Модель LoRaWAN може використовуватися не як одна модель з хабом, а як кілька хабів. Вузол може бути пов'язаний з декількома шлюзами.

Мережева служба має правила і логіку для обслуговування необхідних верхніх рівнів мережевого стека. Побічним ефектом цієї архітектури є те, що передача обслуговування від одного шлюзу до іншого не потрібна. Якщо вузол мобільний і переміщається від антени до антени, мережеві служби будуть захоплювати кілька ідентичних пакетів з різних шляхів. Ці хмарні мережеві служби дозволяють системам LoRaWAN вибирати кращий маршрут і

джерело інформації, коли кінцевий вузол пов'язаний з декількома шлюзами.

Обов'язки мережевих служб включають:

- ідентифікацію і видалення повторного пакету;
- послуги безпеки;
- маршрутизацію;
- повідомлення про підтвердження.

Крім того, LPWAN-системи, такі як LoRaWAN, матимуть на 5-10 менше базових станцій для аналогічного покриття мережі 4G. Всі базові станції прослуховують один і той же набір частот, тому вони логічно є однією дуже великою базовою станцією. Це, звичайно ж, підтверджує твердження про те, що системи LPWAN можуть мати більш низьку вартість, ніж традиційна мережа.

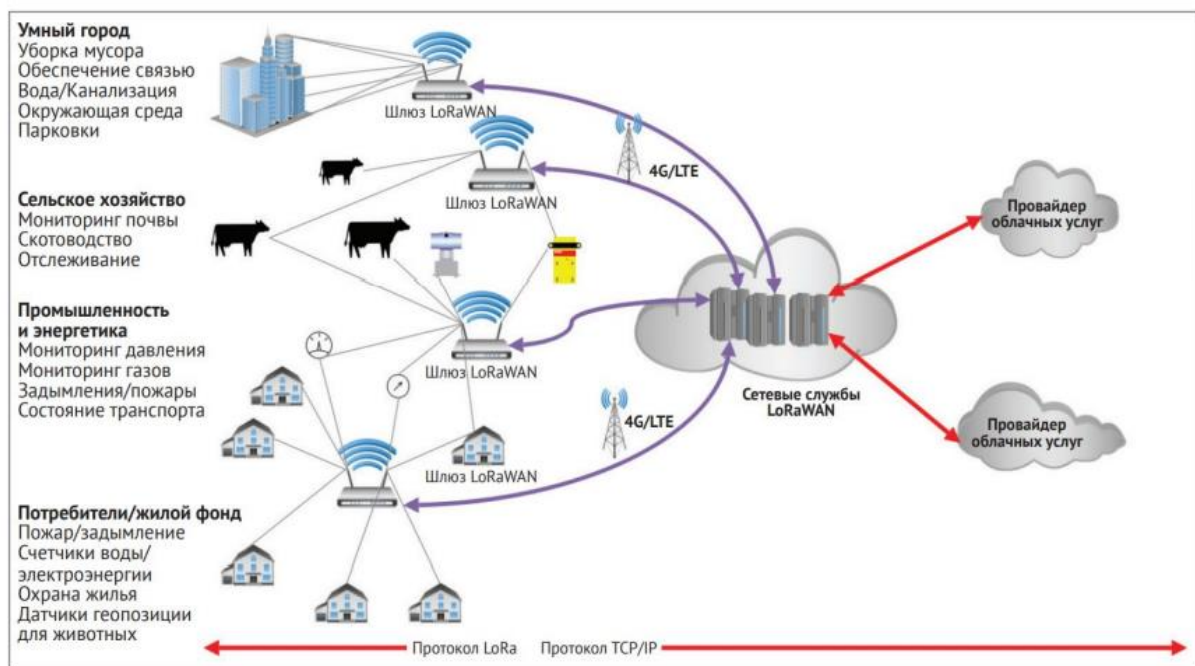


Рисунок 2.1 - Мережева топологія LoRaWAN

LoRaWAN побудований на топології зірки (рис. 2.1) зі шлюзами, діючими в якості концентраторів, а також агентами зв'язку в порівнянні з традиційними IP мережами для адміністрування LoRaWAN в хмарі. Кілька вузлів можуть зв'язуватися з декількома шлюзами LoRaWAN [15].

Переваги та недоліки технології LoRa

Нижче наведені переваги LoRaWAN:

- Однією з головних переваг використання модуляції, коли частота змінюється з часом, є зменшення і майже усунення перешкод, спричинених відлунням та доплерівським зсувом;
- не вимагає синхронізації, яка існує в інших методах модуляції. Таким чином, низька затримка з'єднання з меншим "часом ефіру", отже, триваліший час автономної роботи;
- варіативна пропускна здатність, можна вибрати меншу відстань, вищу пропускну здатність або більшу відстань, меншу пропускну здатність; – крім того, LoRa має методи адаптивної швидкості передачі даних, які можуть змінювати швидкість передачі даних у межах вибраної смуги пропускання, наприклад, використовуючи смугу пропускання 125 кГц, ви можете вибрати від 300 біт/с до 27 кбіт/с.;
- можна налаштувати коефіцієнт розширення спектру, що надає подальший контроль над вихідною потужністю передавача; – Оскільки LoRa заснована на модуляції FSK, використовувані підсилювачі потужності набагато дешевші та ефективніші, ніж інші методи модуляції;
- LoRa має набагато кращий "бюджет зв'язку", ніж інші дешеві радіочастотні комунікації. Link Budget - це складний розрахунок ефективності від передавача до приймача;
- низька вартість розгортання;

Серед недоліків технології можна виділити такі:

- швидкість передачі даних - не очікуйте, що LoRa зможе передавати відеопотоки високої якості на відстані 10 км. Максимальна швидкість передачі даних, яку ви побачите, становить 50 кбіт/с;
- затримка - незважаючи на те, що це модуляція з низькою затримкою, вона недостатньо низька для програм, які вимагають дуже чуйного спілкування в режимі реального часу [15, 16].

2.3 Аналіз параметрів системи моніторингу

Пропускна здатність (BW). Змінюючи діапазон частот (пропускну здатність), по якому розповсюджується чіп LoRa, можна обмінювати радіоефірний час з радіочутливістю, таким чином, ефективність використання енергії залежить від діапазону зв'язку та надійності. Чим більша пропускна здатність, тим коротший ефірний час і нижча чутливість. Менша пропускна здатність також вимагає більшої чистоти, щоб мінімізувати проблеми, пов'язані з «дрейфом годинника». Задано смугу пропускання BW, як правило, в діапазоні 125...500 кГц, швидкість обчислення LoRa RC (chip-rate) обчислюється як:

$$R_c = BW \frac{\text{чіп}}{с}. \quad (2.1)$$

Фактор розповсюдження (SF). Для передачі інформації LoRa «розподіляє» кожен символ на декілька мікросхем (коефіцієнт розповсюдження), щоб ще більше підвищити чутливість приймача. Коефіцієнт розповсюдження LoRa SF може бути обраний між 6 і 12, в результаті чого швидкість розповсюдження коливається від 2^6 до 2^{12} чіпи/символ, а швидкість передачі символів RS обчислюється як:

$$R_s = \frac{R_c}{2^{SF}} = \frac{BW}{2^{SF}} \frac{\text{символ}}{с}, \quad (2.1)$$

що призводить до модуляції швидкості бітової передачі, яка може бути виражена як:

$$R_M = SF \cdot R_s = SF \cdot \frac{BW}{2^{SF}} \frac{\text{біт}}{с}, \quad (2.2)$$

Звернемо увагу, що в LoRa пакети, передані з різними факторами розповсюдження, є ортогональними між собою і не викликають зіткнень, якщо передаються одночасно.

Швидкість кодування (CR). Щоб підвищити стійкість до пошкоджених бітів, LoRa підтримує методи виправлення помилок вперед із змінним числом CR

надлишкових бітів, що варіюється від 1 до 4. Отримана швидкість передачі даних BR LoRa стає:

$$BR = R_M \cdot \frac{4}{4 + CR} = SF \cdot \frac{BW}{2^{SF}} \cdot \frac{4}{4 + CR} \frac{\text{біт}}{\text{с}}. \quad (2.3)$$

Чим більше сплесків перешкод очікується, тим вища швидкість кодування, яку слід використовувати для максимізації ймовірності успішного прийому пакетів. Зауважте, що радіостанції LoRa з різними швидкостями кодування все ще можуть обмінюватися даними, оскільки заголовок пакета (переданий з використанням максимальної швидкості кодування 4/8) може включати швидкість кодування, що використовується для корисного навантаження.

Потужність передачі (TP). Як і більшість бездротових радіостанцій, приймачі LoRa також дозволяють регулювати потужність передачі, різко змінюючи енергію, необхідну для передачі пакета. Наприклад, перемикаючи потужність передачі з -4 на +20 дБм, споживання енергії збільшується з 66 мВт до 396 мВт при використанні трансивера RFM95 (HopeRF, Шеньчжень, Китай) [16]. Зауважте також, що для потужностей передачі, що перевищують +17 дБм, апаратні обмеження та законодавчі норми обмежують робочий цикл радіо максимум до 1%.

Носійна частота (CF). Приймачі LoRa використовують для зв'язку частоти під ГГц: серед інших, промислові, наукові та медичні (ISM) діапазони 433 МГц, 868 МГц (Європа) та 915 МГц (Північна Америка). Загальні модулі LoRa, такі як Semtech SX1272 [17] та HopeRF RFM95 [18], підтримують зв'язок у діапазоні частот 860–1020 МГц і програмується з кроком 61 Гц. Десять каналів з різною пропускною здатністю можуть бути використані для зв'язку за допомогою LoRa в європейському діапазоні ISM 868 МГц.

На Рис. 2.2 наведено вигляд ЛЧМ сигналу у часовій області, а на Рис. 2.3 і Рис. 2.4 показаний його спектр при $BW = 125\text{кГц}$ і базою рівній 128 ($SF = 7$) і 4096 ($SF = 12$) відповідно

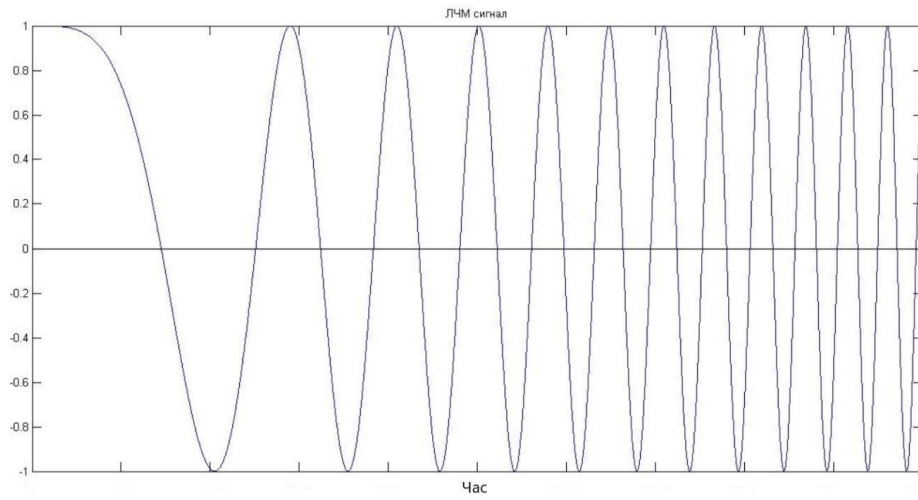


Рисунок 2.2 – ЛЧМ сигналу у часовій області

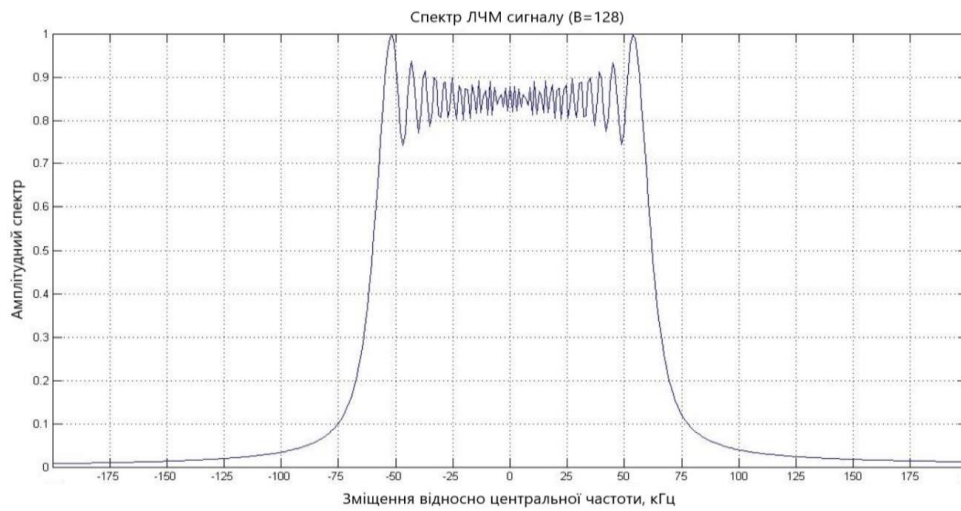


Рисунок 2.3 – Спектр ЛЧМ сигналу при $BW=128\text{кГц}$ і базою 128 ($SF=7$)

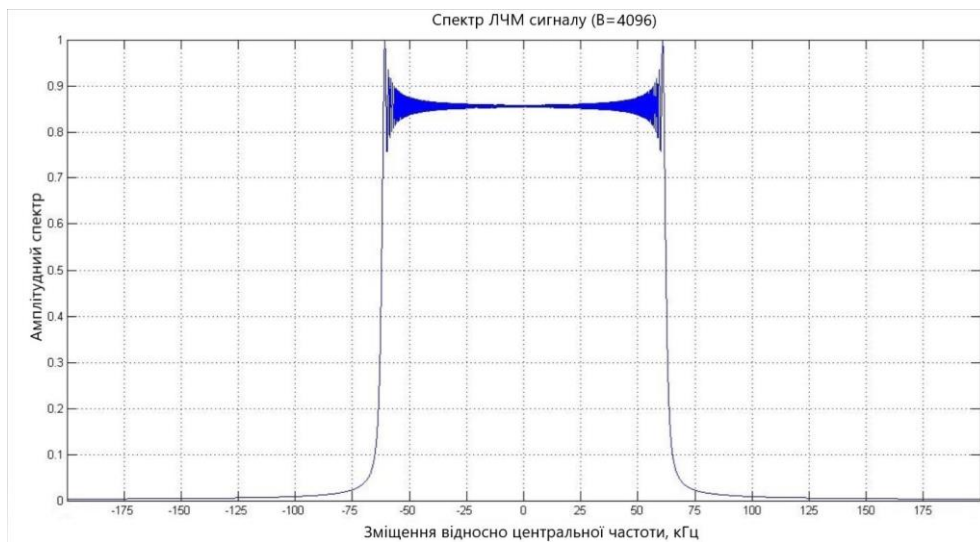


Рисунок 2.4 – Спектр ЛЧМ сигналу при $BW=128\text{кГц}$ і базою 4096 ($SF=12$)

Передавачі LoRa формують CSS радіосигнали з шириною спектра (BW) 125, 250 або 500 кГц. При фіксованій ширині спектра радіосигналу BW зміна його бази здійснюється за рахунок зміни тривалості T_S і швидкості зміни частоти (Рис. 2.5) [17].

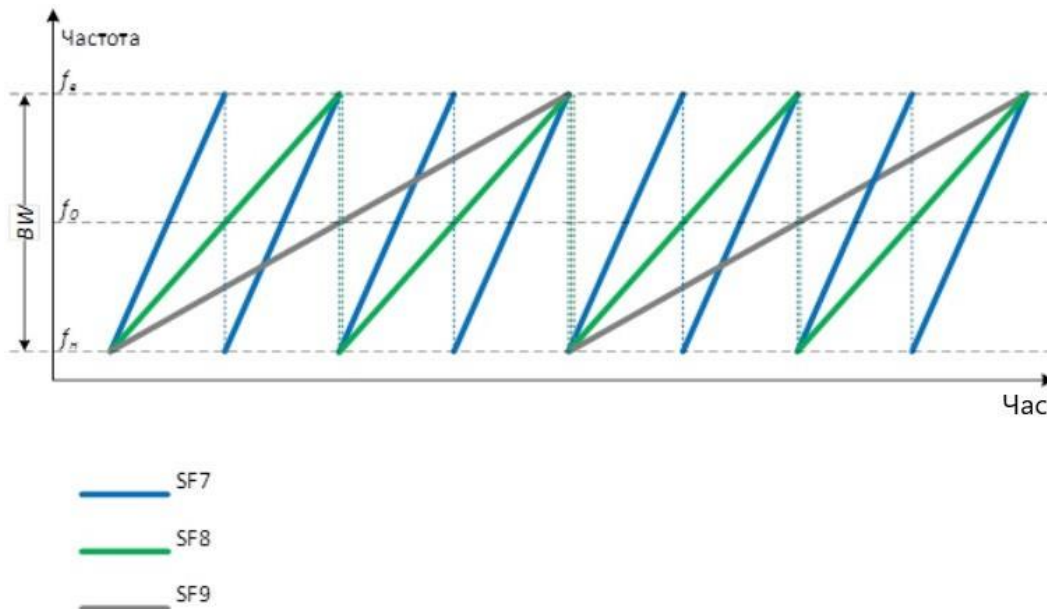


Рисунок 2.5 – Зміна бази при фіксованій ширині спектра

Для успішного функціонування будь-якої системи обміну інформацією необхідна взаємна синхронізація приймача і передавача, що дозволяє визначити часові межі прийому-передачі як цілого блоку даних (або кадру), так і одиничних символів.

Технологія LoRa використовує асинхронний режим прийому-передачі при якому передавач може почати генерацію радіосигналу в будь-який момент часу. В цьому випадку потрібен механізм, що забезпечує синхронізацію приймача по сигналу від передавача (аналог "старт-біта" протоколу RS232). В якості такого механізму використовується преамбула, що передує кожному сеансу зв'язку. Преамбула включає в себе послідовність символів, що дозволяють приймачу виявити активність передавача, визначити використовуваний передавачем коефіцієнт розширення спектра (SF) і виконати символну синхронізацію. Тривалість преамбули є конфігурується величиною і повинна бути не менше, ніж

$TT1 + 2 \cdot TT2$, де $TT1$ визначає максимальний час знаходження приймача в стані "сну" (Sleep), $TT2$ - визначає час пошуку приймачем преамбули.

Механізм функціонування детектора преамбули заснований на використанні узгодженого фільтра (УФ), чия імпульсна характеристика комплексно пов'язана з CSS радіосигналом в частотній області і має дзеркальне відображення його в часі:

$$h(t) = A_1 \cdot \cos\left(\omega_H \cdot (T_{sym} - t) - \frac{\mu}{2} \cdot (T_{sym} - t)^2\right), 0 \leq t < T_{sym}. \quad (2.4)$$

Принцип передачі символів інформації блоку даних фізичного рівня (PHY DATA UNIT) за допомогою широкосмугового радіосигналу LoRa полягає в частотному зсуві $e^{j\Delta\omega \cdot k \cdot t}$ відносного опорного ЛЧМ сигналу $e^{j(\omega_H \cdot t + \mu \cdot t^2)}$, де $k=0,1,2, \dots, 2^{SF}$ – інформаційний символ, розміром SF біт (Рис. 2.6):

$$x(t) = \begin{cases} A_0 \cdot \cos\left(\omega_H \cdot t + \Delta\omega \cdot k \cdot t + \frac{\mu}{2} \cdot t^2\right), & 0 \leq t < T_0 \\ A_0 \cdot \cos\left(\omega_H \cdot t + \Delta\omega \cdot k \cdot t - BW \cdot t + \frac{\mu}{2} \cdot t^2\right), & T_0 \leq t < T_{sym} \end{cases} \quad (2.5)$$

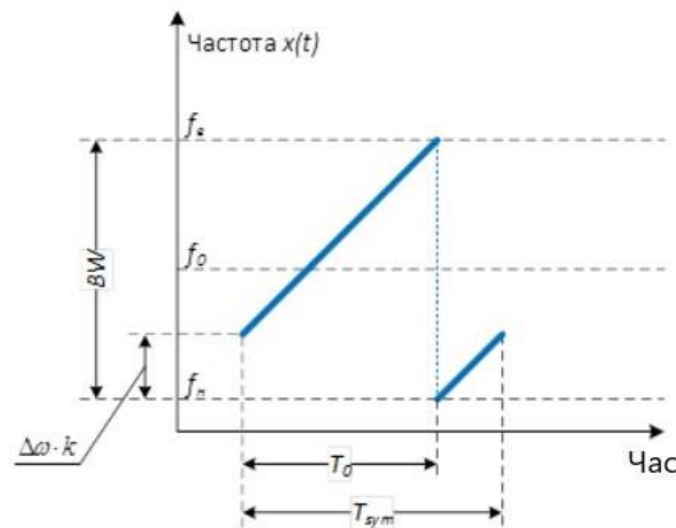


Рисунок 2.6 – Принцип передачі символів

Приклад залежності частоти радіосигналу від часу для LoRa кадру показаний на Рис. 2.6.

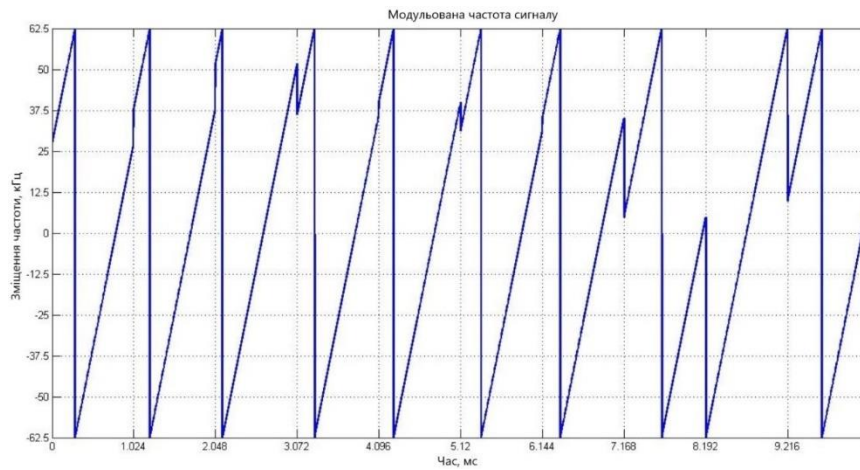


Рисунок 2.7 – Залежність частоти радіосигналу від часу

Можлива схема приймача сигналу LoRa, що переносить блок даних фізичного рівня, показана на Рис. 2.8 [18].

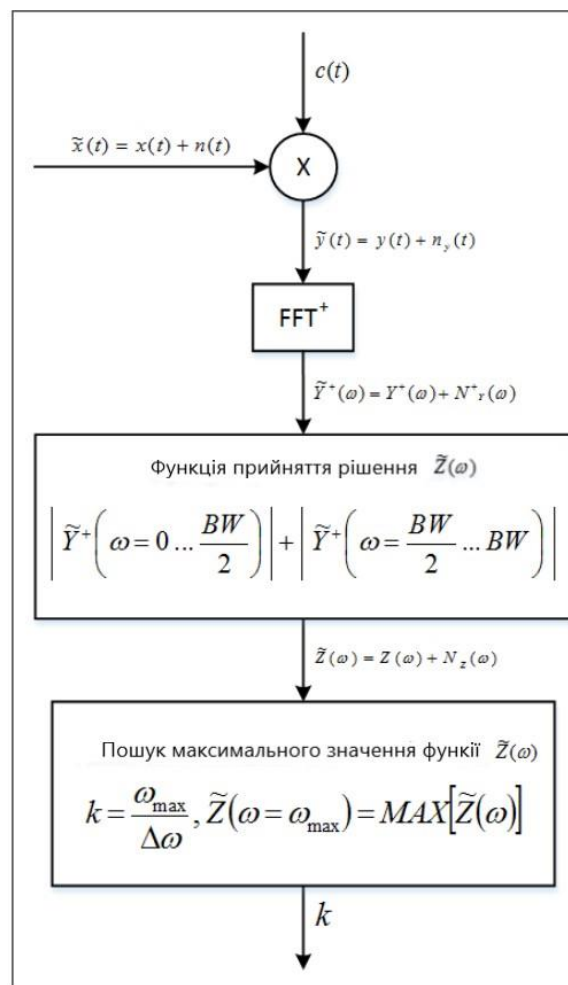


Рисунок 2.8 – Схема приймача сигналу LoRa

Тут:

$$c(t) = A_1 \cdot \cos\left(\omega_n \cdot t + \frac{\mu}{2} \cdot t^2\right), 0 \leq t < T_{sym} - \text{ЛЧМ сигнал}, \quad (2.6)$$

$$n(t) = 0 \leq t < T_{sym} - \text{адитивний білий Гаусівський шум}, \quad (2.7)$$

$$\text{Де-chirped сигнал:} \quad y(t) = x(t) \cdot c(t) = \frac{A_0 \cdot A_1}{2}, \quad (2.8)$$

$$\begin{cases} \cos(\Delta\omega \cdot k \cdot t) + \cos(2 \cdot \omega_n \cdot t + \Delta\omega \cdot k \cdot t + \mu \cdot t^2), & 0 \leq t < T_0, \\ \cos(BW - \Delta\omega \cdot k \cdot t) + \cos(2 \cdot \omega_n \cdot t + \Delta\omega \cdot k \cdot t - BW \cdot t + \mu \cdot t^2), & T_0 \leq t < T_{sym} \end{cases} \quad (2.9)$$

$$n_y(t) = n(t) \cdot c(t).$$

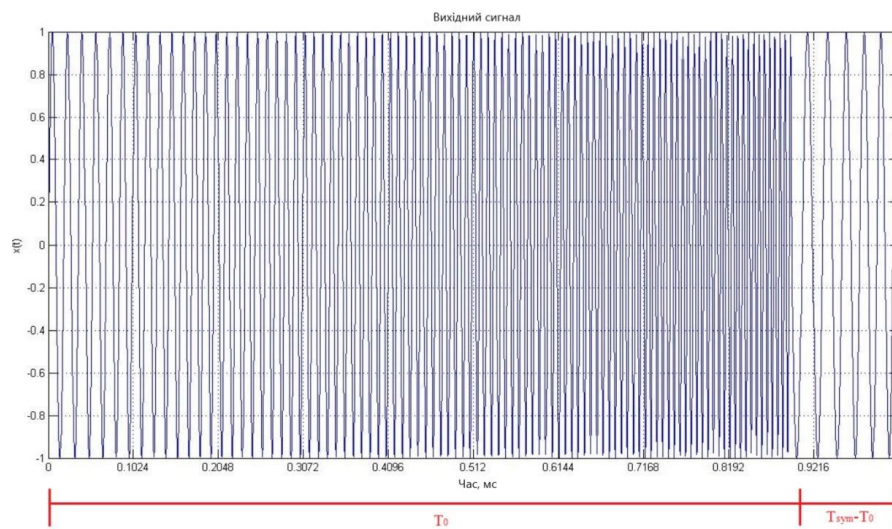


Рисунок 2.9 – Вихідний сигнал

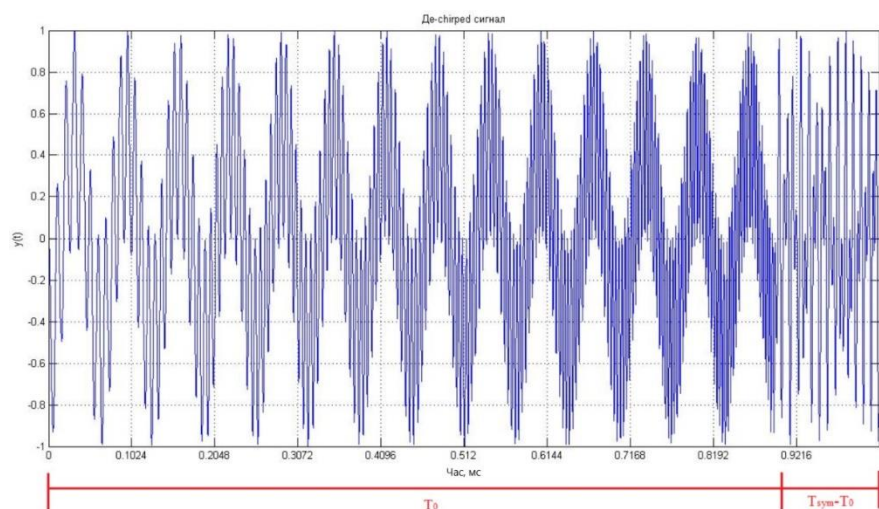


Рисунок 2.10 – Де-chirped сигнал

Відкинувши в вираженні для $y(t)$ другі доданки в фігурних дужках (як високочастотні складові):

$$y(t) = \frac{A_0 \cdot A_1}{2} \cdot \begin{cases} \cos(\Delta\omega \cdot k \cdot t), & 0 \leq t < T_0 \\ \cos([BW - \Delta\omega \cdot k] \cdot t), & T_0 \leq t < T_{sym}, \end{cases} \quad (2.10)$$

на виході блоку перетворення Фур'є (FFT⁺) отримуємо наступний комплексний сигнал:

$$\begin{aligned} Y(\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} y(t) \cdot e^{-i\omega t} dt = \\ &= \frac{A_0 \cdot A_1}{4} \times e^{-j(\omega - \Delta\omega k) \frac{T_0}{2}} \cdot T_0 \cdot \frac{\sin[(\omega - \Delta\omega k) \cdot T_0/2]}{(\omega - \Delta\omega k) \cdot T_0/2} + \\ &+ \frac{A_0 \cdot A_1}{4} \times e^{-j(\omega - (BW - \Delta\omega k)) \frac{T_0 + T_{sym}}{2}} \cdot (T_{sym} - T_0) \cdot \frac{\sin[(\omega - (BW - \Delta\omega k)) \cdot (T_{sym} - T_0)/2]}{(\omega - (BW - \Delta\omega k)) \cdot (T_{sym} - T_0)/2} + \\ &+ \frac{A_0 \cdot A_1}{4} \times e^{-j(\omega + \Delta\omega k) \frac{T_0}{2}} \cdot T_0 \cdot \frac{\sin[(\omega + \Delta\omega k) \cdot T_0/2]}{(\omega + \Delta\omega k) \cdot T_0/2} + \\ &+ \frac{A_0 \cdot A_1}{4} \times e^{-j(\omega + (BW - \Delta\omega k)) \frac{T_0 + T_{sym}}{2}} \cdot (T_{sym} - T_0) \cdot \frac{\sin[(\omega + (BW - \Delta\omega k)) \cdot (T_{sym} - T_0)/2]}{(\omega + (BW - \Delta\omega k)) \cdot (T_{sym} - T_0)/2} \end{aligned} \quad (2.11)$$

Далі позбавляємося від двох останніх доданків, що мають істотний вплив в області негативних частот і низький в області позитивних:

$$Y^+(\omega) = Y_1(\omega) + Y_2 \cdot K_y(BW \cdot \omega), \quad (2.12)$$

$$\text{де } Y_1(\omega) = \frac{A_0 \cdot A_1}{4} \cdot e^{-j(\omega - \Delta\omega k) \frac{T_0}{2}} \cdot T_0 \cdot \frac{\sin\left[(\omega - \Delta\omega k) \frac{T_0}{2}\right]}{(\omega - \Delta\omega k) \frac{T_0}{2}}; \quad (2.13)$$

K_y – ваговий коефіцієнт.

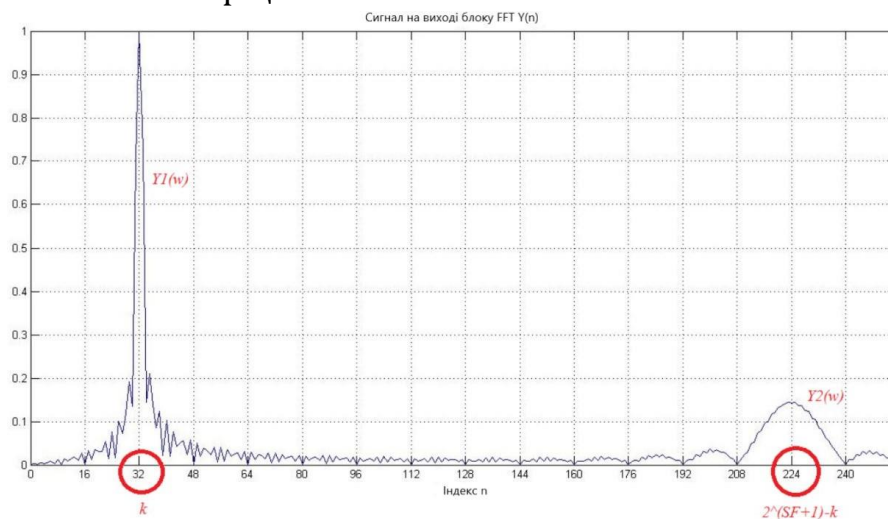


Рисунок 2.11 – Сигнал на виході блоку FFT

Для того щоб уникнути перекриття двох доданків $Y^+(\omega)$ при різних значеннях k має виконуватися нерівність:

$$\Delta \omega < \frac{BW}{2 \cdot k}. \quad (2.14)$$

Звідси,

$$\Delta \omega = \frac{BW}{2^{SF+1}}, \quad (2.15)$$

$$T_0 = \frac{(2^{SF+1} - k)}{2^{SF+1}} \cdot T_{sym} \quad (2.16)$$

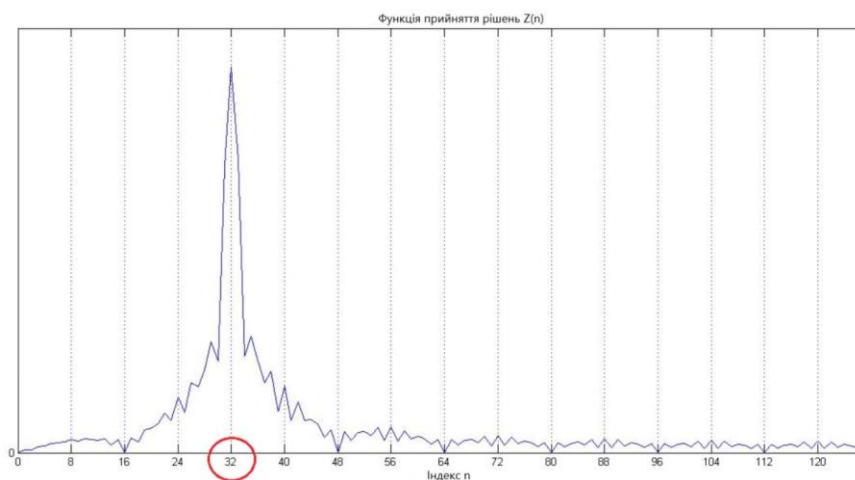


Рисунок 2.12 – Функція прийняття рішень

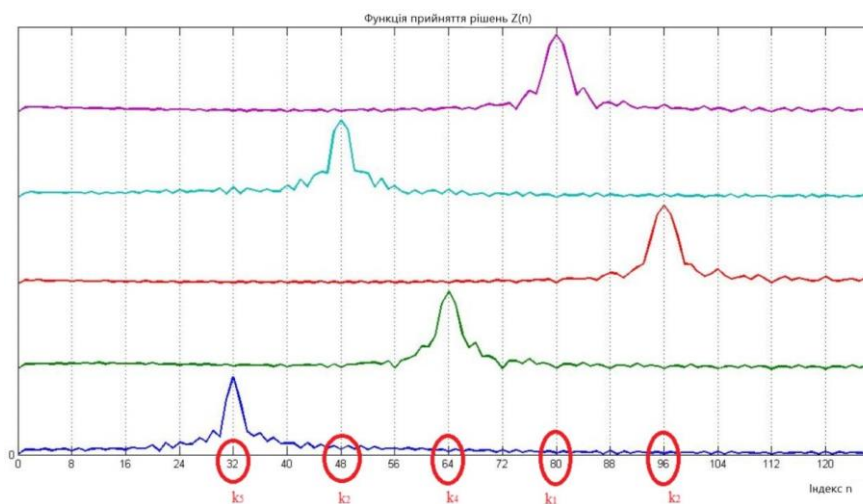


Рисунок 2.13 – Функція прийняття рішень при різних значеннях інформаційного символу k .

Нарешті визначаємо значення декодованого приймачем інформаційного символу k . Для цього знаходимо частоту ω , при якій функція прийняття рішення $Z(\omega)$ набуває максимальне значення (ω_{max}):

$$Z(\omega = \omega_{max}) = MAX[Z(\omega)], \quad (2.17)$$

$$k = \frac{\omega_{max}}{\Delta \omega}; \quad (2.18)$$

$$Z(\omega) = Y_{1_{\bar{z}(\omega)}} \cdot h_1(\omega) + Y; \quad (2.19)$$

$$Z(\omega) = \sum_{k=KN1}^{KB1} Y_1(\omega_k) \cdot h_1(\omega_k) + \sum_{k=KN2}^{KB2} Y_2(\omega_k) \cdot h_2(\omega_k). \quad (2.20)$$

Ключовою особливістю радіоінтерфейсу LoRa (як уже згадувалося вище) є його висока стійкість. Рисунки 2.14, 2.15 демонструють функціонування описаного детектора сигналу LoRa в умовах адитивного білого гаусівського шуму (відношення сигнал / шум $SNR = 0dB$). А на Табл. 2.1 наведені результати моделювання в середовищі Matlab роботи детектора при різних відносинах сигнал / шум і коефіцієнтах розширення спектра [21].

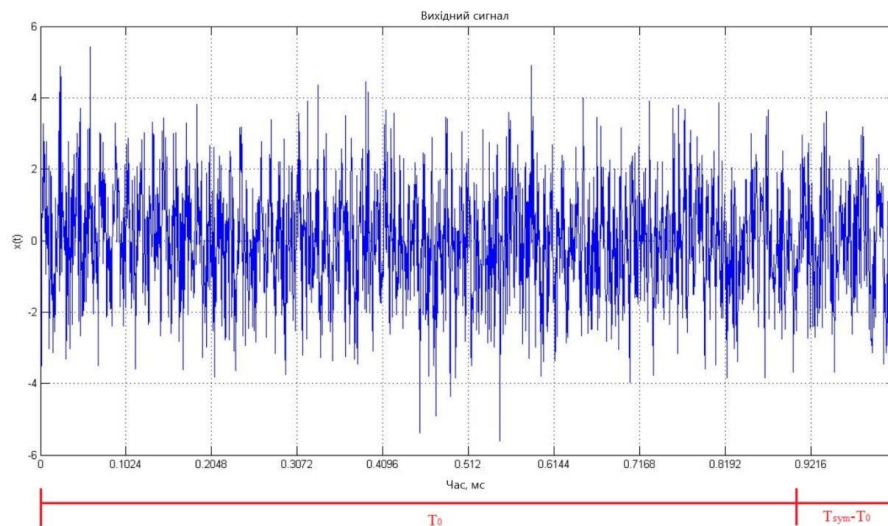


Рисунок 2.14 – Вихідний сигнал LoRa в умовах адитивного білого гаусівського шуму

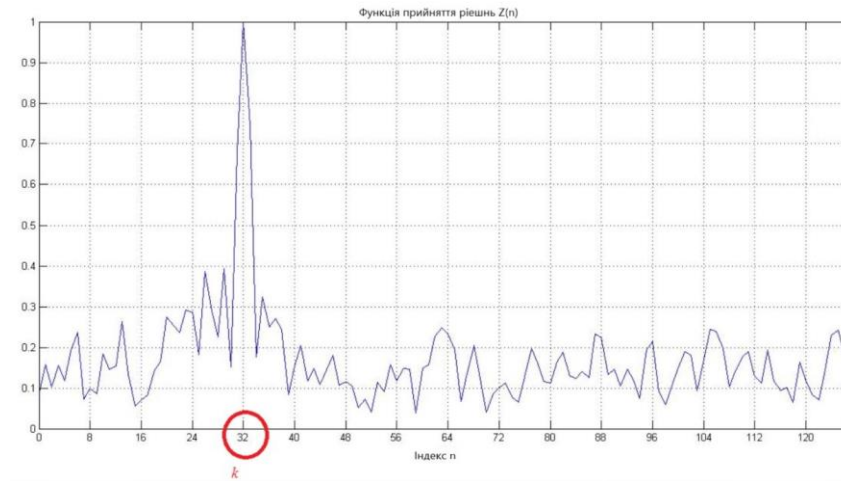


Рисунок 2.15 – Функція прийняття рішень в умовах адитивного білого гаусівського шуму

2.4 Дослідження алгоритму приймання сигналів

Сигнал системи LORA після перетворення представляє собою некогерентну пачку радіоімпульсів. Число N імпульсів у пачці залежить від часу спостереження $T_{\text{обл}}$ цілі, періоду повторення радіоімпульсів $T_{\text{п}}$ і визначається відношенням:

$$N = \frac{T_{\text{обл}}}{T_{\text{п}}}. \quad (2.21)$$

У режимі кругового огляду

$$T_{\text{обл}} = \frac{\Delta \theta_{0,5}}{\Omega}, \quad (2.22)$$

де $\Delta \theta_{0,5}$ — ширина діаграми спрямованості за рівнем 0,5, Ω — кутова швидкість обертання променя антени.

Огинаюча пачки визначається ваговою функцією аналізу. У деяких випадках зручно в якості апроксимації використовувати пачку з прямокутною огинаючою, що має ту ж енергію, але менше імпульсів.

Пачка радіоімпульсів називається когерентною, якщо початкові фази радіоімпульсів пов'язані детермінованою залежністю. Якщо початкові фази радіоімпульсів випадкові, то пачка радіоімпульсів називається некогерентною.

Когерентність пачки відбитих радіоімпульсів можлива за виконання таких умов:

- 1) випромінювані радіоімпульси мають бути когерентними;
- 2) зрушення фаз при відображенні сигналу від об'єкта і при поширенні його в середовищі має бути однаковим для всіх радіоімпульсів;
- 3) інтервал кореляції флуктуацій повинен бути більшим за тривалість пачки.

При вирішенні задачі виявлення когерентної пачки радіоімпульсів розглядають такі основні моделі:

- 1) пачка радіоімпульсів з повністю відомими параметрами (детермінована модель);
- 2) пачка радіоімпульсів з випадковою початковою фазою;
- 3) пачка радіоімпульсів з випадковими початковою фазою та амплітудою.

Синтез оптимальних виявників для зазначених вище моделей когерентної пачки радіоімпульсів практично нічим не відрізняється від синтезу виявників одиночних сигналів. Структурні схеми виявників когерентних пачок радіоімпульсів співпадають з структурними схемами виявників. Однак у кореляційних схемах як опорний сигнал необхідно використовувати сигнали, що описують пачки радіоімпульсів, а у фільтрових схемах оптимальний фільтр повинен бути узгоджений з пачкою радіоімпульсів.

Узгоджений фільтр для когерентної пачки радіоімпульсів можна представити у вигляді каскадного з'єднання фільтра, узгодженого з одиночним радіоімпульсом (СФО, і синхронного накопичувача (СН). Синхронний накопичувач складається з лінії затримки у вигляді підсилювачів з коефіцієнтами посилення K_f , пропорційними амплітудам імпульсів пачки, та сумуючого пристрою (Σ) [21].

Алгоритм роботи оптимального детектора можна записати наступним чином:

$$\sum_{i=l}^N \ln l_0 \cdot \left(\frac{2 \cdot Z_i}{N_0} \right) \underset{H_0}{\overset{H_1}{>}} C, \quad (2.23)$$

де C – величина межі, яка обирається із умови забезпечення заданої ймовірності хибної тривоги.

Відповідно до алгоритму, що записаний в вищенаведеній формулі, на рисунку 2.17 наведена схема оптимального детектора некогерентної пачки сигналів радіоімпульсів з відомими амплітудами і випадковими фазами. Детектор складається з фільтра, узгодженого з одичного радіоімпульсу ($СФ_1$), детектора огибаючої (ДО), синхронного накопичувача (СН) і порогового пристрою (ПП).

На практиці замість узгодженого фільтра $СФ_1$ часто використовують квазіоптимальний фільтр, смуга пропускання якого вибирається з умови отримання максимально можливого відношення сигнал-шум на виході. Зокрема, за прямокутної частотної характеристики фільтра ширина лінії пропускання визначається формулою Сифорова:

$$\Delta f_{\text{опт}} \approx \frac{1,37}{\tau_i}. \quad (2.24)$$

Характеристика детектора огибаючої відповідно до формули повинна описуватися функцією $f(x) = \ln I_0(x)$. Оскільки:

$$\ln I_0(x) \approx \begin{cases} \frac{1}{4}x^2, & x \ll 1, \\ x, & x \gg 1, \end{cases} \quad (2.25)$$

то характеристика ДО при малих співвідношеннях сигнал-шум є квадратичною, а при великих значеннях відношення сигнал-шум лінійною.

Відповідно, вирішальною статистикою є $\sum_{i=l}^N x_i^2$, або $\sum_{i=l}^N x_i$.

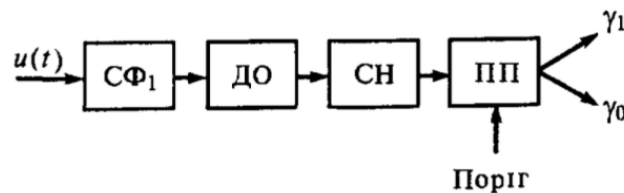


Рисунок 2.17 - Структурна схема оптимального детектора некогерентної пачки імпульсів

Сигнали з частотною фазовою маніпуляцією

Сучасні складні системи радіодоступу не завжди можуть бути відповідним чином охарактеризовані одним показником. Оцінка за декількома показниками є більш повною і більш конкретною і дозволяє охарактеризувати різні властивості системи. Оптимізація системи передачі в цілому здійснюється на основі теорії інформації, основи якої розроблені К. Шенноном [20].

При цьому ефективність системи оцінюється коефіцієнтом використання потужності сигналу β_E (енергетичною ефективністю) і коефіцієнтом використання смуги частот каналу β_F (частотною ефективністю). Енергетична ефективність характеризує енергетичні витрати на передачу одного біта інформації, частотна ефективність - швидкість передачі інформації в одиничній смузі частот (питома швидкість):

$$\beta_E = \frac{v_i}{\frac{P_c}{G_0}}; \quad \beta_F = \frac{v_i}{\Delta F}, \quad (2.25)$$

де v_i - швидкість передачі інформації;

G_0 - спектральна щільність потужності завади (шуму);

P_c - потужність сигналу;

ΔF - ширина смуги частот каналу.

При передачі цифрових сигналів методом багатопозиційної фазової і відносної фазової маніпуляції радіоімпульси на виході модулятора мають однакову амплітуду α_0 та частоту f_0 , і відрізняються тільки початковими фазами φ_i :

$$A_{\text{ФМ}}(t) = \alpha_0 \cos 2\pi(f_0 t + \varphi_i), \quad i = \overline{1, M}. \quad (2.26)$$

У системах з КАМ і АФМ протягом інтервалу передачі одного елементарного сигналу його фаза й амплітуда приймають значення, обрані з ряду можливих дискретних значень амплітуд і фаз:

$$A_{\text{АФМ}}(t) = \alpha_j \cos 2\pi(f_0 t + \varphi_i). \quad (2.27)$$

2.5 Дослідження методів виявлення та розрізнення серії радіоімпульсів

Пристрій генерування сигналів з ДЧМн складається з двох балансних модуляторів. На один подається носійне коливання з частотою $f_{\text{в}} = f_0 + \Delta f$, на другий — з частотою $f_{\text{н}} = f_0 - \Delta f$. Сигнали з виходів модуляторів підсумовуються і утворюють сигнал з ДЧМн.

При побудові генератора сигналів із ДЧМн важливу роль відіграє те, як формуються носійні коливання з частотами $f_{\text{в}}$ і $f_{\text{н}}$.

Існує два способи:

- носійні коливання з частотами $f_{\text{в}}$ і $f_{\text{н}}$ формуються двома незалежними генераторами;
- носійні коливання з частотами $f_{\text{в}}$ і $f_{\text{н}}$ формуються одним генератором зі змінною частотою (це може бути, наприклад, генератор, керований напругою — ГКН);
- спектри сигналів із ДЧМн, одержаних на виході модулювального пристрою, а отже, і характеристики системи цифрового зв'язку суттєво залежать від способу формування коливань з частотами $f_{\text{в}}$ і $f_{\text{н}}$.

Спектр сигналу з ДЧМн

Спектральну густину середньої потужності сигналу із ДЧМн можна одержати різними способами, наприклад так, як ми це робили для сигналів з ДАМн або з ДФМн. Виявляється, що такий сигнал можна зобразити як суперпозицію двох сигналів з ДАМн. Розглянемо графіки, наведені на рис. 2.17. Тут $b(t)$ — фрагмент деякої бітової послідовності; $s_{\text{ДАМн}}(t)$ — сигнал з ДЧМн, де символ «1» подано синусоїдним коливанням з амплітудою A_0 і частотою $f_{\text{в}}$, символ «0» — синусоїдним коливанням з тією самою амплітудою, але з частотою $f_{\text{н}}$.

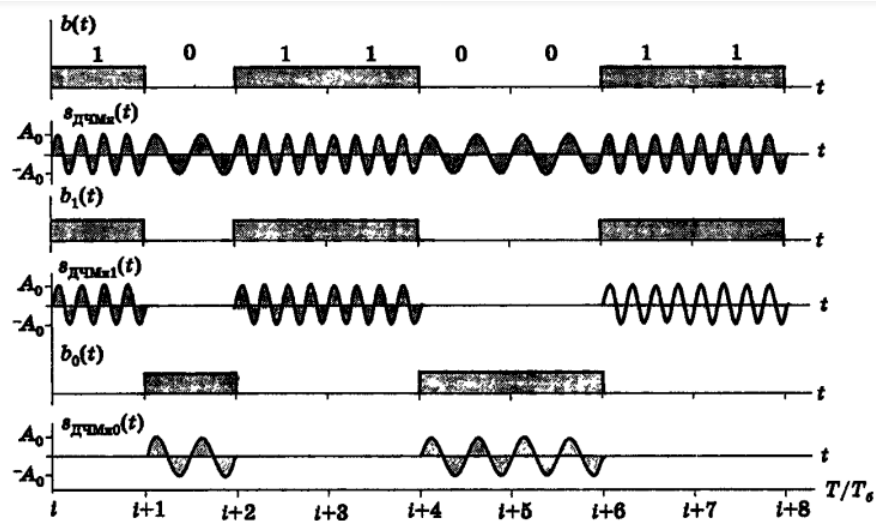


Рисунок 2.17 – Спектр сигналу з ДЧМн

За допомогою послідовності $b_1(t) = b(t)$ одержимо сигнал $s_{\text{ДАМн}_1}(t)$. За допомогою другого модулювального сигналу $b_0(t)$ одержимо інший сигнал з ДАМн — $s_{\text{ДАМн}_0}(t)$. Сигнал $b_0(t)$ отримано інвертуванням сигналу $b_1(t)$ (t), тобто заміною “1” на “0” і “0” на “1”. З аналізу наведених сигналів з ДЧМн і ДАМн виходить, що[**Ошибка! Источник ссылки не найден.**].

$$s_{\text{ДЧМн}}(t) = s_{\text{ДАМн}_1}(t) + s_{\text{ДАМн}_0}(t). \quad (2.28)$$

Розрізнення серії радіоімпульсів

Нехай на вході приймача сигнал має вигляд $u(t) = s_i(t, \varphi_i) + n(t)$, $i = 1, 2, \dots, m$, де початкова фаза φ_i позначає собою випадкову величину, розділену рівноцінно на відрізок $[-\pi, \pi]$; $n(t)$ – завада типу білого гаусівського шуму. Корисні сигнали $s_i(t)$, $i = 1, 2, \dots, m$, ортогональні в посиленому сенсі, рівноймовірні та мають однакову енергію.

Алгоритм прийняття рішення для розглянутого випадку можна записати у вигляді:

$$Z_l > Z_i, \quad i = 1, 2, \dots, m, i \neq l, \quad (2.29)$$

$$\text{або } v_l > v_i, \quad i = 1, 2, \dots, m, i \neq l, \text{ де } v_i = \frac{Z_i}{\sigma}. \quad (2.30)$$

Структурні схеми оптимальних детекторів, виконаних на основі кореляторів та узгоджених фільтрів, представлені на рис. 2.18, а та 2.18, б відповідно.

Оцінимо завадостійкість оптимального детектора. Очевидно, що помилка прийому виникає тоді, коли нерівності не виконуються хоча б для одного індексу $i \neq l$. У загальному вигляді ймовірність правильного прийому сигналу визначається формулою:

$$P_{\text{пр}} = \int_0^\infty dv_l \int_0^{v_l} \dots \int_0^{v_l} w_m(v_1, v_2, \dots, v_m) dv_1 \dots dv_{l-1} dv_{l+1} \dots dv_m. \quad (2.31)$$

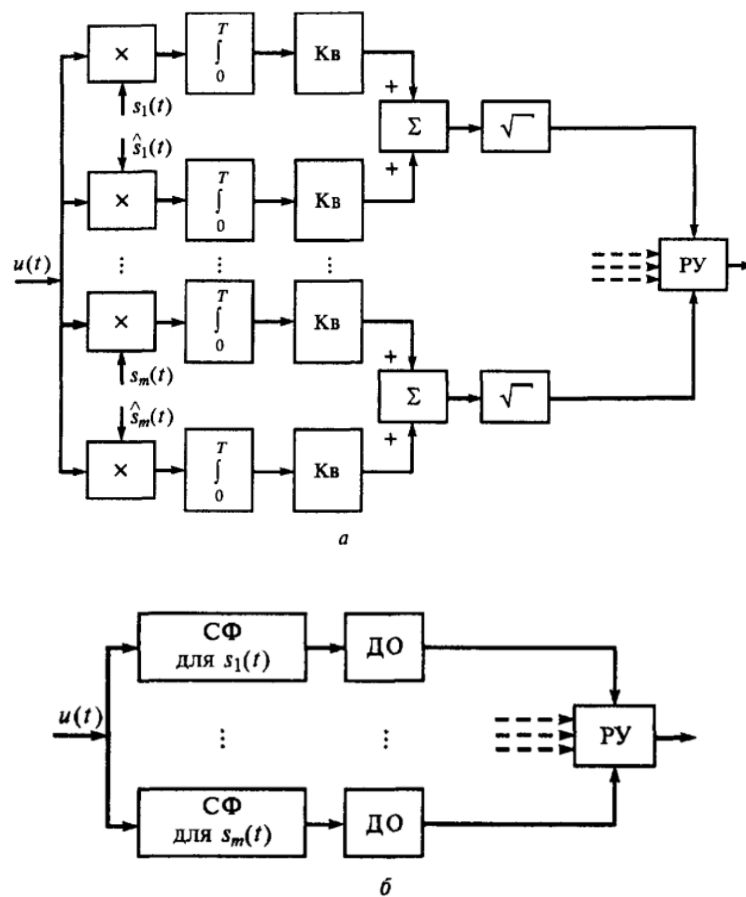


Рисунок 2.18 Структурна схема: а - оптимального кореляційного детектора сигналів з випадковими початковими фазами; б - фільтрового оптимального детектора сигналів з випадковими початковими фазами.

При використанні ортогональних у посиленому значенні сигналів, значення огибаючих виявляються статистично незалежними і співвідношення () можна переписати у вигляді:

$$P_{\text{пр}} = \int_0^{\infty} dv_l \int_0^{v_l} \dots \int_0^{v_l} w(v_1) w(v_2) \dots w(v_m) dv_1 dv_2 \dots dv_{l-1} dv_{l+1} \dots dv_m. \quad (2.32)$$

Як і для двійкової системи, значення огибаючої v_l розподілено по закону Райса, а значення огибаючих v_i , $i = 1, 2, \dots, m, i \neq l$, - за законом Релея.

$$\begin{aligned} P_{\text{пр}} &= \int_0^{\infty} v_l \exp\left(-\frac{v_l^2 + 2E/N_0}{2}\right) I_0\left(v_l \sqrt{\frac{2E}{N_0}}\right) \left[\int_0^{v_l} v_i \exp\left(-\frac{v_i^2}{2}\right) dv_i \right]^{m-1} dv_l = \\ &= \exp\left(-\frac{E}{N_0}\right) \int_0^{\infty} v \exp\left(-\frac{v^2}{2}\right) I_0\left(\sqrt{\frac{2E}{N_0}} v\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{v^2}{2}\right) \right]^{m-1} dv. \end{aligned} \quad (2.33)$$

Враховуючи, що

$$\left[1 - \exp\left(-\frac{v^2}{2}\right) \right]^{m-1} = \sum_{n=0}^{m-1} (-1)^n C_{m-1}^n \exp\left(-\frac{nv^2}{2}\right), \quad (2.34)$$

вираз матиме наступний вигляд:

$$P_{\text{пр}} = \exp\left(-\frac{E}{N_0}\right) \sum_{n=0}^{m-1} (-1)^n C_{m-1}^n \int_0^{\infty} v \exp\left(-\frac{(n+1)v^2}{2}\right) I_0\left(\sqrt{\frac{2E}{N_0}} v\right) dv. \quad (2.35)$$

Отже отримуємо:

$$P_{\text{пр}} = \sum_{n=0}^{m-1} (-1)^n C_{m-1}^n \frac{1}{n+1} \exp\left(-\frac{nE}{(n+1)N_0}\right). \quad (2.36)$$

Ймовірність помилки має наступний вигляд:

$$P_{\text{ош}} = 1 - P_{\text{пр}} = \sum_{n=1}^{m-1} (-1)^{n+1} C_{m-1}^n \frac{1}{n+1} \exp\left(-\frac{nE}{(n+1)N_0}\right). \quad (2.37)$$

Порівняння різних систем передачі інформації при деякому прийомі необхідно проводити на основі залежностей $P_{\text{ош}} = f(\frac{E_b}{N_0})$. На рисунку 2.19 представлені ці залежності, видно, що чим більше, тим вище завадостійкість системи. Порівняння когерентного та некогерентного методів прийому показує, що при відмінності у завадостійкості нехтує мало.

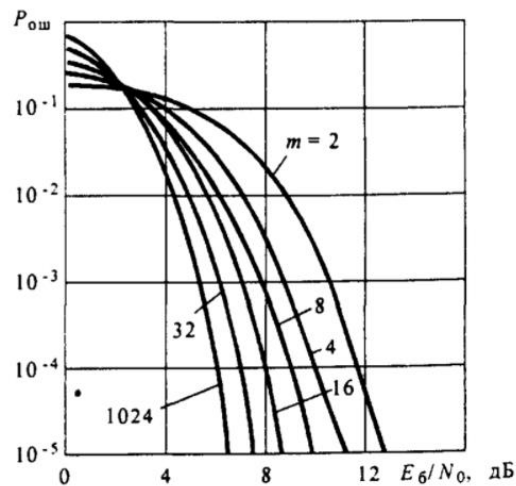


Рисунок 2.19 – Залежність ймовірності помилки розрізнення m сигналів з випадковими початковими фазами

На практиці при $P_{\text{ош}} \ll 1$ часто використовують верхню межу ймовірності помилки

$$P_{\text{ош}} < (m - 1) \exp \frac{(-E)}{2 \cdot N_0}, \text{ співпадаючу з першим доданком суми.}$$

2.6 Дослідження швидкодії системи радіомоніторингу

LoRa використовує канали 125 кГц і виділяє шість каналів 125 кГц і стрибкоподібне пересилання псевдовипадкових каналів. Кадр буде передаватися з певним коефіцієнтом розширення. Чим вище коефіцієнт розширення, тим повільніше передача, але тим довший діапазон передачі. Кадри в LoRa є ортогональними, що означає, що кілька кадрів можуть відправлятися одночасно, поки кожен відправляється з іншим коефіцієнтом

розширення. Всього є шість різних коефіцієнтів розширення (від $SF = 7$ до $SF = 12$).

Типовий пакет LoRa містить преамбулу, заголовок і корисне навантаження від 51 до 222 байт.

Мережі LoRa мають потужну функцію, звану Adaptive Data Rate (ADR). По суті, це дозволяє динамічно масштабувати ємність, ґрунтуючись на щільності вузлів і інфраструктурі. ADR контролюється управлінням мережею в хмарі. Вузли, близькі до базової станції, можуть мати більш високу швидкість передачі даних через достовірність сигналу. Вузли, що знаходяться в безпосередній близькості, можуть передати дані і звільнити свою смугу пропускання і швидко увійти в стан сну в порівнянні з віддаленими вузлами, які передають з меншою швидкістю.

Таблиця 2.1 – Стандарти IEEE 802.11

Властивість	Висхідне з'єднання	Низхідне з'єднання
Модуляція	CSS	CSS
Втрати радіоканалу	156 дБ	164 дБ
Швидкість передачі (адаптивна)	Від 0.3 до 5 кб/с	Від 0.3 до 5 кб/с
Розмір повідомлення корисне навантаження	0-250 байт	0-250 байт
Тривалість повідомлення	Від 40 мс до 1.2 с	Від 20 до 160 мс

Шлюзом для системи моніторингу стрілецького полігону є її пульт. На полігоні, під час проведення стрільб, розміщуються мішені. Процес, коли з периферійного передавача надходить інформація на приймач про початок стрільб і до моменту, коли з передавача надходить інформація про завершення стрільб - називається сеансом.

Передача інформації здійснюється пакетами, до корисної інформації також додається і службова інформація, а саме: преамбула, заголовок та циклічний надлишковий код (2.20).

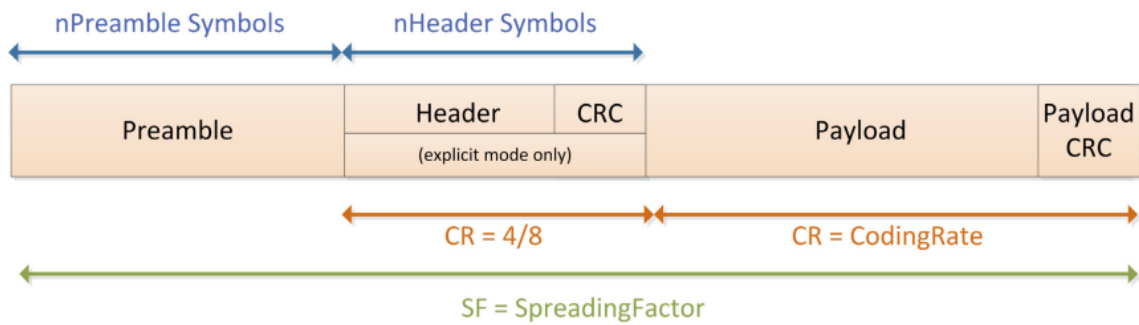


Рисунок 2.20 – Пакет в системах передачі LoRa

Тривалість передавання одного символу інформації розраховується за формулою:

$$T_S = \frac{1}{R_S}, \quad (2.38)$$

де T_S [мс] – тривалість передачі одного біту;

R_S [символ/с] – швидкість передачі інформації.

Час передачі преамбули розраховується за формулою:

$$T_{preamble} = (n_{preamble} + 4,25)T_S, \quad (2.39)$$

де $T_{preamble}$ [мс] – час, який затрачається на передачу преамбули;

$n_{preamble}$ – кількість символів преамбули;

T_S [мс] – час передачі одного символу.

Кількість символів повідомлення, яка передається наступною після преамбули, розраховується за формулою:

$$n_{payload} = 8 + \max \left(\text{ceil} \left(\frac{8PL - 4SF + 28 + 16CRC - 20IH}{4(SF - 2DE)} (CR + 4) \right) \right), \quad (2.40)$$

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).

Тривалість передачі символів після преамбули визначається за формулою:

$$T_{payload} = n_{payload} \cdot T_S, \quad (2.41)$$

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:

$$T_{packet} = T_{preamble} + T_{payload}, \quad (2.42)$$

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

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

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

Отже, виконаємо розрахунок швидкодії системи. Швидкість передачі інформації в системі:

$$R_S = \frac{BW}{2^{SF}} = \frac{62,5}{2^{12}} = 0,015 \text{ біт/с.} \quad (2.42)$$

Час передачі одного біту в мілісекундах буде становити:

$$T_S = \frac{1}{R_S} = \frac{1}{0,015} = 65,536 \text{ мс.} \quad (2.43)$$

Згідно документації на технологію модуляції LoRa [22], стандартна кількість символів преамбули становить 8, отже тривалість передачі преамбули буде рівною:

$$T_{preamble} = (n_{preamble} + 4,25)T_S = (8 + 4,25) \cdot 65,536 = 802,8 \text{ мс.} \quad (2.43)$$

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

$$\begin{aligned} n_{payload} &= 8 + \max \left(\text{ceil} \left(\frac{8PL - 4SF + 28 + 16CRC - 20IH}{4(SF - 2DE)} (CR + 4) \right) \right) = \\ &= 8 + \max \left(\text{ceil} \left(\frac{8 \cdot 8 - 4 \cdot 12 + 28 + 16CRC - 20 \cdot 1}{4(12 - 2 \cdot 1)} (4 + 4) \right) \right) = 24 \text{ символи.} \end{aligned} \quad (2.44)$$

Оскільки тривалість передачі одного символу становить більше 16 мілісекунд, то було увімкнено режим оптимізації, при цьому $DE = 1$.

Тривалість передачі символів повідомлення було розраховано за наступною формулою:

$$T_{payload} = n_{payload} \cdot T_S = 24 \cdot 65,536 = 1573 \text{ мс.} \quad (2.45)$$

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

$$T_{packet} = T_{preamble} + T_{payload} = 802,816 + 1573 = 2375,816 \text{ мс.} \quad (2.46)$$

В результаті час від початку передачі пакету з повідомленням до завершення передачі - 2375,816 мілісекунди, або близько 2,4 секунди.

Мішені в системі моніторингу стрілецького полігону можуть бути розміщені напівколом у відношенні до пульта системи моніторингу стрілецького полігону, у такому випадку, відстань від мішені до пульта, буде рівною для кожної з мішеней. Однак, це може бути не один напівкруг, а декілька, у такому випадку буде змінюватися коефіцієнт розширення спектру.

Так як швидкість передачі інформації залежить від коефіцієнту розширення спектру, то було досліджено тривалість передачі одного пакету при різних значеннях коефіцієнту розширення спектру (Таблиця 2.2).

За умовами технічного завдання, система моніторингу стрілецького полігону працює в межах від 0 метрів до 2 км. Отже проміжок в 2 км було розділено на 6 відрізків з різним значення коефіцієнту розширення спектру.

Таблиця 2.2 – Залежність швидкодії системи від SF

Відстань між пультом і мішенями, м	Коефіцієнт розширення спектру	Час на передачу кількості влучень, с	Час для команди старт/закінчення сесії
50	7	0,090	0,074
200	8	0,181	0,115
500	9	0,296	0,231
700	10	0,593	0,462
1200	11	1,188	0,925
2000	12	2,376	1,851

Згідно даташиту технології LoRa, відповідно до налаштування SF, швидкість передачі буде однаковою для кожної з мішеней, що має однаковий SF, а отже, у випадку, якщо мішені розміщені паралельними один до одної, рівними лініями, то незважаючи на те, що відстань від мішеней до пульта на одному рівні буде різною, швидкість передачі у такому випадку буде повністю однакою.

Дані в таблиці 2.2 наведені для однієї мішені, але якщо в системі не одна мішень, а декілька, то значення швидкості потрібно домножувати на кількість мішеней в системі. На рисунку 2.21 наведені дані для 5, 10, 20, 30 мішеней при SF=7; 10; 12, у випадку передавання інформації з мішеней на пульт. Говорячи про закінчення сесії, варто зауважити, що час на передачу команди про закінчення та час на передавання інформації про кількість влучень на пульт потрібно сумувати.

Пульт опитує кожну мішень по черзі, рівно як і надсилає команду про старт чи закінчення сесії.

Так як швидкість передачі інформації на кожному рівні однакова, виконаємо розрахунок залежності швидкості передачі інформації від кількості мішеней на рівні.

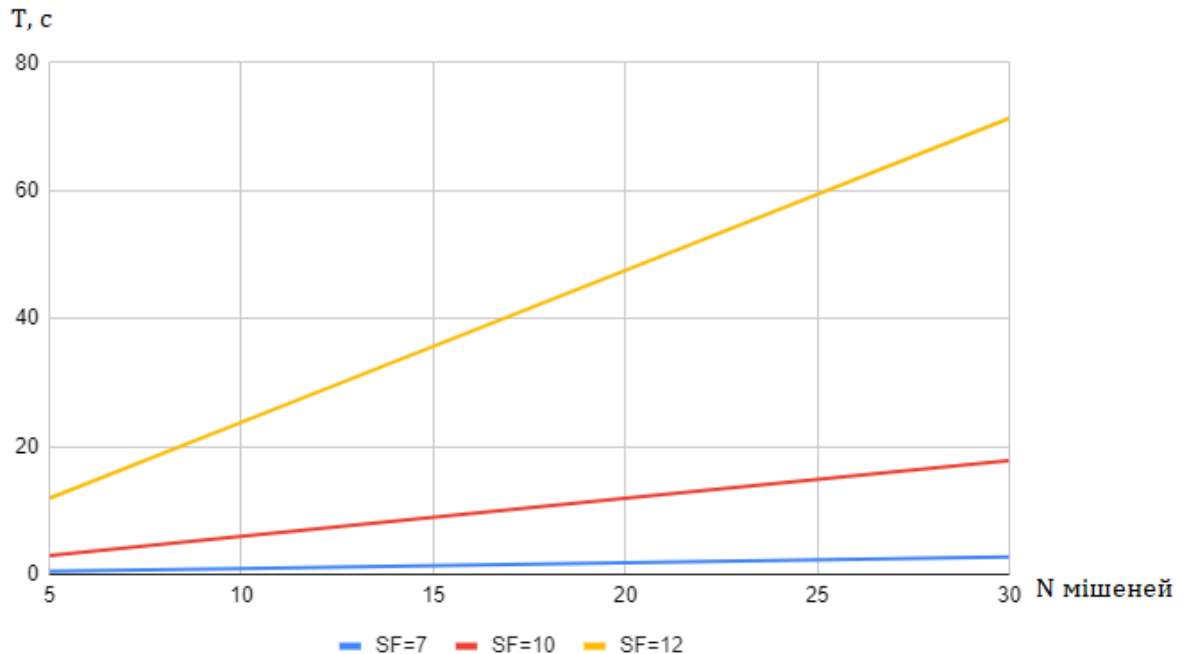


Рисунок 2.21 – Залежність швидкості передачі від кількості мішеней

Отже, зі збільшенням значення SF зростає і швидкість передавання інформації, збільшення кількості мішеней приводить до аналогічного результату.

2.7 Особливості радіопокриття LoRa

Було обрано базові дані, які необхідні для моделювання, тобто частоту розгортання мережі, смугу частот одного радіоканалу й проведено такі розрахунки.

Загальна кількість каналів :

$$n_K = \text{int} \left(\frac{F}{\Delta f_k} \right), \quad (2.47)$$

де F – неліцензійна смуга частот від 433,05 до 434,79 МГц;

Δf_k – смуга частот одного радіоканалу, МГц.

Визначаємо пропускну здатність шлюзу в секторі (з врахуванням каналного кодування і наявності циклічної приставки) R , Мбіт/с:

$$R = \frac{n_{\text{чкк}} \cdot N_{\text{рб}} \cdot n_{\text{пн}} \cdot N_{\text{сим}}^{\text{po}} \cdot V_{\text{cc}} \cdot m}{T_{\text{рб}}}, \quad (2.48)$$

де $N_{\text{рб}}$ – кількість ресурсних блоків у виділеній смузі частот радіоканалу;

$n_{\text{пн}}$ – кількість носійних частот в ресурсному блоці, $n_{\text{пн}} = 12$;

$N_{\text{сим}}^{\text{po}}$ – кількість символів OFDM в часовому слоті, що утворює ресурсний блок, $N_{\text{сим}}^{\text{po}} = 7$;

v_{cc} – швидкість каналного коду, $v_{\text{cc}} = \frac{1}{3}$;

m – кількість рівнів модуляції, біт/символ;

$T_{\text{рб}}$ – тривалість часового слоту, що утворює ресурсний блок, $T_{\text{рб}} = 0,5$ мс [19].

Кількість рівнів модуляції m визначимо з виразу:

$$m = k \cdot \log_2 \cdot M' \quad (2.49)$$

де M' – кількість можливих станів модуляції (максимальна пропускну здатність буде при 64 – QAM, отже $M' = 64$);

k – коефіцієнт, що враховує застосування технології MIMO (для схеми MIMO 2x2 $k = 2$, за відсутності технології MIMO $k=1$).

$$m = 2 \cdot \log_2 \cdot 64. \quad (2.50)$$

Визначаємо кількість периферійних передавачів $N_{\text{аб.с}}$:

$$N_{\text{аб.с}} = \frac{M \cdot R}{R_{\text{аб}}} \cdot k_{\text{os}}, \quad (2.51)$$

де $R_{\text{аб}}$ – гарантована швидкість для периферійного передавача, Мбіт/с;

k_{os} – коефіцієнт, який враховує, що для заданого виду трафіку кількість користувачів може бути збільшено через конкурентний доступ до середовища.

Далі розрахуємо чутливість приймача:

$$P_{\text{пр}} = N + 10 \cdot \lg(\Delta f_K) + NF + SNR, \quad (2.52)$$

де N – спектральна густина потужності теплового шуму приймача, $N = -174$ дБм/Гц;

Δf_K – смуга частот радіоканалу; на лінії вниз відповідає значенню з початкових даних табл. 2.1, на лінії вгору відповідає смузі для передавання ресурсних блоків у рамках SC-FDMA;

NF – внутрішній шум приймача, $NF = 2,5$ дБ для передавача, $NF = 7$ дБ для приймача;

SNR – допустиме відношення сигнал-шум, $SNR = 2$ дБ для передавача, $SNR = 1$ дБ для приймача.

Частота передачі бітів - бітрейт, де LoRa є функцією швидкості чірпа і швидкості передачі символів. Бітрейт представлений R , коефіцієнт розширення S , смуга пропускання B . Тому бітрейт (біт/с) може варіюватися від 0,3 до 5 Кбіт/с і виводиться як:

$$R_b = S \cdot \frac{1}{\left\lceil \frac{2^S}{B} \right\rceil}. \quad (2.53)$$

Така форма модуляції допускає малу потужність для великих відстаней, як показали військові. Дані кодуються з використанням збільшення або зменшення частоти, і кілька передач можуть бути відправлені з різною швидкістю передачі даних на тій же частоті.

Було проведено розрахунки для знаходження втрат в радіолінії в напрямках від передавача L_{DL} і передавача БС L_{UL} :

$$L_{DL} = P_{\text{пер_БС}} + G_{\text{БС}} + G_{\text{МС}} - P_{\text{пр_МС}} - L_{\text{фід}}. \quad (2.54)$$

$$L_{UL} = P_{\text{пер_МС}} + G_{\text{АС}} + G_{\text{БС}} - P_{\text{пр_БС}} - L_{\text{фід}}. \quad (2.55)$$

Використано удосконалену модель Окамура-Хата, яка визначає медіанне значення допустимих втрат в умовах відкритої території, та працює в діапазоні частот від 100 МГц до 3000 МГц:

$$L_o = L_U - 4,78 \cdot (\log_{10} f)^2 + 18,33(\log_{10} f) - 40,94, \quad (2.56)$$

де L_o – втрати на розповсюдження радіохвиль на відкритих територіях, дБ,

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

f – частота передачі радіосигналу, МГц.

Висновки: в другому розділі були виконані теоретичні розрахунки швидкодії системи моніторингу стрілецького полігону, також досліджено особливості радіопокриття LoRa, методів виявлення та розрізнення серії радіоімпульсів. Досліджено та удосконалено алгоритм приймання системи завдяки додаванню під час приймання сигналу вагового множення та сумі відліків. За результатами цього розділу були виконані розрахунки, побудовані таблиці та графіки.

**3 ПРАКТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ
СТРІЛЕЦЬКОГО ПОЛІГОНУ**

**3.1 Дослідження завадостійкості прийому системи моніторингу
стрілецького полігону**

Виконано дослідження завадостійкості прийому сигналів ЛОРА. Дослідження виконані в залежності від коефіцієнту розширення спектру (Рисунок 3.1-3.6).

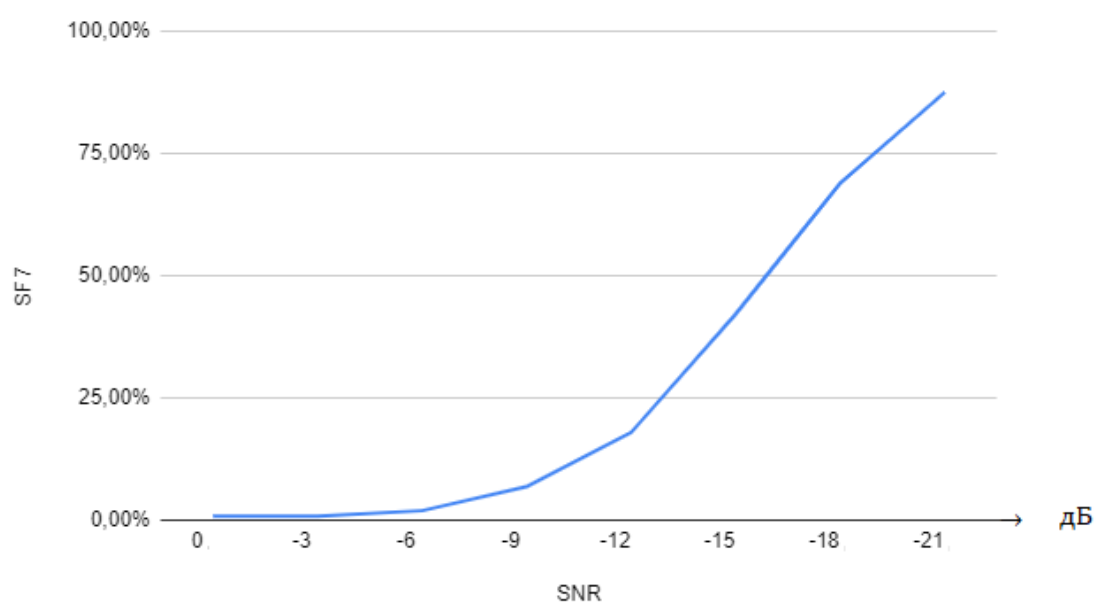


Рисунок 3.1 – Завадостійкість при SF=7

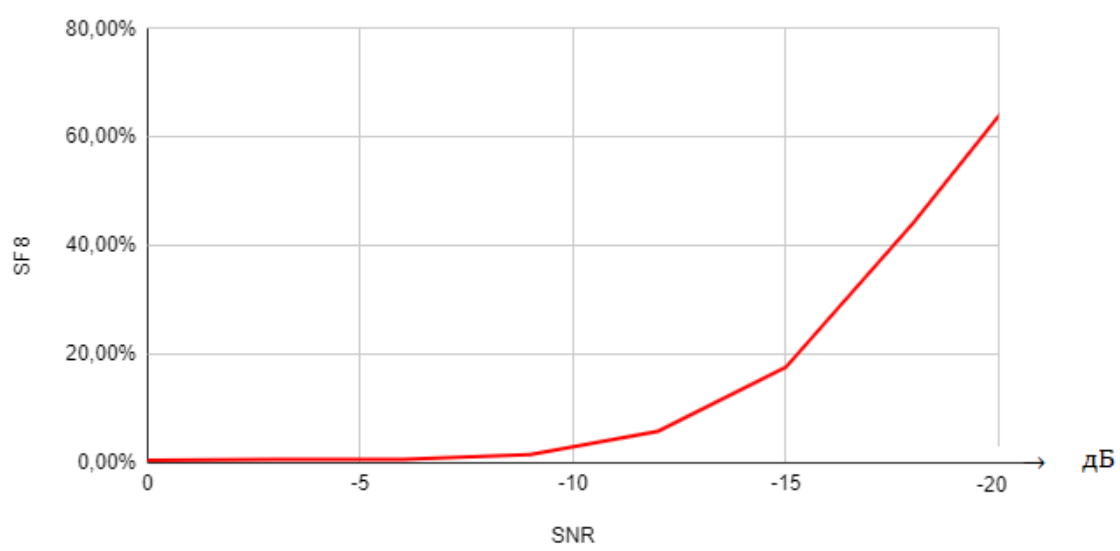


Рисунок 3.2 – Завадостійкість при SF=8

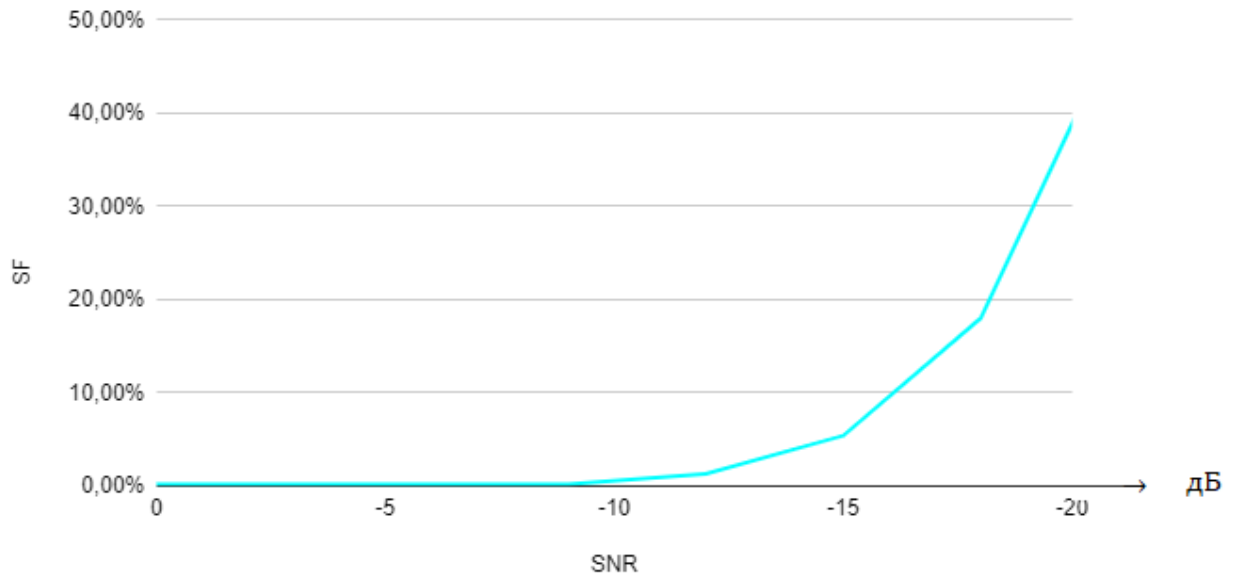


Рисунок 3.3 – Завадостійкість при SF=9

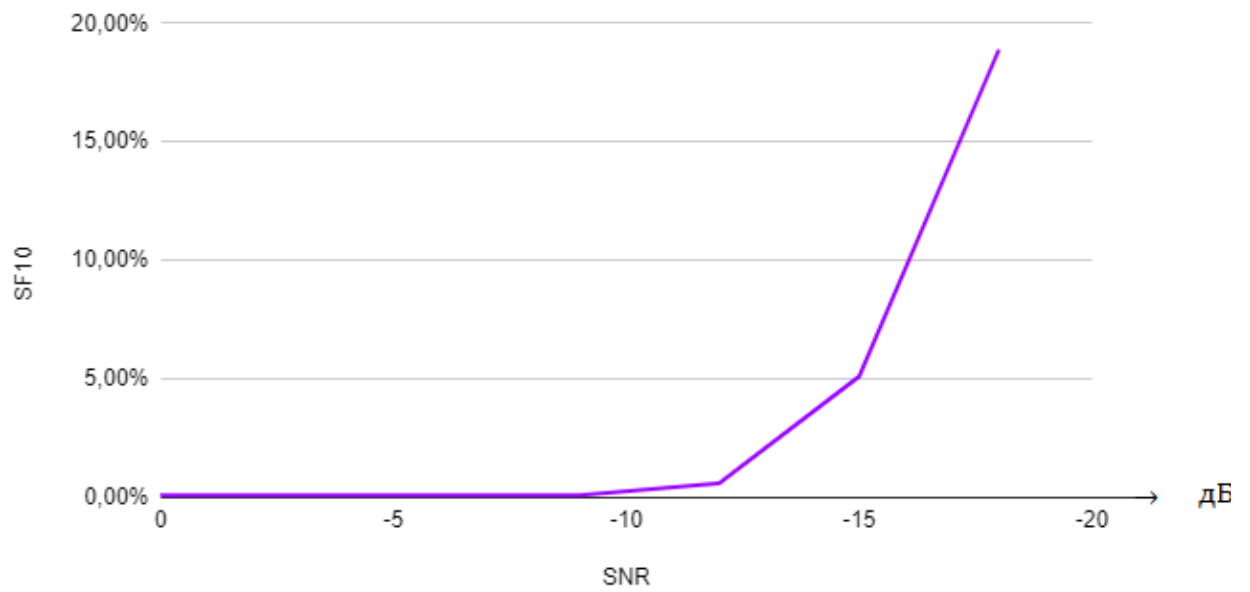


Рисунок 3.4 – Завадостійкість при SF=10

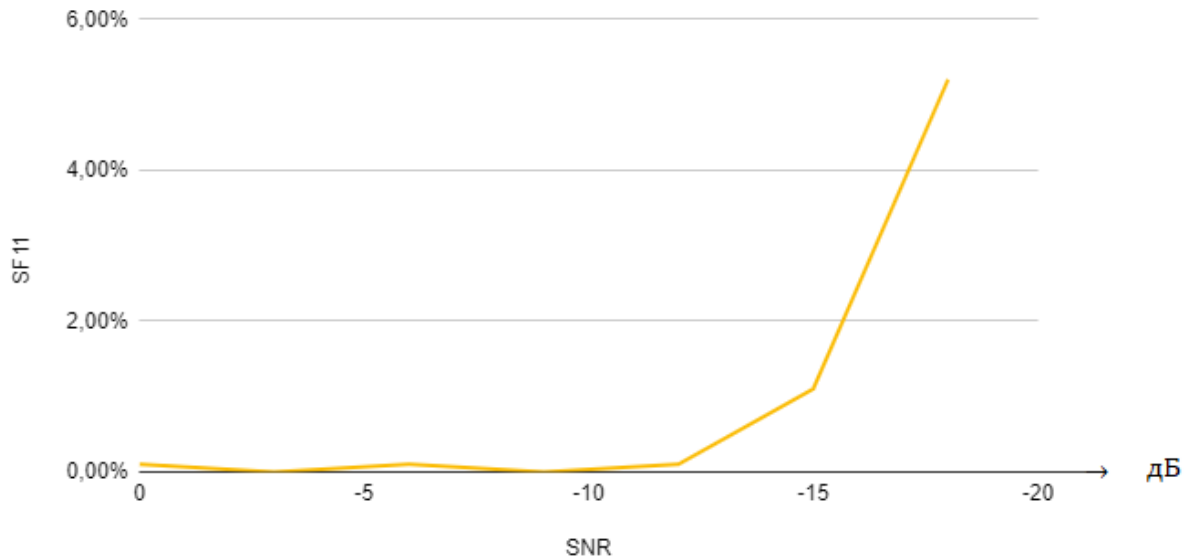


Рисунок 3.5 – Завадостійкість при SF=11

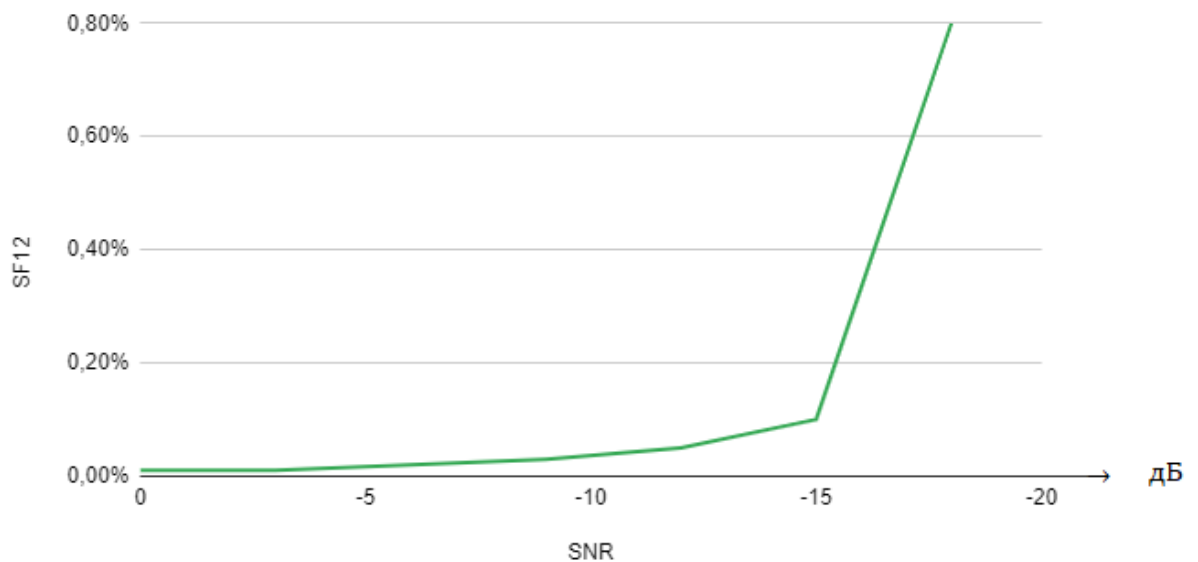


Рисунок 3.6 – Завадостійкість при SF=12

В пункті 3.1 виконано дослідження імовірності помилкового прийому від відношення сигнал/шум для різних режимів прийому, що характеризуються коефіцієнтом розширення SF. Зі збільшенням коефіцієнту спектру, значення помилкового прийому зменшується, але чим більше відношення сигнал/шум, тим більша ймовірність помилки.

3.2 Дослідження точності оцінки амплітуди сигналу

В цьому підрозділі проведено дослідження впливу завад на рівень сигналу при різних значеннях завад (Рисунок 3.7-3.10).

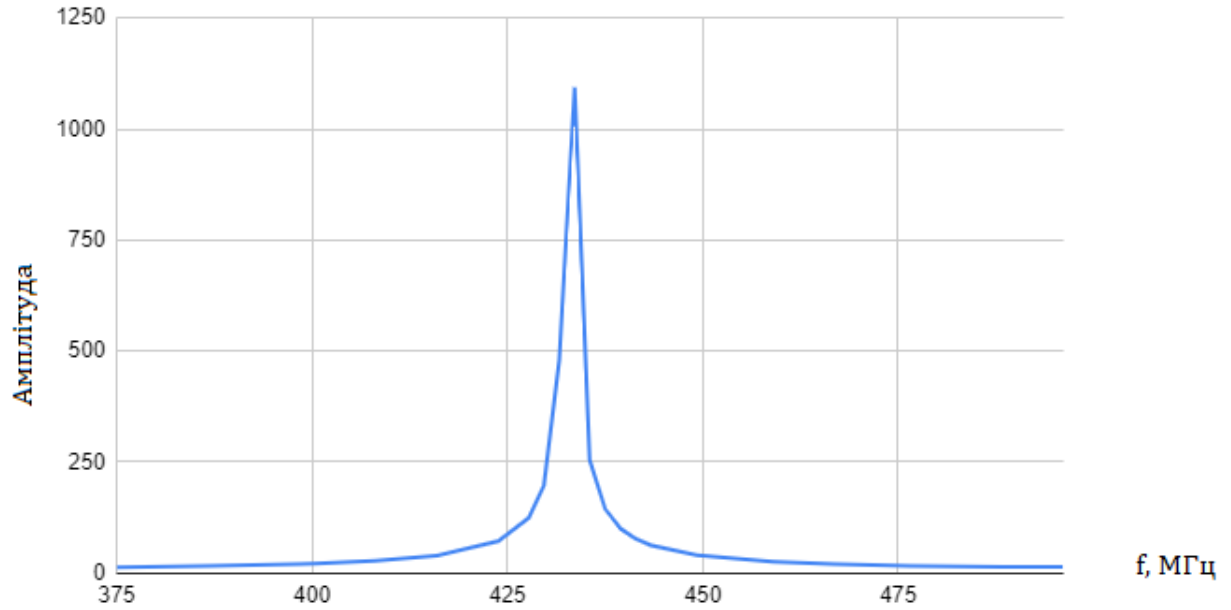


Рисунок 3.7 – Залежність сигналу від впливу завад на нього при рівні завад рівній 0

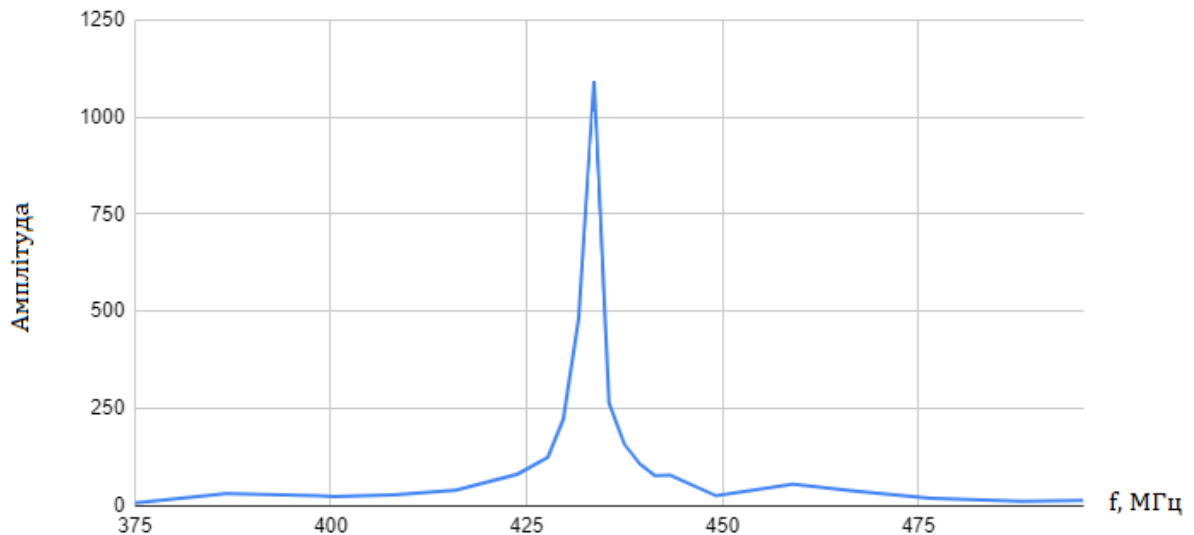


Рисунок 3.8 – Залежність сигналу від впливу завад на нього при рівні завад

$\frac{1}{10}$ відносно рівня сигналу

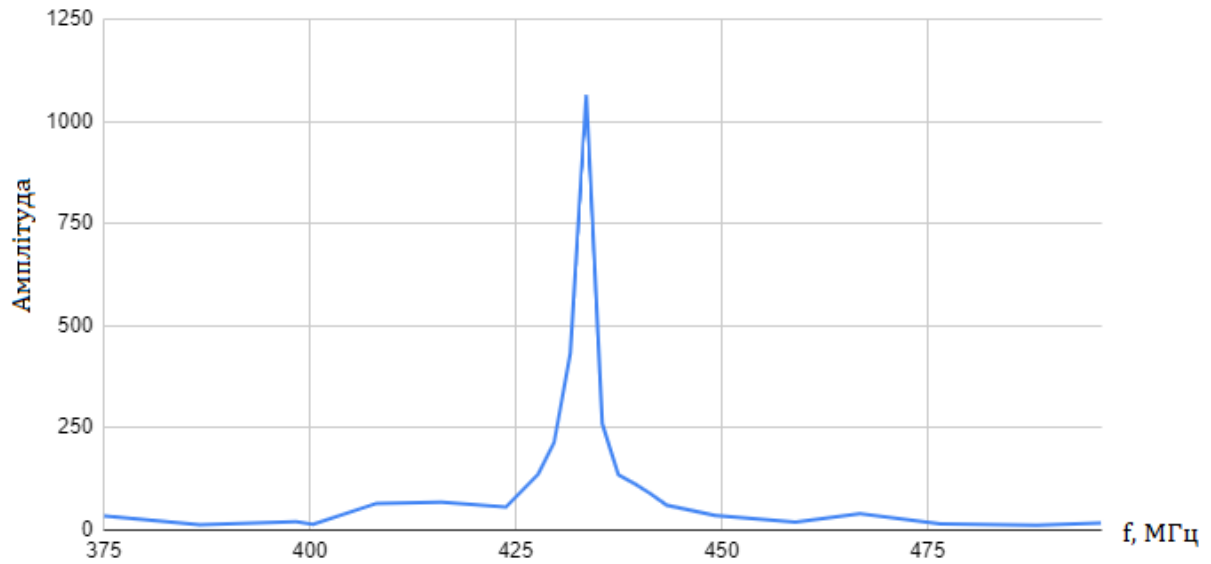


Рисунок 3.9 – Залежність сигналу від впливу завад на нього при рівні завад

$\frac{1}{5}$ відносно рівня сигналу

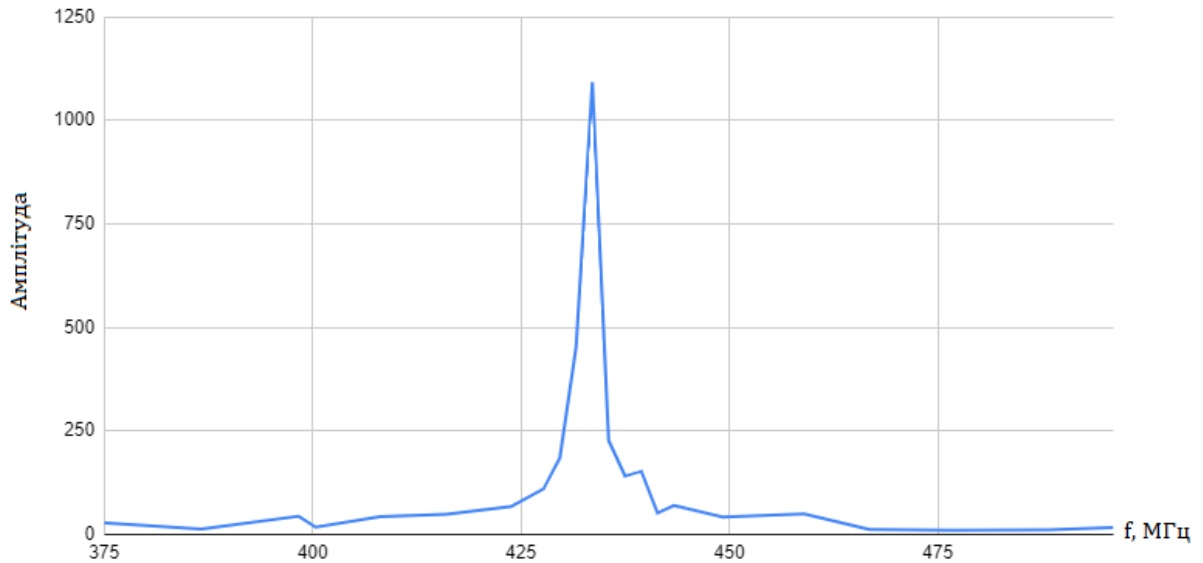


Рисунок 3.10 – Залежність сигналу від впливу завад на нього при рівні завад

$\frac{1}{2}$ відносно рівня сигналу

Отже амплітуда сигналу зазнає змін при впливі завад на неї. Значення рівня сигналу, де відсутній корисний сигнал, збільшився з 6 до 30, а це в 5 разів. Амплітуда сигналу все ж лишається незмінною. Однак навіть при застосуванні

завад, які рівні половині рівня сигналу, сигнал лишається на своїй частоті і добре відрізняється від завад.

3.3 Дослідження швидкодії

Виконано дослідження швидкодії в системі моніторингу стрілецького полігону. Алгоритм дослідження швидкодії системи моніторингу стрілецького полігону виглядає наступним чином, записується дві змінні: у першу змінну записується час початку надсилання команди, у другу змінну записується час закінчення надсилання команди. Під часом розуміється час в мілісекундах, який відраховує таймер мікроконтролеру Timer0. Час надсилання команди визначається різницею часу закінчення та часу початку надсилання. Для обох команд час надсилання визначається однаково.

Час отримання результату визначається різницею часу закінчення отримання повідомлення та часом закінчення надсилання команди про отримання результатів.

Відразу після того, як периферійний передавач отримує команду про надсилання результату, він надсилає 8 біт корисного навантаження на пульт без затримки у часі.

В результаті було отримано три часи:

- час надсилання команди старту;
- час надсилання команди отримання результату;
- час отримання результату.

Також розраховано загальний час, витрачений на надсилання команд та отримання результату - TOTAL TIME.

В ході проведеного дослідження враховувався лише час на пересилання даних між пультом і мішенями, тобто загальний час сесії без врахування часу на проведення стрільб.

На рисунках 3.11 (а-є) наведений практичний вплив зміни коефіцієнту розповсюдження на швидкість передачі.

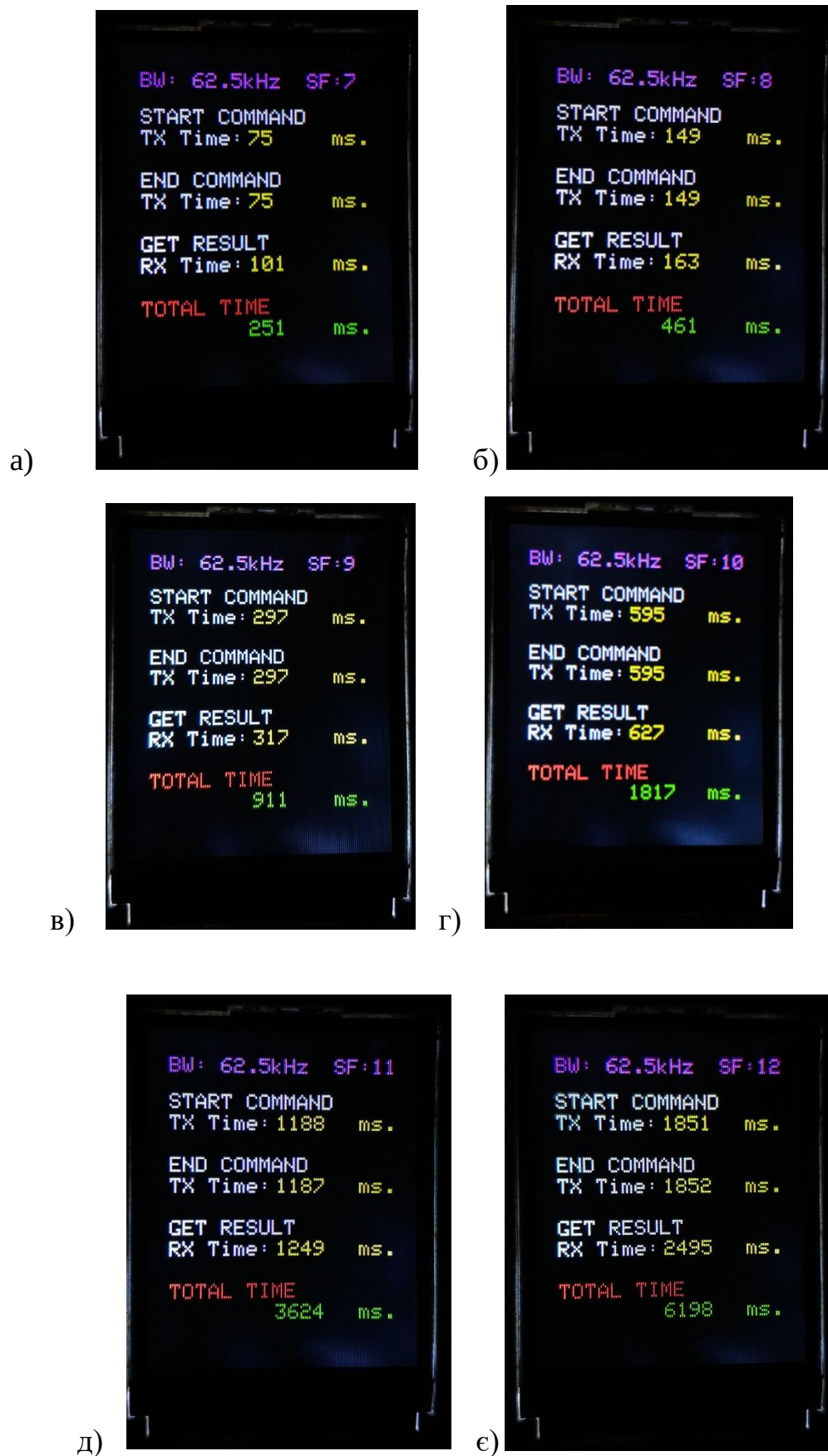


Рисунок 3.11 – Дослідження швидкодії при: а) SF – 7; б) SF – 8; в) SF – 9; г) SF – 10; д) SF – 11; е) SF – 12;

Мішень знаходилася від пульта на відстані 100м, адже згідно літературних джерел, відстань на швидкість передачі в технології LoRa не має впливу. Згідно проведених досліджень побудовані наступні графічні залежності (Рисунок 3.12-3.14):

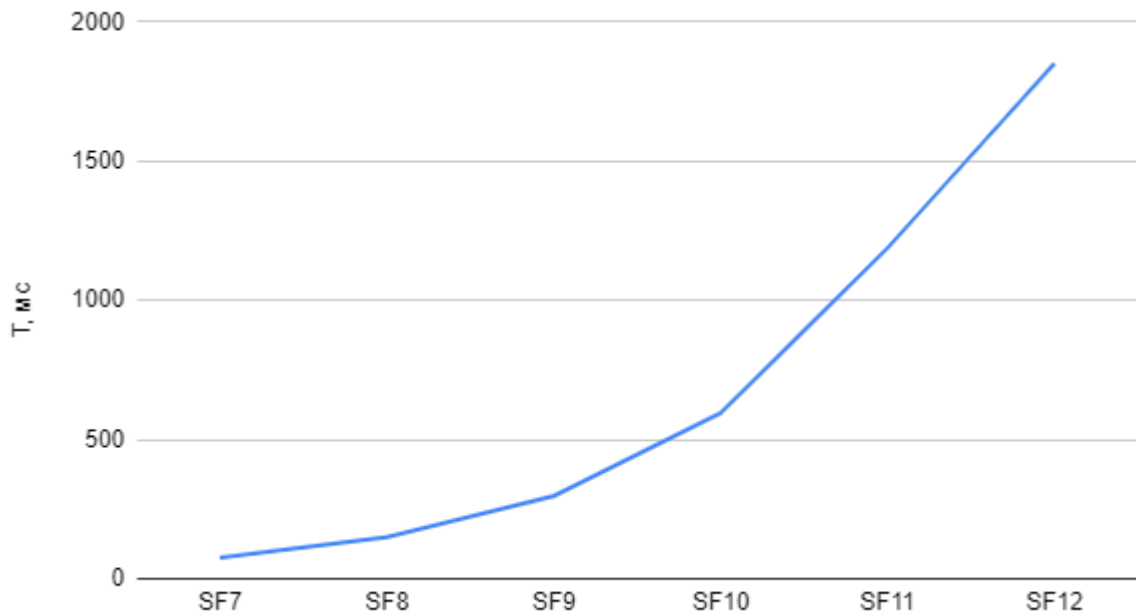


Рисунок 3.12 – Залежність часу передавання при початку або закінченню підрахунку від коефіцієнта розповсюдження

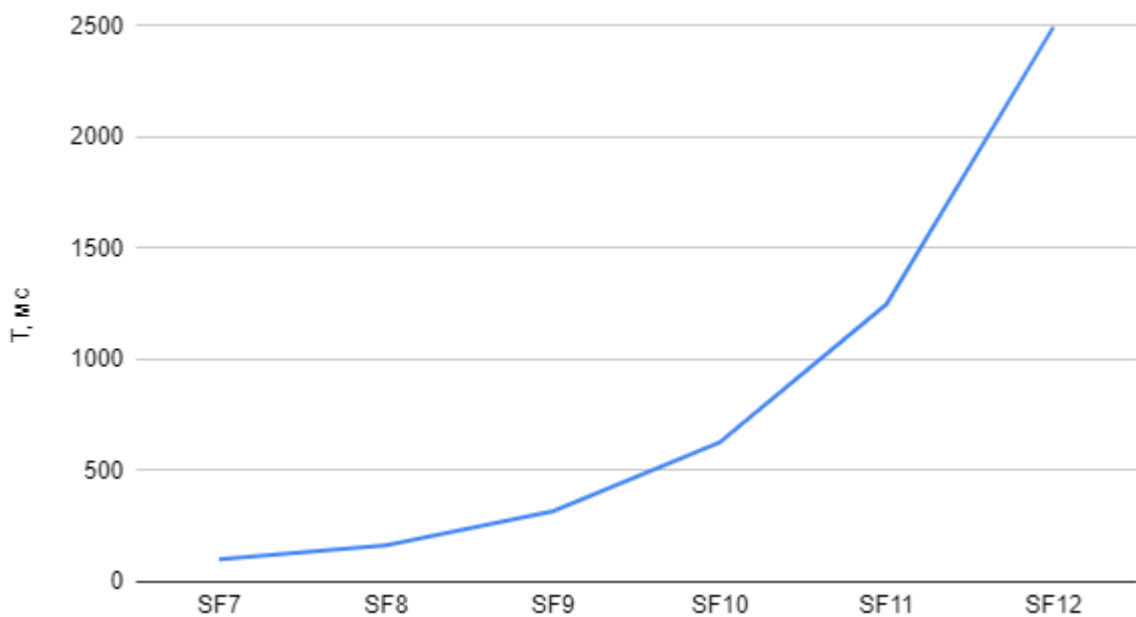


Рисунок 3.13 – Залежність часу передавання при передаванні інформації про кількість влучень від коефіцієнта розповсюдження

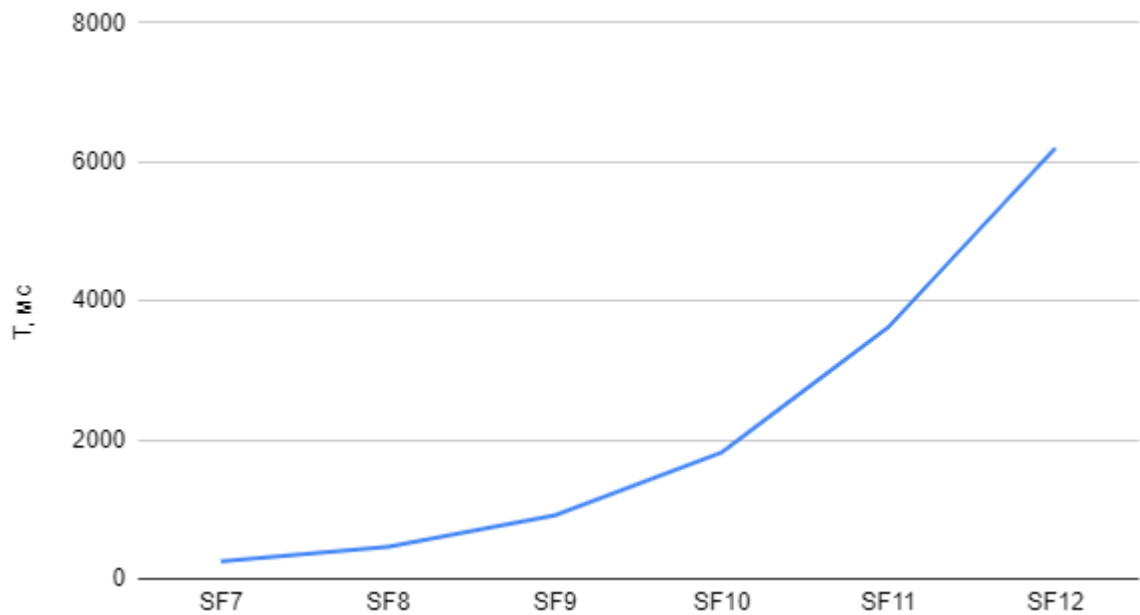


Рисунок 3.14 – Залежність часу передавання всієї сесії від коефіцієнта розповсюдження

Згідно з графічними залежностями представленими на рисунках 3.12-3.14, зі збільшенням коефіцієнта розповсюдження, збільшується і час на передавання інформації чи команд між пультом і мішенями. На рисунках показаний час для однієї мішені.

3.4 Дослідження макету

Виконано дослідження роботи макету за реальних умов в сільській місцевості. Дослідження виконані в залежності від коефіцієнту розширення спектру. На рисунку 3.15 наведено зображення макету системи моніторингу стрілецького полігону. За допомогою даного макету проводилися експериментальні дослідження та вимірювання системи.

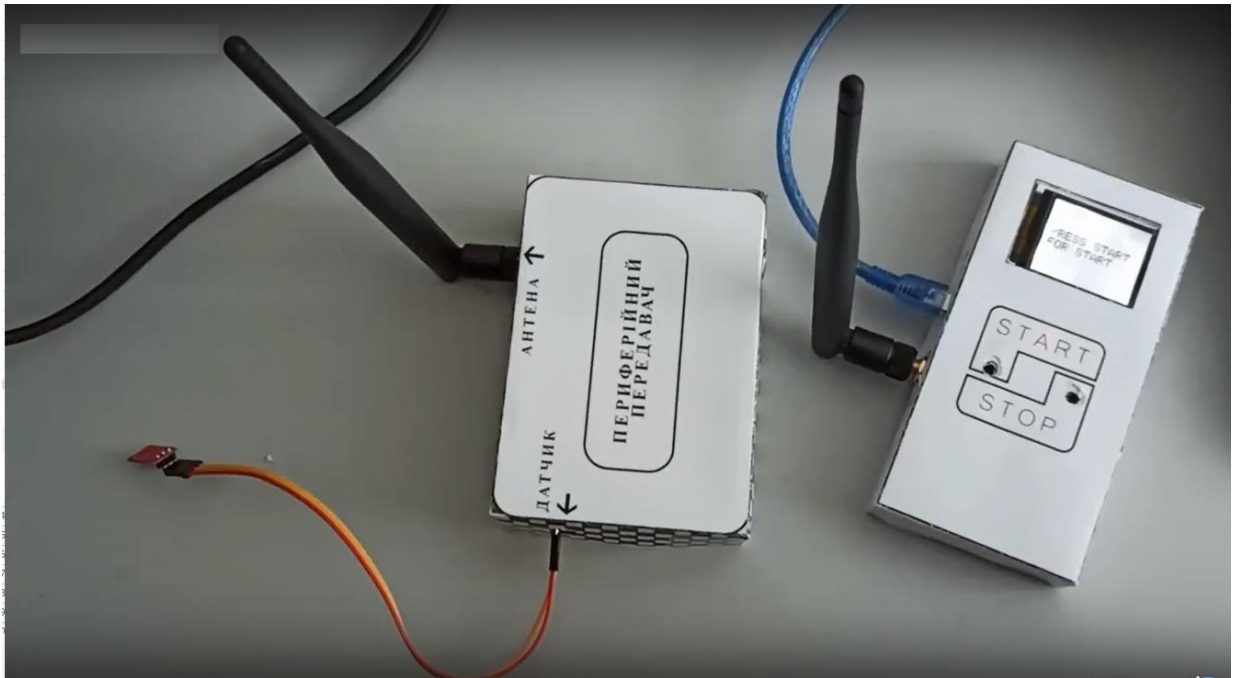


Рисунок 3.15 – Макет системи моніторингу стрілецького полігону

Дослідження макету проводилися недалеко від міста Житомир. Пульт був розміщений на висоті 1,5 м над землею та надійно зафіксований, передавач було розміщено в трьох точках, поступово збільшуючи дальність та знаходився на висоті 3 м над землею. Значення SNR та RSSI було досліджено для різних значень коефіцієнта розповсюдження. На рисунку 3.16а для $SF=10$, 3.16б для $SF=12$. Значення отримані в результаті досліджень наведено на рисунках 3.17 а, б, а також побудовані графічні залежності (Рисунок 3.18а,б-3.19а,б).



Рисунок 3.16а – Дослідження макету при SF=10



Рисунок 3.16б – Дослідження макету при SF=12



Рисунок 3.17а – Дослідження параметрів системи при SF=10



Рисунок 3.17б - Дослідження параметрів системи при SF=12

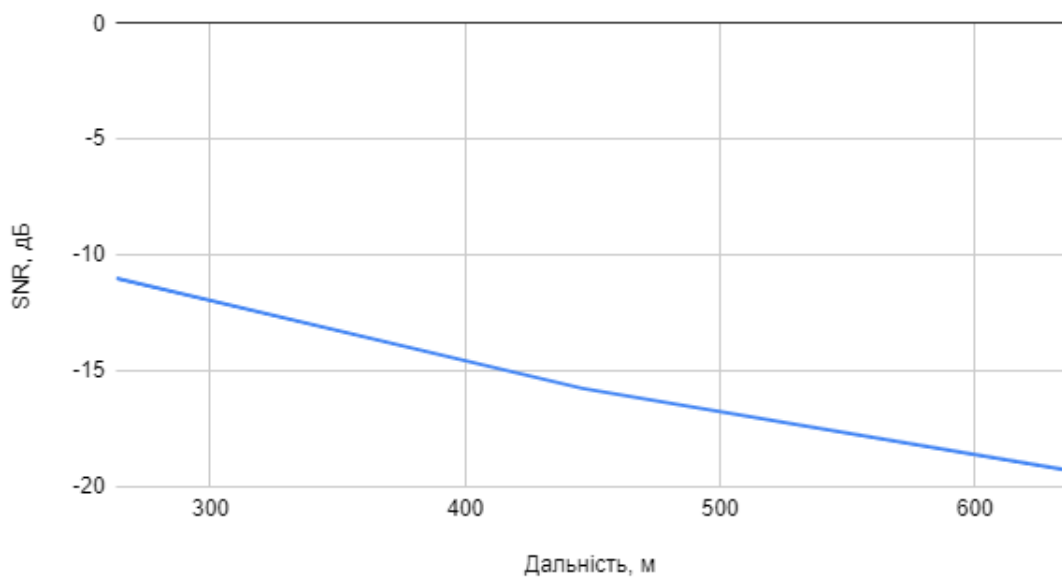


Рисунок 3.18 а - Залежність SNR від дальності при SF=10

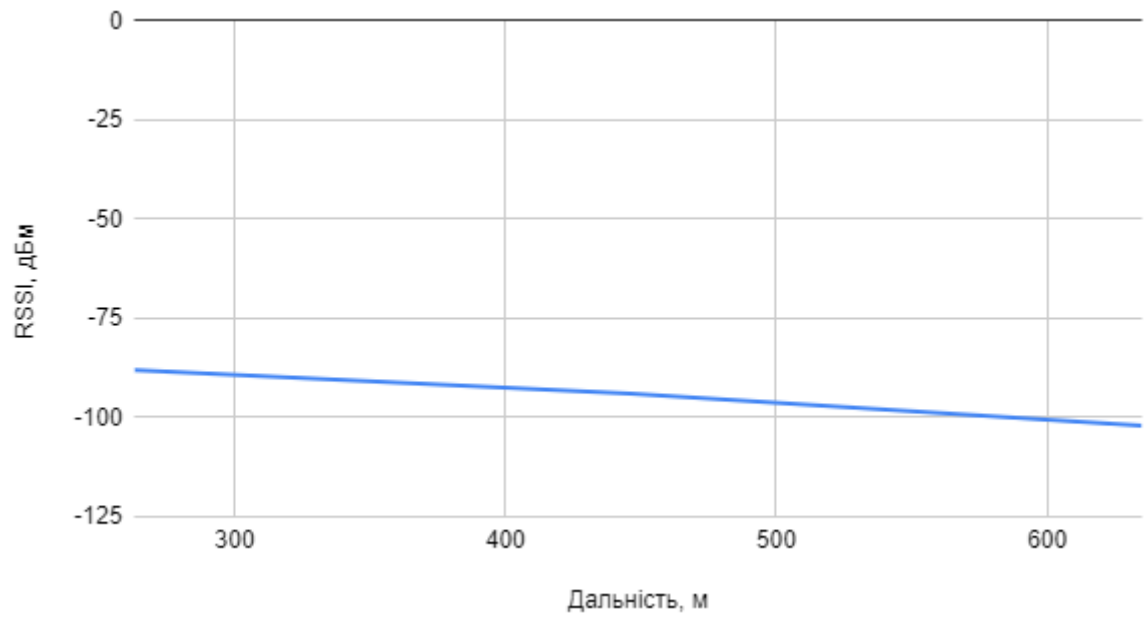


Рисунок 3.18 б - Залежність RSSI від дальності при SF=10

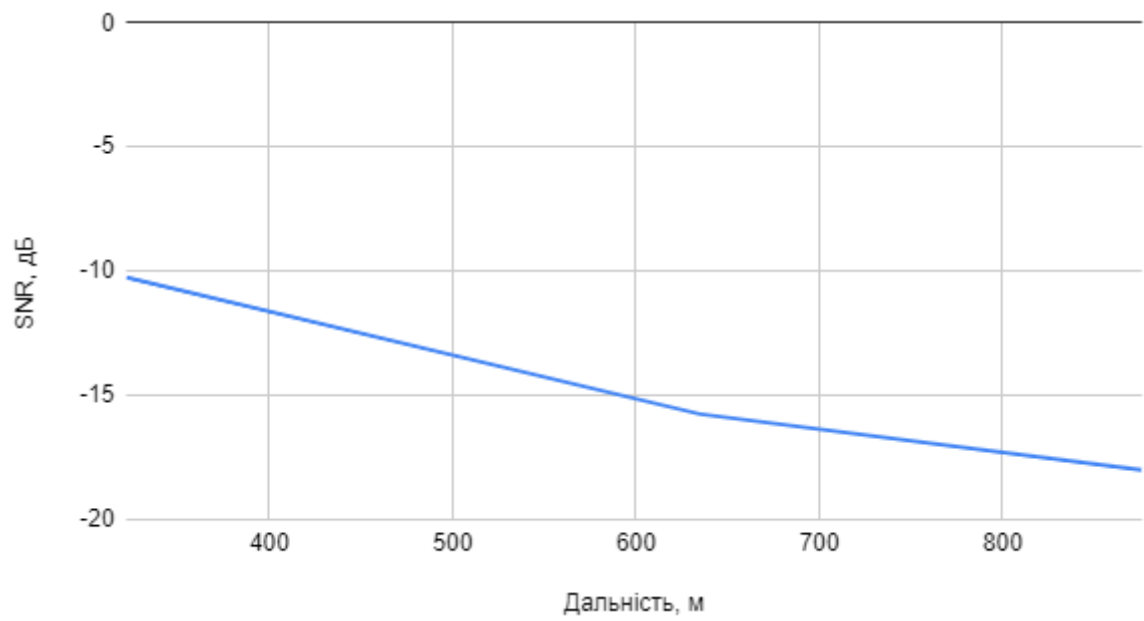


Рисунок 3.19 а - Залежність SNR від дальності при SF=12

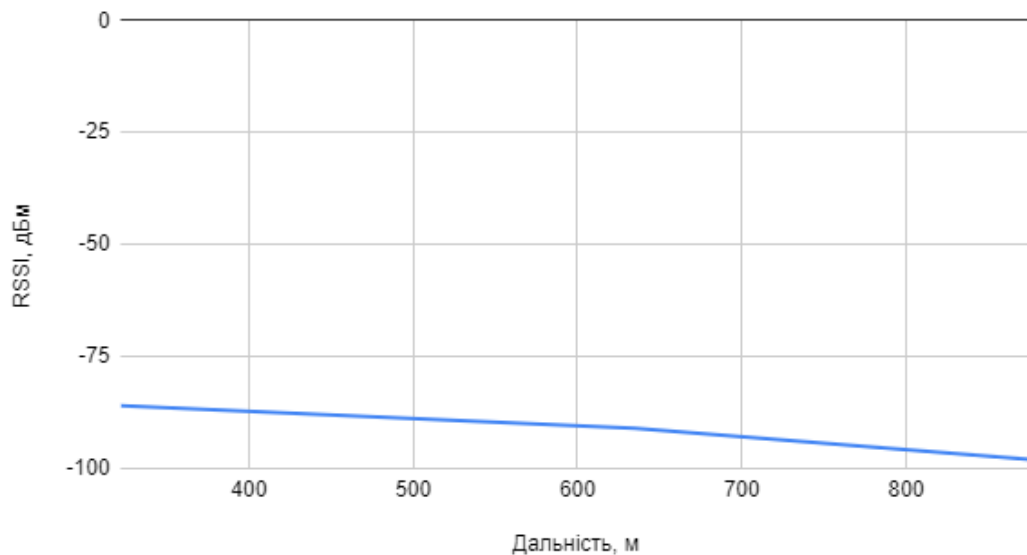


Рисунок 3.19 б - Залежність RSSI від дальності при SF=12

Для обох значень SF, зі збільшенням дальності збільшуються також і RSSI та SNR.

Висновки: в даному розділі дослідження проводилися з використанням макету. Отже теоретичні розрахунки співпадають з практичними дослідженнями. Мають місце невеликі відхилення щодо швидкості передавання, які скоріше за все пов'язані з читанням бібліотек. Також була досліджена завадостійкість системи, система показала гарний результат, а саме: при амплітуді завади, яка рівна половині корисного сигналу, сигнал добре розрізняється і завада немає сильного впливу на нього.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі виконано аналіз літературних джерел за темою роботи, аналіз пристроїв та систем, а також огляд патентних рішень.

З огляду на існуючі системи, була обрана система з використанням технології LoRa, адже система має низьку собівартість, низьке енергоспоживання, не складна під час розгортання, а також має змогу передавати інформацію до 10 км на відкритому просторі.

LoRaWAN - відкритий протокол зв'язку, який визначає архітектуру системи. Цей протокол передбачає топологію типу «зірка». LoRaWAN розроблявся з метою організації зв'язку між недорогими пристроями, які можуть працювати від батарей (аккумуляторів). Для забезпечення прийнятної відносини швидкості передачі до енергоспоживання, протокол передбачає різні класи вузлів. Протокол LoRaWAN визначає конкретний набір швидкостей передачі даних, але реалізація фізичного рівня моделі OSI буде залежати від обраної мікросхеми.

На основі технології LoRa було розроблено систему моніторингу стрілецького полігону, описано її склад та алгоритм роботи.

Було проведено дослідження основних параметрів системи. Швидкодію системи було досліджено в умовах приміської території. Попередньо швидкодію було розраховано, опираючись на дані з даташиту LoRaWAN. Так при коефіцієнті розширення спектру $SF=7$, тривалість сесії 0,238 с в теоретичних розрахунках та 0,251 с в практичному дослідженні, розбіжність незначна і є допустимою, пов'язана з затримкою під час читання бібліотеки.

Також було проведено залежність показника рівня прийнятого сигналу та відношення сигнал/шум від відстані між передавачем і приймачем. Для цього передавач було розміщено на 1,5 метри над рівнем землі, а приймач на 3 метри з шириною спектру $BW = 62,5$ кГц. При $SF=10$, та на відстані 263 м $SNR=-11dB$, $RSSI=-88dBm$, на відстані 635 м $SNR=-19,25dB$, $RSSI = -102dBm$. Отже зі

збільшенням відстані, показники зменшуються, але в допустимих значеннях. При порівнянні цих значень на тій же відстані 635 м при SF=12 (RSSI=-91dBm, SNR=-15,75 dB) стає очевидним, що збільшенням коефіцієнту спектру зростає і дальність передачі системи, а також покращується відношення SNR та потужність прийнятого сигналу.

Також було удосконалено алгоритм передавання даних за допомогою вагового множення та врахування суми відліків, завдяки цьому зменшилася кількість втрат корисного сигналу при його розпізнаванні.

Окрім цього було проведено дослідження з завадостійкості системи, і при порівнянні початкового сигналу, з сигналом, на який накладені шуми рівний половині корисного, сигнал можна розрізнити, однак зріс рівень шумів з 6 до 30, так як амплітуда сигналу 1090, то суттєвого впливу на нашу систему.

Отже, під час виконання теоретичних розрахунків та практичних досліджень, було доведено, що дана система моніторингу стрілецького полігону відповідає основним поставленим до неї вимогам: завадозахищеність, дальність роботи до 2 км та робота з 10 до 100 мішеней в системі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ципоренко В. Г. Програмно-конфігурована система моніторингу стрілецького полігону / В. Г. Ципоренко, М. А. Ващенко, І. В. Меньшикова / Тези доповідей XI Міжнародної науково-технічної конференції «Інформаційно-комп'ютерні технології – 2020 (ІКТ-2020)», ст 179.
2. 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.
3. Іванов І. В. Стрілецькі тренажери: замість кулі – лазерний промінь / І.В. Іванов. – Київ: Видавництво "Наука", 2017. – 128 с.
4. Петренко П. П'ять полювань / Петро Петренко. – 2018. – №10. – С. 52.
5. Лазерні стрілецькі тренажери [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.lasertraining.com/>
6. Шевченко І. ЛАЗЕР: стрілецький тренажер для ГТО/НВП [Електронний ресурс] / Іван Шевченко. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.shootingtraining.com/ua/>
7. Лазерний тир [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://tyr.laser.ua/>
8. Лазерний стрілецький тир "Патріот" [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://patriot.laser.com.ua/>
9. Лазерний стрілецький комплекс "Рубін" ІЛТ-001 "Патріот" [Електронний ресурс]. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.rubincomplex.ua/>

10. Лазерний стрілецький тир "Рубін-У" [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://example.ua/products/lazernyy-strelkovyy-tyr-rubin-u>
11. Малкова В. Безпроводні лінії зв'язку [Електронний ресурс] / Вікторія Малкова – Режим доступу до ресурсу: <https://sites.google.com/site/vikmalko95/osnovnye-vidy-linij-svazi/besprovodnye-linii-svazi>.
12. Зубков О. В. Стрілецький лазерний тренажер з відображенням траєкторії точки прицілювання [Електронний ресурс] / О. В. Зубков, Г. І. Сідоров. – 2011. – Режим доступу до ресурсу: <https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=158873>.
13. Сліпченко М. І. Удосконалений електронний лазерний стрілецький тренажер [Електронний ресурс] / М. І. Сліпченко, В. М. Карташов. – 2013. – Режим доступу до ресурсу: <https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=191378>.
14. Semtech Corporation. SX1278 Datasheet (PDF) [Електронний ресурс] / Semtech Corporation. – 2015. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.alldatasheet.com/datasheetpdf/pdf/800241/SEMTECH/SX1278.html>.
15. Коваленко О.В., Литвиненко І.С. "Застосування LoRaWAN технологій у міському середовищі" // Український науковий журнал, Випуск 45, 2020 рік. С. 77-85.
16. Ципоренко В.Г. Система попередження техногенних аварій / В.Г. Ципоренко, І.В. Меньшикова, М.А. Ващенко // IV Всеукраїнська 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».

17. What is LoRa? // Technology - MickMake - Live. Learn. Make. URL: <https://www.mickmake.com/post/what-is-lora-technology/>
18. Hope RF Microelectronics. RFM95/96/97/98(W)—Low Power Long Range Transceiver Module, v1.0; Hope RF Microelectronics: Shenzhen, China, 2016.
19. Перспективи застосування технології LTE в межах концепції «розумного міста». Магістерська дисертація / П. О. Боковий. – Київ, 2019.
20. Шевченко В.О., Пономаренко Ю.М. "Впровадження LoRaWAN для моніторингу довкілля" // Екологічний вісник України, Випуск 7, 2020 рік. С. 89-96.
21. Мироненко А.П., Лазаренко В.М. "Оптимізація параметрів LoRaWAN мереж" // Технічний вісник, Випуск 33, 2019 рік. С. 56-63.
22. LoRa SX1276/77/78/79 Datasheet. Режим електронного доступу: https://cdn-shop.adafruit.com/product-files/3179/sx1276_77_78_79.pdf