

Міністерство освіти і науки України

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії

(повна назва факультету)

Кафедра радіотехнічних систем

(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Апаратно-програмний комплекс вимірювання діаграм спрямованості

антен з використанням БПЛА

Виконав: студент VI курсу, групи РАм-61

172 Електронні комунікації та

спеціальності радіотехніка

(шифр і назва спеціальності)

		Пеп'юк І В.
	(підпис)	(прізвище та ініціали)
Керівник		Дунець В.Л.
	(підпис)	(прізвище та ініціали)
Нормоконтроль		Хвостівська Л.В.
	(підпис)	(прізвище та ініціали)
Завідувач кафедри		Дунець В.Л.
	(підпис)	(прізвище та ініціали)
Рецензент		
	(підпис)	(прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії

(повна назва факультету)

Кафедра радіотехнічних систем

(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Дунець В.Л.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

26» листопада 2025 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня Магістр

(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 172 Електронні комунікації та радіотехніка

(шифр і назва спеціальності)

Студенту Пеп'юк Ігору Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Апаратно-програмний комплекс вимірювання діаграм спрямованості антен із використанням БПЛА

Керівник роботи Дунець Василь Любомирович, к.т.н., завідувач кафедри РТ

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «26» листопада 2025 року № 4/7-1038.

2. Термін подання студентом завершеної роботи

3. Вихідні дані до роботи

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ.

Розділ 1. Аналітична частина

Розділ 2. Основна частина

Розділ 3. Науково-дослідна частина

Розділ 4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

Висновки

Перелік використаних джерел

Додатки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	к.т.н., завідувач кафедри інжинірингу машинобудівних технологій Окіпний І.Б		
Безпека в надзвичайних ситуаціях	ст. викл. кафедри ОХ, Стручок В.С.		

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Ознайомлення з завданням до кваліфікаційної роботи		Виконано
2.	Підбір джерел по темі кваліфікаційної роботи		Виконано
3.	Переклад та опрацювання джерел по темі кваліфікаційної роботи		Виконано
4.	Виконання дослідження по темі кваліфікаційної роботи		Виконано
5.	Оформлення розділу «Аналітична частина»		Виконано
6.	Оформлення розділу «Основна частина»		Виконано
7.	Оформлення розділу «Науково-дослідна частина»		Виконано
8.	Оформлення розділу «Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях»		Виконано
9.	Підготовка графічного матеріалу		Виконано
10.	Оформлення кваліфікаційної роботи		Виконано
11.	Нормоконтроль		Виконано
12.	Перевірка на плагіат		Виконано
13.	Попередній захист кваліфікаційної роботи		Виконано
14.	Захист кваліфікаційної роботи		

Студент

(підпис)

Пеп'юк І.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Дунець В.Л.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Апаратно-програмний комплекс вимірювання діаграм спрямованості антен з використанням БПЛА» // Кваліфікаційна робота // Пеп'юк Ігор Володимирович // Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії, кафедра радіотехнічних систем, група РАМ-61 // Тернопіль, 2025 // с. 84, рис. – 37, табл. – 1, додат. – 1, бібліогр. – 23.

Ключові слова: БЕЗПІЛОТНИЙ ЛІТАЛЬНИЙ АПАРАТ, ДІАГРАМА СПРЯМОВАНOSTІ, АНТЕНА, СИГНАЛ.

Кваліфікаційна робота спрямована на розроблення вимірювальної системи для дослідження діаграми спрямованості антен із застосуванням безпілотного літального апарата.

У процесі виконання кваліфікаційної роботи:

- Проведено аналіз існуючих платформ безпілотних літальних апаратів та відповідних систем керування польотом.

- Обґрунтовано вибір методів цифрової обробки сигналів, реалізованих у середовищі Matlab, що забезпечують коректний аналіз експериментальних даних.

- Розроблено систему вимірювання діаграми спрямованості зовнішньої антени, яка забезпечує отримання необроблених даних із програмно-визначуваного радіоприймача (SDR) та подальше формування діаграми спрямованості на основі результатів обробки сигналів.

У роботі здійснено детальний аналіз структури вимірювальної системи на основі безпілотного літального апарата, описано принципи організації радіочастотних вимірювань із використанням програмно-керованих радіоприймачів, а також розглянуто методи цифрової обробки сигналів, необхідні для визначення спрямованих характеристик досліджуваної антени.

ANNOTATION

Thesis topic: «Hardware and software complex for measuring antenna directivity patterns using UAVs» // Qualification work // Pepiuk Igor Volodymyrovych // Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Faculty of Applied Information Technologies and Electrical Engineering, Department of Radio Engineering Systems, group RAm-61 // Ternopil, 2025 // P. 84, fig. – 37, tabl. – 1, annexes. – 1, references – 23.

Keywords: UNMANNED AERIAL VEHICLE, DIRECTIONAL DIAGRAM, ANTENNA, SIGNAL.

The thesis is aimed at developing a measurement system for studying antenna directional patterns using unmanned aerial vehicles.

In the process of completing the qualification work:

- An analysis of existing unmanned aerial vehicle platforms and corresponding flight control systems was conducted.
- The choice of digital signal processing methods implemented in the Matlab environment, which ensure correct analysis of experimental data, was justified.
- A system for measuring the directional pattern of an external antenna was developed, which provides raw data from a software-defined radio (SDR) and further formation of the directional pattern based on the results of signal processing.

The paper provides a detailed analysis of the structure of a measuring system based on an unmanned aerial vehicle, describes the principles of organizing radio frequency measurements using software-controlled radio receivers, and considers the methods of digital signal processing necessary to determine the directional characteristics of the antenna under study.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	11
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	12
1.1 Діаграма спрямованості антени.....	12
1.2 Система вимірювання антен	13
1.3 Обмеження безвідбивальних камер.....	Помилка! Закладку не визначено.16
1.4 Запропоноване рішення.....	16
1.5 Висновок до розділу 1	17
РОЗДІЛ 2. ОСНОВНА ЧАСТИНА.....	19
2.1 Система безпілотних літальних апаратів	19
2.2 Гексакоптер DJI Spreading Wings S900	20
2.3 Система управління польотом.....	21
2.3.1 Польовий контролер Pixhawk	22
2.3.2 Радіоуправління Spektrum DX8	23
2.3.3 Наземна станція управління.....	24
2.3.4 Система живлення.....	25
2.4 Процедура польоту	25
2.5 Система вимірювання радіочастот	27
2.5.1 Програмно-кероване радіо Ettus.....	27
2.5.2 Передавальна антена.....	34
2.5.3 Переданий сигнал.....	34
2.5.4 13-бітний код Баркера.....	35
2.5.5 Синусоїдальний сигнал безперервної хвилі.....	40
2.6 Отриманий сигнал	43
2.7 Висновок до розділу 2	46
РОЗДІЛ 3. НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА	48
3.1 Структура даних.....	48
3.2 Частота дискретизації.....	49

3.3 Фільтрування.....	50
3.4 Сигнал	51
3.5 Виявлення максимальної потужності сигналу	54
3.6 Усереднення GPS-координат.....	58
3.7 Розрахунок азимутальних кутів	58
3.8 Розрахунок кута підйому	59
3.9 Корекція діапазону	60
3.10 Розрахунок кута підйому.....	62
3.11 Вимірювання	62
3.11.1 Петльова антена 0–180° азимут, 5° висота, тест на переміщення	62
3.11.2 Петльова антена 0 ° азимут, 0 – 22° висота	68
3.12 Висновок до розділу 3	72
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	74
4.1 Питання щодо охорони праці	74
4.2 Питання щодо безпеки в надзвичайних ситуаціях.....	76
4.3 Висновок до розділу 4	80
ВИСНОВКИ.....	81
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ	83
ДОДАТКИ	

ВСТУП

Актуальність теми. Визначення діаграми спрямованості є одним із базових етапів дослідження, налаштування та верифікації характеристик радіотехнічних систем. Результати таких вимірювань дають змогу оцінити відповідність реальних параметрів антени розрахунковим моделям, використаним на етапі її проєктування. Традиційно вимірювання діаграм спрямованості здійснюються у спеціалізованих безвідбивальних камерах, що забезпечують контрольовані умови експерименту. Водночас у низці практичних випадків проведення випробувань у таких приміщеннях є ускладненим або неможливим. Зокрема, це стосується великогабаритних антенних систем, які не підлягають розміщенню в стандартних випробувальних комплексах, антен, інтегрованих у масштабні рухомі платформи (літальні апарати, морські судна), а також ситуацій, коли необхідно врахувати вплив реального середовища експлуатації на спрямовані властивості антени. У зв'язку з цим актуальним є розроблення альтернативних підходів до вимірювання діаграм спрямованості в польових умовах.

Мета. Метою магістерської роботи є розроблення концептуальної моделі системи вимірювання діаграми спрямованості антени з використанням безпілотного літального апарата та двох програмно-конфігурованих радіостанцій.

Для досягнення поставленої мети передбачається розв'язання таких наукових завдань:

1. Здійснити аналіз сучасних методів вимірювання діаграм спрямованості великогабаритних антен у польових умовах та визначити їхні основні обмеження;
2. Обґрунтувати доцільність застосування компактного безпілотного літального апарата для дослідження антенних характеристик без необхідності їх демонтажу;

3. Розробити методику вимірювання діаграми спрямованості антени із залученням БПЛА;

4. Сформулювати вимоги до параметрів БПЛА та вимірювального обладнання, зокрема щодо точності позиціонування, стабільності польоту та характеристик корисного навантаження;

5. Виконати оцінювання точності та достовірності результатів, отриманих запропонованим методом, у порівнянні з традиційними способами вимірювання;

6. Проаналізувати практичну ефективність розробленого підходу з позицій часових витрат та зручності проведення вимірювань.

Об'єкт дослідження: Процес вимірювання та аналізу діаграм спрямованості радіоантен у реальних умовах із використанням програмно-визначених радіосистем і мобільних вимірювальних платформ.

Предмет дослідження: Методи та алгоритми вимірювання, обробки й аналізу радіочастотних сигналів для визначення діаграм спрямованості антен із використанням програмно-визначених радіостанцій (SDR), навігаційних даних та засобів просторового позиціонування.

Методи дослідження: Чисельне електромагнітне моделювання антенних систем; експериментальні радіочастотні вимірювання з використанням програмно-визначених радіостанцій; методи цифрової обробки сигналів, зокрема фільтрування, кореляційний аналіз і часове усереднення; геометричні та тригонометричні методи визначення кутових параметрів за GPS-координатами; статистичні методи усереднення та порівняльний аналіз експериментальних і модельних результатів.

Наукова новизна одержаних результатів. Полягає в розробленні та експериментальній апробації комплексної методики вимірювання діаграм спрямованості антен, що поєднує програмно-визначені радіостанції, навігаційні дані та кореляційні методи обробки сигналів. Запропоновано підхід до визначення просторових характеристик антен на основі обробки необроблених комплексних I/Q-даних із використанням коду Баркера та процедур

багаторівневого часового усереднення, що забезпечує підвищення відношення сигнал/шум за умов низької потужності передавання. Уперше продемонстровано можливість отримання достовірних азимутальних і піднесених діаграм спрямованості антен у польових умовах із корекцією дальності та положення на основі GPS-даних, а також підтверджено узгодженість експериментальних результатів із чисельним електромагнітним моделюванням.

Практичне значення одержаних результатів. Суть результатів полягає в можливості використання розробленої методики та вимірювальної системи для оперативного й відносно маловитратного визначення діаграм спрямованості антен у реальних умовах експлуатації без застосування спеціалізованих антенних полігонів або безехових камер. Запропонований підхід може бути використаний під час налагодження, калібрування та верифікації антен у короткохвильовому та суміжних діапазонах частот, а також для перевірки результатів електромагнітного моделювання. Отримані алгоритми обробки сигналів і програмна реалізація на базі SDR можуть бути інтегровані в мобільні або стаціонарні вимірювальні комплекси, що розширює можливості практичних радіочастотних вимірювань у наукових дослідженнях, інженерних розробках і прикладних задачах радіозв'язку.

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АЦП – аналогово-цифровий перетворювач.

БПЛА – безпілотний літальний апарат.

ВЧ – високі частоти.

ЕРШ – електронні регулятори швидкості.

ШІМ – Широтно-імпульсна модуляція.

ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач.

FPGA – Field-Programmable Gate Array (програмованої матриці логічних елементів).

GPS – Global Positioning System. (Глобальна система позиціонування).

SDR – Software-Defined Radio (програмно-кероване радіо).

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТЧНА ЧАСТИНА

1.1 Діаграма спрямованості антени

У процесі проектування та експериментального дослідження антен і антенних решіток необхідно враховувати сукупність параметрів, що визначають їхні електромагнітні властивості. Одним із найбільш інформативних і широко застосовуваних характеристик є діаграма спрямованості. Згідно з визначенням Інституту інженерів з електротехніки та електроніки (IEEE), діаграма спрямованості антени являє собою просторовий розподіл величини, що описує електромагнітне поле, сформоване антеною, який може бути поданий у математичній формі або у вигляді графічного зображення [1].

Зазвичай опис діаграм спрямованості здійснюється в сферичній системі координат, що зумовлено її зручністю для аналізу кутового розподілу випромінювання. Застосування цієї системи координат забезпечує чітке розмежування азимутальної та кутової (висотної) площин, які є базовими напрямками вимірювань під час дослідження антенних характеристик. На рисунку 1.1 наведено типову схему сферичної системи координат, що визначається радіальною координатою r та кутами (θ, φ) .

Діаграма спрямованості антени є графічною формою подання просторового розподілу щільності випромінюваної потужності [2]. Під час експериментальних вимірювань, як правило, забезпечується фіксована відстань між досліджуваною антеною (antenna under test, AUT) та вимірювальним обладнанням. Водночас у деяких випадках значення цієї відстані R , показане на рисунку 1.1, може змінюватися, за умови подальшого застосування відповідних коригувальних процедур до отриманих результатів. Для забезпечення зручності аналізу та порівняння результати вимірювань зазвичай нормалізують відносно максимального рівня потужності та подають у логарифмічній шкалі в

децибелах (дБ). За такої нормалізації у напрямку максимального випромінювання рівень діаграми дорівнює 0 дБ, тоді як для інших напрямів спостерігаються від'ємні значення.

Важливою функцією діаграми спрямованості є візуалізація основних структурних елементів антенного випромінювання, зокрема головного променя, другорядних пелюсток і нульових напрямків. Відповідно до [2], головним променем називають пелюстку, в межах якої зосереджений напрямок максимальної випромінюваної потужності. До другорядних пелюсток відносять усі інші пелюстки, що не містять цього максимуму. Нульові точки відповідають напрямкам, у яких рівень потужності наближається до мінімальних значень. На рисунку 1.2, наведеному в [2], представлено умовний приклад діаграми спрямованості з відображенням характерних елементів її структури. Зокрема, бічна пелюстка є різновидом другорядної пелюстки, розташованої поблизу головного променя, тоді як задня пелюстка знаходиться в напрямку, просторово протилежному основному напрямку випромінювання. Обидва зазначені типи належать до класу другорядних пелюсток.

1.2 Система вимірювання антен

Системи вимірювання параметрів внутрішніх антен набули значного поширення внаслідок інтенсивного розвитку мережевих аналізаторів протягом останніх років. Функціональні можливості сучасних приладів такого типу забезпечують оцінювання як імпедансних характеристик антени, що описуються коефіцієнтом відбиття S_{11} , так і її просторових характеристик випромінювання, зокрема діаграми спрямованості, пов'язаної з параметром S_{12} . Визначення імпедансу антени може здійснюватися практично в будь-яких умовах, за наявності можливості безпосереднього підключення мережевого аналізатора до досліджуваної антени (antenna under test, AUT). Поява компактних портативних мережевих аналізаторів з автономним живленням істотно розширила сферу застосування таких вимірювань, зробивши їх

доступними на різних етапах інтеграції антени та в різноманітних умовах експлуатації.

Водночас вимірювання діаграми спрямованості є суттєво складнішим завданням, оскільки потребує використання щонайменше двох антен — досліджуваної та еталонної передавальної — а також забезпечення достатньої просторової відстані між ними. Така відстань необхідна для формування умов далекого електромагнітного поля, за яких можливе коректне визначення спрямованих характеристик антени.

Дослідження антенних характеристик у більшості випадків проводиться в спеціалізованих електромагнітних безвідбивальних камерах, призначених для створення контрольованого вимірювального середовища. Конструкція таких камер передбачає можливість керованого обертання досліджуваної антени (AUT) навколо кількох осей, що забезпечує формування повних азимутальних та кутових діаграм випромінювання. За оптимальних умов експерименту конфігурація вимірювань має максимально відповідати реальним умовам експлуатації антени, зокрема випадкам її встановлення на транспортних засобах або інших носіях, оскільки навколишнє середовище істотно впливає на форму та параметри діаграми спрямованості.

Разом із тим реалізація таких вимірювань часто ускладнюється технічними обмеженнями, пов'язаними з масо-габаритними характеристиками поворотних механізмів, що використовуються всередині камери. У разі дослідження антен із малим коефіцієнтом підсилення опорні елементи та системи позиціонування повинні виготовлятися з матеріалів, які є радіопрозорими в робочому діапазоні частот. Використання таких матеріалів дає змогу зменшити рівень паразитних відбиттів і забезпечити умови, за яких енергія, що приймається антеною, надходить переважно безпосередньо від передавального джерела, а не внаслідок розсіювання сигналів усередині вимірювального об'єму камери.

Під час проектування електромагнітних безвідбивальних камер одним із визначальних параметрів, поряд із коректною організацією радіочастотного та

поворотного обладнання, є розмір робочого об'єму. Габарити вимірювального простору повинні відповідати не лише геометричним розмірам досліджуваної антени (AUT) або платформи, на якій вона змонтована, але й робочому частотному діапазону антенної системи.

Найбільш поширеним типом таких вимірювальних приміщень є класична прямокутна безвідбивальна камера. Типові внутрішні розміри камер цього класу наведено на рисунку 1.3 у [3]. Для забезпечення коректного визначення діаграми спрямованості в зоні далекого поля передавальну антену необхідно розташовувати на відстані, що відповідає умовам формування далекого електромагнітного поля досліджуваної антени. Величина цієї відстані R визначається співвідношенням $R = 2D^2/\lambda$, де D — максимальний геометричний розмір антени, а λ — найбільша довжина хвилі в її робочому діапазоні. Вибір такого значення R забезпечує виконання стандартної вимоги щодо допустимої фазової нерівномірності, яка не перевищує $22,5^\circ$, у випадку, коли розміри антени є співмірними з довжиною хвилі [2].

Для певних спеціалізованих завдань, зокрема у радіопеленгації, необхідно забезпечити значно меншу фазову різницю, що, у свою чергу, вимагає збільшення відстані до зони далекого поля. У випадку, якщо допустимий фазовий зсув не повинен перевищувати 5° , відстань R визначається за співвідношенням: $R = 9D^2/\lambda$.

Інші геометричні параметри прямокутної безвідбивальної камери обчислюють за формулою: $W = 2X + D$, де X приймають рівним або найбільшій довжині хвилі робочого діапазону, або максимальному розміру антени D — залежно від того, яке з цих значень менше [3]. Зазвичай висота камери визначається рівною розрахованій ширині W . Слід зазначити, що наведені розміри стосуються внутрішніх габаритів приміщення та повинні враховувати товщину шарів радіопоглинаючого матеріалу, що покриває стіни камери [3].

1.3 Обмеження безвідбивальних камер

Діапазон високих частот (ВЧ) є одним із найбільш поширених для організації радіозв'язку. Згідно з визначенням Міжнародного союзу електрозв'язку (МСЕ), він охоплює частоти від 3 до 30 МГц, хоча на практиці нижня межа іноді розглядається як 2 МГц [4]. Антени, призначені для роботи в цьому діапазоні, через низьку частоту мають значні фізичні розміри. Прикладами горизонтально поляризованих ВЧ-антен є напівхвильові диполі та антени Ягі. Наприклад, у нижній частині ВЧ-діапазону довжина напівхвильового диполя може досягати приблизно 50 метрів. Масиви антен для радіопеленгації часто формуються з кількох таких елементів, що додатково збільшує загальні габарити системи.

Через великі розміри конструкцій та значну відстань формування далекого поля ВЧ-антен проведення вимірювань у безвідбивальних камерах у багатьох випадках є утрудненим або неможливим. Як наслідок, оцінювання діаграми спрямованості часто здійснюється за допомогою програмних засобів електромагнітного моделювання.

Окрім цього, існують ситуації, коли використання безвідбивальної камери не є оптимальним навіть за наявності можливості розміщення АУТ та платформи всередині приміщення. Це пов'язано з необхідністю врахування впливу реального оточення на характеристики випромінювання антени. До факторів, що можуть суттєво змінювати форму діаграми спрямованості, належать будівлі, інші антени, рельєф місцевості, рослинність та інші елементи довкілля.

1.4 Запропоноване рішення

Для визначення діаграми спрямованості великогабаритних антен або антен, встановлених на масивних платформах у реальних умовах експлуатації, пропонується використання компактного безпілотного літального апарата

(БПЛА). Застосування невеликого комерційного дрона дозволяє проводити вимірювання без демонтажу антени та одночасно враховувати вплив навколишнього середовища, включаючи рельєф місцевості, будівлі та інші об'єкти.

У межах цієї роботи використано гексакоптер DJI S900, який традиційно застосовується для аерозйомки. Політна система БПЛА побудована на базі відкритого програмного забезпечення та контролера Pixhawk. Для генерації вимірювального сигналу на борту апарата встановлено програмно-визначувану радіосистему (SDR) Ettus разом із передавальною антеною. Прийом сигналу здійснюється антеною AUT, на якій також інтегровано SDR Ettus для фіксації та збереження даних, що надалі обробляються у середовищі Matlab.

В якості вимірювального сигналу використано послідовність Баркера, обрану через її сприятливі кореляційні властивості, що детально розглядаються нижче. Передавання та приймання сигналу здійснюються відповідно до спеціально розробленого графіка, який дозволяє виконати усереднення результатів. Такий підхід компенсує відносно низьку потужність передавача та підвищує точність оцінки потужності у визначених кутових напрямках.

1.5 Висновок до розділу 1

У першому розділі проведено аналіз основних аспектів визначення та вимірювання діаграм спрямованості антен. Було охарактеризовано саме поняття діаграми спрямованості, виділено її ключові елементи — головний промінь, другорядні пелюстки та нульові точки — та пояснено, як їхнє графічне та математичне представлення дозволяє оцінювати ефективність роботи антени.

Окрему увагу приділено організації експериментальних вимірювань у безвідбивальних камерах, описано особливості їх конструкції та виявлено обмеження при тестуванні великогабаритних антен, зокрема у ВЧ-діапазоні. Зроблено висновок, що для антен великих розмірів або в умовах, коли

необхідно враховувати вплив реального оточення, класичні безвідбивальні камери є малоефективними.

Для подолання цих обмежень запропоновано використання безпілотного літального апарата як мобільної платформи для передавання та приймання сигналу. Такий підхід забезпечує точне визначення діаграми спрямованості у реальних умовах експлуатації та дозволяє враховувати вплив навколишнього середовища на характеристики антени.

РОЗДІЛ 2

ОСНОВНА ЧАСТИНА

2.1 Система безпілотних літальних апаратів

Розроблена система керування польотом ґрунтувалася на інтеграції чотирьох базових компонентів: безпілотної платформи DJI Spreading Wings S900, польотного контролера Pixhawk, апаратури дистанційного керування DX8 та програмного забезпечення Mission Planner [5], яке виконувало функції наземної станції управління. Програмний комплекс Mission Planner забезпечує стабільний обмін даними з контролером Pixhawk, що дозволяє здійснювати калібрування та налаштування датчиків, формувати та редагувати польотні завдання, а також конфігурувати електронні регулятори швидкості, встановлені на платформі S900. У процесі польоту контролер Pixhawk у режимі реального часу передає інформацію про просторові координати безпілотної літальної апаратури та технічний стан його бортових систем, яка візуалізується засобами Mission Planner.

Обґрунтування вибору контролера Pixhawk і модулів компанії 3D Robotics базувалося на відкритій архітектурі програмного забезпечення, наявності розвиненої спільноти користувачів і доступності технічної підтримки, а також реалізації комплексних засобів безпеки. До ключових механізмів захисту належать наявність відмовостійкого співпроцесора та функція автоматичного повернення до точки зльоту. Резервний процесор здатний автоматично перебрати функції керування у випадку відмови основного обчислювального модуля, що забезпечує можливість безпечного завершення польоту або переходу до ручного режиму керування. Функція автоматичного повернення, у свою чергу, передбачає повернення БПЛА до місця старту за прямолінійною траєкторією на поточній висоті з подальшим виконанням посадки.

Додатковий рівень надійності системи забезпечується використанням автономних моніторів стану акумуляторних батарей. У разі зниження напруги живлення нижче встановленого порогового значення ці пристрої генерують звукове попередження, інформуючи оператора про необхідність своєчасного завершення польотного завдання.

2.2 Гексакоптер DJI Spreading Wings S900

Гексакоптер DJI Spreading Wings S900 (рисунок 2.1) відноситься до класу професійних безпілотних літальних платформ, які широко застосовуються для виконання завдань аерофотозйомки. Конструктивне виконання апарата ґрунтується переважно на використанні вуглецевого волокна та високоміцних полімерних матеріалів, що забезпечує оптимальне поєднання малої маси конструкції, механічної міцності та динамічної стійкості під час польоту.

Доцільність вибору саме цієї моделі зумовлена її високою вантажопідйомністю та здатністю транспортувати додаткове обладнання без істотного скорочення тривалості польотної місії. Зокрема, гексакоптер здатний нести корисне навантаження масою до приблизно 4,8 кг, забезпечуючи при цьому середню тривалість польоту на рівні близько 18 хвилин, що є достатнім для виконання більшості практичних завдань професійної аерозйомки.



Рис. 2.1. Гексакоптер DJI Spreading Wings S900

Гексакоптер S900 оснащений електронними регуляторами швидкості номіналом 40 А, які інтегровані в кожен із шести променів конструкції. Таке конструктивне рішення забезпечує підвищену швидкодію системи керування тягою та збільшену вихідну потужність силової установки. До складу платформи також входить попередньо змонтована плата розподілу живлення, призначена для подачі електроенергії від шестикоміркового літій-полімерного акумулятора до силових двигунів, а також для передачі керувальних широтно-імпульсних сигналів від польотного контролера Pixhawk.

Інтеграція електронних регуляторів швидкості та плати розподілу живлення в базову конструкцію апарата усуває необхідність використання додаткових зовнішніх модулів і виконання їх окремого монтажу. Це, у свою чергу, сприяє загальній оптимізації архітектури безпілотної системи, спрощує процес інтеграції бортового обладнання та зменшує проблеми, пов'язані з обмеженим внутрішнім простором для розміщення компонентів на безпілотному літальному апараті.

2.3 Система керування польотом

Система керування польотом побудована на основі польотного контролера Pixhawk та включає GPS-модуль 3DR і телеметричні радіостанції 3DR [6]. Контролер Pixhawk здійснює обробку навігаційної інформації, що надходить від GPS-модуля, команд керування з апаратури дистанційного керування DX8, а також даних з вбудованих інерціальних датчиків, зокрема гіроскопів.

На підставі комплексного аналізу зазначених вхідних сигналів контролер формує широтно-імпульсні керувальні сигнали, призначені для індивідуального регулювання режимів роботи кожного з шести електродвигунів гексакоптера DJI Spreading Wings S900. Узагальнена блок-схема функціонування системи керування польотом представлена на рисунку 2.2, що ілюструє взаємодію

а саме режиму ручного керування та режиму автоматизованого польоту. Окрім цього, передбачено декілька підрежимів ручного керування, вибір яких визначається рівнем підготовки оператора та специфікою виконуваного завдання.

У процесі польоту контролер здійснює збір і обробку інформації від зовнішніх навігаційних модулів, зокрема GPS-приймача та магнітометра, а також від вбудованих інерціальних сенсорів, до яких належать гіроскопи й акселерометри. На основі аналізу цих даних Pixhawk забезпечує стабілізацію апарата в ручному режимі або виконує автономне керування польотом відповідно до попередньо заданого маршруту. Передавання телеметричної інформації про параметри польоту та технічний стан систем здійснюється за допомогою радіоканалу на частоті 915 МГц до наземної станції керування.

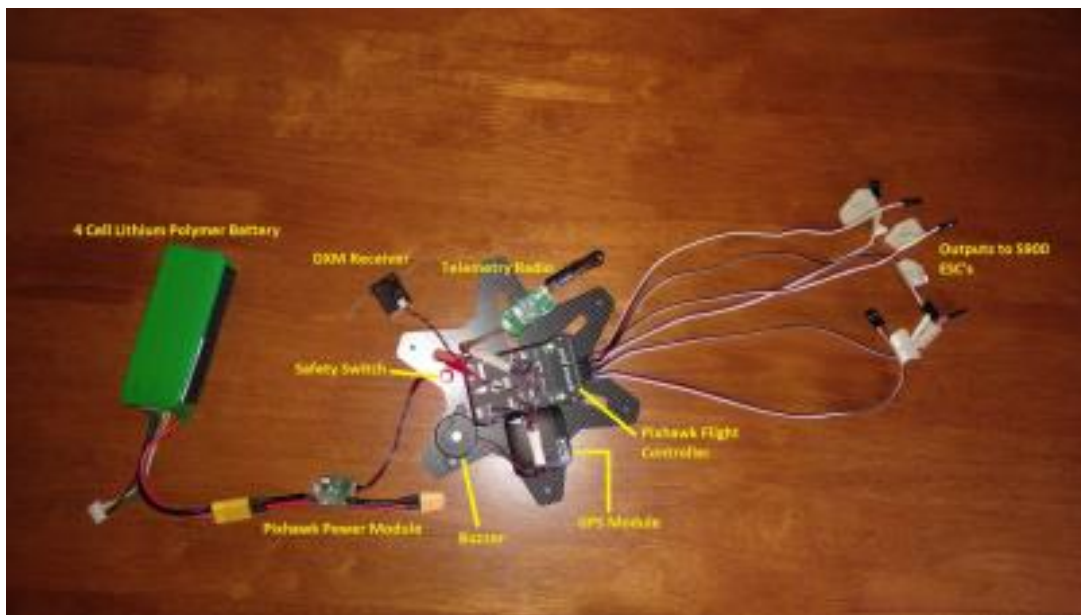


Рис. 2.3. Впровадження контролера польоту Pixhawk та пов'язаних модулів

2.3.2 Система радіокерування Spektrum DX8

Апаратури радіокерування Spektrum DX8 належить до класу восьмиканальних пультів дистанційного керування, які широко використовуються в різних галузях радіокерованих систем. Пристрій оснащений двома основними органами керування типу джойстик,

призначеними для регулювання тяги та керування просторовими осями, а також набором допоміжних елементів керування, до складу яких входять два двопозиційні перемикачі, шість багатопозиційних (восьмипозиційних) перемикачів і одна багатопозиційна поворотна ручка.

Зазначені канали можуть бути програмно сконфігуровані за допомогою польотного контролера Pixhawk для реалізації різноманітних функцій, зокрема перемикання режимів польоту, керування бортовою камерою, шасі та іншими можливостями системи керування. У рамках даного дослідження функціональне призначення перемикачів обмежено виключно вибором і зміною режимів польоту безпілотної літальної апаратури.

Передавання команд керування з пульта Spektrum DX8 до контролера Pixhawk здійснюється через приймач стандарту DSMX, який підключається безпосередньо до контролера. Таке рішення усуває необхідність використання додаткових пристроїв для попередньої обробки сигналів і сприяє спрощенню апаратної структури системи керування.

2.3.3 Наземна станція керування

Наземна станція керування реалізована на базі портативного комп'ютера з інстальованим програмним забезпеченням Mission Planner. Даний програмний продукт є безкоштовним та поширюється через офіційний ресурс проєкту ArduPilot, а його основним призначенням є забезпечення двостороннього зв'язку з польотним контролером Pixhawk, а також реєстрація параметрів польоту в режимі реального часу з подальшою можливістю їх детального аналізу.

Функціональні можливості Mission Planner дозволяють оператору формувати та редагувати польотні місії шляхом задання географічних координат контрольних GPS-точок, висоти польоту та просторової орієнтації безпілотної літальної апаратури. Передбачено можливість призупинення виконання місії на будь-якому етапі, що забезпечує оперативний перехід до ручного режиму керування у разі виникнення нестандартних ситуацій. Окрім

цього, програмне забезпечення використовується для калібрування основних елементів системи керування польотом і підключених до неї датчиків.

2.3.4 Система живлення

Енергоживлення польотного контролера Pixhawk та під'єднаних до нього сенсорних модулів здійснюється від чотирьохелементної літій-полімерної (Li-Po) акумуляторної батареї. Подача живлення реалізується через модуль живлення 3DR, який виконує перетворення напруги батареї у стабілізований постійний струм з номінальним значенням 5 В. Надалі контролер Pixhawk забезпечує розподіл отриманої електроенергії між підключеними датчиками за допомогою відповідних інтерфейсних портів.

Окрім функції живлення, модуль 3DR здійснює безперервний контроль електричних параметрів акумулятора, зокрема напруги та струму, передаючи виміряні значення до програмного забезпечення Mission Planner. Це дозволяє оператору в режимі реального часу оцінювати стан джерела живлення під час виконання польотного завдання. З метою підвищення надійності та рівня експлуатаційної безпеки в системі додатково використовується незалежний датчик стану батареї, підключений до балансувальних роз'ємів акумулятора, що забезпечує резервний моніторинг параметрів живлення.

2.4 Процедура польоту

У межах виконання даної роботи основна увага приділяється використанню двох режимів польоту безпілотного літального апарата, а саме режиму *Loiter* (утримання позиції) та режиму *Auto* (автономний політ).

У режимі *Loiter* польотний контролер Pixhawk забезпечує стабільне утримання заданих географічних координат, висоти та курсу БПЛА на основі даних глобальної навігаційної супутникової системи. У разі подання оператором команди на переміщення апарат здійснює рух у відповідному напрямку, після чого, при поверненні органів керування у нейтральне

положення, автоматично відновлює утримання попередньо встановлених параметрів положення та орієнтації. Стабілізація польоту в цьому режимі реалізується засобами контролера Pixhawk, що значно знижує навантаження на пілота та мінімізує ризик помилкових дій. Завдяки цим особливостям режим *Loiter* є доцільним під час зльоту, а також для операторів з обмеженим практичним досвідом.

У ручному режимі керування команди з пульта дистанційного керування Spektrum DX8 передаються до приймача стандарту DSMX, розташованого на борту БПЛА, після чого надходять на вхід польотного контролера Pixhawk. Контролер здійснює обробку отриманих сигналів і формує керувальні команди для блоків керування електродвигунами, регулюючи їх частоту обертання. Навіть за умови ручного керування Pixhawk може виконувати допоміжні функції стабілізації, зокрема підтримувати задані кути нахилу та крену під час зміни висоти або, навпаки, стабілізувати висоту при активному керуванні просторовими осями. Це сприяє підвищенню плавності, стабільності та керованості польоту.

Режим автономного польоту *Auto* активується за допомогою відповідного перемикача на пульті DX8. У цьому випадку польотний контролер Pixhawk здійснює повністю автоматизоване керування безпілотним літальним апаратом відповідно до заздалегідь підготовленого плану місії. Перед початком польоту маршрут завантажується до контролера через спеціалізоване програмне забезпечення на ноутбучі та складається з послідовності контрольних точок із визначеними GPS-координатами та заданими висотами.

Під час виконання місії Pixhawk отримує навігаційну інформацію від GPS-модуля 3D Robotics і на її основі коригує режими роботи силової установки, забезпечуючи рух БПЛА вздовж заданої траєкторії. Наявність вбудованого компаса в складі GPS-модуля дозволяє підтримувати коректну просторову орієнтацію апарата відносно напрямку руху. Обмін телеметричними даними між бортовою системою та наземною станцією керування реалізується за допомогою радіомодулів 3DR, що надає оператору

можливість у режимі реального часу контролювати координати, швидкість, стан акумуляторної батареї та інші ключові параметри польоту.

2.5 Система вимірювання радіочастот

2.5.1 Програмно-кероване радіо Ettus

Програмно-кероване радіо Ettus E110 використовується в даній роботі як у режимі передавання, так і в режимі приймання радіосигналів. На рисунку 7, запозиченому з офіційної технічної документації пристрою [7], подано структурну блок-схему радіосистеми Ettus E110. До її основних функціональних компонентів належать дочірні плати Ettus Basic RX та Basic TX, які забезпечують роботу в частотному діапазоні від 1 до 250 МГц. Зазначені модулі виконують функції радіочастотного узгодження: у режимі передавання вони подають сигнал від цифро-аналогового перетворювача на антену, тоді як у режимі приймання забезпечують передачу сигналу з антени на аналого-цифровий перетворювач.

Цифро-аналоговий перетворювач працює з тактовою частотою 128 мегасемплів за секунду та має розрядність 14 біт, у той час як аналого-цифровий перетворювач характеризується частотою дискретизації 64 мегасемпли за секунду та роздільною здатністю 12 біт. Такі параметри забезпечують достатню точність формування та оцифрування радіосигналів у заданому діапазоні частот.

Обробка сигналів у цифровій формі реалізується за допомогою програмованої логічної інтегральної схеми (FPGA), інтегрованої до складу радіомодуля. У режимі приймання FPGA отримує цифровий потік даних з виходу АЦП, здійснює його перетворення до проміжної частоти та виконує процедуру децимації. Після цього дійсна та уявна складові сигналу зберігаються у двійковому форматі, при цьому коефіцієнт децимації визначається параметрами конфігураційного файлу.

У режимі передавання FPGA зчитує задану форму сигналу, виконує його інтерполяцію з частотою, визначеною у конфігураційних налаштуваннях, та здійснює перенесення інтерпольованого сигналу на відповідну несучу частоту. Далі сформований сигнал подається на цифро-аналоговий перетворювач і через передавальний тракт надходить на антену для подальшого випромінювання в ефір.

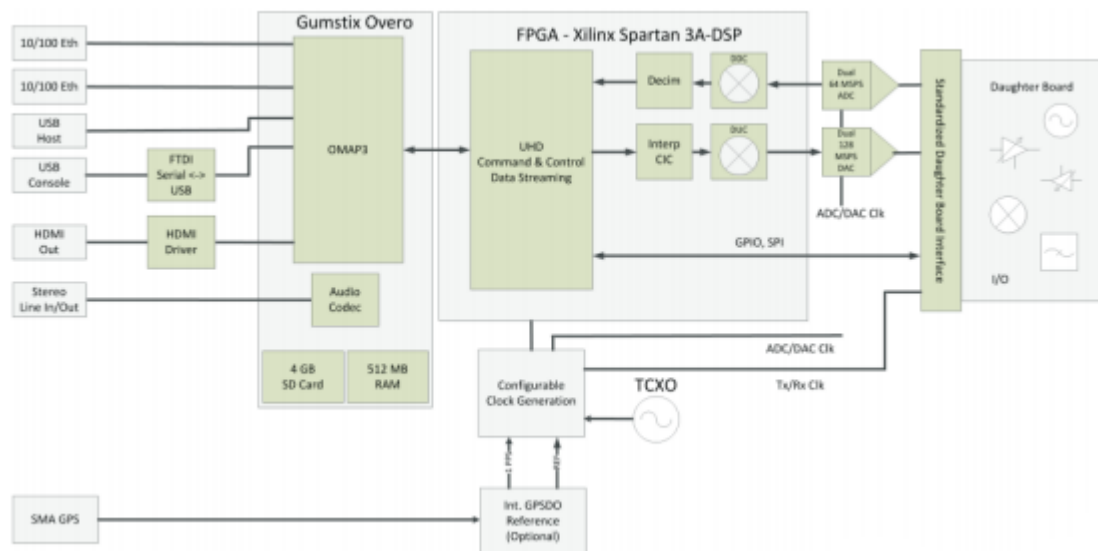


Рис. 2.4. Блок-схема SDR

Конфігурація системи з метою забезпечення ефективного переміщення безпілотного літального апарата до різних просторових точок навколо АУТ та виконання радіочастотних вимірювань формується спеціалізований часовий графік передавання і приймання тестового сигналу. Програмно-керовані радіомодулі (SDR) конфігуруються для роботи в режимі передавача або приймача відповідно до параметрів, заданих у конфігураційному файлі, який завантажується до радіостанцій.

Конфігураційні файли розробляються та налаштовуються користувачем вимірювальної системи з урахуванням конкретних експериментальних вимог і умов проведення дослідження. На рисунку 8 представлено фрагмент конфігураційного файлу, що визначає часову послідовність подій передавання

сигналу та відповідні параметри експерименту. Структура та вміст графіка можуть бути адаптовані залежно від кількості вимірювальних точок, набору досліджуваних частот, а також кількості повторень для кожної частоти в окремих просторових положеннях БПЛА.

```

TEST_START_TIME_RELATIVE      = 2
TEST_START_TIME               = 004500

NUMBER_TESTS                   = 5
PERIOD_TESTS                   = 60

NUMBER_CYCLES_IN_TEST          = 4
PERIOD_CYCLES_IN_TEST          = 10

NUMBER_EVENTS_IN_CYCLE         = 3
PERIOD_EVENTS_IN_CYCLE         = 2.0

; *****

[EVENT0]
FREQUENCY                      = 10000000
DURATION                       = 0.5
RX_SAMPLE_RATE                 = 250000
RX_BANDWIDTH                   = 30000
TX_SAMPLE_RATE                 = 250000
CALIBRATION                    = 1

[EVENT1]
FREQUENCY                      = 20000000
DURATION                       = 0.5
RX_SAMPLE_RATE                 = 250000
RX_BANDWIDTH                   = 30000
TX_SAMPLE_RATE                 = 250000
CALIBRATION                    = 1

[EVENT2]
FREQUENCY                      = 30000000
DURATION                       = 0.5
RX_SAMPLE_RATE                 = 250000
RX_BANDWIDTH                   = 30000
TX_SAMPLE_RATE                 = 250000
CALIBRATION                    = 1

; *****

```

Рис. 2.5. Розклад передачі та налаштування подій у файлі конфігурації

Параметри «TEST START TIME RELATIVE» (відносний час початку тесту) та «TEST START TIME» (абсолютний час початку тесту) визначають момент ініціації процесу вимірювань програмно-керованим радіо. Значення параметра «TEST START TIME» формується залежно від обраного режиму налаштування «TEST START TIME RELATIVE», для якого передбачено декілька можливих варіантів конфігурації.

У межах даного дослідження застосовано режим, за якого «TEST START TIME RELATIVE» встановлено рівним 2. За таких умов початок вимірювального процесу синхронізується з показами годинника глобальної навігаційної супутникової системи та відбувається в момент, коли значення хвилин GPS-часу збігається із заданим користувачем параметром. Так,

відповідно до прикладу, наведеного на рисунку 2.5, у разі активації програмного коду о 14:20 UTC фактичний початок вимірювань відбудеться лише о 14:45 UTC, тобто після досягнення необхідного значення часу за даними GPS.

Параметр «NUMBER TESTS» визначає кількість просторових точок, у яких передбачено виконання вимірювань, тоді як «PERIOD TESTS» задає часовий інтервал між початком тестування в послідовних точках. При цьому тривалість заданого періоду враховує не лише час, необхідний для виконання всіх циклів вимірювальних подій у кожній точці, але й часові витрати, пов'язані з переміщенням безпілотного літального апарата до наступної позиції вимірювань.

Останню групу параметрів, що формує часовий графік передавання сигналу, становлять «NUMBER OF EVENTS IN CYCLE» (кількість подій у циклі) та «PERIOD OF EVENTS IN CYCLE» (період подій у межах одного циклу). Кожна подія надалі детально описується у конфігураційному файлі та може бути індивідуально налаштована для передавання сигналів з різними значеннями несучої частоти, ширини смуги пропускання, частоти дискретизації або типу хвильової форми. У межах даної дисертаційної роботи змінним параметром між окремими подіями обрано виключно несучу частоту, тоді як інші характеристики залишаються сталими.

Значення періоду подій визначається з урахуванням тривалості кожної окремої події та часових витрат, необхідних програмно-керованому радіо для збереження отриманих вимірювальних даних. Параметри хвильових форм задаються окремо та детально описуються у відповідному розділі конфігураційного файлу.

Наступний розділ конфігураційного файлу призначений для задання статичних параметрів, які застосовуються для кожної події та використовуються як передавальною, так і приймальною радіостанціями під час обробки сигналів. Зокрема, передавальна антена використовує ці параметри для модуляції сигналу основної смуги на задану несучу частоту

(FREQUENCY), тоді як приймальна частина налаштовує смугу приймання (RX BANDWIDTH) у околі тієї ж частоти. Частоти дискретизації, у свою чергу, визначаються відповідно до вимог модуляції та демодуляції сигналів у базовій смузі.

На рисунку 2.6 наведено діаграму графіка передавання, сформованого на основі конфігурації, представленої на рисунку 8. Кожна вертикальна лінія на діаграмі відповідає передаванню визначеної кількості повторів тестової хвильової форми на конкретно заданій несучій частоті.

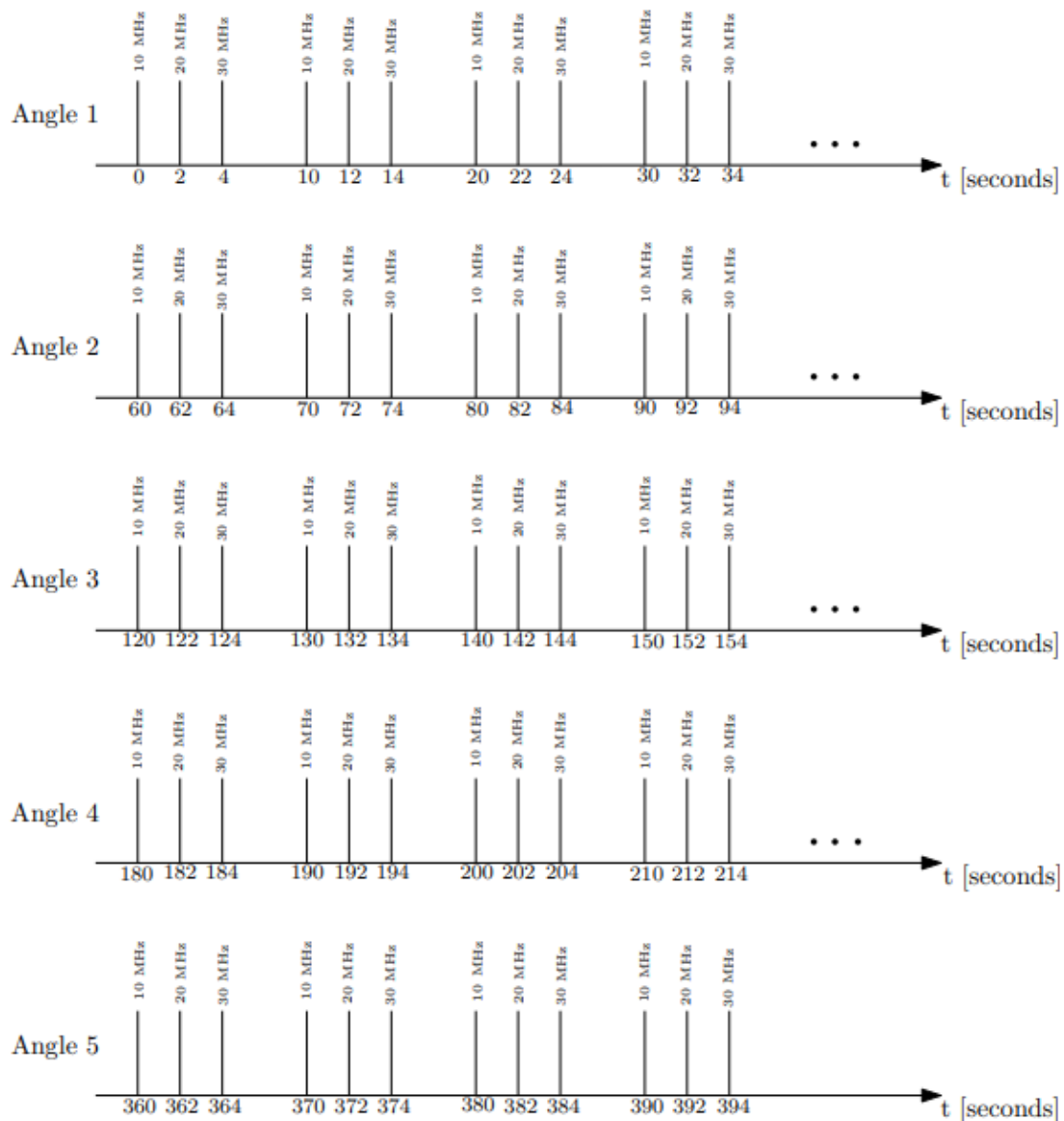


Рис. 2.6. Приклад графіка передачі даних

Наступні розділи конфігураційного файлу містять детальні директиви для радіостанцій щодо виконання процедур, передбачених для кожної окремої події. Фрагмент такого розділу для першої події подано на рисунку 2.7. Кожен блок інструкцій розпочинається рядком формату «[EVENT0 E0R13XAE2]» або «[EVENT0 EFR12XFE2]», який однозначно ідентифікує номер події та конкретну радіостанцію, для якої призначено відповідні параметри. Позначення E0R13XAE2 та EFR12XFE2 відповідають унікальним ідентифікаторам радіостанцій, що залучаються під час проведення експерименту. Радіомодуль аналізує вказаний ідентифікатор і виконує інструкції лише за умови його збігу з власною назвою, що забезпечує коректну адресацію команд.

У межах налаштувань системи параметри «RX ENABLE» та «RX GAIN» для обох радіостанцій встановлено відповідно в значення 1 та 20, включно з передавальною станцією. Оскільки приймальна дочірня плата передавальної радіостанції не має підключеного вхідного сигналу, зафіксовані нею дані представляють собою лише шумовий фон. Водночас параметр «TX ENABLE» активований (значення 1) виключно для передавальної радіостанції. Максимальні коефіцієнти підсилення як у тракті передавання, так і в тракті приймання встановлено на рівні 20, що забезпечує можливість випромінювання сигналу потужністю до 15 дБм з передавальної дочірньої плати програмно-керованого радіо.

Форма хвилі, що передається передавальною радіостанцією, задається за допомогою файлу, ім'я якого вказується у параметрі «TX FILE BASE NAME». Під час виконання програмного коду приймальна частина системи здійснює пошук відповідного файлу та використовує його вміст для відтворення заданої хвильової форми. Параметр «TX START TIME OFFSET» визначає часову затримку між моментом запуску програми та фактичним початком передавання сигналу. У межах даного застосування значення цього параметра встановлено рівним 0 с, що забезпечує мінімізацію затримки початку передавання.

Останні два параметри конфігурації події визначають кількість повторень хвильової форми в межах однієї події та тривалість одного циклу повторення.

Збільшення числа повторів дає змогу реалізувати метод усереднення сигналу, детально описаний у розділі 4.4, що сприяє підвищенню відношення сигнал/шум. Водночас зростання кількості повторень призводить до збільшення тривалості події, а отже, і до подовження загального часу польоту безпілотної літального апарата, необхідного для виконання вимірювань у кожній заданій просторовій точці.

Розділ конфігураційного файлу, проілюстрований на рисунку 10, є типовим і повторюється для кожної події вимірювального циклу. Порядковий номер події, зазначений у другому рядку відповідного блоку, змінюється відповідно до нумерації подій, визначеної у загальному графіку, наведеному на рисунку 8. За необхідності для окремих подій можуть бути задані різні параметри хвильових форм, кількість повторень сигналу та тривалість періодів повторення, що забезпечує гнучке налаштування експерименту залежно від поставлених завдань.

Водночас коефіцієнти підсилення у трактах приймання та передавання для всіх подій встановлюються на фіксованому максимальному рівні, який дорівнює 20. Функції приймання та передавання сигналів при цьому конфігуруються індивідуально для кожної події відповідно до заданих умов проведення вимірювань.

```
;TX E110 192.168.0.29
[EVENT0_E0R13XAE2]
RX_ENABLE                = 1
RX_GAIN                  = 20.0
TX_ENABLE                = 1
TX_GAIN                  = 20.0
TX_FILE_SEGMENTED        = 0
TX_FILE_NUMBER_SEGMENTS  = 0
TX_FILE_BASE_NAME        =BxCafFilterPercent_10_FIRModFilterPercent_75_FIRBW_15.625_kHz_Baud_15625_signalDuration_1.032_mS_Fs_250k_Fc_0k_16I_16Q
TX_START_TIME_OFFSET      = 0.000
TX_NUMBER_SUB_EVENTS      = 40
TX_SUB_EVENT_PERIOD      = 0.008

;RX E110 192.168.0.30
[EVENT0_EFR12XFE2]
RX_ENABLE                = 1
RX_GAIN                  = 20
TX_ENABLE                = 0
TX_GAIN                  = 20.0
TX_FILE_SEGMENTED        = 0
TX_FILE_NUMBER_SEGMENTS  = 0
TX_FILE_BASE_NAME        =BxCafFilterPercent_10_FIRModFilterPercent_75_FIRBW_15.625_kHz_Baud_15625_signalDuration_1.032_mS_Fs_250k_Fc_0k_16I_16Q
TX_START_TIME_OFFSET      = 0.000
TX_NUMBER_SUB_EVENTS      = 40
TX_SUB_EVENT_PERIOD      = 0.008

; *****
```

Рис. 2.7. Розклад передавання та налаштування подій у конфігураційному файлі

2.5.2 Передавальна антена

Конструктивне виконання передавальної антени, що встановлюється на безпілотному літальному апараті, визначається характеристиками антени об'єкта випробування (AUT), запланованою траєкторією польоту БПЛА та робочим частотним діапазоном вимірювань. Однією з ключових вимог є відповідність поляризації передавальної антени поляризації AUT протягом усього часу проведення експерименту. Зокрема, у випадку використання AUT з горизонтальною поляризацією передавальна антена також повинна мати горизонтальну поляризацію, що виключає можливість застосування вертикально орієнтованих штирьових антен, змонтованих безпосередньо на платформі БПЛА.

Запланована траєкторія польоту безпілотного літального апарата істотно впливає на вибір типу та геометрії передавальної антени, оскільки її діаграма спрямованості має залишатися максимально стабільною відносно AUT у процесі переміщення. Наприклад, у разі коли об'єкт випробування є антеною з горизонтальною поляризацією, а вимірювання передбачають формування вертикального профілю шляхом переміщення БПЛА у вертикальному напрямку, передавальну антену доцільно реалізувати у вигляді горизонтально орієнтованого диполя. Таке конструктивне рішення забезпечує перебування AUT у всеспрямованій області діаграми спрямованості дипольної антени протягом усього польотного завдання.

2.5.3 Переданий сигнал

Перш ніж перейти до розгляду принципів функціонування програмно-керованого радіо та методів цифрової обробки сигналів, доцільно проаналізувати форму хвилі, що використовується для передавання. У межах даного дослідження було обрано та проаналізовано два типи зондуючих сигналів: 13-бітний код Баркера та синусоїдальний сигнал безперервної хвилі (Continuous Wave, CW). Кожен із зазначених типів сигналів характеризується власними перевагами та обмеженнями з точки зору вимірювальних

можливостей і точності отриманих результатів, що зумовлює необхідність їх детального розгляду в подальших підрозділах.

2.5.4 13-бітний код Баркера

Код Баркера являє собою бінарну послідовність скінченної довжини N біт, яка синтезується з метою забезпечення близьких до ідеальних автокореляційних властивостей. Основною особливістю таких послідовностей є мінімальний рівень бічних пелюсток автокореляційної функції, що істотно підвищує їх придатність для застосування в радіовимірювальних та навігаційних системах. Максимальне значення бічних пелюсток для коду Баркера дорівнює величині $1/M$, де M відповідає довжині коду [8].

У таблиці 1 наведено повний перелік відомих кодів Баркера разом із відповідними рівнями бічних пелюсток їх автокореляційних функцій.

Таблиця 2.1

Перелік відомих кодів Баркера та відповідні значення рівнів бічних пелюсток їх автокореляційних функцій.

Code Length	Code	Sidelobe Level [dB]
2	+1 +1 OR 1 -1	-6
3	+1 + 1 -1	-9.5
4	+1 +1 +1 -1 OR +1 +1 -1 +1	-12
5	+1 +1 +1 -1 +1	-14
7	+1 +1 +1 -1 -1 +1 -1	-16.9
11	+1 +1 +1 -1 -1 -1 +1 -1 -1 +1 -1	-20.8
13	+1 +1 +1 +1 +1 -1 -1 +1 +1 -1 +1 -1 +1	-22.8

Низький рівень бічних пелюсток забезпечує можливість надійного виявлення корисного сигналу навіть за умов низького співвідношення сигнал/шум (Signal-to-Noise Ratio, SNR). Застосування кореляційної обробки

прийнятого сигналу дає змогу отримати часову інформацію, яка може бути використана для визначення фазових характеристик антени об'єкта випробування (AUT), а також для оцінювання значення SNR прийнятого сигналу з метою подальшого встановлення рівня достовірності отриманих результатів вимірювань.

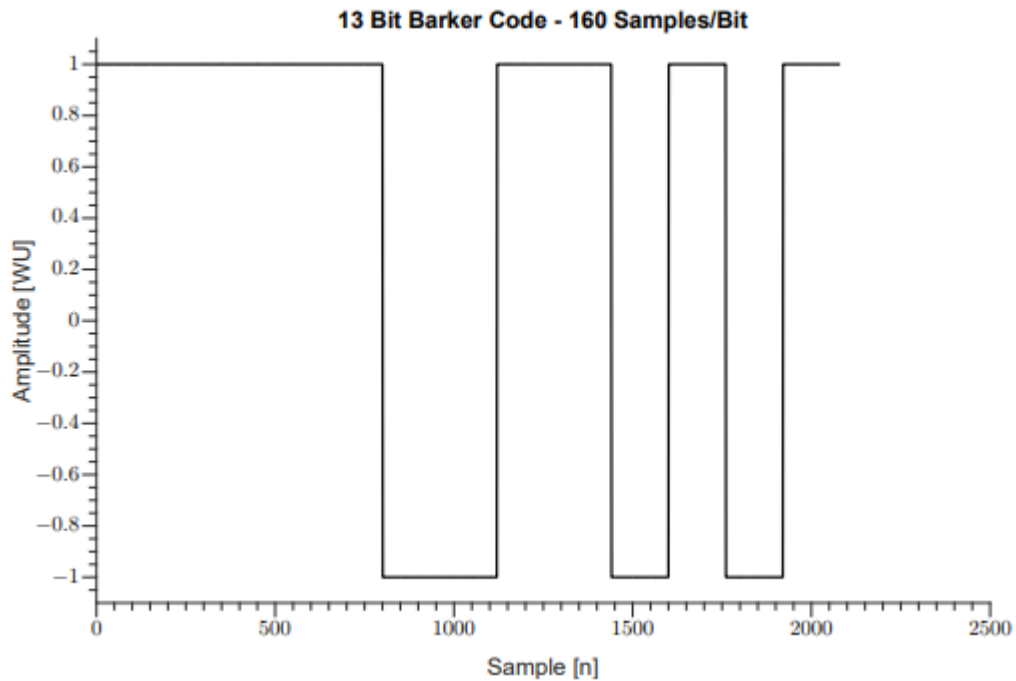


Рис. 2.8: 13-бітний код Баркера

Тринадцятибітний код Баркера було обрано з огляду на те, що він характеризується найменшим рівнем бічних пелюсток автокореляційної функції серед усіх відомих кодів цього типу. На рисунку 2.8 наведено приклад відповідної хвильової форми, яка використовується в межах проведеного дослідження.

Формування сигналу здійснюється із застосуванням методу вибірки та утримання, що є поширеним підходом у системах цифрової обробки сигналів. Кількість дискретних відліків, які припадають на один біт послідовності, визначається співвідношенням між швидкістю передавання даних та частотою дискретизації $F_s F$ сформованого сигналу, як це наведено у рівнянні (1). Зазначені параметри безпосередньо впливають на загальну тривалість сигналу та ширину його спектральної смуги.

Для реалізованої хвильової форми швидкість передавання становить 1,56525 кГц, тоді як частота дискретизації дорівнює 250 кГц, що забезпечує формування 160 дискретних відліків на кожен біт коду Баркера.

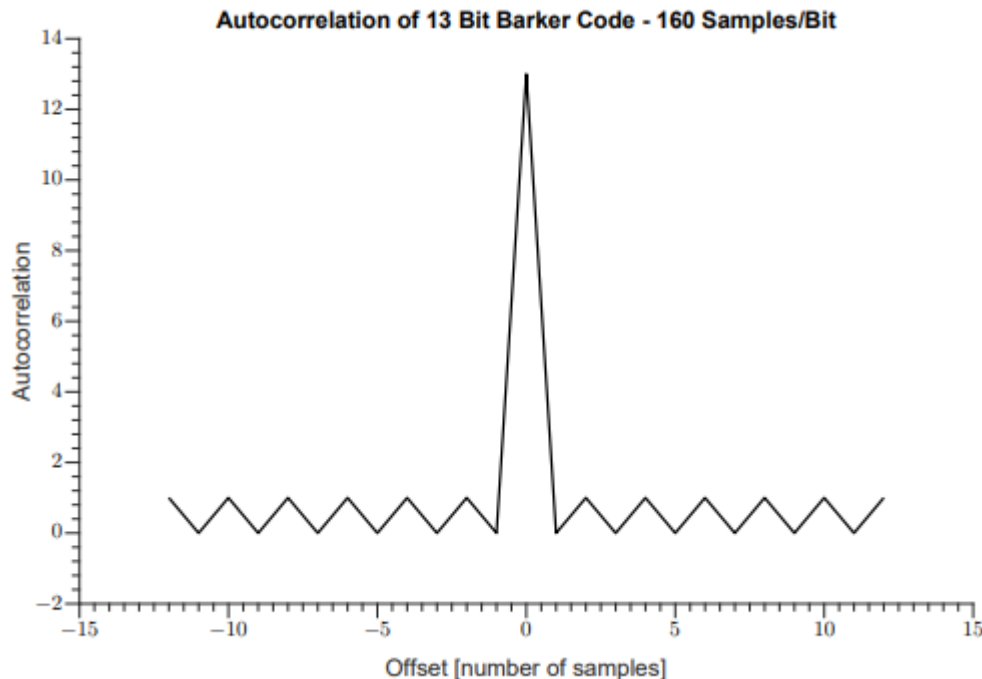


Рис. 2.9: Автокореляція 13-бітного коду Баркера хвильової форми

На рисунку 2.9 представлено автокореляційну характеристику хвильової форми, зображеної на рисунку 2.8. Аналіз отриманої функції показує, що максимальний рівень бічних пелюсток автокореляції для даного сигналу становить $1/131$, що відповідає приблизно $-22,8$ дБ у логарифмічному масштабі.

Коди Баркера найчастіше застосовуються у складі імпульсних сигналів із фазовим кодуванням. Їх бінарна структура є особливо придатною для використання в системах з двійковою фазовою маніпуляцією (Binary Phase Shift Keying, BPSK), у яких фаза несучого коливання перемикається між двома дискретними значеннями з метою уникнення фазової неоднозначності під час демодуляції. Зазначена неоднозначність полягає в неможливості розрізнення фазових значень ϕ та $\phi + 2\pi$ демодулятором [9].

У межах даного дослідження дві фазові позиції BPSK-сигналу обрано рівними $-\pi/4$ та $\pi/4$. Математичний опис сформованого сигналу наведено у рівнянні (2), де A відповідає амплітуді сигналу, а f_c — значенню несучої частоти.

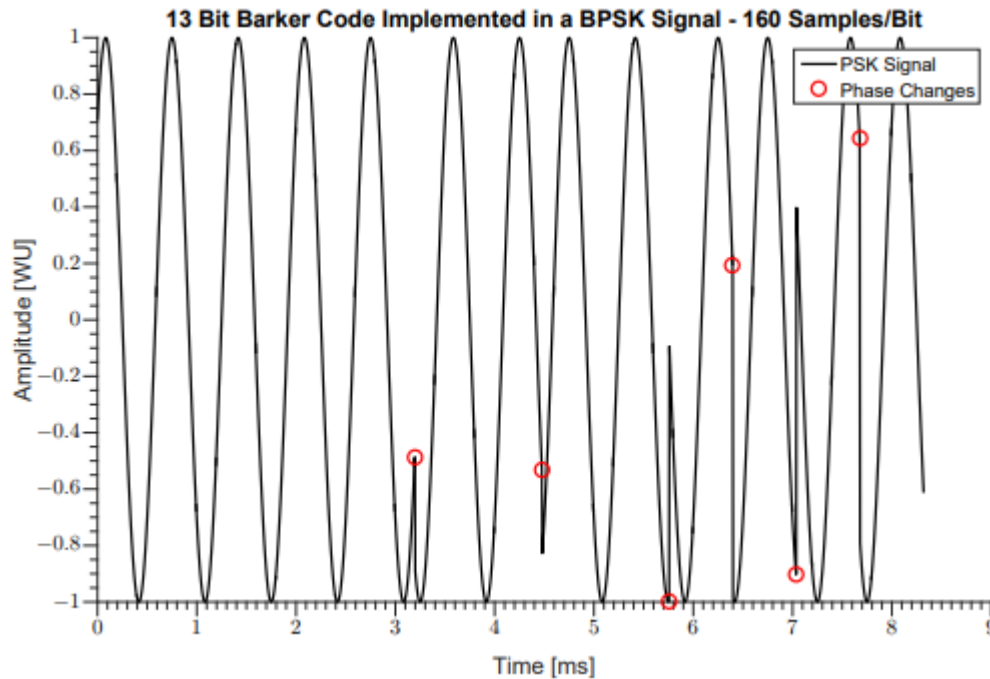


Рис. 2.10 13-бітний код Баркера, реалізований у вигляді BPSK-сигналу

На рисунку 2.10 наведено реалізацію 13-бітного коду Баркера, поданого на рисунку 2.9, у формі сигналу з двійковою фазовою маніпуляцією (BPSK) з несучою частотою 1,5 кГц. Зазначене значення несучої частоти використано виключно з ілюстративною метою. Кругові маркери на діаграмі відповідають моментам миттєвої зміни фази сигналу, що відбувається відповідно до бітової структури коду.

Як було зазначено раніше, параметри швидкості передавання та частоти дискретизації безпосередньо визначають часову тривалість сформованого сигналу та, відповідно, ширину його спектральної смуги. Збільшення швидкості передавання призводить до зменшення кількості дискретних відліків, що припадають на один біт, унаслідок чого сигнал стає коротшим у часовій області, а його спектральна смуга — ширшою.

На рисунку 2.11 наведено спектральну щільність потужності коду Баркера, сформованого з використанням 160 дискретних відліків на один біт. Для порівняння, на рисунку 15 представлено спектральну щільність цього ж коду за умови швидкості передавання 15,625 кГц, частоти дискретизації 250 кГц та кількості 16 відліків на біт, що відповідає тривалості одного біту 0,832 мс.

Отримані результати наочно демонструють наявність компромісу, який необхідно враховувати під час проєктування експериментальних вимірювань, між часовою довжиною сигналу та шириною його спектральної смуги. У випадку, коли антена об'єкта випробування (AUT) характеризується вузькосмуговими властивостями, принципово важливо, щоб спектральна смуга переданого тестового сигналу не перевищувала робочу смугу пропускання антени. Водночас іншим аспектом зазначеного компромісу є те, що зменшення смуги пропускання тестового сигналу призводить до збільшення часу, який безпілотний літальний апарат повинен перебувати в кожній вимірювальній точці для забезпечення достатньо ефективної передачі даних.

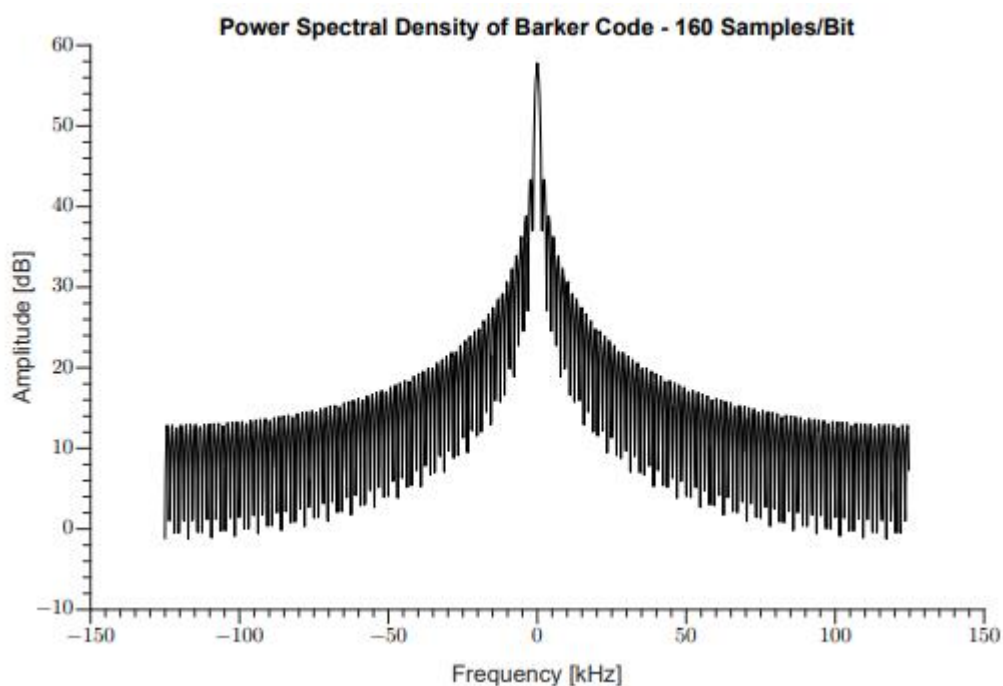


Рис. 2.11 Енергетична спектральна щільність 13-бітного коду Баркера при використанні 160 дискретних відліків на один біт

Таким чином, значна ширина спектральної смуги коду Баркера є його основним обмеженням у контексті проведення подібних вимірювань, незважаючи на його сприятливі автокореляційні властивості.

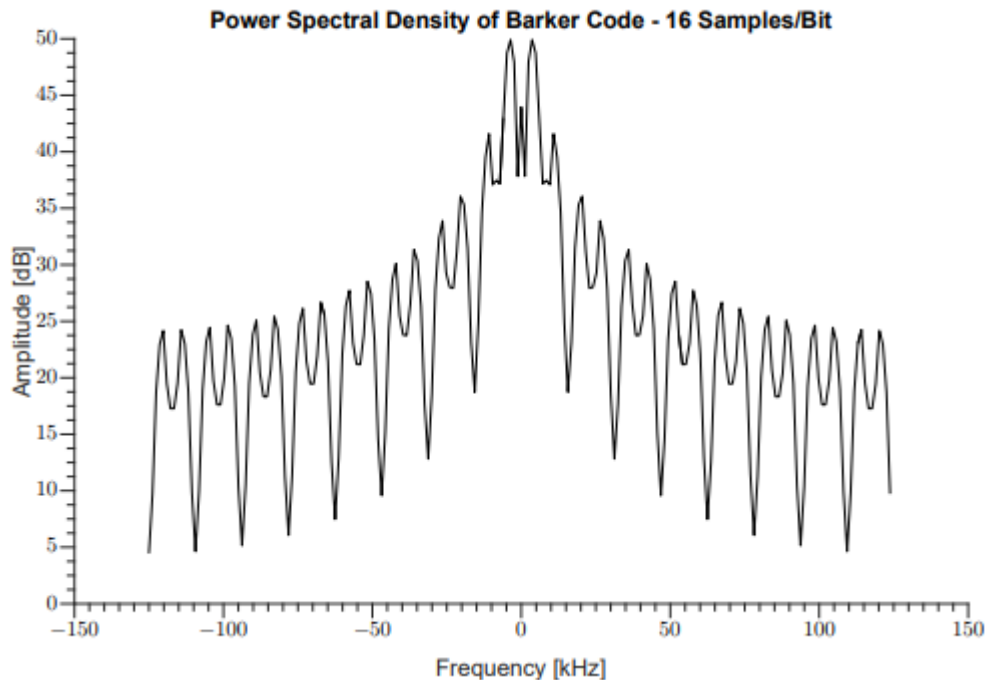


Рис. 2.12 Енергетична спектральна щільність 13-бітного коду Баркера при використанні 16 дискретних відліків на один біт

2.5.5 Синусоїдальний сигнал безперервної хвилі (CW)

Синусоїдальний сигнал безперервної хвилі формується із застосуванням тієї ж методики вибірки та утримання й двійкової фазової маніпуляції (BPSK), що використовувалася для коду Баркера. Відмінність полягає в тому, що замість 13-бітної псевдовипадкової послідовності передається сигнал, який складається з послідовності тринадцяти одиничних бітів, що зумовлює відсутність фазових переходів, характерних для коду Баркера.

Сформована хвильова форма характеризується такими параметрами:

- швидкість передавання — 1,5625 кГц;
- частота дискретизації — 250 кГц;
- несуча частота — 1,5 кГц;
- кількість відліків на біт — 160;

- загальна тривалість сигналу — 8,32 мс.

На рисунку 2.13 наведено часову реалізацію синусоїдального сигналу, тоді як на рисунку 2.14 представлено його автокореляційну функцію. Аналіз автокореляції свідчить про відсутність чітко виражених піків, що істотно обмежує можливості точного визначення часових характеристик сигналу та знижує ефективність його виявлення в умовах низького співвідношення сигнал/шум. У зв'язку з цим синусоїдальний сигнал безперервної хвилі є менш придатним для задач, у яких критичними є точність часової синхронізації та надійність детектування.

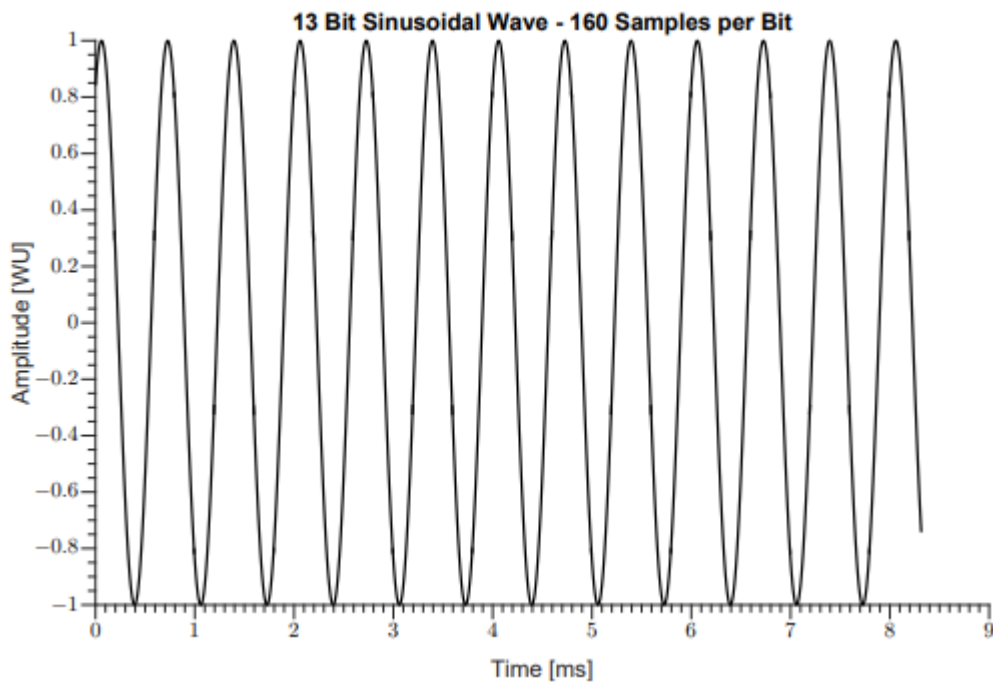


Рис. 2.13 Часова реалізація 13-бітного синусоїдального сигналу з 160 дискретними відліками на один біт

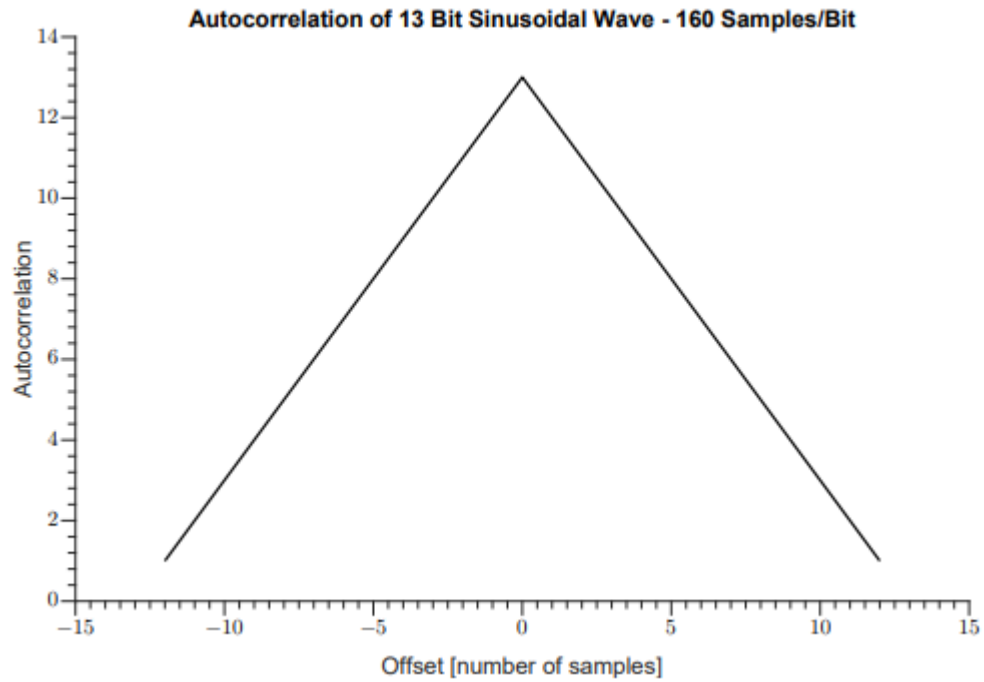


Рис. 2.14: Автокореляційна функція 13-бітного синусоїдального сигналу при використанні 160 дискретних відліків на один біт

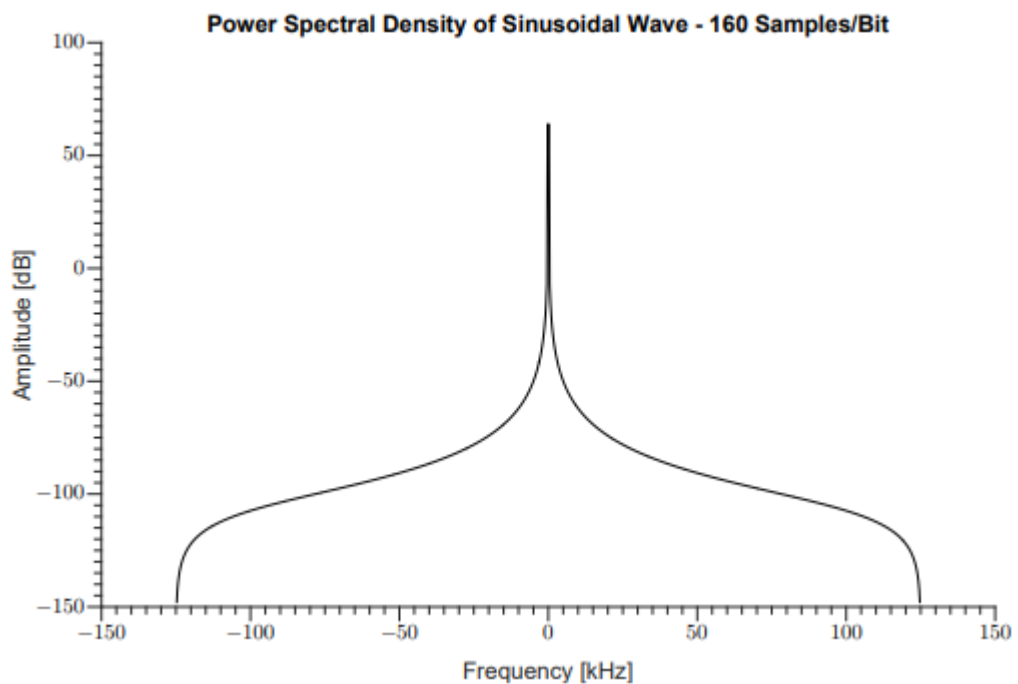


Рис. 2.15: Енергетична спектральна щільність 13-бітного синусоїдального сигналу з 160 дискретними відліками на один біт

На рисунку 2.15 представлено спектральну щільність потужності синусоїдального сигналу, часову реалізацію якого наведено на рисунку 2.13.

Порівняльний аналіз із спектральною щільністю потужності 13-бітного коду Баркера, поданою на рисунку 2.11, свідчить про те, що синусоїдальний сигнал характеризується істотно вузкою смугою пропускання.

Зазначена властивість забезпечує можливість більш точної оцінки діаграми спрямованості антени об'єкта випробування (AUT) на конкретній робочій частоті. Водночас для задач вимірювання фазових характеристик та дослідження широкосмугових антен у межах даного дослідження було обрано використання 13-бітного коду Баркера. Це рішення зумовлене його кращими кореляційними властивостями та вищою ефективністю в умовах обробки широкосмугових сигналів, незважаючи на відносно більшу ширину спектральної смуги.

2.6 Отриманий сигнал

риймальний програмно-керований радіоприймач здійснює збір і збереження необроблених комплексних даних у вигляді дійсної та уявної складових сигналу (I та Q) для кожного моменту часу приймання, що відповідає часовим інтервалам передавання, визначеним у графіку, наведеному на рисунку 2.6. Кожен інтервал збору даних призводить до формування трьох файлів на кожному з радіоприймачів. Інформація з каналів 0 і 1 зберігається разом із переданим сигналом, унаслідок чого, наприклад, для конфігурації, поданої на рисунку 2.6, на обох SDR формується загалом 180 файлів даних.

Отримані файли послідовно відкриваються та обробляються з використанням програмного середовища MATLAB. На етапі попередньої обробки дані впорядковуються за значенням несучої частоти передавання, у результаті чого для кожної частоти, зокрема 10 МГц, 20 МГц і 30 МГц, формуються окремі матриці даних. Такий підхід є доцільним з огляду на частотну залежність діаграми спрямованості антени об'єкта випробування та забезпечує коректний аналіз результатів вимірювань для кожної частоти незалежно.

На рисунку 2.16 наведено часову реалізацію події, яка була передана та прийнята відповідно до заданого конфігураційного файлу. З наведеного графіка чітко ідентифікуються 40 окремих повторень коду Баркера, що узгоджується з очікуваними параметрами експерименту та підтверджує коректність роботи системи.

У межах проведеного експерименту тривалість кожної події передавання та приймання становить 0,5 с, при цьому приймальний SDR виконує дискретизацію сигналу з частотою 250 кГц. Слід зазначити, що частота дискретизації є регульованим параметром, вибір якого істотно впливає на точність і достовірність результатів вимірювань, що буде детально розглянуто у розділі 3.

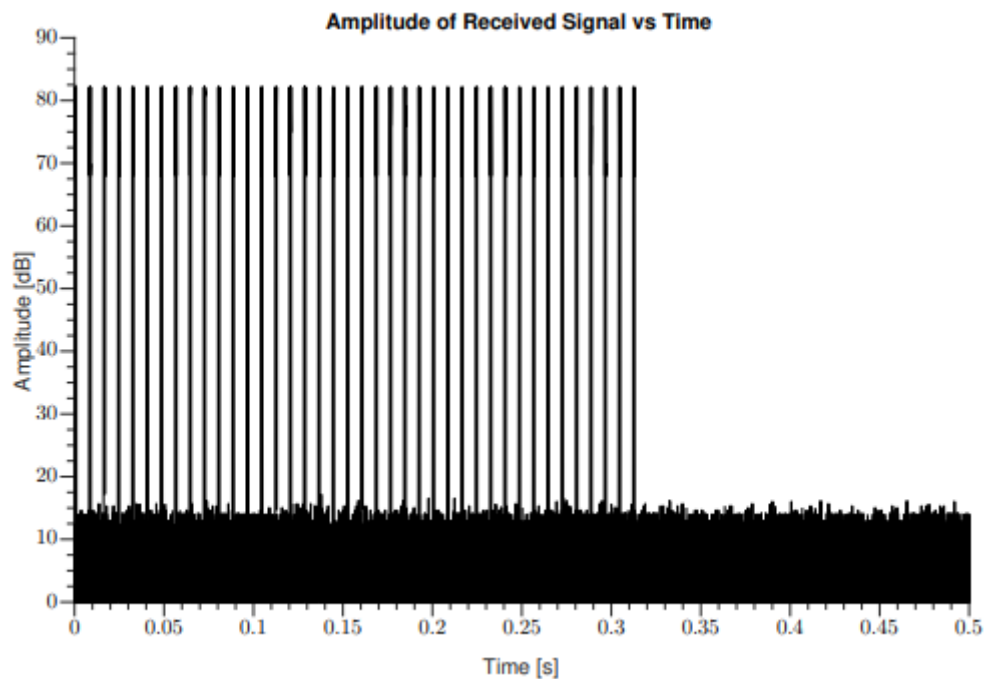


Рис. 2.16 Отримані дані однієї передачі

З огляду на часовий масштаб, використаний на рисунку 2.16, детальний аналіз окремих подій у межах сигналу є ускладненим. Для більш наочного відображення структури сигналу на рисунку 2.17 подано ті самі експериментальні дані, однак часову вісь зосереджено на першій події, тобто на початковому інтервалі тривалістю приблизно 8 мс. Візуальний аналіз сигналу

на рисунку 2.17 може створювати враження невідповідності його форми очікуваному вигляду коду Баркера, представленому на рисунку 2.8.

Зазначена особливість пояснюється тим, що у випадку двійкової фазової маніпуляції (BPSK) інформаційна послідовність коду Баркера закодована у фазі сигналу, а не в його амплітудних характеристиках. На рисунку 2.18 наведено фазову складову прийнятого сигналу, яка чітко відтворює очікувану структуру коду Баркера. Водночас слід відзначити, що фазові переходи відбуваються не миттєво, як у випадку ідеалізованої ступінчастої функції, а мають плавний характер. Така поведінка зумовлена апаратними обмеженнями програмно-керованого радіо: різкі фазові зміни можуть призводити до нестабільної роботи системи, тоді як поступові переходи забезпечують надійне та передбачуване функціонування вимірювального комплексу.

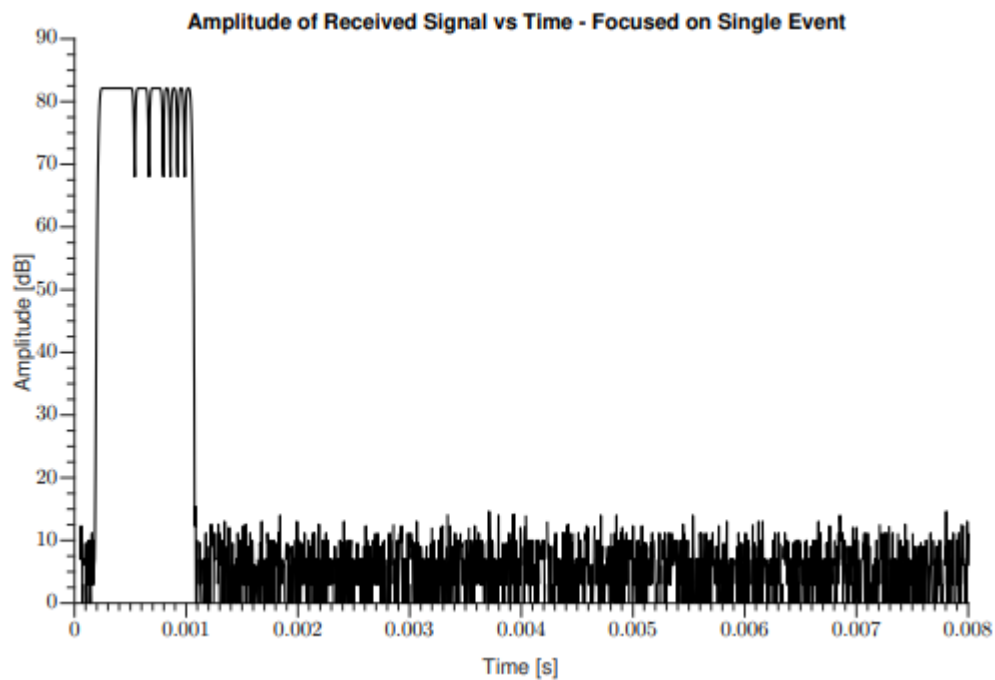


Рис. 2.17 Амплітудна характеристика отриманих даних однієї передачі з фокусуванням на окремому коді Баркера

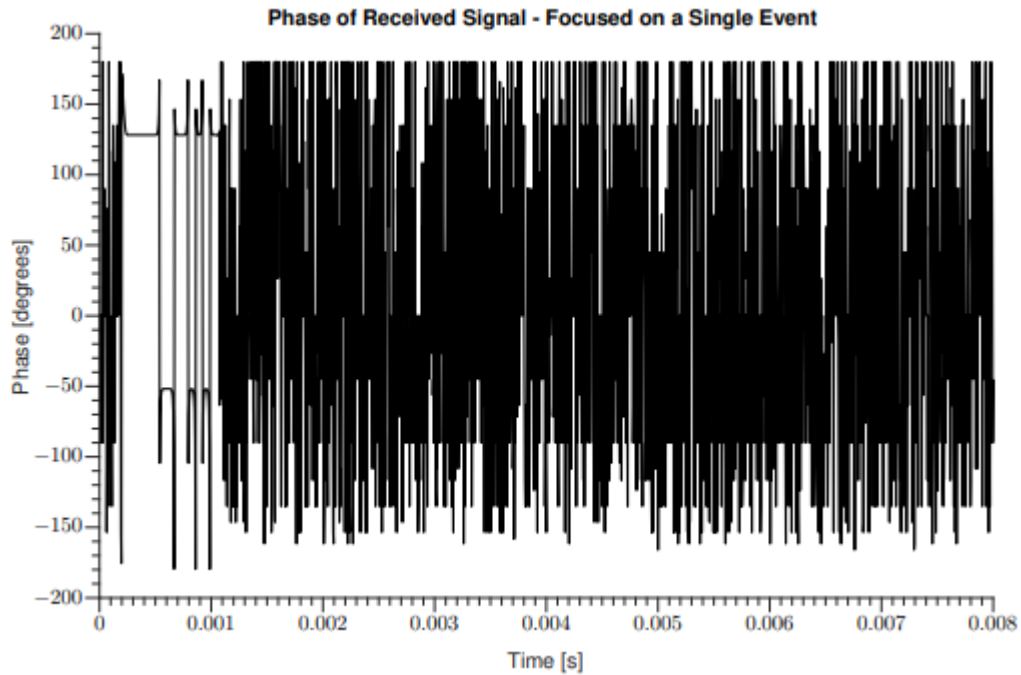


Рис. 2.18 Фазова характеристика отриманих даних однієї передачі з фокусуванням на окремому коді Баркера

2.7 Висновок до розділу 2

У цьому розділі здійснено комплексний аналіз архітектури та принципів функціонування системи безпілотного літального апарата DJI Spreading Wings S900 у поєднанні з польотним контролером Pixhawk, апаратурою дистанційного керування Spektrum DX8 і наземною станцією керування Mission Planner. Обґрунтовано доцільність вибору зазначених компонентів системи керування польотом, які у сукупності забезпечують високий рівень стабілізації, експлуатаційну надійність, безпеку виконання польотів і можливість реалізації автономних місій.

Окрему увагу приділено вбудованим механізмам безпеки контролера Pixhawk, зокрема наявності відмовостійкого співпроцесора та функції автоматичного повернення до точки зльоту, що істотно підвищує рівень безпеки під час експлуатації безпілотного літального апарата. Також детально розглянуто конфігурацію системи живлення, принципи керування силовою установкою та реалізовані режими польоту, зокрема *Loiter*, ручний режим і

режим автопілота. Встановлено, що інтеграція GPS-модуля, телеметричних засобів і допоміжних функцій керування забезпечує високу точність дотримання заданого маршруту та стабільність польоту, у тому числі за умов ручного керування.

У підрозділах, присвячених системі радіочастотних вимірювань, проведено детальний аналіз застосування програмно-керованого радіо Ettus E110, а також принципів налаштування передавальної та приймальної антен, що забезпечує можливість ефективного виконання вимірювань у різних просторових точках відносно антени об'єкта випробування (AUT). Розглянуті параметри передаваних сигналів, зокрема 13-бітного коду Баркера та синусоїдального сигналу безперервної хвилі (CW), дають змогу здійснювати обґрунтований вибір типу зонduючого сигналу залежно від вимог до точності результатів, спектральних обмежень і необхідного співвідношення сигнал/шум.

Узагальнюючи викладене, розроблений вимірювальний комплекс на основі безпілотного літального апарата у поєднанні з програмно-керованим радіо забезпечує комплексне розв'язання задач дистанційного дослідження характеристик антени AUT. Така система поєднує автономність польоту, високу точність просторового позиціонування та гнучкість у виборі параметрів і типів сигналів, що робить її придатною для реалізації широкого спектра експериментальних сценаріїв.

Розділ 3

НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

3.1 Структура даних

SDR-радіостанції сконфігуровані таким чином, щоб зберігати необроблені вимірювальні дані для кожного окремого акту передавання сигналу (кожної вертикальної лінії на рисунку 2.6) у самостійний файл. Кожен згенерований файл містить часову мітку, сформовану на основі даних GPS, що забезпечує точну часову прив'язку прийнятого сигналу до моменту його передавання.

У середовищі MATLAB реалізовано автоматизовану процедуру зчитування та впорядкування отриманих файлів за однаковими значеннями несучої частоти. Даний процес здійснюється шляхом аналізу переліку файлів і використання часової інформації, заданої у конфігураційному файлі радіостанцій. У результаті вимірювальні дані автоматично групуються відповідно до несучої частоти та конкретної тестової точки з одночасним вибором каталогів, що містять файли з обох SDR. Такий підхід суттєво зменшує ймовірність помилок оператора на етапі обробки експериментальних даних.

Необроблені дані на SDR зберігаються у бінарному форматі. Перші 1024 байти кожного файлу відведені під заголовок, який містить службову інформацію про параметри експерименту, зокрема серійний номер радіостанції, частоту дискретизації, значення несучої частоти, коефіцієнти підсилення, GPS-координати місця вимірювання, а також кількість імпульсів у послідовності коду Баркера.

Особливості збереження GPS-координат:

- Приймальний SDR фіксує GPS-координати лише одноразово на початку тестового сеансу, що зумовлено стаціонарним розташуванням антени об'єкта випробування (AUT).

- Передавальний SDR здійснює запис координат під час кожного акту передавання сигналу, що уможливорює подальше усереднення просторових даних з метою підвищення точності визначення положення безпілотного літального апарата в процесі виконання вимірювань.

Після формування заголовка файлу SDR переходить до запису необроблених вимірювальних даних. Отримані дані мають комплексну природу, однак зберігання здійснюється не у вигляді комплексних чисел безпосередньо, а шляхом послідовного запису їх складових.

Для коректного збереження комплексної інформації сигнал розкладається на дійсну (I) та уявну (Q) компоненти. Процедура запису реалізується у такій послідовності: спочатку зберігається дійсна складова I, після чого записується уявна складова Q. Обидві компоненти кодуються у форматі 16-бітних числових значень. Зазначений алгоритм повторюється для кожного дискретного відліку сигналу, що забезпечує можливість точного відтворення комплексних даних на етапі подальшої цифрової обробки.

3.2 Частота дискретизації

Частота дискретизації сигналу в основній смузі (f_s) є одним із ключових параметрів будь-якої радіочастотної вимірювальної системи, оскільки вона безпосередньо визначає можливість коректного представлення та подальшої обробки сигналу в цифровій формі. Фундаментальним принципом вибору частоти дискретизації є теорема Найквіста–Шеннона, відповідно до якої для сигналу зі смугою пропускання B частота дискретизації f_s повинна бути не меншою за подвоєне значення цієї смуги, тобто $f_s \geq 2B$. Дотримання даної умови є необхідним для запобігання явищу спектрального накладання (аліасингу) та забезпечення точного відновлення сигналу без спотворень

$$f_s \geq 2B \quad (3.1)$$

Використання наддискретизації, за якої частота дискретизації f_s істотно перевищує мінімальне значення $2B$, супроводжується як позитивними, так і негативними наслідками.

До основних переваг наддискретизації належать зниження ймовірності виникнення ефекту аліасингу та підвищення ефективної роздільної здатності оцифрованих даних, що може сприяти більш точному аналізу сигналу. Водночас такий підхід має і низку недоліків. Зокрема, дискретизація ширшого спектрального діапазону призводить до зростання сумарної потужності шуму в записаних даних, а також підвищує ймовірність приймання сторонніх або завадових сигналів, які можуть ускладнювати подальший аналіз корисного сигналу.

Отже, вибір частоти дискретизації повинен здійснюватися з урахуванням компромісу між вимогами до точності та детальності вимірювань, з одного боку, і мінімізацією впливу шумів та небажаних сигналів — з іншого.

3.3 Фільтрування

Після перетворення прийнятого радіочастотного сигналу до основної смуги програмно-кероване радіо формує цифровий сигнал із максимальною смугою пропускання до 125 кГц, що обумовлено вибраною частотою дискретизації 250 кГц. Водночас інформативна складова досліджуваного сигналу зосереджена в значно вужчому частотному діапазоні — приблизно до 30 кГц. Частотні компоненти, розташовані вище цього значення, не несуть корисної інформації та можуть розглядатися як надлишкові або завадові.

З метою видалення небажаних високочастотних складових застосовується цифровий FIR-фільтр із частотою зрізу 32 кГц. Обраний фільтр забезпечує ефективне пригнічення спектральних компонентів вище заданої граничної частоти, що сприяє зменшенню рівня шуму та впливу сторонніх сигналів. Водночас у смузі пропускання допускаються незначні пульсації амплітудно-

частотної характеристики, які не призводять до істотного спотворення корисної частини спектра.

Застосування такого фільтраційного підходу дозволяє зберегти всю інформативну складову сигналу для подальшої обробки, одночасно мінімізуючи вплив небажаних високочастотних компонентів на результати вимірювань.

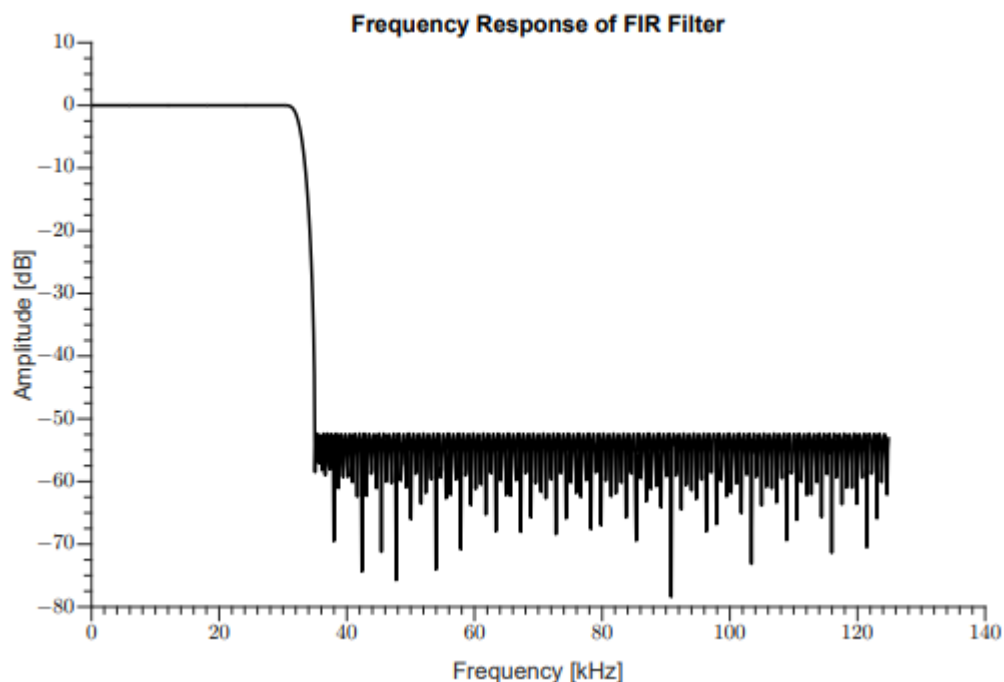


Рис. 3.1 Амплітудно-частотна характеристика FIR-фільтра, застосованого для фільтрації прийнятих даних

3.4 Сигнал

Часове усереднення є одним із базових методів підвищення відношення сигнал/шум (SNR) у прийнятих радіосигналах. Принцип цього методу полягає у багаторазовому вимірюванні одного й того самого корисного сигналу з подальшим обчисленням середнього значення відповідних дискретних відліків. На прикладі, наведеному на рисунку 9, кожен набір прийнятих даних містить 40 повторень послідовності Баркера, при цьому тривалість одного повторення становить 8 мс. Таким чином, початковий часовий інтервал сигналу тривалістю

320 мс поділяється на рівні сегменти по 8 мс, після чого відліки, що відповідають однаковим моментам часу в межах кожного сегмента, підсумовуються та нормуються шляхом ділення на загальну кількість повторень, тобто на 40.

Унаслідок застосування часового усереднення когерентні складові сигналу зберігають свої амплітудно-фазові характеристики, тоді як некогерентні компоненти, зокрема шум, зазнають істотного пригнічення. Оскільки послідовність Баркера є когерентною, процедура усереднення не призводить до спотворення її структури. Водночас рівень некогерентних складових зменшується пропорційно коефіцієнту $1/N$, де N — кількість усереднень [10]. Як наслідок, відношення сигнал/шум зростає у N разів, що відповідає залежності, наведеній у рівнянні (4). Для наведеного прикладу це забезпечує підвищення SNR у 40 разів, що еквівалентно приросту приблизно 16,0 дБ.

$$SNR_{\text{після}} = SNR_{\text{перед}}$$

На рисунку 3.2 наведено порівняльний аналіз необробленого прийнятого сигналу та сигналу після застосування процедури часового усереднення. З наведених результатів видно, що фрагмент сигналу, який відповідає послідовності Баркера, після усереднення практично не зазнає змін, тоді як рівень шумової складової суттєво зменшується. Як зазначалося раніше, теоретично очікуване зниження рівня шуму становить близько 16 дБ. Відповідно до даних, поданих на рисунку 23, середня потужність шуму до виконання усереднення становить приблизно 6 дБ, тоді як після усереднення вона зменшується до близько -10 дБ, що узгоджується з прогнозованим покращенням відношення сигнал/шум.

Разом із тим у шумовій складовій спостерігаються окремі дискретні точки, для яких ефект зниження рівня шуму є менш вираженим. Це явище пояснюється наявністю частково когерентного шуму, джерелами якого можуть

бути власні шумові характеристики приймального тракту SDR, а також наведення в з'єднувальних кабелях. Незважаючи на те, що в наведеному прикладі застосування усереднення може здаватися надмірним через достатньо високе початкове значення SNR, використання даного методу є обґрунтованим. Зокрема, він забезпечує можливість надійного передавання та виявлення сигналів з низьким рівнем потужності навіть у короткохвильовому діапазоні, який характеризується підвищеним рівнем фоновому шуму.

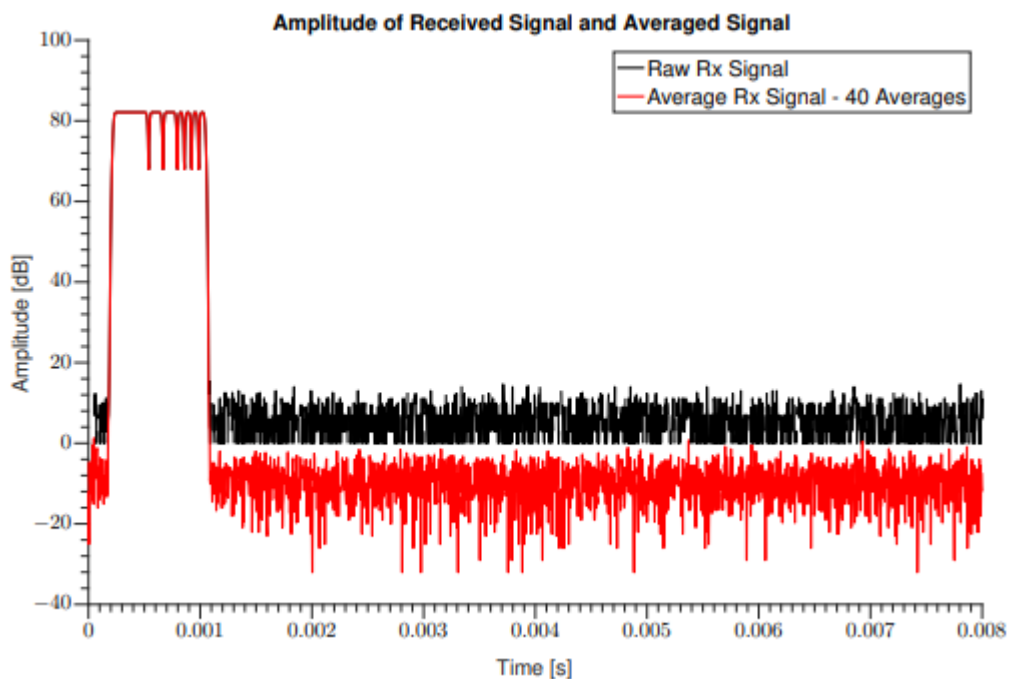


Рис. 3.2 Фазова характеристика прийнятих даних однієї передачі з фокусуванням на окремій послідовності Баркера

Після виконання усереднення окремих повторень у межах кожної передачі здійснюється додаткове усереднення сигналів між усіма передачами. Зазначена процедура виконується незалежно для кожного кутового положення вимірювань. Зокрема, як показано на рисунку 2.6, усереднення проводиться між передачами з однаковими значеннями несучої частоти: наприклад, усі чотири передачі на частоті 10 МГц усереднюються між собою, аналогічно обробляються передачі на частоті 20 МГц та на інших заданих частотах. Такий

підхід дозволяє додатково знизити вплив випадкових завад і підвищити достовірність результатів для кожної частотної та кутової конфігурації.

3.5 Виявлення максимальної потужності сигналу

Наступним етапом обробки після завершення процедур усереднення є визначення максимального значення потужності прийнятого сигналу для кожного кутового положення, що необхідно для подальшої побудови діаграми спрямованості випромінювання. З цією метою на початковому кроці виконується операція взаємної кореляції між усередненими прийнятими даними та еталонною формою переданого сигналу.

Процес взаємної кореляції описується рівнянням (3.1), у якому параметр τ відповідає часовому зсуву між порівнюваними сигналами. Застосування даної операції дає змогу визначити момент надходження корисного сигналу, оскільки значення τ , за якого взаємна кореляційна функція досягає максимального значення, відповідає часовому положенню прийнятого сигналу відносно еталонної хвильової форми.

$$R_{xy} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(\tau + t)dt \quad (3.1)$$

На рисунку 3.3 проілюстровано приклад взаємної кореляції між усередненими прийнятими даними та ідеалізованою формою переданого сигналу. За результатами обчислення кореляційної функції визначається її максимальне значення, яке надалі використовується для оцінювання відповідного часового зсуву між сигналами. У межах застосованого підходу від’ємна частина індексів кореляційної функції не має практичного значення, тому положення кореляційного піка визначається відносно нульового індексу.

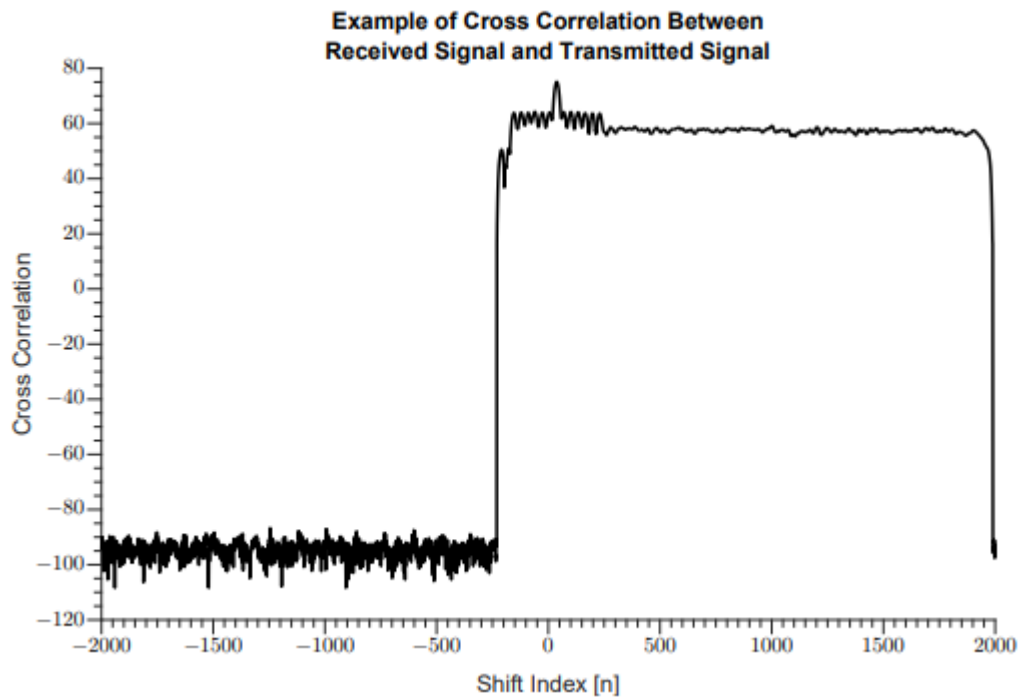


Рис. 3.3 Приклад взаємної (перехресної) кореляції між усередненим прийнятим сигналом та еталонною формою переданого сигналу

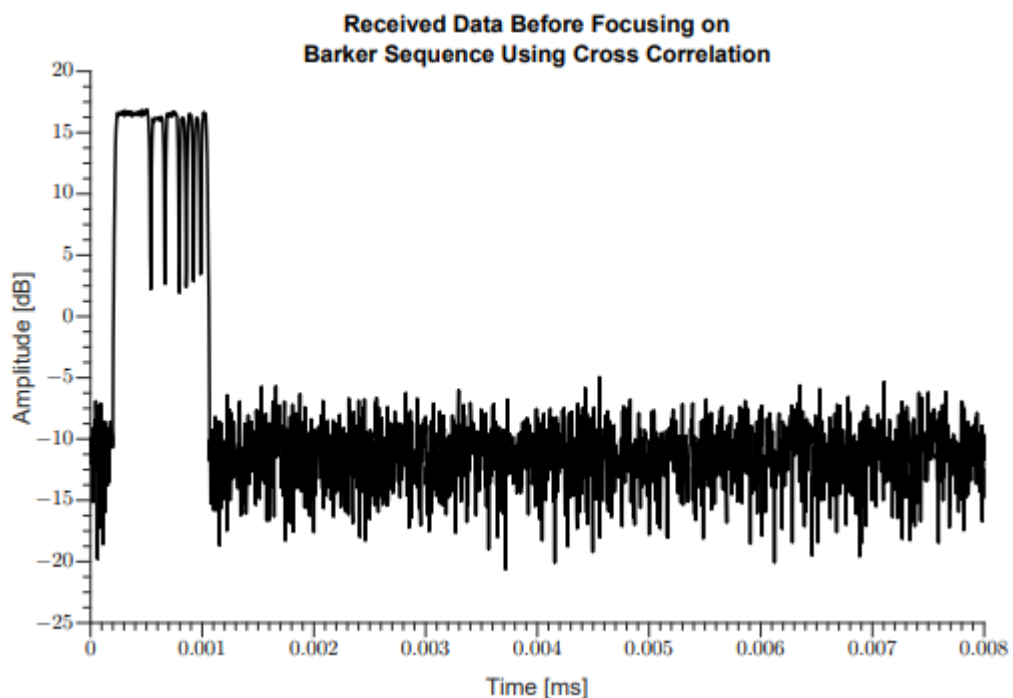


Рис. 3.4 Отримані дані до фокусування на послідовності Баркера за допомогою взаємної кореляції

Визначений індекс максимального значення взаємної кореляції разом із заздалегідь заданою тривалістю сигналу, яка є параметром, що встановлюється

користувачем, використовується для виділення з масиву прийнятих даних лише того часовго інтервалу, який відповідає послідовності коду Баркера. Це дозволяє надалі здійснювати коректний аналіз амплітудних та фазових характеристик корисного сигналу.

На рисунку 3.4 наведено приклад усередненого прийнятого сигналу до застосування процедури взаємної кореляції, яка використовується для подальшого виділення послідовності Баркера з масиву даних. Слід зауважити, що внаслідок виконання операції усереднення формується часовий сигнал, тривалість якого відповідає періоду пакетної (burst) передачі. У розглянутому випадку тривалість одного такого періоду становить 8 мс, що відповідає параметрам передавання, заданим у конфігурації експерименту.

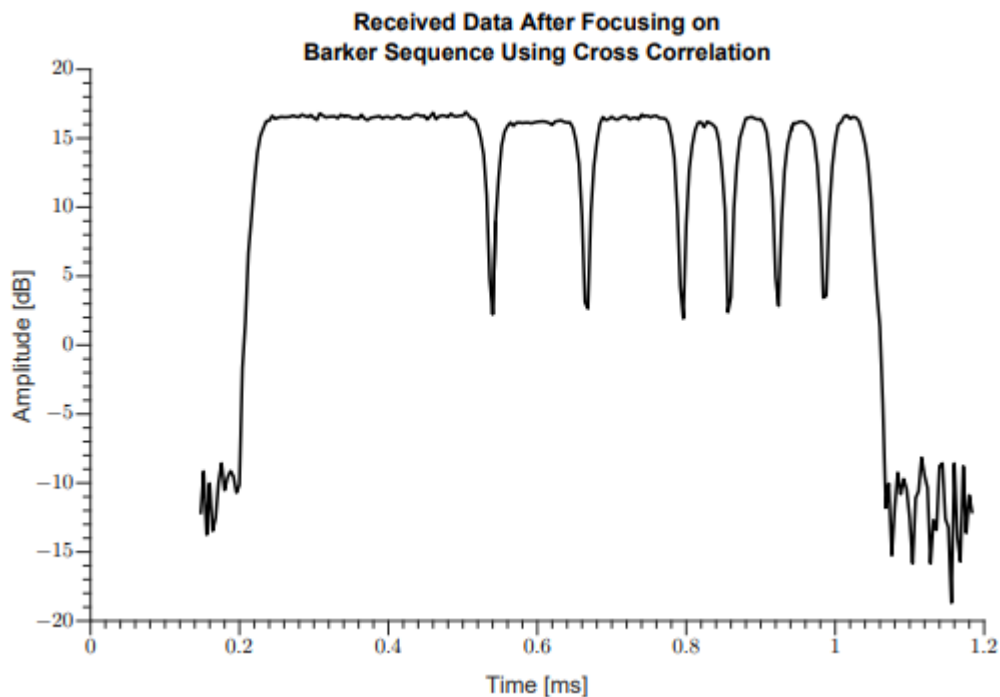


Рис. 3.5 Приклад взаємної кореляції між усередненим прийнятим сигналом і переданим сигналом

На рисунку 3.5 представлено часову реалізацію сигналу після застосування процедури взаємної кореляції, метою якої є виділення послідовності Баркера з усереднених прийнятих даних. Як впливає з наведеного прикладу, використання кореляційного підходу дозволяє ефективно

усунути надлишкові дискретні відліки, що передують та слідують за послідовністю Баркера. Це, у свою чергу, створює умови для виконання подальших етапів обробки виключно для амплітудної складової корисного сигналу, мінімізуючи вплив шуму та сторонніх компонентів, які не несуть інформаційної цінності.

Наступним етапом обробки є застосування фільтра типу *boxcar*, який являє собою простий усереднювальний фільтр. Амплітудна характеристика такого фільтра має сталу величину A в межах заданого часового інтервалу та дорівнює нулю поза ним. Довжина інтервалу з ненульовим значенням фільтра була визначена експериментальним шляхом і становить одну чверть від загальної тривалості часового ряду, зображеного на рисунку 3.5. Амплітуда фільтра A задається рівною $1/M$, де M відповідає довжині фільтра, що забезпечує збереження амплітуди корисного сигналу після фільтрації. Результат усереднення сигналу із застосуванням *boxcar*-фільтра наведено на рисунку 3.6.

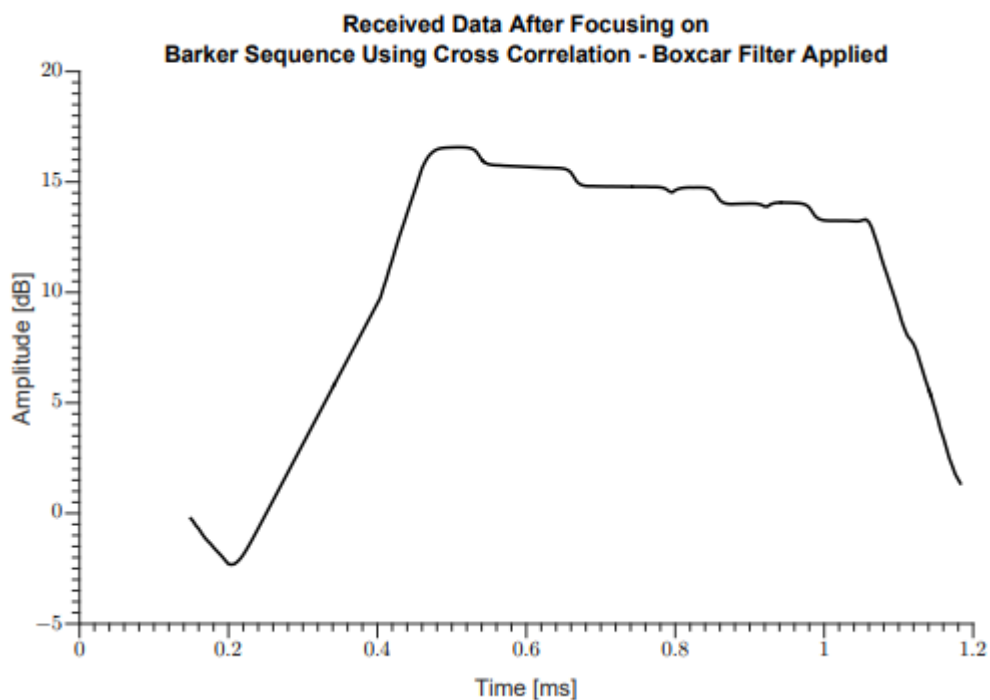


Рис. 3.6: Приклад взаємної кореляції між усередненим прийнятим сигналом і переданим сигналом із застосуванням фільтра *Boxcar*

3.6 Усереднення GPS-координат

Обробка координат глобальної навігаційної супутникової системи здійснюється шляхом усереднення всіх вимірних значень, отриманих для одного й того самого кутового положення. Координати зберігаються у вигляді трійки параметрів: широта, довгота та висота. Після виконання процедури усереднення формується єдине представницьке значення координат для кожного кута. Такий підхід дозволяє зменшити вплив випадкових відхилень положення безпілотного літального апарата під час режиму зависання, які зумовлені поривами вітру та притаманною польоту динамічною нестабільністю.

3.7 Розрахунок азимутальних кутів

Визначення азимутальних кутів для тестових точок виконується із застосуванням формули Гаверсіна у поєднанні із законом косинусів. Формула Гаверсіна наведена в рівнянні (3.2), де параметри ϕ_1 та ϕ_2 відповідають широтам першої та другої точок у радіанах, а λ_1 і λ_2 — їхнім довготам у радіанах. Величина r інтерпретується як радіус сфери, на поверхні якої розташовані точки, тобто радіус Землі. Застосування зазначених співвідношень забезпечує коректне визначення просторових кутових параметрів між точками вимірювань.

$$d = 2r \arcsin \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{\phi_2 - \phi_1}{2} \right) + \cos(\phi_2) \cos(\phi_1) \sin^2 \left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2} \right)} \right) \quad (3.2)$$

Закон косинусів подано у рівнянні (3.3), а графічне пояснення змінних, що входять до цього співвідношення, наведено на рисунку 3.7. Для практичного застосування закону косинусів необхідно визначити три відстані: між першою контрольною точкою, яка приймається за базову з нульовим азимутальним кутом (0°), та антеною об'єкта випробування (AUT); між поточною

контрольною точкою та AUT; а також між базовою контрольною точкою 0° і поточною контрольною точкою. Усі зазначені відстані обчислюються з використанням формули Гаверсіна, наведеної у попередньому підрозділі, що забезпечує узгодженість і коректність геометричних розрахунків.

$$C = \arccos\left(\frac{a^2 + b^2 - c^2}{2ab}\right) \quad (3.3)$$

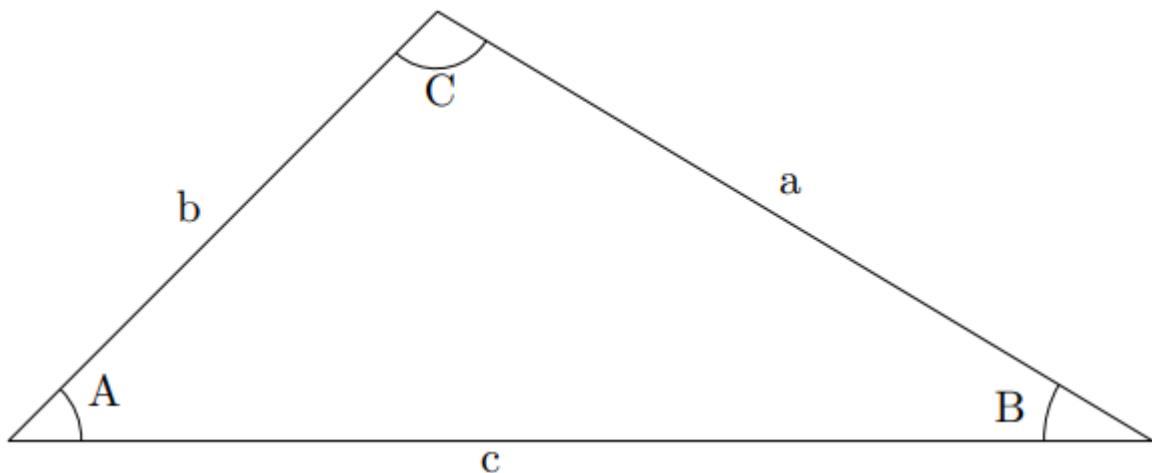


Рис. 3.7 Трикутник, що використовується для застосування закону косинусів

3.8 Розрахунок кута підйому

Кут підйому визначається із застосуванням базових тригонометричних співвідношень. На відміну від кута, зображеного на рисунку 1.1, у даному підході нульове значення кута підйому (0°) відраховується вздовж поверхні Землі, тоді як значення 90° відповідає напрямку, що проходить безпосередньо над антеною об'єкта випробування.

GPS-координати, які реєструються передавальним SDR, містять інформацію про широту та довготу наземної проєкції точки вимірювання, а також висоту безпілотного літального апарата. На рисунку 3.8 наведено приклад тестової точки, що використовується для визначення кута підйому. Горизонтальна відстань d між антеною об'єкта випробування (AUT) та відповідними наземними GPS-координатами визначається за формулою Гаверсіна, наведеною в рівнянні (3.2). Значення кута підйому α обчислюється

на основі відомої висоти БПЛА, горизонтальної відстані d та тангенціальної залежності між цими величинами, при цьому аналітичний вираз для розрахунку кута подано в рівнянні (3.4).

$$a = \arctang\left(\frac{\text{Altitude}}{d}\right) \quad (3.4)$$

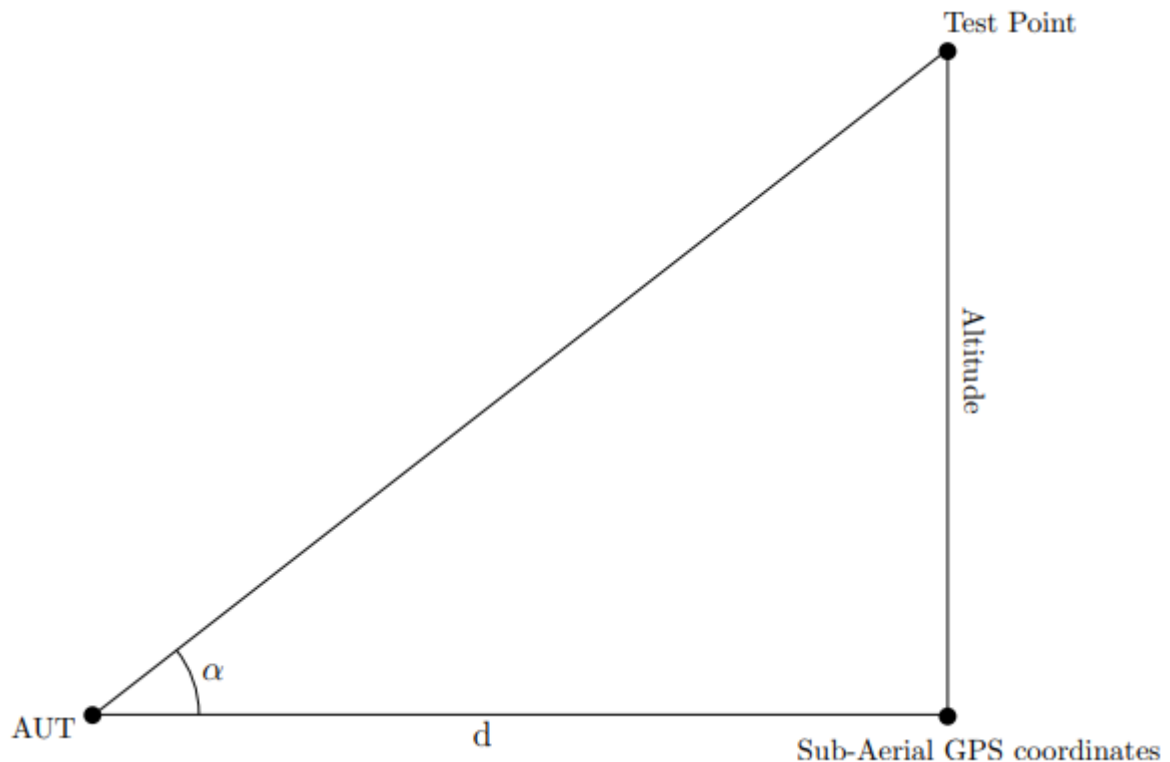


Рис. 3.8: Приклад тесту на висоту

3.9 Корекція діапазону

Корекція діапазону застосовується для нормалізації результатів вимірювань, виконаних на різних відстанях від антени об'єкта випробування (AUT), та ґрунтується на рівнянні передачі Фріса, поданому в рівнянні (3.5). Зазначене рівняння описує залежність потужності сигналу, що приймається вимірювальною системою, від переданої потужності P_t , коефіцієнтів підсилення передавальної та приймальної антен (G_t і G_r відповідно), довжини хвилі переданого сигналу λ та відстані R між передавальною і приймальною антенами.

Застосування корекції на основі рівняння Фріса дозволяє привести виміряні значення потужності до порівнюваного рівня, усуваючи вплив змінної дальності між БПЛА та АУТ. Це забезпечує коректне зіставлення результатів, отриманих у різних просторових точках, і підвищує точність побудови діаграм спрямованості антени.

$$P_r = P_t G_r G_t \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \quad (3.5)$$

Змінною, що безпосередньо враховується в рівнянні передачі Фріса під час виконання корекції дальності, є відстань R між передавальною та приймальною антенами. За умови незмінності інших параметрів, зі збільшенням відстані R рівень прийнятої потужності зменшується пропорційно квадрату цієї відстані (R^2). У практичних умовах відстань між безпілотним літальним апаратом та антеною об'єкта випробування може змінюватися під впливом метеорологічних факторів або внаслідок похибок визначення координат GPS. З метою компенсації впливу таких відхилень застосовується процедура корекції дальності.

Корекція дальності враховується в останньому доданку рівняння (3.6), де R_n позначає відстань між АУТ і БПЛА в n -тій точці вимірювання, а R_{ref} — еталонну відстань між АУТ і БПЛА. Обчислене коригувальне значення додається до потужності прийнятого сигналу $P_{r,n}$ (дБ), визначеної відповідно до описаної раніше процедури обробки даних. У випадку, коли R_n перевищує R_{ref} , корекційний доданок має додатне значення та компенсує втрати потужності, спричинені збільшенням відстані. Навпаки, якщо R_n є меншою за R_{ref} , корекція набуває від'ємного значення, що враховує зменшення відстані між антенами. Значення R_{ref} може бути задане як фіксована величина або вибране рівним відстані для першої вимірювальної точки.

$$P_{r,n,corrected(dB)} = P_{r,n(dB)} + 20 \log_{10} \left(\frac{R_n}{R_{ref}} \right) \quad (3.6)$$

3.10 Побудова діаграми спрямованості випромінювання

Описані вище методи обробки даних застосовуються незалежно для кожної тестової частоти. Після завершення повного циклу обробки для кожної частоти формується однакова кількість розрахованих значень максимального рівня прийнятого сигналу та відповідних їм кутових положень. На наступному етапі отримані значення максимальних рівнів сигналу зіставляються з відповідними азимутальними або кутами підйому та відображаються у вигляді прямокутного графіка. Така візуалізація дозволяє наочно представити просторовий розподіл випромінювання антени та слугує основою для подальшого аналізу її діаграми спрямованості на кожній досліджуваній частоті.

3.11 Вимірювання

3.11.1 Петльова антена: азимут $0\text{--}180^\circ$, висота 5° , тест на переміщення

Антенною об'єкта випробування (AUT) у даному експерименті є високочастотна петльова антена, зображена на рисунку 33, яка функціонує в діапазоні частот від 0,1 МГц до 30 МГц. Електромагнітну модель цієї антени було побудовано з використанням програмного комплексу FEKO [11], що дозволило виконати чисельне моделювання її випромінювальних характеристик.

Результати моделювання азимутальної діаграми спрямованості наведено на рисунку 3.12. Отримана діаграма має характерну для петльових антен форму: максимуми випромінювання зосереджені в площині петлі, тоді як напрямки мінімального випромінювання (нульові точки) орієнтовані в бік її геометричного центра. Така конфігурація підтверджує відповідність змодельованих характеристик теоретичним уявленням про просторовий розподіл випромінювання петльових антен і слугує базою для подальшого порівняння з експериментальними результатами вимірювань.

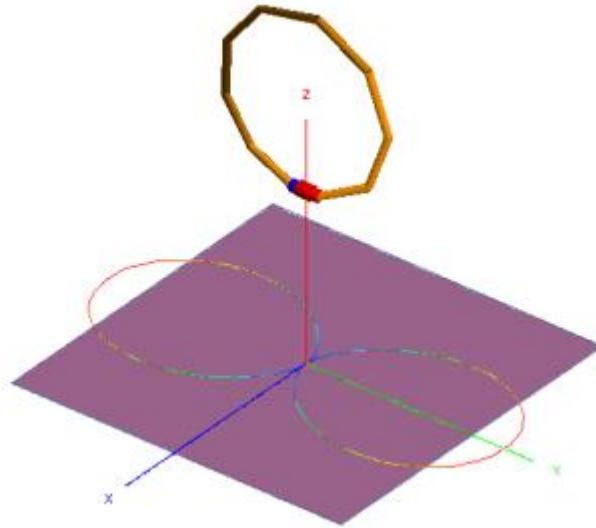


Рис. 3.9 Модель HF-петлі FEKO з розрахованою діаграмою спрямованості

Для виконання експериментальних вимірювань петльову антену було зорієнтовано таким чином, щоб максимуми її діаграми спрямованості в азимутальній площині відповідали напрямкам 0° та 180° , тоді як напрям мінімального випромінювання (нуль діаграми) був спрямований у бік 90° . Вимірювання азимутальної діаграми здійснювалися з кутовим кроком 5° у діапазоні від 0° до 180° .

Схема випробувальної установки та просторове розташування тестових точок наведені на рисунку 3.10. На рисунку 3.12 показано конфігурацію вимірювального стенда, що включає петльову антену, еталонну антену та приймальний SDR, змонтовані для проведення експерименту. Тестові точки визначалися вручну, що забезпечувало можливість поетапного переміщення передавальної антени, зображеної на рисунку 3.11, між послідовними позиціями вимірювань. Загальний вигляд експериментальної установки перед початком тестування представлено на рисунку 3.13.

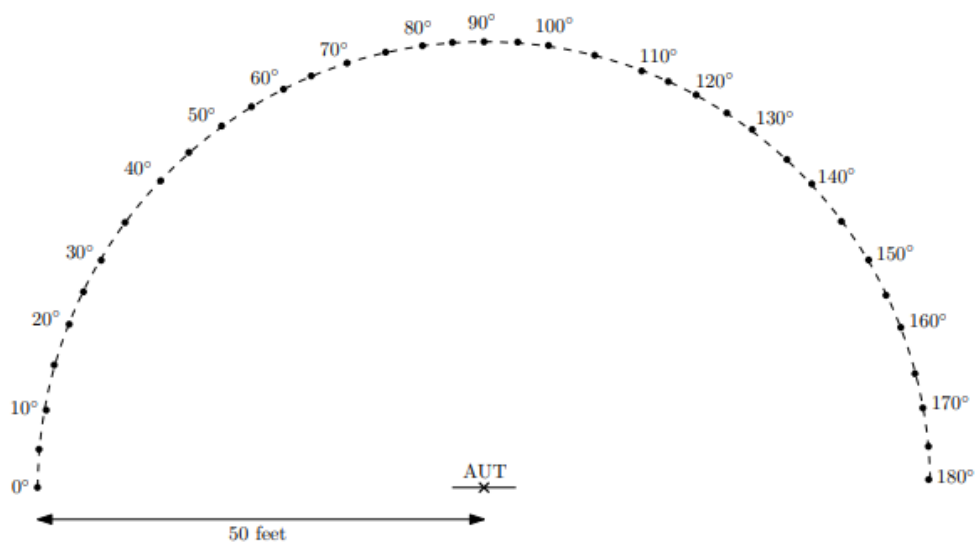


Рис. 3.10 Схема розташування тестових точок для проведення вимірювань азимутальної діаграми спрямованості

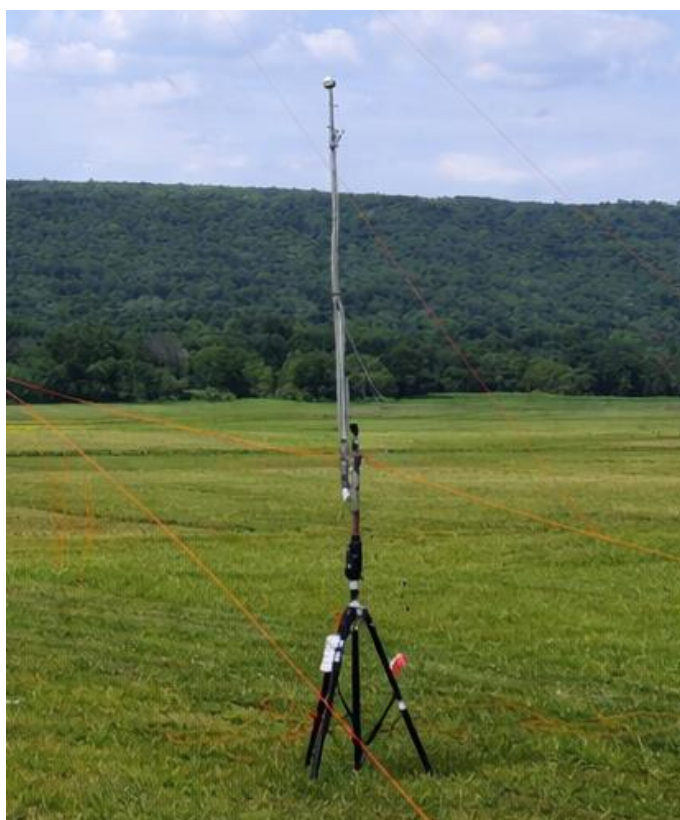


Рис. 3.11 Передавальна антена та програмно-кероване радіо (SDR), використані у вимірвальній установці



Рис. 3.12 Петльова антена, еталонна антена та приймальний програмно-керований радіоприймач (SDR), встановлені для проведення вимірювань

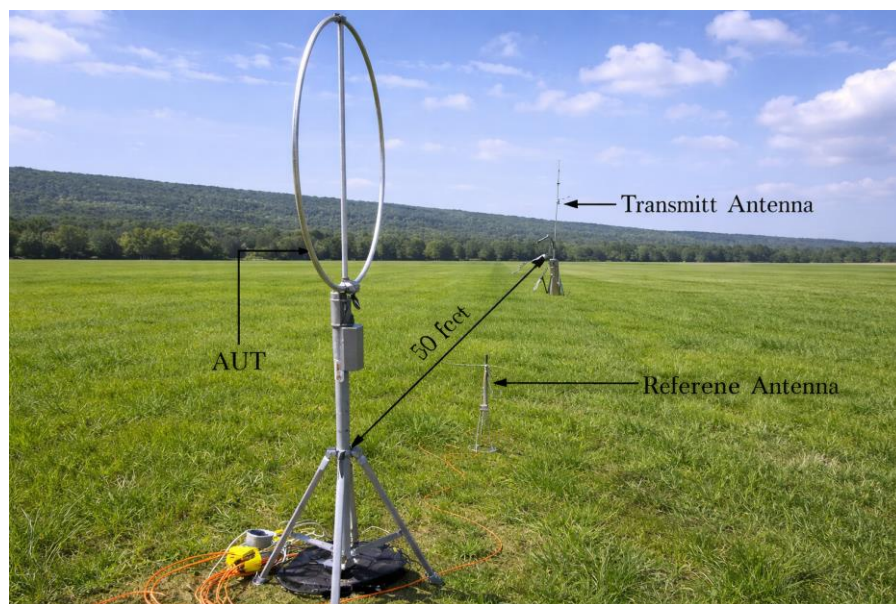


Рис. 3.13 Загальна конфігурація вимірювальної установки для побудови азимутальної діаграми спрямованості

Даний експеримент було виконано з метою вимірювання характеристик петльової антени на трьох обраних робочих частотах: 17,48 МГц, 19,43 МГц та 25,18 МГц. Для кожної частоти здійснювалося передавання ста імпульсів, які надалі підлягали процедурі усереднення, що забезпечило сумарний вигрaш

після обробки на рівні приблизно 20 дБ. Отримані результати вимірювань наведено нижче.

У кожній тестовій точці, розташованій уздовж напівкола вимірювань, виконувалося по чотири окремі передачі для кожної з досліджуваних частот. Таким чином, для однієї точки загальна кількість передач становила дванадцять. На рисунках 3.14, 3.15 та 3.16 наведено експериментально отримані азимутальні діаграми спрямованості для частот 17,48 МГц, 19,43 МГц і 25,18 МГц відповідно, а також проведено їх порівняння з результатами чисельного моделювання, виконаного в програмному середовищі FEKO.

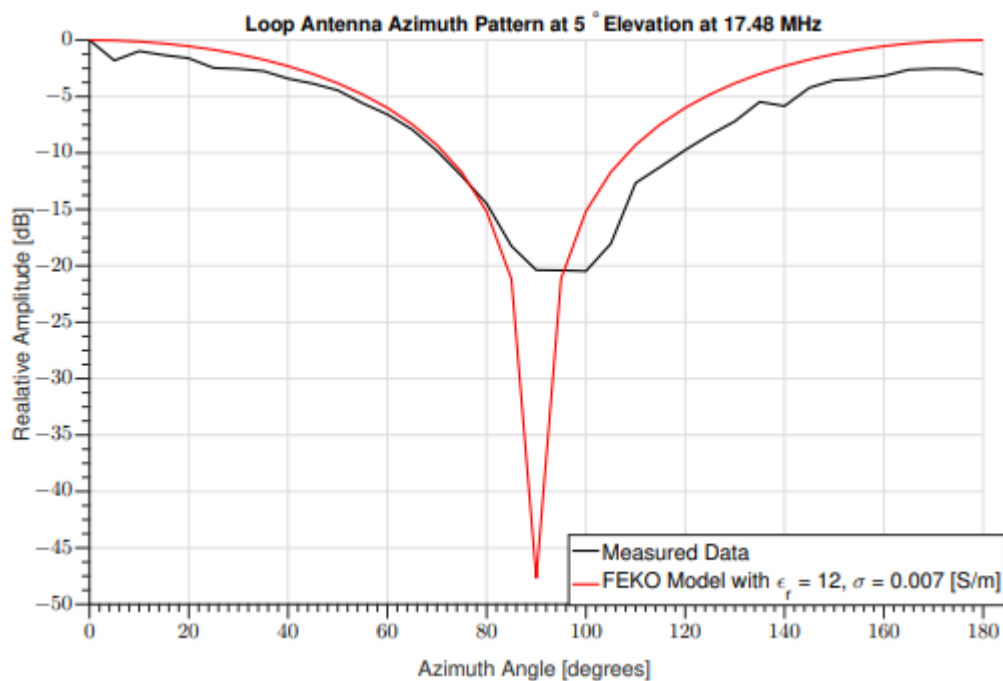


Рис. 3.14 Експериментально виміряні дані та результати чисельного моделювання FEKO для азимутальної діаграми спрямованості на частоті 17,48 МГц

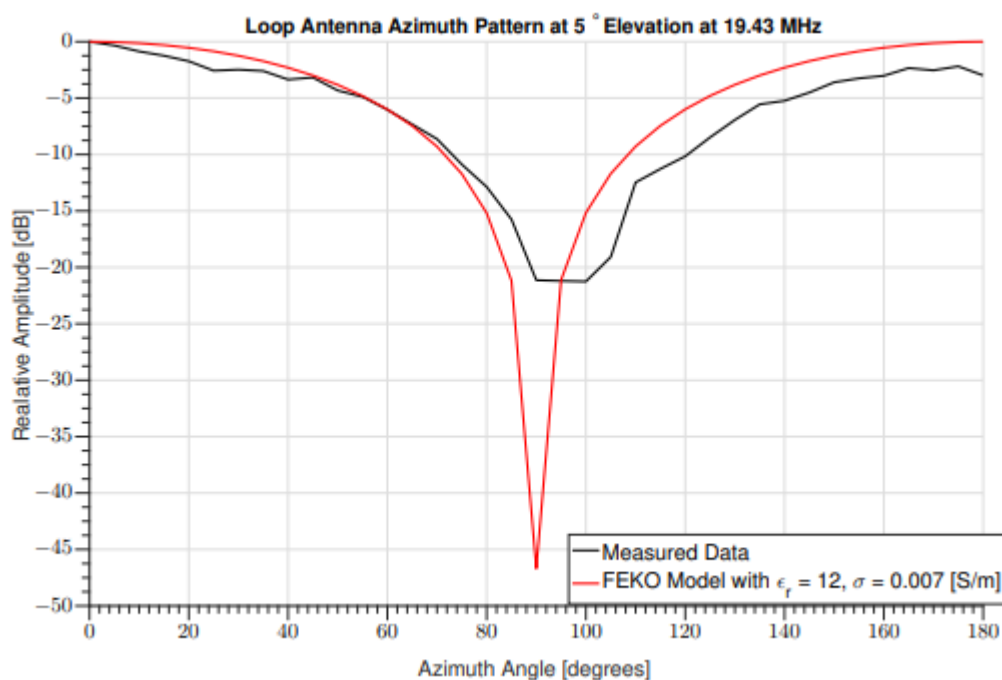


Рис. 3.15 Експериментально отримані результати та дані чисельного моделювання FEKO для азимутальної діаграми спрямованості на частоті 19,43 МГц

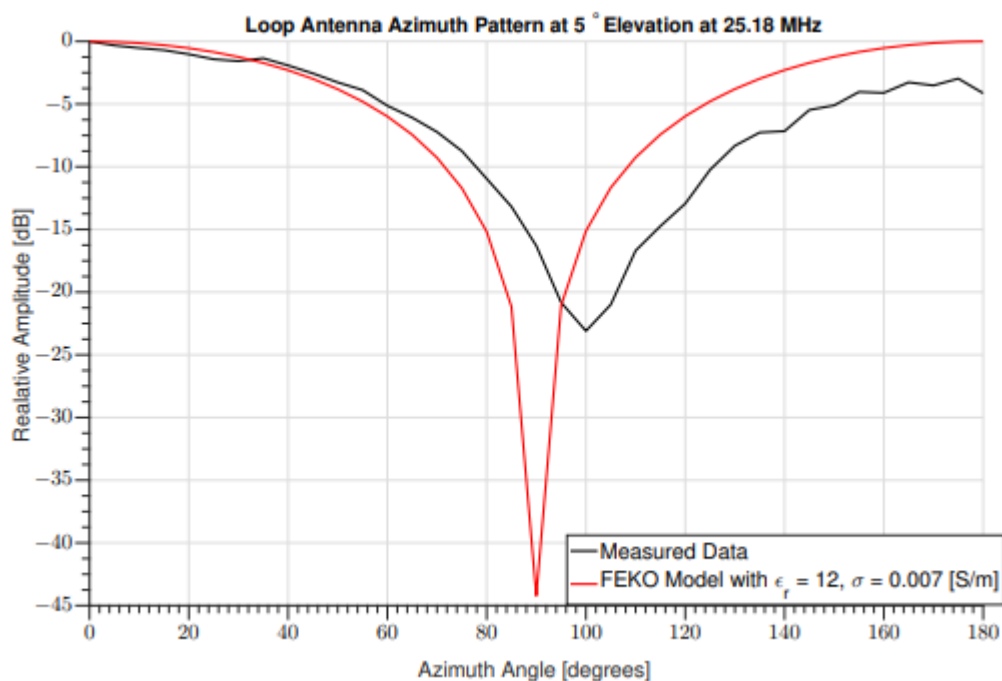


Рис.3.16 Експериментально виміряні результати та дані моделювання FEKO для азимутальної діаграми спрямованості на частоті 25,18 МГц

Отримані експериментальні результати демонструють загалом добру узгодженість із результатами чисельного моделювання. Для всіх трьох досліджуваних частот перші приблизно 80° азимутального сектору відтворюються відповідно до розрахункових моделей, зокрема в області, де діаграма спрямованості наближається до мінімального рівня. Положення нульового випромінювання для всіх частот зміщене орієнтовно на 10° , що, ймовірно, зумовлено неточною орієнтацією петльової антени, унаслідок чого її нульова точка не була спрямована строго в напрямку тестової позиції 90° .

У ділянці, де діаграма виходить із мінімуму та наближається до головного променя в напрямку 180° , загальна форма експериментальної діаграми відповідає результатам моделювання. Водночас рівень сигналу не досягає значень, характерних для головного променя в напрямку 0° , як це передбачено теоретичною моделлю. Найімовірнішою причиною такого відхилення є нерівність поверхні, на якій були розташовані тестові точки, унаслідок чого вимірювання в діапазоні кутів від 100° до 180° виконувалися на дещо меншій висоті порівняно з попередніми точками.

3.11.2 петльова антена: азимут 0° , висота $0-22^\circ$

Для дослідження діаграми піднесення антени об'єкта випробування (AUT) застосовувалася та сама високочастотна петльова антена, що наведена на рисунку 33. Випробування виконувалися на трьох ідентичних робочих частотах, що використовувалися під час вимірювання азимутальної діаграми, а саме 17,48 МГц, 19,43 МГц та 25,18 МГц. Вимірювання діаграми піднесення здійснювалися при фіксованому азимуті 0° , тобто в напрямку основного променя антени.

Вплив земної поверхні на форму діаграми піднесення проявляється у різкому зменшенні коефіцієнта підсилення до нульових значень у разі наближення кута підйому до горизонту. Для порівняльного аналізу було виконано чисельне моделювання антени в програмному середовищі FEKO; відповідна модель та розрахована діаграма піднесення наведені на рисунку

3.17. Під час моделювання використовувалися ті самі параметри ґрунту, що й у попередніх розрахунках діаграми піднесення, а саме відносна діелектрична проникність $\epsilon_r = 12$ та електропровідність $\sigma = 0,007$ См/м.

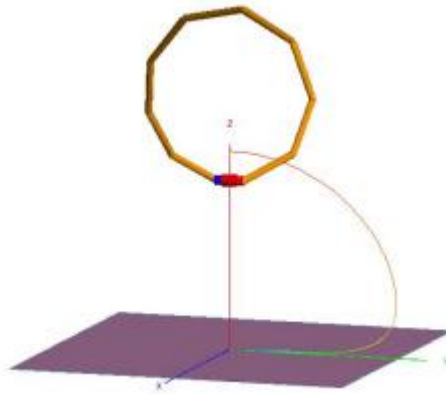


Рис. 3.17 Модель ФЕКО, застосована для вимірювання діаграми підйому антени

Для проведення даного експерименту використовувалася малогабаритна монопольна антена, зображена на рисунку 39, яку підіймали з кроком у два фути з метою вимірювання діаграми спрямованості петльової антени за кутом підйому. Контроль висоти розташування антени здійснювався за допомогою вимірювальної рулетки, наведеної на рисунку 3.18. Передавальну антену було розміщено на відстані 50 футів від петльової антени, що забезпечувало дискретизацію кута підйому з кроком приблизно 2° .

На рисунку 40 представлено велику телескопічну щоглу, яка застосовувалася для вертикального переміщення передавальної антени за допомогою блоку, встановленого у верхній частині конструкції. Загальна висота щогли становила 25 футів, що уможливлювало виконання вимірювань діаграми підйому в діапазоні кутів від 0° до орієнтовно 25° .



Рис. 3.18 Малогабаритна монопольна антена, застосована для вимірювання діаграми спрямованості петльової антени

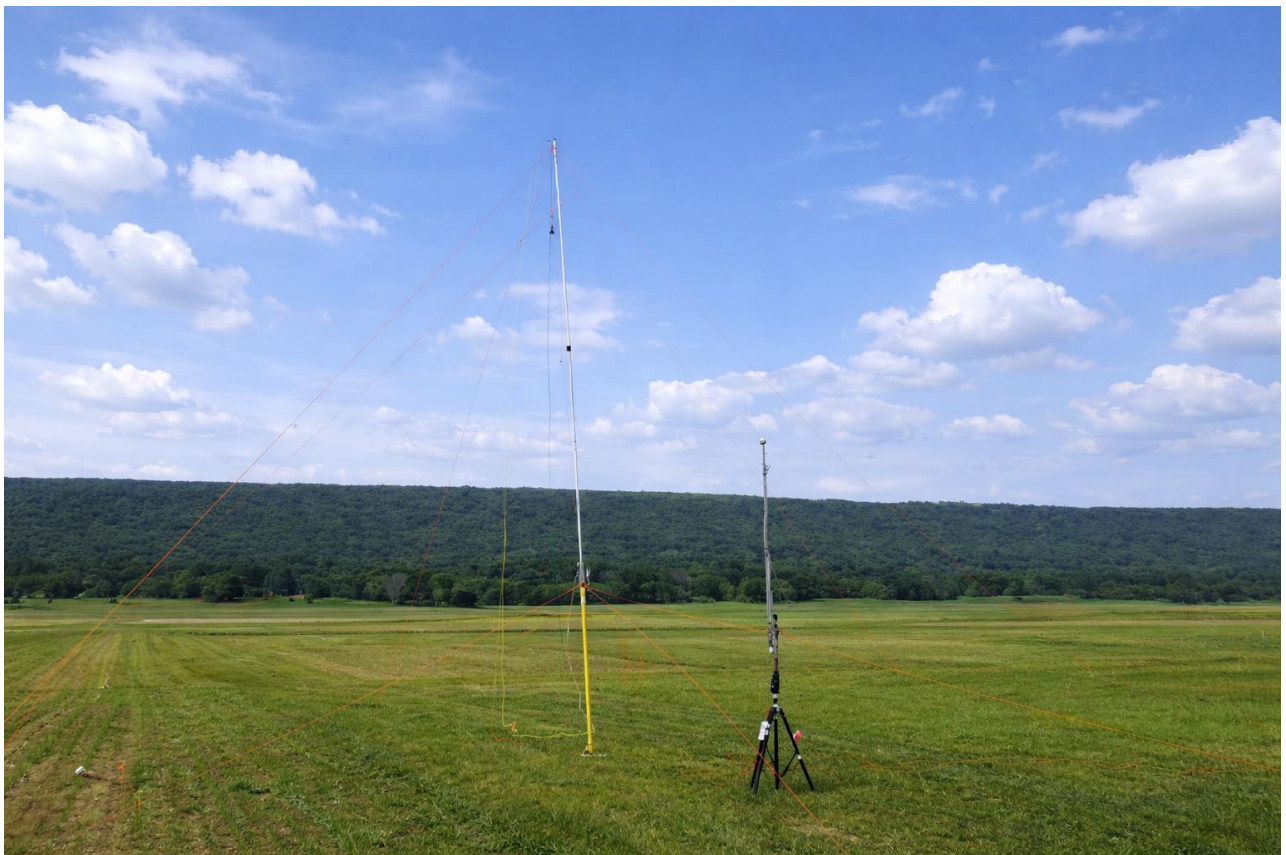


Рис. 3.19 Конфігурація експериментальної установки для вимірювання діаграми підйому (за висотою)

На рисунках 3.20, 3.21 та 3.22 наведено експериментально отримані діаграми спрямованості у порівнянні з результатами чисельного моделювання в програмному середовищі FEKO для частот 17,48 МГц, 19,43 МГц та 25,18 МГц відповідно. Загалом виміряні діаграми демонструють задовільну узгодженість із розрахунковими даними, хоча точність відповідності є нижчою, ніж у випадку азимутальних діаграм. Попри це, отримані результати надають достатні підстави стверджувати, що розроблена вимірювальна система придатна для оцінювання діаграми підйому антени.

Виявлені розбіжності між експериментальними результатами та моделлю FEKO можуть бути зумовлені низкою практичних чинників. Зокрема, малогабаритна монопольна антена не забезпечувала повної механічної стабільності внаслідок її підйому за допомогою блоку. Зі збільшенням висоти ускладнювалося утримання антени в заданому положенні через вплив сильних поривів вітру та обмеження, накладені направляючими дротами висувної щогли. Крім того, монопольна антена мала обмежену площу заземлення, що могло призводити до наведення струмів на лінії живлення між щоглою та антеною. Це, у свою чергу, могло змінювати поляризацію антени на невизначену або спричиняти формування псевдодипольної структури, утвореної антеною разом із лінією живлення. Кожен із зазначених факторів або їх поєднання міг негативно вплинути на точність вимірювань і стати причиною відхилень від результатів моделювання FEKO.

Крім того, було встановлено, що зі зменшенням кута підйому до значень, близьких до нуля, виміряні амплітуди сигналу швидко наближалися до рівня шуму приймальної системи. У результаті мінімальні значення діаграми спрямованості в експерименті визначалися переважно шумовим порогом вимірювань, а не відтворювали наднизькі рівні випромінювання, які можуть бути отримані за допомогою програмного моделювання в FEKO або інших електромагнітних симуляторах.

Окрім зазначених факторів, додатковим джерелом розбіжностей між експериментальними даними та результатами моделювання ФЕКО можуть бути відмінності між параметрами ґрунту, використаними в чисельній моделі, та реальними властивостями ґрунту на місці проведення випробувань. Такі невідповідності можуть впливати на форму та рівні діаграми підйому, особливо в області малих кутів.

3.12 Висновок до розділу 3

У даній роботі наведено ґрунтовний опис методики вимірювання та обробки радіочастотних сигналів із використанням програмно-визначених радіостанцій (SDR) у поєднанні з HF-петльовою антеною як антеною об'єкта випробування (AUT). Показано, що вимірювальні дані зберігаються у формі комплексних відліків із поділом на дійсну (I) та уявну (Q) складові, що забезпечує коректне відтворення часових, амплітудних і фазових характеристик сигналу на етапах подальшої цифрової обробки.

Процес обробки сигналів включає впорядкування файлів за значенням несучої частоти, пригнічення високочастотних завад із застосуванням FIR-фільтра, часове усереднення з метою підвищення відношення сигнал/шум, а також визначення максимального рівня сигналу шляхом взаємної кореляції з еталонною послідовністю коду Баркера. Для зменшення впливу нестабільності положення безпілотного літального апарата виконується усереднення GPS-координат, тоді як компенсація змін відстані між передавальною та приймальною антенами реалізується на основі рівняння передачі Фріса.

Результати експериментальних вимірювань свідчать, що отримані азимутальні та піднесені діаграми спрямованості HF-петльової антени загалом добре узгоджуються з даними чисельного моделювання в програмному середовищі ФЕКО. Виявлені відмінності пояснюються сукупним впливом механічних неточностей вимірювальної установки, неоднорідностей поверхні ґрунту та шумових складових приймального тракту. Загалом результати

підтверджують ефективність запропонованої методики для оцінювання діаграм спрямованості антен і демонструють доцільність використання SDR для виконання високоточних радіочастотних вимірювань у реальних умовах експлуатації.

Таким чином, запропонований підхід забезпечує надійне збирання, обробку та аналіз радіочастотних даних, що уможливорює точну оцінку характеристик антен і підвищує ефективність експериментальних досліджень у короткохвильовому діапазоні.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Питання щодо охорони праці

Розроблення програмного забезпечення для дослідження каналів зв'язку в телекомунікаційних системах виконувалося з використанням персонального комп'ютера. У зв'язку з цим робота здійснювалася з обов'язковим дотриманням вимог Державних санітарних правил і норм роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин (ДСанПіН 3.3.2.007-98), затверджених постановою Головного державного санітарного лікаря України від 10.12.1998 № 7, а також Вимог щодо безпеки та охорони здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями, затверджених наказом Міністерства соціальної політики України від 14.02.2018 № 207 (НПАОП 0.00-7.15-18), які ґрунтуються на положеннях Директиви 90/270/ЄЕС від 29 травня 1990 року щодо мінімальних вимог безпеки та захисту здоров'я під час роботи з екранними пристроями.

У процесі експлуатації програмної системи умови праці повинні забезпечувати зниження впливу шкідливих факторів екранних пристроїв до гранично допустимих значень, зокрема рівнів випромінювання, шуму, вібрації та температури. Такі умови не мають призводити до виникнення соматичних порушень або інших патологічних змін стану здоров'я та зниження працездатності працівника, що відповідає чинним вимогам з охорони праці та безпеки життєдіяльності.

Під час організації робочого місця необхідно використовувати таке обладнання, яке не створює надмірного акустичного навантаження та не спричиняє перевищення допустимих теплових виділень. Рівні шуму на робочому місці мають відповідати вимогам Санітарних норм виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку (ДСН 3.3.6.037-99), затверджених постановою Головного державного санітарного лікаря України від 01.12.1999 № 37.

Параметри мікроклімату у виробничому приміщенні повинні підтримуватися у стабільних межах та відповідати вимогам Санітарних норм мікроклімату виробничих приміщень (ДСН 3.3.6.042-99), затверджених постановою Головного державного санітарного лікаря України від 01.12.1999 № 42

Робоче місце користувача під час роботи із системою має бути організоване з урахуванням ергономічних та антропометричних показників, а також психофізіологічних особливостей людини і специфіки виконуваних завдань у процесі розроблення програмного забезпечення. Розміщення елементів робочого місця повинно забезпечувати зручність та безпеку роботи.

Освітлення робочої зони має забезпечувати достатній контраст між екраном і навколишнім середовищем та відповідати вимогам ДСанПіН 3.3.2.007-98.

Відповідно до Технічного регламенту щодо медичних виробів, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 2 жовтня 2013 року № 753, телекомунікаційна система належить до категорії медичних виробів і може розглядатися як інструмент, апарат або пристрій, що використовується з метою проведення діагностики, здійснення моніторингу стану пацієнта, а також для підтримки та полегшення перебігу захворювання і процесу лікування.

Програмне забезпечення цієї системи було розроблене з урахуванням вимог безпеки таким чином, щоб його використання не призводило до виникнення загроз для клінічного стану пацієнтів, безпеки споживачів, а також здоров'я і безпеки користувачів чи інших осіб.

Згідно з вимогами, телекомунікаційна система разом з електронною програмною складовою спроектована таким чином, щоб забезпечувати необхідний рівень надійності, стабільність результатів та ефективність функціонування відповідно до свого призначення. Конструкцією системи передбачено механізми, спрямовані на усунення або зменшення можливих ризиків у разі виникнення одиничних відмов.

Розроблення програмного забезпечення здійснювалося відповідно до сучасного рівня науково-технічних знань із дотриманням принципів життєвого циклу програмного забезпечення, процедур управління ризиками, а також процесів верифікації та валідації.

У конструкції системи реалізовано заходи, спрямовані на зниження ризиків утворення електромагнітних полів, які за нормальних умов експлуатації можуть негативно впливати на роботу іншого обладнання або технічних засобів. Крім того, передбачено технічні рішення, що забезпечують захист від випадкового ураження електричним струмом за умови правильного монтажу та експлуатації. Зокрема, система має робочу ізоляцію і виконана таким чином, що її підключення до електричної мережі можливе лише після приєднання корпусу до заземлювального пристрою, тоді як під час відключення від мережі роз'єднання корпусу із заземленням (нульовим захисним провідником) здійснюється в останню чергу. Рівень і стан ізоляції струмопровідних елементів відповідають встановленим правилам експлуатації системи.

Отже, розглянута телекомунікаційна система відповідає вимогам охорони праці та техніки безпеки і є безпечною для користувачів.

4.2 Питання щодо безпеки в надзвичайних ситуаціях

У разі виникнення загрози або настання надзвичайних ситуацій важливим завданням є забезпечення безперервного та надійного функціонування об'єктів, оснащених телекомунікаційними системами.

Відповідно до вимог Державних будівельних норм ДБН В.1.2-4-2006 «Інженерно-технічні заходи цивільного захисту (цивільної оборони)», до основних напрямів підвищення стійкості функціонування таких об'єктів належать:

- забезпечення захисту працівників та службовців;
- підвищення надійності інженерно-технічного комплексу;

- запобігання або обмеження негативного впливу вторинних уражаючих факторів;
- організація стійкого матеріально-технічного забезпечення та виробничих зв'язків;
- реалізація заходів зі зменшення можливих втрат і підтримання стабільності виробничих процесів;
- забезпечення безперебійного управління виробничою діяльністю;
- завчасна підготовка до відновлення роботи у разі її порушення.

Захист працівників і службовців забезпечується шляхом:

- розміщення у захисних спорудах;
- проведення евакуаційних заходів у заміську зону;
- забезпечення персоналу засобами індивідуального захисту та організації своєчасного і надійного оповіщення про небезпеку;
- розроблення і впровадження режимів захисту;
- герметизації виробничих і службових приміщень;
- проведення профілактичних медичних заходів.

Підвищення стійкості інженерно-технічного комплексу досягається завдяки:

- розміщенню обладнання та комунікацій у заглиблених або незавалюваних приміщеннях;
- посиленню конструктивної міцності будівель і споруд;
- забезпеченню підприємства кількома незалежними джерелами електропостачання;
- впровадженню на мережах газо- та теплопостачання заходів щодо запобігання витокам газу, пари й води, а також передбаченню резервних ліній для переключення енергопостачання з альтернативних магістралей або об'єктів.

Імовірність виникнення пожеж на підприємстві переважно визначається рівнем вогнестійкості будівель і споруд, ступенем їх пожежної та вибухової небезпеки, щільністю забудови, а також характером і масштабами можливих руйнувань.

Під час розроблення заходів, спрямованих на запобігання або зменшення впливу вторинних уражаючих факторів на об'єкт і його складові, необхідно враховувати особливості конкретного виробництва. Зокрема, на підприємствах нафтопереробної та нафтохімічної галузей унаслідок пошкодження або руйнування резервуарів, трубопроводів і запірної арматури може відбуватися утворення вибухонебезпечних газоповітряних сумішей, здатних до займання або вибуху, що, у свою чергу, призводить до пошкодження обладнання, будівельних конструкцій, будинків і споруд.

Умови виникнення та особливості поширення пожеж визначаються не лише категорією виробництва за пожежною безпекою, а й рівнем вогнестійкості будівель і споруд. За цим показником усі будинки та споруди класифікуються на п'ять ступенів вогнестійкості: I, II, III, IV та V.

Лікувальні корпуси психіатричних лікарень і диспансерів повинні відповідати вимогам не нижче III ступеня вогнестійкості.

Водночас будівлі лікувальних закладів місткістю до 60 ліжок, а також амбулаторно-поліклінічні установи, розраховані на обслуговування до 90 відвідувачів за зміну, допускається проектувати з IV або V ступенем вогнестійкості за умови використання рублених чи брущатих стінових конструкцій.

У разі розміщення лікувальних, амбулаторно-поліклінічних закладів або аптек у будівлях іншого функціонального призначення такі приміщення, за винятком службових приміщень медичного персоналу в громадських спорудах та аптечних кіосків, повинні бути конструктивно відокремлені від інших зон протипожежними стінами першого типу та обладнані окремими самостійними виходами безпосередньо назовні.

Рівень вогнестійкості будинків і споруд встановлюється на підставі мінімально допустимих меж вогнестійкості основних будівельних конструкцій, а також характеристик горючості матеріалів, з яких вони виготовлені. Вогнестійкість конструктивних елементів визначається часом їх опору дії вогню до моменту займання або втрати несучої здатності та вимірюється в

годинах. Будівельні матеріали за здатністю до горіння поділяються на три основні групи: горючі, важкогорючі та негорючі.

З метою запобігання виникненню або обмеження поширення пожеж, отруєнь та інших вторинних уражаючих факторів на підприємствах реалізуються заходи протипожежної й інженерно-технічної профілактики. До них належать дії, спрямовані на локалізацію пожеж і зменшення їх наслідків, зокрема облаштування протипожежних розривів поблизу нагрівальних печей і технологічних установок, формування та підготовка сил і засобів пожежогасіння, винесення складів паливно-мастильних матеріалів і вибухонебезпечних речовин за межі території об'єкта із одночасним скороченням їх запасів, обвалування резервуарів і складів сильнодіючих отруйних речовин, оснащення системами їх нейтралізації, створення запасів води в резервуарах, а також впровадження інших необхідних заходів захисту.

Під час оцінювання стійкості функціонування об'єкта в умовах надзвичайних ситуацій додатково слід враховувати його розташування щодо меж зон можливого катастрофічного затоплення у разі руйнування гребель гідротехнічних споруд, а також потенційні наслідки такого впливу.

На стійкість функціонування об'єктів істотно може впливати радіоактивне забруднення території, у зв'язку з чим для забезпечення безпеки персоналу розробляються та впроваджуються відповідні режими радіаційного захисту.

До таких заходів належать скорочення обсягів матеріально-технічних ресурсів, що зберігаються безпосередньо на території підприємства, формування необхідних запасів і резервів у заміській зоні, зокрема сировини, палива, обладнання, комплектуючих виробів, запасних частин, будівельних матеріалів, а також пересувних електричних і компресорних установок для виконання аварійно-рятувальних та інших невідкладних робіт. Крім того, передбачається завчасна підготовка підприємства до переходу на резервні або автономні джерела електро-, паро- та водопостачання, а також попереднє вивчення можливостей залучення місцевих джерел сировини, палива,

комплектуючих і інших матеріалів, необхідних для забезпечення виробничого процесу.

Важливим заходом є завчасна підготовка до відновлення порушеного виробництва, для чого на об'єкті розробляється план відновлювальних робіт, що дозволить значно скоротити час на проведення робіт у випадку часткового зруйнування об'єкта.

4.3 Висновок до розділу 4

У підрозділі з охорони праці здійснено обґрунтування безпечності експлуатації телекомунікаційної системи з точки зору дотримання вимог охорони праці.

У підрозділі, присвяченому безпеці в надзвичайних ситуаціях, виконано аналіз заходів щодо підвищення стійкості функціонування об'єктів, які використовують електроенцефалографічну систему, а також розглянуто основні способи захисту персоналу зазначених об'єктів в умовах надзвичайних ситуацій.

ВИСНОВКИ

Метою даного дослідження було розроблення комплексної системи для вимірювання діаграми спрямованості зовнішньої антени. Запропонований підхід проаналізовано в межах трьох взаємопов'язаних підсистем: системи керування польотом, системи радіочастотних вимірювань та підсистеми обробки експериментальних даних. Кожен із зазначених компонентів було інтегровано та апробовано на еталонній антені з наперед відомими характеристиками діаграми спрямованості.

Проведені випробування інтеграції платформи S900 з польотним контролером Pixhawk підтвердили їх функціональну сумісність і можливість стабільної роботи S900 з використанням Pixhawk та відповідних периферійних модулів.

Програмно-конфігуровані радіостанції Ettus E110 були налаштовані таким чином, щоб забезпечити гнучку реконфігурацію за допомогою користувацьких конфігураційних файлів. Це дало змогу застосовувати єдиний програмний код для виконання вимірювань за різних робочих частот, кількості кутових положень і тривалості експериментів. Як тестовий сигнал використовувався код Баркера, вибір якого обумовлений його сприятливими кореляційними властивостями, що забезпечують надійне виявлення сигналів малої потужності навіть за умов наявності значного фонового шуму.

У межах роботи було розроблено процедуру обробки сигналів, яка дає змогу зчитувати необроблені дані з SDR і на їх основі формувати діаграми спрямованості. Обробка охоплює як радіочастотні вимірювання, так і GPS-координати, зафіксовані радіостанціями під час експериментів, що надає користувачеві можливість вільного просторового переміщення передавальної антени в будь-якому напрямку.

Експериментальні вимірювання виконувалися виключно в наземних умовах із використанням двох SDR. Отримані результати були зіставлені з теоретично очікуваними діаграмами спрямованості, розрахованими в

програмному середовищі FEKO. Проведене порівняння засвідчило добру узгодженість експериментальних даних із результатами моделювання, що підтверджує ефективність розробленої системи як інструмента для вимірювання діаграм спрямованості антен.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ

1. Yurii Palianytsia, Vasyl Dunets, Liliia Khvostivska. Modeling of Phased Array Antenna for Data Transmission in Urban Environment. CEUR Workshop Proceedings. 3rd International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems, ITTAP 2023. Ternopil 22 November 2023 до 24 November 2023. Том 3628, с. 208-220.
2. Dual-Polarization Yagi Antenna for Meter Wavelength Range. Khymych H., Dunets V., Duda S., Palaniza Y., Kornieiev K. Radioelectronics and Communications Systems. Allerton Press Inc. United States. 2023. Volume 66. Issue 11, pp. 609–615.
3. Skolnik M. I. Introduction to radar systems. 3rd ed. New York : McGraw-Hill, 2001. 772 p.
4. Balanis C. A. Antenna theory: analysis and design. 4th ed. Hoboken : John Wiley & Sons, 2016. 1072 p.
5. Pozar D. M. Microwave engineering. 4th ed. Hoboken : John Wiley & Sons, 2011. 756 p.
6. Haykin S. Communication systems. 5th ed. Hoboken : John Wiley & Sons, 2009. 928 p.
7. Lyons R. G. Understanding digital signal processing. 3rd ed. Upper Saddle River : Prentice Hall, 2011. 992 p.
8. Proakis J. G., Salehi M. Digital communications. 5th ed. New York : McGraw-Hill, 2008. 1150 p.
9. Ettus Research. USRP E110 datasheet and hardware documentation. Ettus Research LLC, 2012.
10. Couch L. W. Digital and analog communication systems. 8th ed. Upper Saddle River : Prentice Hall, 2013. 896 p.
11. Oppenheim A. V., Schafer R. W. Discrete-time signal processing. 3rd ed. Upper Saddle River : Prentice Hall, 2010. 1120 p.

12. Altair Engineering. FEKO user's manual: electromagnetic simulation software. Altair, 2020.
13. Richards M. A. Fundamentals of radar signal processing. New York : McGraw-Hill, 2005. 672 p.
14. Kaplan E. D., Hegarty C. Understanding GPS/GNSS: principles and applications. 3rd ed. Norwood : Artech House, 2017. 1040 p.
15. MathWorks. MATLAB signal processing toolbox documentation. Natick : MathWorks Inc., 2022.
16. Довбня В. М., Кузьмін О. В. Антени та поширення радіохвиль : навч. посіб. Харків : ХНУРЕ, 2012. 320 с.
17. Литвиненко Л. М., Слюсар В. І. Радіотехнічні системи : підручник. Київ : Техніка, 2006. 512 с.
18. Слюсар В. І. Цифрова обробка сигналів у радіотехнічних системах : навч. посіб. Київ : НТУУ «КПІ», 2010. 408 с.
19. Глухов В. С., Пархоменко О. П. Основи теорії електромагнітних полів та хвиль : підручник. Київ : Вища школа, 2008. 367 с.
20. Бондаренко М. Ф., Шевченко О. А. Радіовимірювання та метрологія : навч. посіб. Київ : НАУ, 2014. 286 с.
21. Ярошенко В. О. Антенні пристрої радіозв'язку : навч. посіб. Львів : Львівська політехніка, 2011. 294 с.
22. Костюк І. П., Мельник Р. С. Безпілотні літальні апарати: принципи побудови та застосування : монографія. Київ : ЦНДІ ОВТ ЗС України, 2018. 356 с.
23. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 16 с.
24. Техноекологія та цивільна безпека. Частина «Цивільна безпека». Навчальний посібник / В.С. Стручок, – Тернопіль: ТНТУ ім. І.Пулля, 2022. – 150 с.