

Хмельницький національний університет  
Факультет інформаційних технологій  
Кафедра телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій

## КВАЛІФІКАЦІЙНИЙ ПРОЕКТ

Бакалавр

Освітній рівень

Система радіотехнічного моніторингу

Назва теми

КПЕК.023027.01.01 ПЗ

Галузь знань 17 Електроніка та телекомунікації  
Шифр і назва галузі

Спеціальність 172 Електронні комунікації та радіотехніка  
Шифр і назва спеціальності

Освітня програма «Електронні інформаційно-комунікаційні системи та мережі»  
Назва освітньої програми

Виконав:

здобувач 3 курсу, група ЕКРС-23-1



підпис

Віталій АНДРІЙЧУК

Ініціали, прізвище

Керівник: к. техн. наук, доцент



підпис

Леся КАРПОВА

Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:

Зав. кафедри: д-р техн. наук, професор



підпис

Сергій ПІДЧЕНКО

Ініціали, прізвище

«7» червня 2026р.


Хмельницький, 2026

Хмельницький національний університет

Факультет	<u>інформаційних технологій</u>
Кафедра	<u>телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій</u>
Освітній рівень:	<u>бакалавр</u>
Галузь знань:	<u>17 Електроніка та телекомунікації</u>
Спеціальність:	<u>172 Електронні комунікації та радіотехніка</u>
Освітня програма:	<u>Електронні інформаційно-комунікаційні системи та мережі</u>

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ТМІТ

 Сергій ПІДЧЕНКО

2026 р.


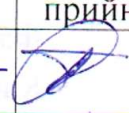


## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНИЙ ПРОЕКТ

АНДРІЙЧУК Віталію Васильовичу

Прізвище, ім'я по батькові здобувача

- 1 Тема роботи: «Система радіотехнічного моніторингу»  
керівник роботи: КАРПОВА Леся Вікторівна, к. техн. наук, доцент  
Затверджено наказом по університету від «20» січня 2026р. №7
- 2 Строк подання здобувачем роботи на кафедру 02 червня 2026 року
- 3 Вихідні дані до роботи: є необхідність розроблення системи радіотехнічного моніторингу для виявлення та аналізу радіосигналів малопотужних об'єктів у заданій зоні спостереження з урахуванням вимог до дальності, чутливості та завадостійкості.
- 4 Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): 1 Теоретичні основи побудови систем радіотехнічного моніторингу. 2. Функціональне моделювання системи радіотехнічного моніторингу. 3. Проєктування системи радіотехнічного моніторингу. 4. Моделювання та аналіз функціонування системи. 5. Розробка підсистеми керування та синхронізації
- 5 Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень):  
1. Структурна схема системи радіотехнічного моніторингу. 2. Функціональна схема блоку синхронізації системи радіотехнічного моніторингу. 3. Антенна решітка системи радіотехнічного моніторингу та результати її моделювання.

6 Консультанти розділів кваліфікаційного проекту


Розділ	Прізвища, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Нормоконтроль	СТЕЦІОК Віктор к.т.н., доцент		
Антиплагіат	ПИВОВАР Олег к.т.н., доцент		

7 Дата видачі завдання 23 січня 2026 року

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

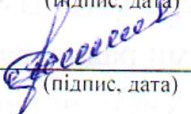
№ п/п	Найменування виду роботи	Форма звітності, термін виконання	Відмітка наукового керівника
1.	Розробка завдання на кваліфікаційний проект	09.02.2026р.	виконано
2.	Складання індивідуального плану на кваліфікаційний проект	15.02.2026р.	виконано
3.	Написання першого (теоретичного) розділу	10.03.2026р.	виконано
4.	Написання другого розділу	26.03.2026р.	виконано
5.	Написання третього розділу	15.04.2026р.	виконано
6.	Написання четвертого розділу	30.04.2026р.	виконано
7.	Написання вступу і загальних висновків та пропозицій до кваліфікаційного проекту	10.05.2026р.	виконано
8.	Оформлення кваліфікаційного проекту	15.05.2026р.	виконано
9.	Рецензування кваліфікаційного проекту	20.05.2026р.	виконано
10.	Презентаційні матеріали за результатами виконання кваліфікаційного проекту	28.05.2026р.	виконано

Здобувач

  
(підпис, дата)

Віталій АНДРІЙЧУК

Науковий керівник

  
(підпис, дата)

Леся КАРПОВА

## АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційного проекту: «Система радіотехнічного моніторингу»

Автор проекту: АНДРІЙЧУК Віталій Васильович

Керівник проекту: КАРПОВА Леся Вікторівна, к. техн. наук, доцент.

Пояснювальна записка: 70 сторінок, 25 рисунків, 1 таблиця, 40 джерел.

Графічна частина: технічні креслення.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** СИСТЕМА РАДІОТЕХНІЧНОГО МОНІТОРИНГУ, РАДІОЛОКАЦІЯ, РАДІОСИГНАЛ, ФАЗОВАНА АНТЕННА РЕШТКА, ЦИФРОВА ОБРОБКА СИГНАЛІВ, ВІДНОШЕННЯ СИГНАЛ/ШУМ, ЧУТЛИВІСТЬ ПРИЙМАЧА, ЗАВАДОСТІЙКІСТЬ.

Об'єктом дослідження є процеси виявлення, приймання та аналізу радіосигналів малопотужних і малорозмірних радіооб'єктів у заданій зоні контролю.

Метою кваліфікаційного проекту є проектування системи радіотехнічного моніторингу, здатної забезпечувати виявлення об'єктів із малою ефективною площею розсіювання на визначеній дальності з необхідним рівнем чутливості та завадостійкості.

Кваліфікаційний проект присвячений розробці структурної та параметричної моделі системи радіотехнічного моніторингу, обґрунтуванню її основних технічних характеристик, проектуванню антенної підсистеми та підсистеми обробки сигналів, а також оцінюванню ефективності функціонування запропонованого рішення.

02.06.2026 р.





## ЗМІСТ

	С.
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	4
ВСТУП.....	5
1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПОБУДОВИ СИСТЕМ РАДІОТЕХНІЧНОГО МОНІТОРИНГУ .....	7
1.1 Призначення та функціональні завдання систем радіотехнічного моніторингу.....	7
1.2 Методи виявлення, аналізу та контролю радіосигналів.....	14
1.2.1 Активні та пасивні методи радіомоніторингу.....	15
1.2.2 Радіолокаційний метод (активне виявлення) .....	15
1.2.3 Пасивний радіочастотний моніторинг .....	16
1.2.4 Частотний аналіз і спектральна обробка .....	16
1.2.5 Мікродоплерівський аналіз .....	17
1.2.6 Комбіновані системи моніторингу .....	17
1.2.7 Українські зразки БПЛА як об'єкти моніторингу .....	18
1.3 Особливості моніторингу малопотужних і малорозмірних радіооб'єктів	20
1.4 Сучасні технології та засоби радіотехнічного моніторингу .....	23
1.5 Висновки до першого розділу.....	26
2 ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ РАДІОТЕХНІЧНОГО МОНІТОРИНГУ.....	27
2.1 Розробка структурної схеми системи.....	27
2.2 Обґрунтування та вибір основних технічних параметрів.....	32
2.3 Розрахунок приймального радіотехнічного тракту .....	35
2.4 Проектування антенної підсистеми.....	39
2.5 Вибір апаратної та елементної бази .....	45

КПЕК.023027.01.01 ПЗ									
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Система радіотехнічного моніторингу Пояснювальна записка	Літ.	Арк.	Аркуші	
Розроб.		Андрійчук В.В.	<i>[Signature]</i>	05.06.26				2	70
Перевір.		Карпова Л.В.	<i>[Signature]</i>	05.06.26					
Реценз.									
Н. Контр.		Стецюк В.	<i>[Signature]</i>	7.06.26		ХНУ, гр. ЕКРс-23-1			
Затверд.		Підченко С.К.	<i>[Signature]</i>	7.06.26					

2.6 Висновки до другого розділу .....	47
<b>3 МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ .....</b>	<b>48</b>
3.1 Побудова математичної моделі системи .....	48
3.2 Аналіз параметрів прийнятого сигналу .....	50
3.3 Оцінювання чутливості, завадостійкості та дальності виявлення .....	55
3.4 Порівняльний аналіз ефективності запропонованого рішення .....	56
3.5 Висновки до третього розділу.....	57
<b>4 РОЗРОБКА ПІДСИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТА СИНХРОНІЗАЦІЇ .....</b>	<b>59</b>
4.1 Організація синхронізації функціональних блоків.....	59
4.2 Реалізація алгоритмів керування та цифрової обробки сигналів.....	61
4.3 Конструктивна реалізація та інтеграція підсистеми .....	63
4.4 Висновки до четвертого розділу.....	65
<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>67</b>
<b>ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....</b>	<b>69</b>

					КПЕК.023027.01.01 ПЗ	Арк.
						3
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АКФ	-	автокореляційна функція
БПЛА	-	безпілотний літальний апарат
ДС	-	діаграма спрямованості
ЕПР	-	ефективна площа розсіювання
ЗС	-	зондувальний сигнал
ІМС	-	інтегральна мікросхема
КНД	-	коефіцієнт направленої дії
НВЧ	-	надвисокі частоти
ПП	-	підсилювач потужності
ПРМ	-	приймальний модуль
ПЧ	-	проміжна частота
РЛС	-	Радіолокаційна система
РТМ	-	радіотехнічний моніторинг
С/Ш	-	відношення сигнал/шум
ФАР	-	фазована антенна решітка
ЦОС	-	цифрова обробка сигналів

					КПЕК.023027.01.01 ПЗ	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВСТУП

Стрімкий розвиток радіоелектронних технологій, бездротових систем зв'язку та безпілотних платформ зумовлює суттєве зростання електромагнітної активності в сучасному середовищі. Повітряний простір і радіочастотний спектр стають насиченими різноманітними джерелами випромінювання, що створює як нові можливості для цивільного застосування, так і потенційні загрози для об'єктів інфраструктури, оборонних систем і громадської безпеки. У цих умовах особливої актуальності набувають системи радіотехнічного моніторингу, призначені для виявлення, аналізу та контролю параметрів радіосигналів у заданій зоні спостереження.

Система радіотехнічного моніторингу є комплексом технічних засобів, що забезпечує приймання, перетворення, обробку та інтерпретацію електромагнітних сигналів з метою визначення їх джерел, просторового положення та основних характеристик. На відміну від класичних радіолокаційних засобів, такі системи можуть функціонувати як в активному, так і в пасивному режимах, що розширює можливості їх застосування для контролю повітряного простору, виявлення безпілотних літальних апаратів, моніторингу радіоефіру та забезпечення електромагнітної безпеки.

Розроблення подібних систем вимагає комплексного підходу, що поєднує методи теорії електромагнітних полів, радіоприймальних пристроїв, цифрової обробки сигналів, антенної техніки та мікроконтролерних технологій. Особливу увагу необхідно приділяти оцінюванню чутливості приймального тракту, завадостійкості, просторової селекції сигналів та оптимізації структурної побудови системи з урахуванням сучасної елементної бази.

Метою кваліфікаційного проєкту є проєктування системи радіотехнічного моніторингу з визначенням її структурної схеми, обґрунтуванням основних

					КПЕК.023027.01.01 ПЗ	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

технічних параметрів, розрахунком приймального радіотехнічного тракту та антенної підсистеми, а також оцінюванням ефективності функціонування в умовах реального радіоелектронного середовища.

Для досягнення поставленої мети в роботі передбачено: аналіз теоретичних основ радіотехнічного моніторингу; вибір і розрахунок ключових параметрів системи; моделювання процесів приймання та обробки сигналів; проектування підсистем керування та синхронізації.

Отримані результати можуть бути використані при створенні сучасних засобів радіотехнічного контролю повітряного простору, систем протидії безпілотним апаратам та комплексів моніторингу радіочастотного спектра

					КПЕК.023027.01.01 ПЗ	Арк.
						6
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

# 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПОБУДОВИ СИСТЕМ РАДІОТЕХНІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

## 1.1 Призначення та функціональні завдання систем радіотехнічного моніторингу

Система радіотехнічного моніторингу (СРМ) призначена для комплексного спостереження за електромагнітною обстановкою в заданому частотному діапазоні з метою виявлення, аналізу та ідентифікації джерел радіовипромінювання. Основною функцією таких систем є забезпечення контролю використання радіочастотного ресурсу, виявлення несанкціонованих передавачів, оцінювання параметрів сигналів та формування інформації для прийняття рішень щодо подальшого реагування.

У сучасних умовах інтенсивного розвитку бездротових комунікацій (Wi-Fi, Bluetooth, LTE, 5G, IoT-пристрої, телеметричні канали, SDR-передавачі та інші радіотехнічні засоби) електромагнітний спектр характеризується високою щільністю сигналів та складною заводовою обстановкою. Кількість джерел випромінювання постійно зростає, а їхні характеристики стають більш різноманітними, що ускладнює процеси виявлення, класифікації та локалізації сигналів. Це висуває підвищені вимоги до систем радіотехнічного моніторингу щодо їх чутливості, селективності, швидкодії та завадостійкості.

Особливу актуальність системи радіотехнічного моніторингу набувають у сфері забезпечення інформаційної безпеки, контролю використання радіочастотного спектра, захисту критичної інфраструктури та моніторингу безпілотних літальних апаратів. Такі системи використовуються для виявлення джерел радіовипромінювання, визначення їх параметрів, оцінювання завантаженості частотного спектра та контролю дотримання встановлених регламентів використання радіочастот.

					КПЕК.023027.01.01 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Типова система радіотехнічного моніторингу складається з антенної підсистеми, приймального тракту, блоку цифрової обробки сигналів, підсистеми керування та засобів відображення результатів. Антенна підсистема забезпечує приймання електромагнітних хвиль і формування необхідної діаграми направленості. Приймальний тракт виконує підсилення, фільтрацію та перетворення сигналів у форму, придатну для подальшої цифрової обробки. Блок цифрової обробки здійснює спектральний аналіз, кореляційну обробку, визначення параметрів сигналів та їх класифікацію. Підсистема керування забезпечує координацію роботи всіх вузлів системи та взаємодію з оператором.

Для підвищення ефективності виявлення слабких сигналів у заводовому середовищі в сучасних СРМ широко застосовуються методи цифрової обробки сигналів, зокрема спектральний аналіз на основі швидкого перетворення Фур'є, кореляційна обробка, адаптивна фільтрація та алгоритми розпізнавання сигналів. Використання таких методів дозволяє підвищити достовірність виявлення джерел випромінювання та зменшити ймовірність хибних спрацювань.

Важливим елементом системи є антенно-фідерний тракт, який визначає енергетичні характеристики та просторову вибірковість системи. Застосування антенних решіток дозволяє формувати вузькі діаграми направленості, здійснювати електронне сканування простору та покращувати співвідношення сигнал/шум за рахунок просторової селекції сигналів.

Розроблювана система орієнтована на моніторинг радіосигналів у заданому частотному діапазоні з можливістю аналізу їх часових, спектральних та енергетичних характеристик. Передбачається використання сучасних методів цифрової обробки сигналів та фазокодованих радіоімпульсів, що забезпечують підвищення роздільної здатності та заводостійкості системи.

Узагальнену структурну модель системи радіотехнічного моніторингу наведено на рисунку 1.1. Вона відображає основні функціональні зв'язки між підсистемами приймання, обробки, аналізу та відображення інформації, а також

					КПЕК.023027.01.01 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

демонструє послідовність проходження сигналу від антени до кінцевого користувача.



Рисунок 1.1 – Узагальнена структурна схема системи радіотехнічного моніторингу

До складу системи входять:

- антенно-фідерна підсистема;
- високочастотний приймальний тракт;
- блок перетворення частоти;
- аналого-цифровий перетворювач;
- блок цифрової обробки сигналів;
- підсистема керування та відображення інформації.

### Приймання електромагнітного сигналу

Електромагнітна хвиля, що поширюється від джерела випромінювання, приймається антеною. Потужність сигналу на вході приймача визначається законом поширення хвиль у вільному просторі:

$$P_{\text{пр}} = \frac{P_{\text{перед}} G_{\text{перед}} G_{\text{прийм}} \lambda^2}{(4\pi R)^2 L}$$

де  $P_{\text{перед}}$  – потужність передавача;

$G_{\text{перед}}, G_{\text{прийм}}$  – коефіцієнти підсилення антен;

$\lambda$  – довжина хвилі;

$R$  – відстань до джерела;

$L$  – втрати в середовищі поширення.

Залежність рівня прийнятого сигналу від відстані наведена на рисунку 1.2.

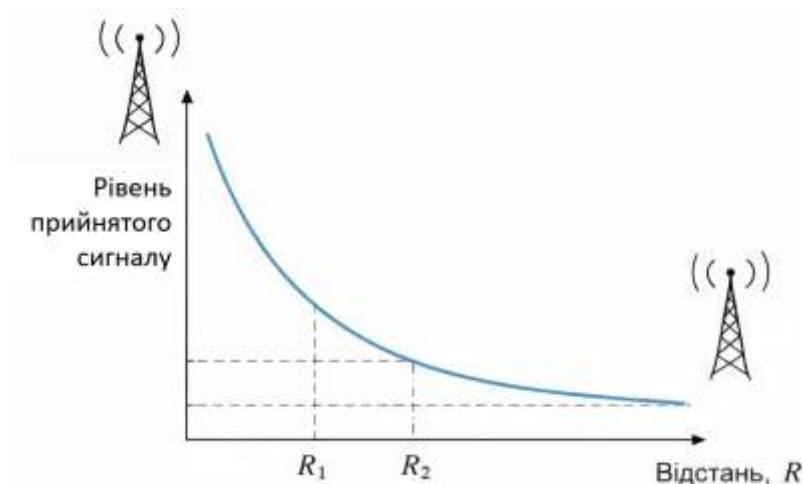


Рисунок 1.2 – Залежність рівня прийнятого сигналу від відстані

Із формули видно, що потужність сигналу зменшується пропорційно квадрату відстані, що обмежує дальність моніторингу малопотужних джерел.

#### Чутливість та шумові характеристики

Одним із ключових параметрів СРМ є чутливість приймача — мінімальний рівень сигналу, який може бути достовірно виділений на фоні шуму.

Мінімальна потужність визначається:

$$P_{\text{min}} = kTBF \cdot (S/N)_{\text{min}}$$

де  $k$  – стала Больцмана;

$T$  – еквівалентна шумова температура;

$B$  – смуга пропускання;

$F$  – коефіцієнт шуму;

					КПЕК.023027.01.01 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$(S/N)_{min}$  – мінімальне відношення сигнал/шум.

Вплив смуги пропускання на рівень шуму ілюструється на рисунку 1.3.

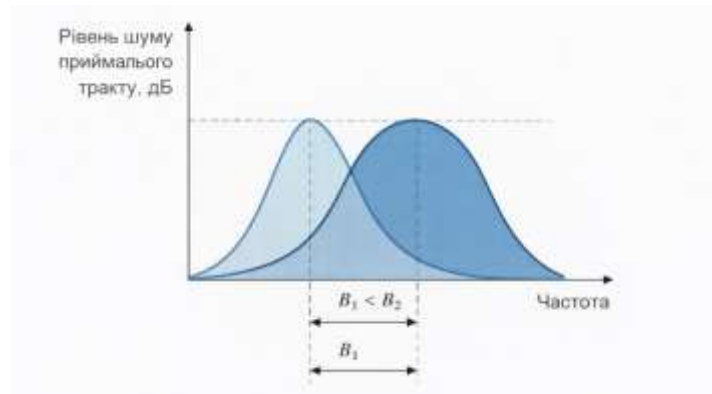


Рисунок 1.3 – Вплив смуги пропускання на рівень шуму приймального тракту

Зменшення смуги пропускання знижує шумову складову, але водночас обмежує швидкість виявлення широкосмугових сигналів.

#### Спектральний аналіз

Оскільки більшість радіосигналів розрізняються за частотними характеристиками, важливою функцією системи є спектральний аналіз.

Перетворення сигналу з часової у частотну область здійснюється за допомогою перетворення Фур'є:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt$$

Графічна інтерпретація цього процесу наведена на рисунку 1.4.

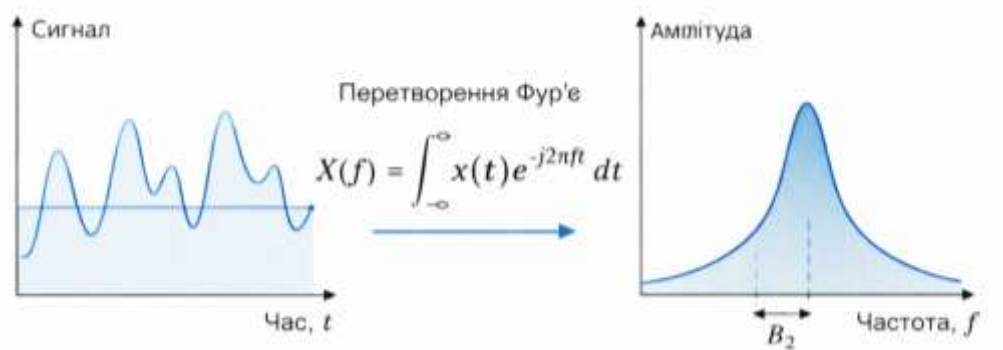


Рисунок 1.4 – Перетворення сигналу з часової у частотну область

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Спектральний аналіз дозволяє визначити:

- центральну частоту;
- ширину смуги;
- рівень потужності;
- тип модуляції;
- наявність гармонік або побічних випромінювань.

Активний і пасивний принцип моніторингу

Системи радіотехнічного моніторингу можуть працювати за двома принципами:

1. Пасивний моніторинг — приймання та аналіз існуючих сигналів без власного випромінювання.
2. Активний моніторинг — поєднання з радіолокаційними методами (в інтегрованих комплексах).

Принципи роботи наведені на рисунку 1.5.



Рисунок 1.5 – Активний та пасивний принципи радіотехнічного моніторингу

Перевагою пасивного методу є скритність роботи та відсутність демаскувальних ознак.

					КПЕК.023027.01.01 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

## Функціональні завдання системи

Система радіотехнічного моніторингу повинна забезпечувати:

- виявлення наявності сигналу;
- оцінку його параметрів;
- розділення сигналів у багатосигнальному середовищі;
- класифікацію типу модуляції;
- визначення напрямку на джерело (за наявності антенних решіток);
- збереження та передачу результатів аналізу.

Ймовірність правильного виявлення сигналу визначається залежністю:

$$P_d = Q\left(\frac{\gamma - \mu_1}{\sigma}\right)$$

де  $\gamma$  – поріг прийняття рішення;

$\mu_1$  – середнє значення сигналу;

$\sigma$  – середньоквадратичне відхилення шуму.

Графічно залежність ймовірності виявлення від відношення сигнал/шум показано на рисунку 1.6.

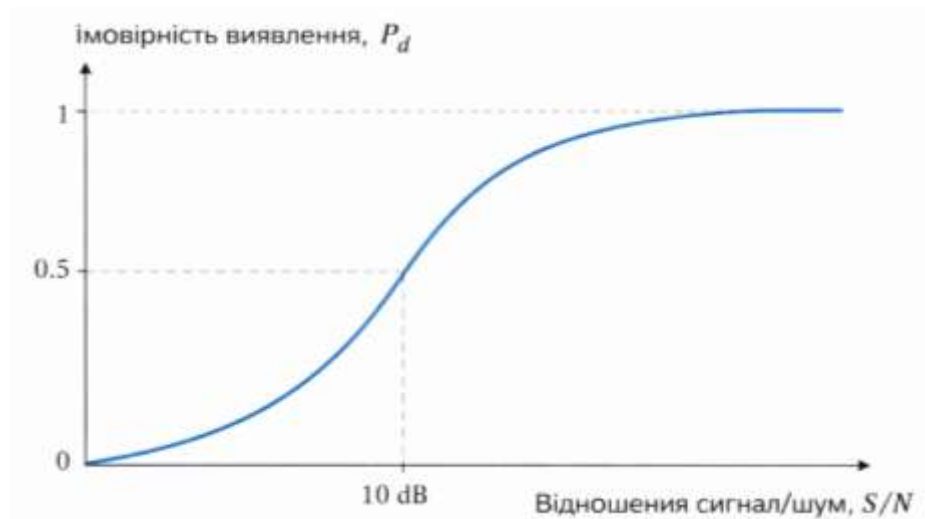


Рисунок 1.6 – Залежність ймовірності виявлення від відношення сигнал/шум

Таким чином, система радіотехнічного моніторингу є багатофункціональним радіоелектронним комплексом, що поєднує антенно-фідерні пристрої, приймальний радіотракт та засоби цифрової обробки сигналів. Її ефективність визначається сукупністю енергетичних, спектральних та алгоритмічних характеристик.

Сучасні вимоги передбачають:

- високий рівень автоматизації;
- адаптивність до складної радіоелектронної обстановки;
- мінімізацію хибних спрацювань;
- можливість інтеграції з іншими інформаційними системами.

## 1.2 Методи виявлення, аналізу та контролю радіосигналів

Система радіотехнічного моніторингу (СРТМ) призначена для виявлення, аналізу та контролю радіосигналів різного походження, зокрема сигналів керування, навігації та телеметрії безпілотних літальних апаратів (БПЛА). У межах спеціальності 172 «Електронні комунікації та радіотехніка» такі системи розглядаються як комплекс приймальних, обробних та аналітичних засобів, що забезпечують автоматизоване спостереження за радіочастотним середовищем.

На відміну від вузькоспеціалізованих засобів протидії, СРТМ виконує ширший спектр функцій:

- безперервний огляд радіочастотного діапазону;
- виявлення фактів випромінювання;
- класифікація типів сигналів;
- оцінювання параметрів (частота, потужність, смуга, модуляція);
- визначення напрямку та координат джерела;
- ведення бази радіоелектронної обстановки.

					КПЕК.023027.01.01 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

### 1.2.1 Активні та пасивні методи радіомоніторингу

У системі радіотехнічного моніторингу застосовуються два базові підходи (див. рисунок 1.5):

- Активний метод – випромінювання власного зондуючого сигналу та аналіз відбитої хвилі (принцип РЛС).
- Пасивний метод – приймання та аналіз уже існуючих випромінювань у радіоефірі.

У контексті моніторингу БПЛА пасивний метод має суттєві переваги: система не демаскує себе та може виявляти сигнали керування, передачі відео або телеметрії навіть без наявності радіолокаційного відбиття.

### 1.2.2 Радіолокаційний метод (активне виявлення)

Активний принцип базується на вимірюванні часу проходження електромагнітного імпульсу до об'єкта та назад. Дальність визначається:

$$R = \frac{c \cdot t}{2}$$

де  $c$  – швидкість світла,

$t$  – час затримки відбитого сигналу.

Максимальна дальність виявлення описується радіолокаційним рівнянням:

$$D_{max} = \sqrt[4]{\frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 P_{r.min}}}$$

де  $P_t$  – потужність передавача;

$G_t, G_r$  – коефіцієнти підсилення антен;

$\lambda$  – довжина хвилі;

$\sigma$  – ефективна площа розсіювання (ЕПР);

$P_{r.min}$  – мінімальна чутливість приймача.

Для малорозмірних БПЛА характерні значення ЕПР:

					КПЕК.023027.01.01 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- $\sigma \approx 0.1 \text{ м}^2$  – середні апарати;
- $\sigma \approx 0.01 \text{ м}^2$  – компактні мультикоптери.

Зменшення ЕПР призводить до істотного зниження дальності виявлення (що узгоджується з рівнянням (1.3)). Саме тому в СРТМ радіолокаційні засоби часто доповнюються пасивними каналами.

### 1.2.3 Пасивний радіочастотний моніторинг

Пасивна система радіотехнічного моніторингу аналізує:

- канали керування БПЛА (2.4 ГГц, 5.8 ГГц);
- сигнали передачі відео;
- телеметричні канали;
- сигнали GPS/GLONASS;
- випромінювання радіолокаційних висотомірів.

Переваги методу:

- відсутність власного випромінювання;
- можливість роботи у фоновому режимі;
- виявлення БПЛА навіть без прямої видимості.

Однак ефективність залежить від рівня сигнал/шум, що показано на рисунку 1.6. Імовірність виявлення  $P_d$  зростає зі збільшенням відношення сигнал/шум  $S/N$ .

### 1.2.4 Частотний аналіз і спектральна обробка

Ключовим етапом роботи системи радіотехнічного моніторингу є перетворення сигналу з часової у частотну область (див. рисунок 1.4). Це дозволяє:

- визначити центральну частоту;
- оцінити ширину смуги;

					КПЕК.023027.01.01 ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- ідентифікувати тип модуляції;
- виявити характерні ознаки БПЛА.

Шумова потужність приймача визначається:

$$N = kTB$$

де  $k$  – стала Больцмана,

$T$  – температура,

$B$  – смуга пропускання.

Зі збільшенням смуги пропускання рівень шуму зростає (рисунок 1.3), що впливає на чутливість системи радіотехнічного моніторингу. Тому вибір смуги – компроміс між швидкістю огляду та точністю детектування.

### 1.2.5 Мікродоплерівський аналіз

Для БПЛА характерні обертові лопаті, які формують мікродоплерівські сигнатури. Їх аналіз дозволяє:

- відрізнити БПЛА від птахів;
- визначати тип дрона;
- зменшувати кількість хибних спрацювань.

Сучасні системи реалізують 3D-радіолокацію (рисунок 1.5) з повним покриттям 360° та автоматичним супроводженням цілей.

### 1.2.6 Комбіновані системи моніторингу

Найвищу ефективність забезпечує багатоканальна система радіотехнічного моніторингу, що поєднує:

- радіолокаційний канал;
- пасивний RF-аналіз;
- оптико-електронні засоби;
- інфрачервоний канал.

					КПЕК.023027.01.01 ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Такий підхід дозволяє:

- підтверджувати виявлення;
- зменшувати кількість помилкових тривог;
- підвищувати достовірність класифікації.

### 1.2.7 Українські зразки БПЛА як об'єкти моніторингу

На рисунках 1.7–1.9 наведені приклади сучасних українських БПЛА («Сокіл-300», «Лелека-100») та засобів протидії (RIFF-P).

«Сокіл-300» є проектом ударного безпілотного літального апарата, призначеного для виконання завдань повітряної розвідки та високоточного ураження наземних цілей як у глибині оборони противника, так і на передових позиціях. Заявлена дальність застосування озброєння становить до 10 км.

Комплекс передбачає використання керованих ракет типу РК-2П виробництва ДАХК «Артем». У бойовій конфігурації БПЛА інтегрується з високоточними засобами ураження розробки КБ «Луч». Особливістю апарата є оснащення синтезованою апертурною антенною системою, що забезпечує формування радіолокаційного зображення місцевості та виявлення цілей незалежно від метеорологічних умов.



Рисунок 1.7 – Загальний вигляд ударного безпілотного літального апарата «Сокіл-300»

					КПЕК.023027.01.01 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

RIFF-P є переносним радіоелектронним комплексом боротьби з безпілотними літальними апаратами роторного типу (квадрокоптерами, гексакоптерами тощо). Система реалізує принцип радіоелектронного придушення каналів керування та передачі даних БПЛА.

Комплекс може застосовуватись для захисту об'єктів критичної інфраструктури, військових об'єктів, прикордонних зон, а також під час масових заходів. Основним функціональним завданням є створення завад у діапазонах керування та навігації безпілотників з метою припинення їх польоту або примусового повернення.



Рисунок 1.9 – Мобільний радіоелектронний комплекс протидії БПЛА типу RIFF-P

БПЛА «Лелека-100» призначений для проведення аеророзвідки та оперативного визначення координат об'єктів у режимі реального часу. Система забезпечує передачу телеметричної та розвідувальної інформації в умовах складної радіоелектронної обстановки, включаючи постановку активних радіоперешкод та спроби блокування сигналів супутникової навігації.

Апарат характеризується підвищеною стійкістю до погодних факторів і може застосовуватись у різний час доби. Конструктивні та програмні рішення забезпечують його функціонування в умовах радіоелектронної протидії.



Рисунок 1.9 – Розвідувальний безпілотний літальний апарат «Лелека-100»

Для системи радіотехнічного моніторингу важливо враховувати:

- можливість роботи БПЛА в автономному режимі;
- застосування малопомітних матеріалів;
- використання складних алгоритмів навігації;
- стійкість до радіоелектронних завад.

Методи виявлення, аналізу та контролю радіосигналів у системах радіотехнічного моніторингу базуються на комплексному використанні активних і пасивних принципів, спектрального аналізу, оцінювання параметрів сигнал/шум та просторової локалізації джерел випромінювання.

### 1.3 Особливості моніторингу малопотужних і малорозмірних радіооб'єктів

Малопотужні та малорозмірні радіооб'єкти (зокрема БПЛА і їхні пульти керування) є складними цілями для систем радіотехнічного моніторингу через поєднання слабого випромінювання, нестійких режимів роботи та засміченого радіоефіру. На практиці система радіотехнічного моніторингу має не просто «побачити» сигнал, а відокремити його від фону, підтвердити належність до БПЛА та оцінити параметри джерела (частоту, смугу, рівень, тип модуляції,

					КПЕК.023027.01.01 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

часову структуру). Узагальнений принцип побудови системи радіотехнічного моніторингу і місце приймального тракту показано на рисунку 1.1, а типові залежності рівня сигналу та шуму – на рисунках 1.2–1.3.

### 1. Низька потужність випромінювання та швидке падіння рівня сигналу

Більшість цивільних БПЛА використовують стандартизовані канали зв'язку (2,4/5,8 ГГц), де передавачі працюють у режимах з обмеженою потужністю. Тому на вході приймача системи радіотехнічного моніторингу сигнал швидко слабшає зі збільшенням відстані, що ілюструє рисунок 1.2. У спрощеному вигляді (для вільного простору) втрати поширення можна оцінити як:

$$L_{fs} = \left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right)^2, P_r \approx \frac{P_t G_t G_r}{L_{fs}}$$

де  $P_t$  – потужність передавача,  $G_t, G_r$  – підсилення антен,  $R$  – відстань,  $\lambda$  – довжина хвилі.

Для малопотужних джерел навіть невелике зростання  $R$  може перевести сигнал у зону, де детектування стає нестійким.

### 2. Вплив смуги приймача на рівень шуму та чутливість

Під час моніторингу важливо правильно вибрати смугу пропускання приймального тракту: широка смуга пришвидшує огляд, але збільшує шум (див. рисунок 1.3). Рівень теплового шуму оцінюють:

$$N = kTB$$

де  $k$  – стала Больцмана,  $T$  – еквівалентна температура,  $B$  – смуга.

Звідси видно, що при зростанні  $B$  шумова потужність зростає лінійно, а отже зменшується відношення сигнал/шум і падає ймовірність виявлення (порівняйте з рисунком 1.6).

### 3. Складність відокремлення сигналів БПЛА від «побутового» радіоефіру

					КПЕК.023027.01.01 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

Діапазони 2,4 і 5 ГГц є перевантаженими Wi-Fi, Bluetooth та іншими пристроями. Для СРТМ це означає дві проблеми: сигнал БПЛА може маскуватися під інші передавання або «ховатися» в загальному спектрі; навіть при виявленні енергії в каналі складно довести, що це саме БПЛА, а не, наприклад, точка доступу.

Тому практично застосовують комбінований аналіз:

- спектральні ознаки (центральна частота, смуга, структура спектра);
- часові ознаки (пакетність, повторюваність, імпульсні складові);
- ознаки модуляції (оцінка типу/класу модуляції).

Перехід до частотної області як базовий інструмент аналізу показано на рисунку 1.4.

4. Нестабільність режимів роботи та короткочасність випромінювань БПЛА часто змінюють режими:

- старт/посадка (інший профіль телеметрії);
- зависання/маневр (інша інтенсивність обміну);
- перемикання каналів/частот (частотна адаптація);
- робота «за подією» (короткі пакети замість безперервного випромінювання).

Через це СРТМ має працювати не лише як «сканер», а як система, що виконує безперервне спостереження та накопичення статистики сигналу, підвищуючи ймовірність детектування слабких пакетів. Залежність ймовірності виявлення від  $S/N$  наведена на рисунку 1.6.

5. Проблема «птаха–дрон» та багатоканальне підтвердження

У класичних РЛС малі БПЛА є складними цілями через малу ЕПР та схожість траєкторій із птахами. Для системи радіотехнічного моніторингу це трансформується у схожу задачу: відрізнити корисний RF-слід БПЛА від фонових джерел.

Тому в практичних комплексах моніторингу застосовують:

- пасивний RF-канал як первинний детектор (фіксує факт випромінювання);

					КПЕК.023027.01.01 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- активний канал або інший сенсор для підтвердження (принципи активного/пасивного підходів — рисунок 1.5);
- логіку «підтвердження по сукупності ознак» (частота + смуга + повторюваність + напрямок/сектор + часові мітки).

Коли потрібне одночасне ведення кількох цілей (групи БПЛА), система радіотехнічного моніторингу повинна підтримувати багатоканальний огляд і паралельну обробку декількох спектральних «кандидатів» (приклад задачі класифікації і цілевказання подано на рисунку 1.9).

Для моніторингу малопотужних/малорозмірних радіооб'єктів система радіотехнічного моніторингу має бути спроектована з акцентом на:

- високу чутливість приймального тракту та контроль смуги  $B$  (див. рисунок 1.3, формула  $N = kTB$ );
- спектрально-часовий аналіз з перетворенням у частотну область (див. рисунок 1.4);
- адаптивні критерії детектування залежно від  $S/N$  (див. рисунок 1.6);
- поєднання пасивного й активного підходів для підтвердження цілі (див. рисунок 1.5);
- стійкість до перевантаженого ефіру у 2,4/5,8 ГГц та можливість відокремлення сигналів БПЛА від побутових передавачів.

#### 1.4 Сучасні технології та засоби радіотехнічного моніторингу

Сучасні системи радіотехнічного моніторингу (СРМ) формуються як багатофункціональні програмно-апаратні комплекси, здатні здійснювати безперервний контроль електромагнітного середовища в широкому діапазоні частот. Їх основним призначенням є виявлення, аналіз, класифікація та локалізація джерел радіовипромінювання, зокрема каналів управління та передачі даних безпілотних літальних апаратів.

Сучасні технології радіомоніторингу розвиваються у напрямі:

					КПЕК.023027.01.01 ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- цифровізації приймальних трактів;
- розширення робочого частотного діапазону;
- підвищення чутливості та динамічного діапазону приймачів;
- автоматизації процесів виявлення та аналізу сигналів;
- інтеграції декількох сенсорних підсистем в єдину мережеву структуру.

Система радіотехнічного моніторингу більше не є окремим приймачем чи аналізатором спектра — це комплекс, що об'єднує антенні підсистеми, широкосмугові приймальні модулі, цифрові процесори обробки сигналів та програмні засоби аналізу.

Програмно-конфігуровані радіосистеми (SDR). Однією з ключових технологій сучасного радіомоніторингу є програмно-конфігуроване радіо (Software Defined Radio). У таких системах основні функції налаштування, фільтрації, демодуляції та спектрального аналізу реалізуються програмно, що дозволяє швидко адаптувати систему до нових стандартів сигналів.

Для задач моніторингу БПЛА це особливо актуально, оскільки безпілотники використовують різні частотні діапазони (2,4 ГГц, 5,8 ГГц, діапазони телеметрії, GPS), а також нестандартні або зашифровані протоколи передачі даних.

Широкосмуговий спектральний контроль. Сучасні засоби радіотехнічного моніторингу здатні одночасно контролювати значну частину радіочастотного спектра. Це дозволяє:

- виявляти активні передавачі в режимі реального часу;
- фіксувати короточасні імпульсні або пакетні сигнали;
- аналізувати структуру сигналу та його параметри;
- визначати тип модуляції та ширину смуги пропускання.

Широкосмуговий моніторинг є особливо ефективним у виявленні каналів керування БПЛА, які можуть використовувати стрибкоподібну перебудову частоти або адаптивну зміну параметрів передачі.

					КПЕК.023027.01.01 ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Просторові методи визначення джерел сигналу. Сучасні системи радіомоніторингу активно застосовують методи радіопеленгації та визначення координат джерела випромінювання. Для цього використовуються:

- багатоканальні приймачі;
- фазові антенно-решіткові системи;
- рознесені пункти спостереження.

Застосування мережевих структур дозволяє створювати розподілені системи моніторингу, у яких кілька сенсорних вузлів передають інформацію до центрального обчислювального центру для подальшого аналізу та уточнення координат джерела випромінювання.

Інтелектуалізація процесів моніторингу. Важливою тенденцією є впровадження алгоритмів машинного навчання та автоматичної класифікації сигналів. Це дозволяє:

- відрізнити сигнали БПЛА від фонових Wi-Fi або інших побутових передавачів;
- зменшувати кількість хибних спрацювань;
- автоматично формувати сигнатури нових типів пристроїв;
- здійснювати прогнозування поведінки радіоб'єкта.

Автоматизація особливо важлива в умовах насиченого електромагнітного середовища, де людський фактор може призводити до помилок.

Комплексні інтегровані рішення. Найбільш ефективні сучасні системи радіотехнічного моніторингу функціонують як частина комплексних систем безпеки. Вони інтегруються з:

- радіолокаційними засобами;
- оптико-електронними та тепловізійними модулями;
- системами акустичного виявлення;
- автоматизованими системами реагування.

					КПЕК.023027.01.01 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

У таких комплексах радіомоніторинг виконує функцію первинного виявлення електромагнітної активності, після чого інші сенсори підтверджують наявність об'єкта та уточнюють його параметри.

Таким чином, сучасна система радіотехнічного моніторингу є не окремим приладом, а багаторівневим інформаційно-аналітичним комплексом, здатним забезпечити високий рівень ситуаційної обізнаності та своєчасного реагування в умовах складної радіоелектронної обстановки

### 1.5 Висновки до першого розділу

У першому розділі було розглянуто теоретичні основи побудови систем радіотехнічного моніторингу та визначено їх роль у забезпеченні контролю електромагнітного середовища. Проаналізовано призначення та функціональні завдання таких систем, зокрема виявлення, ідентифікацію та локалізацію джерел радіовипромінювання, включаючи малопотужні канали керування безпілотних літальних апаратів.

Досліджено методи виявлення та аналізу радіосигналів, що застосовуються у сучасних системах моніторингу, а також окреслено проблеми контролю малорозмірних і малопотужних радіоб'єктів в умовах складної радіоелектронної обстановки. Показано, що традиційні підходи потребують модернізації з урахуванням зростання кількості безпілотних систем і розвитку адаптивних протоколів зв'язку.

Окрему увагу приділено сучасним технологіям радіотехнічного моніторингу, зокрема застосуванню широкосмугових цифрових приймачів, програмно-конфігурованих радіосистем, мережевих сенсорних структур та інтелектуальних алгоритмів обробки сигналів.

					КПЕК.023027.01.01 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

## 2 ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ РАДІОТЕХНІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

### 2.1 Розробка структурної схеми системи

Структурна побудова системи радіотехнічного моніторингу визначається її функціональним призначенням – виявленням, прийманням, аналізом та ідентифікацією радіосигналів у заданому частотному діапазоні. На відміну від класичних імпульсних радіолокаційних станцій, система радіотехнічного моніторингу може працювати як у пасивному режимі (без власного випромінювання), так і в активному режимі (з формуванням контрольного або зондувального сигналу). Така універсальність дозволяє використовувати систему для широкого спектра завдань, пов'язаних із контролем електромагнітної обстановки, аналізом завантаженості радіочастотного спектра, виявленням несанкціонованих передавачів та дослідженням параметрів радіосигналів.

У загальному випадку структурна схема системи радіотехнічного моніторингу наведена на рис. 2.1. Вона включає такі основні функціональні блоки:

- антенну підсистему;
- радіочастотний тракт приймання;
- блок перетворення частоти;
- підсилювачі та фільтри;
- аналого-цифровий перетворювач;
- цифровий блок обробки сигналів;
- блок керування та синхронізації;
- пристрій відображення та зберігання інформації.

Антенна підсистема є первинною ланкою системи та призначена для приймання електромагнітних хвиль, що надходять від джерел

					КПЕК.023027.01.01 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

радіовипромінювання. Вона забезпечує перетворення електромагнітної енергії у високочастотний електричний сигнал, придатний для подальшої обробки. Основними характеристиками антенної підсистеми є коефіцієнт підсилення, діаграма направленості, ширина головної пелюстки та рівень бічних пелюсток. Використання антенних решіток дозволяє реалізувати просторову селекцію сигналів та підвищити ефективність роботи системи в умовах інтенсивних завад.

Радіочастотний тракт приймання забезпечує попереднє підсилення прийнятого сигналу та його узгодження з наступними каскадами. До його складу, як правило, входять малощумні підсилювачі, які дозволяють мінімізувати вплив власних шумів приймального обладнання на якість обробки сигналу. Від параметрів цього тракту значною мірою залежить чутливість усієї системи.

Після попереднього підсилення сигнал надходить до блока перетворення частоти, де здійснюється його перенесення з високочастотного діапазону до проміжної або безпосередньо до базової смуги частот. Застосування проміжної частоти дозволяє реалізувати високоякісну селекцію сигналів та спростити подальшу обробку. У сучасних системах часто використовуються супергетеродинні або прямоперетворювальні архітектури приймачів.

Фільтри та підсилювачі проміжної частоти забезпечують додаткову селекцію корисного сигналу та придушення позасмугових завад. На цьому етапі формується необхідна смуга пропускання, яка визначається характеристиками сигналів, що аналізуються. Крім того, реалізується автоматичне регулювання підсилення для підтримання оптимального рівня сигналу на вході аналого-цифрового перетворювача.

Аналого-цифровий перетворювач (АЦП) виконує дискретизацію та квантування аналогового сигналу, перетворюючи його у цифрову форму. Якість роботи АЦП визначається частотою дискретизації, розрядністю та динамічним діапазоном. Від цих параметрів залежить точність подальшого спектрального та часово-частотного аналізу сигналів.

					КПЕК.023027.01.01 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

Цифровий блок обробки сигналів є центральним елементом системи радіотехнічного моніторингу. У ньому реалізуються алгоритми цифрової фільтрації, спектрального аналізу, кореляційної обробки, виявлення сигналів та оцінювання їх параметрів. Для аналізу спектрального складу сигналів застосовується швидке перетворення Фур'є, а для підвищення завадостійкості та роздільної здатності можуть використовуватись методи узгодженої фільтрації та кореляційної обробки фазокодованих сигналів. Отримані результати використовуються для класифікації джерел випромінювання та визначення їх характеристик.

Блок керування та синхронізації забезпечує узгоджену роботу всіх функціональних вузлів системи. Він формує тактові сигнали, керує режимами роботи окремих модулів, здійснює обмін даними між підсистемами та координує процеси приймання й обробки сигналів. У випадку активного режиму роботи цей блок також синхронізує формування та випромінювання зондувальних сигналів.

Пристрій відображення та зберігання інформації призначений для представлення результатів аналізу оператору та архівування отриманих даних. На екрані можуть відображатися спектрограми, часові реалізації сигналів, діаграми розподілу потужності, результати класифікації джерел випромінювання та інші інформаційні повідомлення. Збереження результатів моніторингу дозволяє здійснювати подальший аналіз електромагнітної обстановки та формувати статистичні звіти.

Таким чином, структурна схема системи радіотехнічного моніторингу являє собою сукупність взаємопов'язаних функціональних блоків, які забезпечують повний цикл обробки радіосигналів – від їх приймання антеною до відображення та збереження результатів аналізу. Раціональна організація взаємодії між цими блоками дозволяє підвищити ефективність виявлення джерел радіовипромінювання та забезпечити високу достовірність отримуваної інформації.

					КПЕК.023027.01.01 ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

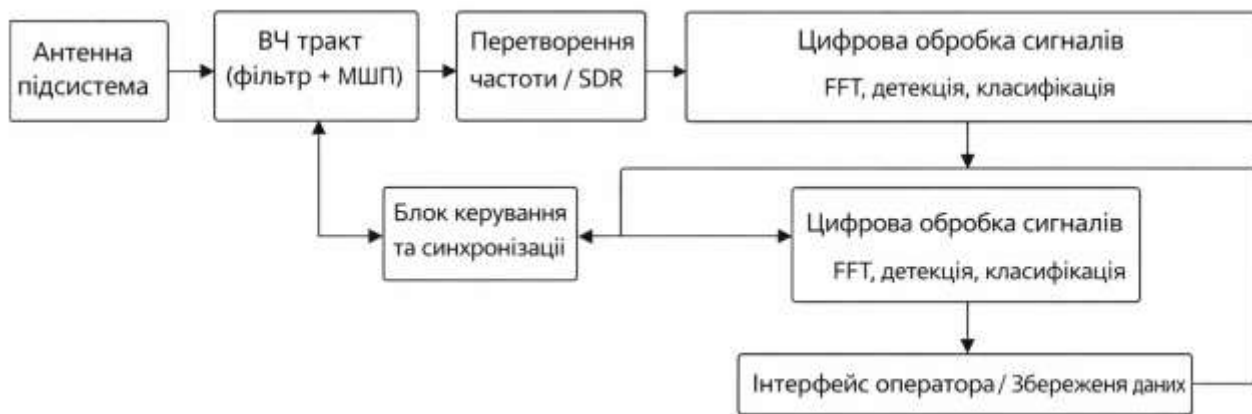


Рисунок 2.1 – Структурна схема системи радіотехнічного моніторингу

### Принцип функціонування системи

Антенна підсистема здійснює приймання електромагнітних хвиль від джерел радіовипромінювання (наприклад, каналів керування БПЛА або телеметричних передавачів). У разі використання активного режиму до складу системи може входити передавальний тракт, який формує зондувальні сигнали та забезпечує контрольоване опромінення простору.

Прийнятий сигнал з антени надходить до радіочастотного тракту, де відбувається його попереднє підсилення малошумовим підсилювачем (МШП) та селекція за частотою. Далі сигнал перетворюється на проміжну частоту (ПЧ) або безпосередньо оцифровується (у випадку використання SDR-рішень).

Для визначення дальності до об'єкта (в активному режимі) може використовуватися часовий метод, який базується на вимірюванні затримки відбитого сигналу. У цьому випадку дальність визначається за виразом:

$$R = \frac{c \cdot \tau}{2}$$

де  $c$  – швидкість поширення електромагнітної хвилі;

$\tau$  – інтервал часу між випромінюванням і прийманням сигналу.

У пасивному режимі система визначає наявність джерела випромінювання за перевищенням прийнятого сигналу над рівнем шуму:

$$SNR = \frac{P_s}{P_n}$$

де  $P_s$  – потужність сигналу;  $P_n$  – потужність шуму.

Ймовірність виявлення об'єкта прямо залежить від відношення сигнал/шум, що було проілюстровано раніше на рис. 1.6.

Блок цифрової обробки. Після аналого-цифрового перетворення сигнал надходить до цифрового процесора обробки сигналів (DSP або FPGA), де виконуються:

- спектральний аналіз (швидке перетворення Фур'є);
- виявлення піків енергетичного спектра;
- демодуляція сигналів керування;
- класифікація типу радіоб'єкта;
- визначення параметрів руху (за доплерівським зсувом частоти).

Зміна частоти сигналу при русі об'єкта визначається за формулою доплерівського зсуву:

$$f_d = \frac{2v}{\lambda}$$

де  $v$  – радіальна швидкість об'єкта;  $\lambda$  – довжина хвилі.

Це дозволяє системі радіотехнічного моніторингу оцінювати швидкість переміщення БПЛА або іншого радіоб'єкта.

Блок керування та синхронізації. Блок синхронізації забезпечує узгоджену роботу всіх функціональних модулів системи, формує тактові сигнали, керує режимами сканування частотного діапазону та задає алгоритм обробки.

У разі використання активної антенної системи передбачено комутацію режимів «передача–приймання». У пасивному варіанті цей вузол виконує функції селекції каналів і розподілу сигналів між приймальними модулями.

Відображення та реєстрація інформації. Результати обробки подаються на пристрій відображення (монітор оператора) у вигляді:

- спектрограм;
- часових реалізацій сигналів;
- координат джерел випромінювання;
- треків супроводження цілей.

					КПЕК.023027.01.01 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

Система може забезпечувати круговий огляд простору (360°) при використанні механічного або електронного сканування антенної решітки.

Таким чином, розроблена структурна схема системи радіотехнічного моніторингу (рис. 2.1) забезпечує комплексне виявлення, аналіз та ідентифікацію малопотужних радіоб'єктів, зокрема БПЛА.

## 2.2 Обґрунтування та вибір основних технічних параметрів

Проектування системи радіотехнічного моніторингу передбачає визначення сукупності технічних параметрів, які забезпечують задану дальність контролю, необхідну роздільну здатність та ймовірнісні характеристики виявлення малорозмірних повітряних об'єктів (зокрема БПЛА).

### 1. Визначення параметрів повторення зондуючих імпульсів

Для забезпечення максимальної дальності контролю  $R_{\max} = 2500\text{м}$  період повторення імпульсів визначається з умови відсутності неоднозначності за дальністю:

$$T_p = \frac{2R_{\max}}{c}$$
$$T_p = \frac{2 \cdot 2500}{3 \cdot 10^8} = 1.667 \cdot 10^{-5} \text{ с} \quad (2.1)$$

Отримане значення періоду повторення імпульсів забезпечує однозначне визначення дальності до 2,5 км без перекриття відбитих сигналів.

### 2. Розрахунок тривалості імпульсу та смуги сигналу

Необхідна роздільна здатність за дальністю  $\Delta r = 15\text{м}$  визначає тривалість імпульсу:

$$t_{imp} = \frac{2\Delta r}{c}$$
$$t_{imp} = \frac{2 \cdot 15}{3 \cdot 10^8} = 1.0 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 100 \text{ нс} \quad (2.2)$$

					КПЕК.023027.01.01 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

Відповідна ширина спектра сигналу:

$$\Delta f = \frac{1}{t_{imp}} = 10^7 \text{ Гц} \quad (2.3)$$

Тривалість імпульсу 100 нс забезпечує роздільну здатність 15 м, а смуга 10 МГц є технічно реалізованою для НВЧ-діапазону.

### 3. Визначення необхідного відношення сигнал/шум

Для заданих імовірностей:

- $P_x = 2 \cdot 10^{-3}$
- $P_v = 0.8$

визначаємо необхідний параметр виявлення:

$$q_1 = 2 \left( \frac{\ln\left(\frac{1}{P_x}\right)}{\ln\left(\frac{1}{P_v}\right)} - 1 \right) = 53.701 \quad (2.4)$$

У децибелах:

$$q_2 = 10 \log q_1 = 17.3 \text{ дБ} \quad (2.5)$$

Для забезпечення заданих ймовірнісних характеристик система повинна формувати співвідношення сигнал/шум не менше 17,3 дБ на виході узгодженого фільтра.

### 4. Врахування кореляційної обробки

Для підвищення завадостійкості використовується фазокодовий сигнал (код Баркера, 13 позицій).

Коефіцієнт стиснення:  $K = 13$

Після кореляційної обробки:

$$q = \frac{q_1}{K^2} = 0.318 \quad (2.6)$$

$$q_{dB} = -4.98 \text{ дБ} \quad (2.7)$$

					КПЕК.023027.01.01 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

Застосування фазокодової модуляції дозволяє значно підвищити завадостійкість системи та зменшити вимоги до мінімальної потужності прийнятого сигналу.

#### 5. Розрахунок шумової потужності

Шумова потужність:

$$N = K_s \cdot kT_0 \Delta f \quad (2.8)$$

$$N = 1.201 \cdot 10^{-13} \text{ Вт}$$

Мінімальна потужність сигналу на вході приймача:

$$P_{pr.min} = 1.026 \cdot 10^{-17} \text{ Вт} \quad (2.9)$$

Отримане значення мінімальної приймальної потужності свідчить про необхідність застосування високочутливого приймального тракту з низьким власним шумом.

#### 6. Параметри антенної системи

Несуча частота:  $f_n = 10 \text{ ГГц}$

Довжина хвилі:

$$\lambda = \frac{c}{f_n} = 0.03 \text{ м} \quad (2.10)$$

Прийнято коефіцієнт підсилення антени:

$$G = 15 \text{ дБ}$$

Необхідна потужність передавача:

$$P_{pr} = 39.278 \text{ Вт} \quad (2.11)$$

Передавач потужністю близько 40 Вт у поєднанні з антеною 15 дБ забезпечує виявлення цілі з ЕПР  $0,1 \text{ м}^2$  на дальності 2,5 км.

#### 7. Доплерівські параметри

Роздільна здатність за швидкістю:

$$\Delta F = \frac{2\Delta V}{\lambda} = 2.333 \cdot 10^3 \text{ Гц} \quad (2.12)$$

Кількість швидкісних каналів:

					КПЕК.023027.01.01 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

$$N = \frac{V_{\max}}{\Delta V} = 20 \quad (2.13)$$

Система здатна одночасно аналізувати до 20 швидкісних каналів, що забезпечує виявлення об'єктів із різними параметрами руху.

#### 8. Сліпа зона

Тривалість пачки:

$$t = 1.3 \cdot 10^{-6} \text{ с} \quad (2.14)$$

Сліпа зона:

$$R_{blind} = \frac{ct}{2} = 195 \text{ м} \quad (2.15)$$

Сліпа зона 195 м є допустимою для стаціонарної системи радіотехнічного моніторингу об'єктів середньої та великої дальності.

Обрані технічні параметри системи радіотехнічного моніторингу забезпечують:

- дальність контролю до 2,5 км,
- роздільну здатність 15 м,
- стійке виявлення цілей з ЕПР 0,1 м<sup>2</sup>,
- аналіз доплерівських характеристик об'єкта.

Отримані результати підтверджують енергетичну та функціональну реалізованість розроблюваної системи.

### 2.3 Розрахунок приймального радіотехнічного тракту

Приймальний радіотехнічний тракт системи радіотехнічного моніторингу призначений для приймання сигналів у заданому частотному діапазоні, їх селекції, підсилення, перетворення частоти та подальшої підготовки до цифрової обробки (виявлення, оцінювання параметрів, класифікації джерел випромінювання). Узагальнена структура тракту включає: антену → вхідний фільтр → малошумний підсилювач (МШП) → змішувач → гетеродин →

					КПЕК.023027.01.01 ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

підсилювач проміжної частоти (ППЧ) → фільтр ПЧ → детектор/АЦП (див. рис. 2.2 — “Структура приймального тракту системи моніторингу”).

Вихідні дані для розрахунку

Для узгодження з обраними у п. 2.2 параметрами приймаємо:

- несуча частота:  $f_0 = 10$  ГГц;
- ширина корисної смуги:  $\Delta f \approx 10$  МГц(за (2.3));
- шумова температура:  $T_0 = 290$  К;
- стала Больцмана:  $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К;
- коефіцієнт шуму тракту задається на рівні  $F_\Sigma$ (обґрунтовується вибором МШП і змішувача);
- необхідна мінімальна потужність на вході приймача  $P_{pr.min}$  – за (2.9).

1. Тепловий шум і мінімальний рівень сигналу

Шумова потужність на вході приймача у смузі  $\Delta f$  визначається:

$$P_n = kT_0\Delta f \quad (2.16)$$

З урахуванням коефіцієнта шуму приймача  $F_\Sigma$ (у лінійних одиницях) еквівалентна шумова потужність:

$$P_{n\Sigma} = F_\Sigma kT_0\Delta f \quad (2.17)$$

Тоді мінімально необхідна потужність сигналу на вході, що забезпечує задане співвідношення сигнал/шум  $q$ :

$$P_{s.min} = q \cdot P_{n\Sigma} \quad (2.18)$$

На цьому етапі формується вимога до чутливості приймача: сигнал на вході повинен перевищувати шум у робочій смузі на величину, що визначається критерієм виявлення  $q$ .

2. Розподіл підсилення та оцінка лінійності

Загальний коефіцієнт підсилення тракту вибирається так, щоб рівень сигналу на вході АЦП/детектора був достатнім для коректної обробки, але без перевантаження. Нехай потрібний рівень на вході АЦП:

$$P_{ADC} \approx -10 \dots -5 \text{ дБм} \quad (2.19)$$

Тоді мінімально необхідний загальний коефіцієнт підсилення:

					КПЕК.023027.01.01 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

$$G_{\Sigma} = P_{ADC} - P_{s.min}(\text{у дБ}) \quad (2.20)$$

Для контролю перевантаження вводиться запас за лінійністю  $K_{lin}$  (типово 10...20 дБ) і задається умова:

$$P_{in.max} + G_{\Sigma} \leq P_{1dB} - K_{lin} \quad (2.21)$$

де  $P_{1dB}$  – рівень компресії 1 дБ для “найслабшої” ланки (частіше – МШП або ППЧ).

Підсилення тракту підбирається як компроміс між чутливістю (потрібен великий коефіцієнт підсилення) та лінійністю/динамічним діапазоном (потрібні запаси від перевантаження).

### 3. Розрахунок сумарного коефіцієнта шуму (формула Фріса)

Для каскадної структури (вхідний фільтр → МШП → змішувач → ППЧ) сумарний коефіцієнт шуму визначається за формулою Фріса:

$$F_{\Sigma} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \dots \quad (2.22)$$

де  $F_i$  – коефіцієнт шуму  $i$ -го каскаду (лінійно),  $G_i$  – його коефіцієнт підсилення (лінійно).

З практичної точки зору ключовим є перший активний каскад (МШП), тому приймається умова:

$$G_{LNA} \geq 15 \dots 20 \text{ дБ та } NF_{LNA} \leq 2 \dots 3 \text{ дБ} \quad (2.23)$$

Основний внесок у шум тракту визначається МШП і втратами до нього. Тому вхідні втрати (кабель, фільтр, перемикач) потрібно мінімізувати, а МШП обирати з низьким  $NF$  і достатнім підсиленням.

### 4. Вибір проміжної частоти та частоти гетеродина

Для зручності фільтрації і подальшої цифрової обробки вибираємо проміжну частоту  $f_{IF}$  (типово 70 МГц або 140 МГц). Приймаємо:

$$f_{IF} = 70 \text{ МГц} \quad (2.24)$$

Частота гетеродина при верхньому перетворенні:

$$f_{LO} = f_0 + f_{IF} \quad (2.25)$$

					КПЕК.023027.01.01 ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

або при нижньому:

$$f_{LO} = f_0 - f_{IF} \quad (2.26)$$

Вибір (верхнє/нижнє) виконується з урахуванням придушення дзеркального каналу. Для цього до змішувача встановлюється вхідний смуговий фільтр, який забезпечує ослаблення сигналів дзеркальної частоти не менше:

$$A_{img} \geq 40 \dots 60 \text{ дБ} \quad (2.27)$$

Вибір ПЧ визначає простоту фільтрації, вимоги до гетеродина та придушення дзеркального каналу. Для моніторингу важливо мінімізувати паразитні прийоми й помилкові спрацьовування.

#### 5. Пропускання тракту та узгодження зі смугою сигналу

Оскільки розрахована смуга корисного сигналу  $\Delta f \approx 10$  МГц, смуга пропускання тракту повинна її перекривати з технологічним запасом:

$$B_{RX} = (1.1 \dots 1.3)\Delta f \approx 11 \dots 13 \text{ МГц} \quad (2.28)$$

Вплив ширини смуги на шумовий рівень і чутливість ілюструється на рис. 1.3, де зі збільшенням  $B_{RX}$  шумова потужність зростає пропорційно  $\Delta f$  (див. (2.16)).

Надмірно широка смуга приймача погіршує чутливість через ріст теплового шуму, а занадто вузька — спотворює сигнал та погіршує кореляційну обробку.

Отримані співвідношення дозволяють сформувані обґрунтовані вимоги до елементів приймального тракту системи радіотехнічного моніторингу: низькі вхідні втрати, застосування МШП з малим коефіцієнтом шуму, вибір ПЧ із забезпеченням придушення дзеркального каналу, а також узгодження смуги пропускання тракту зі спектром зондувального/контрольованого сигналу. Це забезпечує необхідну чутливість і завадостійкість під час виявлення малопотужних радіовипромінювань та супроводу об'єктів у заданій зоні контролю.

					КПЕК.023027.01.01 ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 2.4 Проектування антенної підсистеми

Антенна підсистема системи радіотехнічного моніторингу призначена для:

- приймання сигналів у заданому діапазоні частот;
- просторової селекції (пригнічення завад із небажаних напрямків);
- визначення напрямку на джерело випромінювання (пеленгація) та формування сектора спостереження.

З урахуванням задач моніторингу (виявлення та ідентифікація радіоканалів керування/телеметрії БПЛА, а також супутніх випромінювань) доцільно застосувати антенну решітку з можливістю керування діаграмою спрямованості. Принцип роботи такої решітки ґрунтується на зміні фазового (і за потреби амплітудного) розподілу сигналів у каналах приймання, завдяки чому здійснюється електронне сканування простору (рис. 2.2).

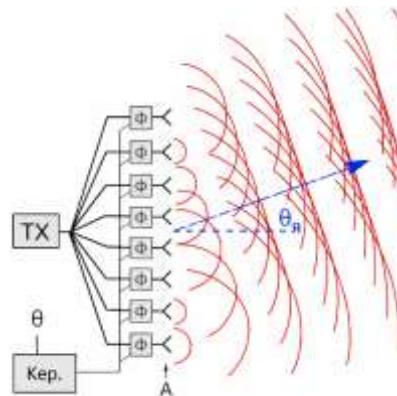


Рисунок 2.2 – Принцип роботи антенної решітки з електронним скануванням (для пеленгації/просторової селекції)

### Вибір типу випромінювача

Як елементарний випромінювач приймальної решітки може застосовуватись мікросмужковий патч-елемент, який є технологічним для друкованого виконання, має компактні габарити та добре масштабується в решітку (рис. 2.3).

					КПЕК.023027.01.01 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

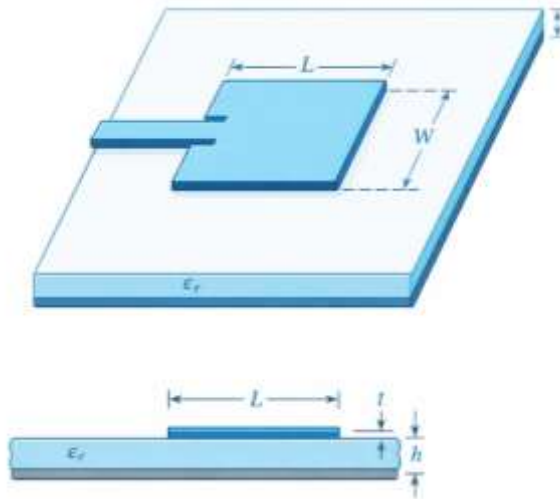


Рисунок 2.3 – Патч-елемент як базовий випромінювач антенної решітки

Розрахунок базових параметрів патч-елемента (за необхідності)

Для заданої робочої частоти  $f_0$  довжина хвилі у вільному просторі:

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_0} \quad (2.16)$$

де  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с.

Для прикладу (узгоджено з п. 2.2):  $f_0 = 10$  ГГц, тоді  $\lambda_0 = 0.03$  м = 30 мм.

Ширина патча (наближено):

$$W \approx \frac{c}{2f_0} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (2.17)$$

Ефективна діелектрична проникність:

$$\epsilon_{eff} \approx \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + 12h/W}} \quad (2.18)$$

Довжина патча:

$$L \approx \frac{c}{2f_0 \sqrt{\epsilon_{eff}}} - 2\Delta L \quad (2.19)$$

де  $\Delta L$  — поправка на крайові поля (визначається через  $h/W$  та  $\epsilon_{eff}$ ).

За параметрами підкладки (приклад):  $\epsilon_r = 11$ ,  $h = 3$  ммотримуються характерні розміри порядку кількох міліметрів, що узгоджується з практичними результатами:  $W \approx 6.1$  мм,  $L \approx 3.2$  мм.

Патч-елемент є придатним для друкованої реалізації приймальної решітки та забезпечує компактність і повторюваність параметрів у серійному виготовленні.

Формування антенної решітки та крок між елементами

Для запобігання появі паразитних максимумів (граткових пелюсток) у типовому випадку обирають крок решітки:

$$d \approx \frac{\lambda_0}{2} \quad (2.20)$$

Тоді при  $f_0 = 10$  ГГц:  $d \approx 15$  мм.

Геометрія решітки, сформована в середовищі моделювання (MATLAB), подана на рис. 2.4.

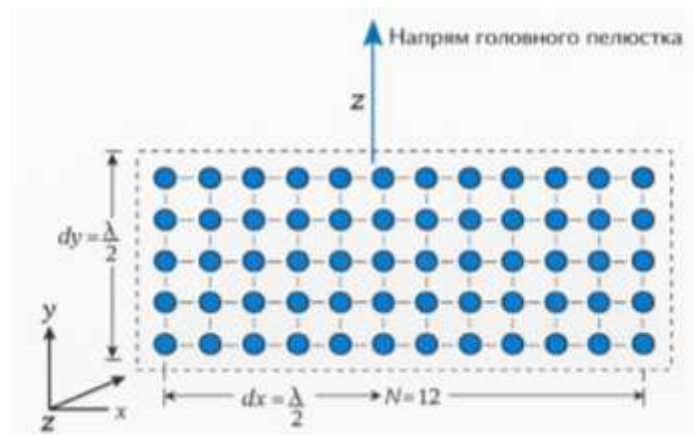


Рисунок 2.4 – Геометрія антенної решітки

Оцінювання підсилення та діаграми спрямованості

Параметри ДС та підсилення визначаються моделюванням (рис. 2.5–2.10).

Розподіл амплітуд уздовж апертури (наприклад, вікно Хемінга) застосовується для зниження бічних пелюсток і підвищення завадостійкості моніторингу (рис. 2.6–2.9).

					КПЕК.023027.01.01 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41



Рисунок 2.5 – Результати розрахунку параметрів антенної підсистеми в середовищі аналізу решіток (Sensor Array Analyzer)

У результаті моделювання антенної системи отримано коефіцієнт підсилення 17,7 дБ, що відповідає заданим вимогам до дальності та просторової селекції цілей.

Амплітудний розподіл збудження елементів уздовж апертури антени в горизонтальній та вертикальній площинах сформовано за законом віконної функції Хемінга, що дозволило знизити рівень бічних пелюсток діаграми направленості в азимутальній площині та покращити завадостійкість системи.

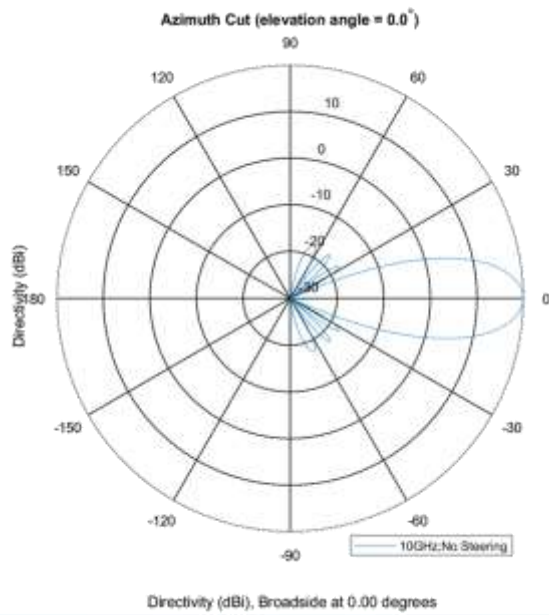


Рисунок 2.6 – Діаграма направленості в горизонтальній площині

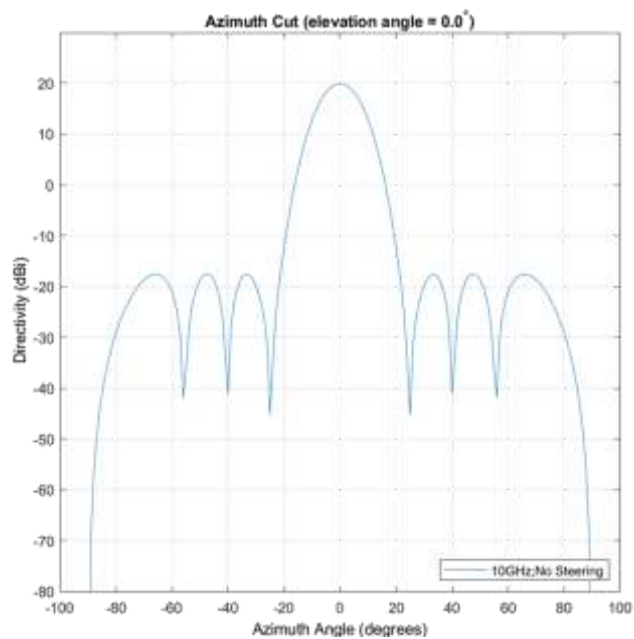


Рисунок 2.7 – Діаграма направленості у горизонтальній площині

Ширина діаграми направленості антени в азимутальній площині становить  $12^\circ$ , що забезпечує необхідну кутову роздільну здатність при визначенні напрямку на об'єкт

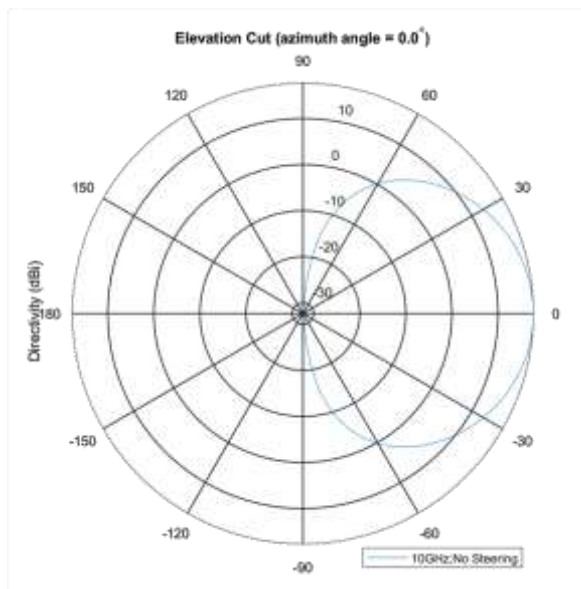


Рисунок 2.8 – Діаграма направленості в вертикальній площині

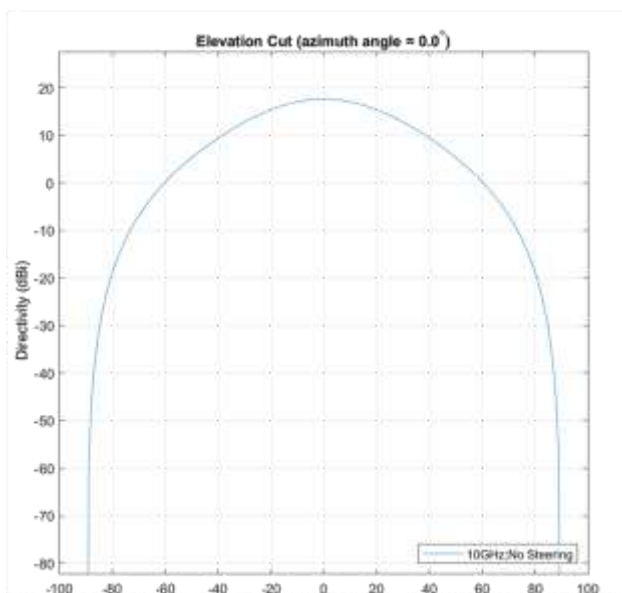


Рисунок 2.9 – Діаграма направленості у вертикальній площині

Завдяки розширеній діаграмі направленості у вертикальній площині забезпечується охоплення простору за всіма можливими висотами розташування цілі. У цій площині не здійснюється точне вимірювання кутових координат, а важливим є гарантоване опромінення об'єкта по висоті для забезпечення його виявлення.

Таким чином, ширина діаграми направленості антени у вертикальній площині прийнята рівною  $60^\circ$ , що дозволяє сформувати необхідну зону контролю за висотою.

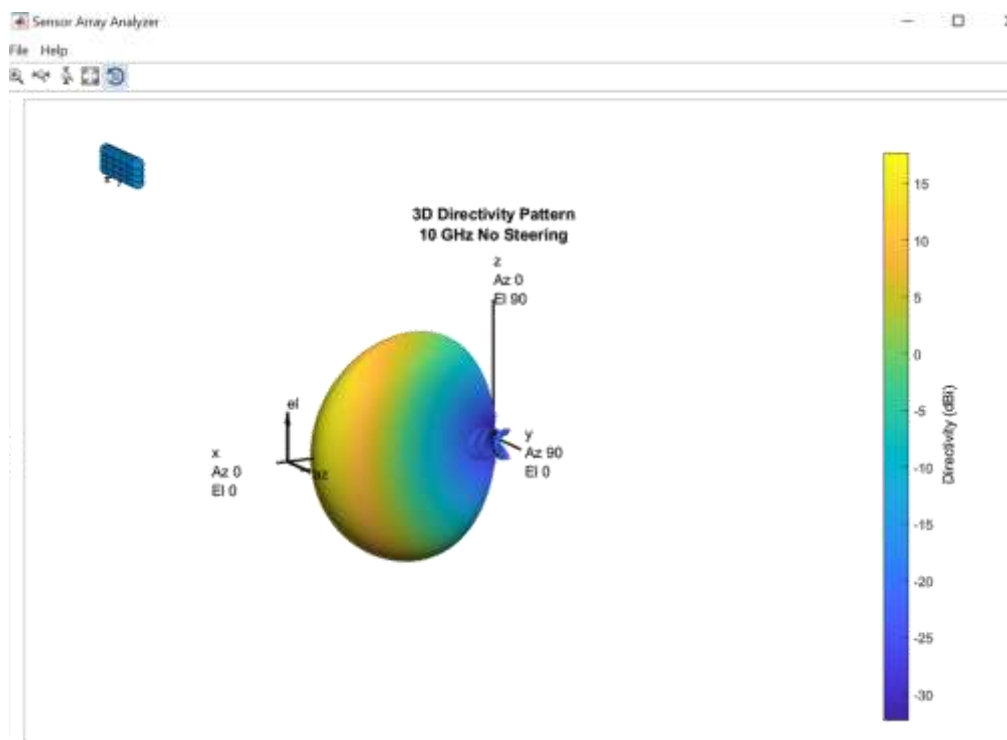


Рисунок 2.10 – Модель 3D діаграми спрямованості

У цьому розділі виконано розрахунок та аналіз параметрів антенної підсистеми, призначеної для виявлення БПЛА. Отримано ширину діаграми направленості  $12^\circ$  у горизонтальній площині, що є достатньою для забезпечення просторової селекції та визначення координат повітряної цілі за параметрами азимут–дальність.

## 2.5 Вибір апаратної та елементної бази

Апаратна база системи радіотехнічного моніторингу повинна забезпечувати: приймання у заданій смузі, цифрову обробку (FFT/виявлення/оцінювання SNR), пеленгацію (за наявності багатоканального приймання), реєстрацію даних та інтерфейс оператора.

					КПЕК.023027.01.01 ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Доцільно виділити такі функціональні вузли:

1. Антенна підсистема (п. 2.4).
2. Вхідний ВЧ-тракт: смуговий фільтр + захист + МШП.
3. Перетворення частоти / приймач: SDR або супергетеродинний модуль з ПЧ.
4. АЦП та цифрова обробка: DSP/FPGA/МК (залежно від смуги та задач).
5. Опорна частота і синхронізація: TCXO/OCXO або GPSDO (коли потрібна стабільність і фазова узгодженість).
6. Система керування та інтерфейс: одноплатний ПК/МК, індикація, мережевий зв'язок.
7. Живлення і корпус: стабілізатори, захист, ЕМС-екранування.

Структура апаратної бази підпорядкована головній вимозі моніторингу: стабільне приймання слабких сигналів і їх цифровий аналіз із можливістю просторової селекції.

Для систем моніторингу практичними є два підходи:

- SDR-платформа (гнучкість налаштувань, цифрові фільтри, просте розширення функцій);
- супергетеродинний приймач (вища вибірковість/динаміка, але менша гнучкість).

У задачі радіотехнічного моніторингу БПЛА перевагу зазвичай має SDR-підхід, оскільки дозволяє:

- швидко змінювати смугу/частоту спостереження;
- виконувати спектральний аналіз у реальному часі;
- реалізувати алгоритми виявлення та класифікації програмно.

SDR забезпечує універсальність системи моніторингу і спрощує модернізацію алгоритмів без зміни апаратної частини.

Під час вибору компонентів доцільно керуватись такими критеріями:

- МШП: мінімальний коефіцієнт шуму, достатнє підсилення, стійкість до перевантаження;

					КПЕК.023027.01.01 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

- фільтри: потрібна смуга пропускання, пригнічення позасмугових сигналів;
- АЦП/SDR: розрядність і частота дискретизації відповідно до  $\Delta f$  та вимог до динамічного діапазону;
- опора частоти: стабільність (особливо для точного вимірювання частоти/доплера та пеленгації);
- обчислювальний модуль: продуктивність для FFT/детекції/логування;
- компоненти живлення: низькі пульсації, фільтрація за ЕМС, захист.

Елементна база добирається не “по бренду”, а під вимоги: чутливість, вибірковість, стабільність частоти, реальний час обробки та електромагнітна сумісність.

## 2.6 Висновки до другого розділу

У другому розділі виконано проектування системи радіотехнічного моніторингу, призначеної для виявлення та супроводження БПЛА в заданій зоні контролю. Розроблено структурну схему системи, обґрунтовано вибір основних технічних параметрів, а також визначено вимоги до приймального тракту та антенної підсистеми.

На основі вихідних даних здійснено розрахунок параметрів зондуючого сигналу, визначено мінімальну чутливість приймача та необхідну потужність передавача. Отримані результати підтвердили можливість забезпечення дальності виявлення до 2,5 км для цілей з ефективною площею розсіювання 0,1 м<sup>2</sup>, що відповідає типовим характеристикам малорозмірних БПЛА.

Виконано проектування антенної підсистеми на основі фазованої антенної решітки з електронним скануванням, що забезпечує формування вузької діаграми спрямованості в горизонтальній площині та достатнє покриття по висоті. Це дозволяє реалізувати просторову селекцію та підвищити завадостійкість системи.

					КПЕК.023027.01.01 ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 3 МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ

### 3.1 Побудова математичної моделі системи

Математична модель системи радіотехнічного моніторингу призначена для кількісного опису процесу виявлення малорозмірних повітряних цілей (БПЛА) залежно від їх ефективної площі розсіювання (ЕПР), параметрів антенної системи та чутливості приймального тракту.

Основою моделі є класичне радіолокаційне рівняння дальності, яке встановлює зв'язок між максимальною дальністю виявлення та енергетичними параметрами системи:

$$R = \sqrt[4]{\frac{P_{\text{пр}} G^2 \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 P_{\text{пр.min}}}}$$

де  $P_{\text{пр}}$  – потужність передавача;  $G$  — коефіцієнт підсилення антени;

$\sigma$  – ефективна площа розсіювання цілі;

$\lambda$  – довжина хвилі;

$P_{\text{пр.min}}$  – мінімальна потужність сигналу на вході приймача.

Вплив ефективної площі розсіювання на дальність виявлення

У межах побудованої моделі було визначено залежність максимальної дальності виявлення від значення ЕПР цілі. Розрахунок виконано для кількох характерних значень ЕПР, що відповідають малорозмірним БПЛА. Для:

$$\sigma_{\text{ц1}} = 0.1 \text{ м кв}$$

$$R1 = \sqrt[4]{\frac{P_{\text{пр}} \cdot (G^2 \cdot \sigma_{\text{ц1}} \cdot \lambda^2)}{(4 \cdot \pi)^3 \cdot P_{\text{пр.min}}} = 2.5 \cdot 10^3 \text{ м}$$

$$\sigma_{\text{ц2}} = 0.07 \text{ м кв}$$

$$R2 = \sqrt[4]{\frac{P_{\text{пр}} \cdot (G^2 \cdot \sigma_{\text{ц2}} \cdot \lambda^2)}{(4 \cdot \pi)^3 \cdot P_{\text{пр.min}}} = 2.287 \cdot 10^3 \text{ м}$$

					КПЕК.023027.01.01 ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\sigma_{ц3} = 0.05 \text{ м кв}$$

$$R3 = \sqrt[4]{\frac{P_{pr} \cdot (G^2 \cdot \sigma_{ц3} \cdot \lambda^2)}{(4 \cdot \pi)^3 \cdot P_{pr\_min}}} = 2.102 \cdot 10^3 \text{ м}$$

$$\sigma_{ц4} = 0.01 \text{ м кв}$$

$$R4 = \sqrt[4]{\frac{P_{pr} \cdot (G^2 \cdot \sigma_{ц4} \cdot \lambda^2)}{(4 \cdot \pi)^3 \cdot P_{pr\_min}}} = 1.406 \cdot 10^3 \text{ м}$$

$$\sigma_{ц5} = 0.005 \text{ м кв}$$

$$R5 = \sqrt[4]{\frac{P_{pr} \cdot (G^2 \cdot \sigma_{ц5} \cdot \lambda^2)}{(4 \cdot \pi)^3 \cdot P_{pr\_min}}} = 1.182 \cdot 10^3 \text{ м}$$

Отримані результати узагальнено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 — Залежність дальності виявлення від ЕПР цілі

ЕПР $\sigma_{ц}$ , м <sup>2</sup>	Дальність R, км
0,1	2,5
0,07	2,287
0,05	2,102
0,01	1,406
0,005	1,182

На рисунку 3.1 представлено зміну радіусу зони огляду системи радіотехнічного моніторингу при зменшенні ЕПР цілі за умови сталих значень імовірності виявлення та рівня хибної тривоги.

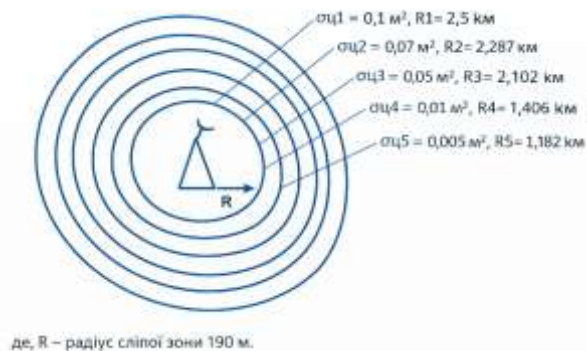


Рисунок 3.1 – Зона радіолокаційного огляду залежно від ефективної площі розсіювання цілі

Згідно з побудованою математичною моделлю, дальність виявлення зменшується пропорційно четвертому кореню з ефективної площі розсіювання. Це означає, що навіть значне зменшення ЕПР БПЛА не призводить до пропорційного зменшення дальності виявлення, що є важливою перевагою імпульсних радіотехнічних систем моніторингу.

Експериментальні оцінки показують, що для більшості малих БПЛА ЕПР знаходиться в межах 0,01–0,1 м<sup>2</sup>. За таких умов розроблена система забезпечує впевнене виявлення на дальностях від 1,2 до 2,5 км, що є достатнім для контролю повітряного простору над об'єктами критичної інфраструктури, міськими районами та зонами проведення масових заходів.

### 3.2 Аналіз параметрів прийнятого сигналу

Одним із ключових етапів оцінювання ефективності системи радіотехнічного моніторингу є аналіз параметрів прийнятого сигналу після його кореляційної обробки. Кореляційна обробка дозволяє значно підвищити відношення сигнал/шум, забезпечити виявлення слабких сигналів на фоні завад та підвищити точність визначення параметрів об'єкта спостереження. Особливо важливим є застосування методів внутрішньоімпульсної модуляції, які дають змогу збільшити енергетичний потенціал системи без збільшення пікової потужності передавача.

Для підвищення завадостійкості та покращення роздільної здатності в роботі використано фазокодований радіоімпульс на основі коду Баркера. Використання фазової маніпуляції дозволяє формувати складні сигнали з великою базою, що після узгодженої фільтрації забезпечують ефект стиснення імпульсу. У результаті досягається одночасно висока енергетична ефективність сигналу та покращення роздільної здатності за дальністю.

					КПЕК.023027.01.01 ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Коди Баркера являють собою спеціальні двійкові послідовності, елементи яких приймають значення  $+1$  або  $-1$  та характеризуються унікальними кореляційними властивостями. Основною особливістю таких кодів є те, що їх бічні пелюстки аперіодичної автокореляційної функції не перевищують одиниці за абсолютним значенням. Завдяки цьому після кореляційної обробки формується вузький головний максимум та мінімізується вплив паразитних відгуків, які можуть призводити до появи хибних цілей або погіршення точності вимірювань.

Застосування кодів Баркера широко використовується в радіолокаційних системах, системах зв'язку та радіотехнічного моніторингу, де необхідно забезпечити високу ймовірність виявлення сигналів в умовах шумів та активних завад. Порівняно з немодульованими імпульсами, фазокодовані сигнали забезпечують додатковий вигравш обробки, який приблизно дорівнює довжині кодової послідовності.

Відомо обмежену кількість кодів Баркера, причому максимальна довжина послідовності становить 13 елементів. На сьогодні математично доведено, що інших кодів Баркера більшої довжини не існує. Це обмеження пов'язане з фундаментальними властивостями автокореляційних функцій двійкових послідовностей. Незважаючи на відносно невелику довжину, коди Баркера залишаються одним із найефективніших інструментів формування сигналів для задач виявлення та вимірювання.

У даній роботі для формування зондувального сигналу використано код Баркера довжиною 13 елементів, який забезпечує найбільший коефіцієнт стиснення серед усіх існуючих кодів цього класу. Після проходження узгодженого фільтра формується автокореляційна функція з вираженим головним максимумом і низьким рівнем бічних пелюсток, що сприяє підвищенню точності визначення дальності та покращує завадозахищеність системи радіотехнічного моніторингу.

Основні відомі коди Баркера наведено у таблиці 3.2.

					КПЕК.023027.01.01 ПЗ	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.2 – Відомі коди Баркера

Довжина N	Послідовність	Рівень бокових пелюсток
2	+1 -1; +1 +1	-3,01 дБ
3	+1 +1 -1	-6,53 дБ
4	+1 +1 -1 +1; +1 +1 +1 -1	-6,02 дБ
5	+1 +1 +1 -1 +1	-7,96 дБ
7	+1 +1 +1 -1 -1 +1 -1	-9,12 дБ
11	+1 +1 +1 -1 -1 -1 +1 -1 -1 +1 -1	-10,83 дБ
13	+1 +1 +1 +1 +1 -1 -1 +1 +1 -1 +1 -1 +1	-11,49 дБ

Кодова послідовність Баркера складається з елементів  $a_n = \pm 1$  та характеризується нормованою автокореляційною функцією (АКФ):

$$R(\mu) = \begin{cases} 1, & \mu = 0 \\ 0, & \mu = 2l + 1 \\ \pm \frac{1}{N}, & \mu = 2l \end{cases}$$

де  $l = 0, 1, \dots, (N - 1)/2$ .

Ця властивість забезпечує мінімальний рівень бокових пелюсток автокореляційної функції, що є критично важливим для систем радіотехнічного моніторингу при виявленні малорозмірних БПЛА на фоні завад.

На рисунку 3.2 наведено тіло невизначеності сигналів Баркера, яке відображає зв'язок між часовим зсувом та доплерівським зміщенням частоти.

Перетини функції невизначеності будуються для значень

$$\Omega = \frac{2\pi l}{\tau_0 N}$$

де  $l = 0, \pm 1, \dots, \pm N$ .

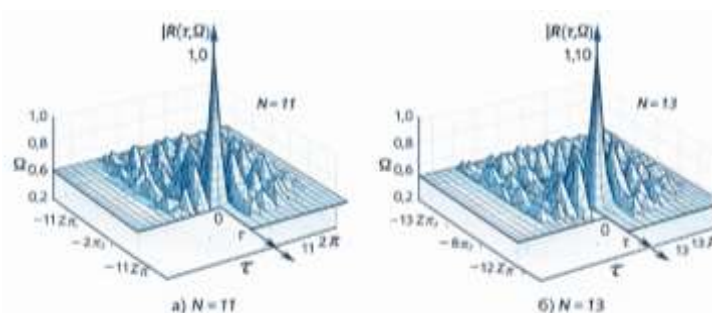


Рисунок 3.2 – Тіло невизначеності автокореляційної функції сигналу з кодом Баркера

Дослідження зондуючого сигналу виконано у програмному середовищі Radar Waveform Analyzer. Для аналізу використано такі параметри:

- частота дискретизації –  $3 \cdot 10^7$  Гц;
- кількість імпульсів – 1;
- тип коду – Баркер;
- тривалість чіпа –  $1 \cdot 10^{-7}$  с;
- кількість елементів коду – 13;
- швидкість поширення хвилі –  $3 \cdot 10^8$  м/с.

На рисунку 3.3 представлено функцію невизначеності вибраного сигналу. Видно виражений максимум при нульових затримці та доплерівському зсуві, що підтверджує хороші кореляційні властивості сигналу.

Рисунок 3.4 ілюструє нормовану автокореляційну функцію сигналу Баркера при нульовому часовому зсуві. Центральний пік значно перевищує рівень бокових пелюсток, що забезпечує високу точність визначення дальності.

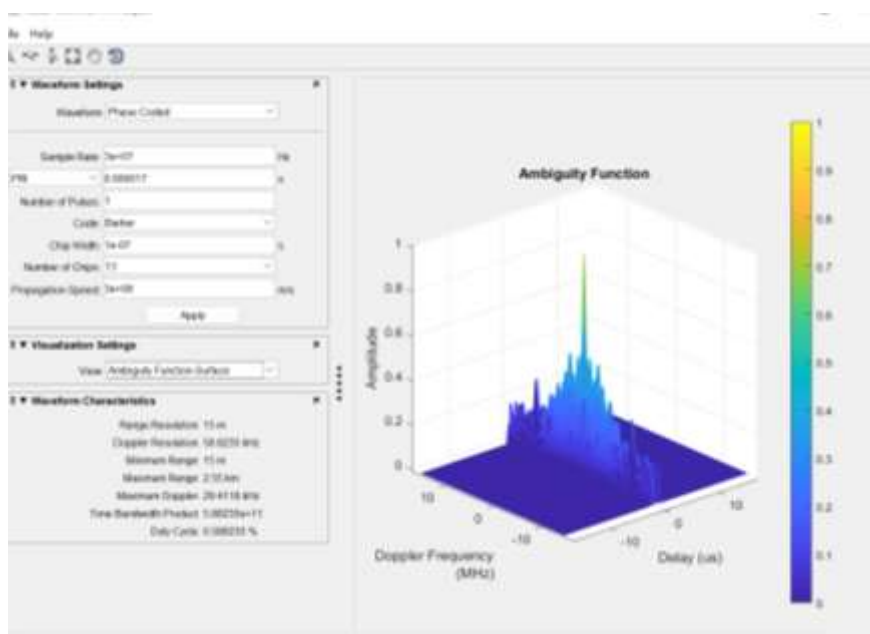


Рисунок 3.3 – Двовимірна функція невизначеності фазокодованого сигналу



Таким чином, використання 13-елементного коду Баркера дозволяє підвищити енергетичну ефективність сигналу та забезпечити необхідну роздільну здатність системи радіотехнічного моніторингу при виявленні БПЛА з малою ефективною площею розсіювання.

### 3.3 Оцінювання чутливості, завадостійкості та дальності виявлення

Чутливість системи радіотехнічного моніторингу визначається мінімальною потужністю сигналу на вході приймача, за якої забезпечується задана ймовірність виявлення при фіксованій ймовірності хибної тривоги.

Мінімальна потужність сигналу на вході приймача визначається співвідношенням:

$$P_{min} = kT_0BF \cdot q$$

де:  $k$  – стала Больцмана;

$T_0$  – еквівалентна шумова температура (290 K);

$B$  – смуга пропускання приймача;

$F$  – коефіцієнт шуму приймального тракту;

$q$  – необхідне відношення сигнал/шум для забезпечення заданих імовірностей.

З аналізу попередніх розрахунків встановлено, що мінімальна потужність сигналу на вході приймача становить порядку  $10^{-17}$  Вт, що свідчить про високу чутливість системи.

Таким чином, застосування кореляційної обробки сигналів (код Баркера довжиною 13) дозволяє суттєво знизити вимоги до вхідної потужності сигналу та підвищити енергетичний потенціал системи.

Завадостійкість запропонованої системи забезпечується поєднанням просторової, часової та частотної селекції сигналів. Використання фазованої

					КПЕК.023027.01.01 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

антенної решітки дозволяє формувати вузьку діаграму спрямованості в горизонтальній площині та знижувати рівень бічних пелюсток за рахунок амплітудного зважування. Застосування кодованих радіоімпульсів із кореляційною обробкою забезпечує енергетичний вигравш після стиснення сигналу та покращення співвідношення сигнал/шум на виході оптимального фільтра. Це особливо важливо в умовах складної радіоелектронної обстановки, характерної для міської забудови, де присутні як активні перешкоди, так і фонове електромагнітне випромінювання.

Дальність виявлення визначається енергетичним потенціалом системи та ефективною площею розсіювання цілі. Відповідно до рівняння радіолокації, дальність пропорційна четвертому кореню з добутку потужності передавача, коефіцієнта підсилення антени та ЕПР цілі. Результати моделювання показали, що для БПЛА з ЕПР  $0,1 \text{ м}^2$  забезпечується дальність виявлення до 2,5 км, а для малорозмірних цілей з ЕПР  $0,01 \text{ м}^2$  – близько 1,4 км. Отримані значення підтверджують здатність системи ефективно контролювати повітряний простір на малих і середніх дистанціях.

### 3.4 Порівняльний аналіз ефективності запропонованого рішення

Запропонована система радіотехнічного моніторингу має низку переваг порівняно з класичними імпульсними радіолокаційними станціями. Насамперед, використання фазованої антенної решітки з електронним скануванням дозволяє відмовитися від механічного обертання антени, що підвищує швидкодію, надійність та точність просторової селекції. Застосування кодованих сигналів та цифрової обробки забезпечує зменшення рівня бічних пелюсток автокореляційної функції та покращення завадостійкості в умовах інтенсивних перешкод.

					КПЕК.023027.01.01 ПЗ	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Порівняно з пасивними системами радіомоніторингу, які аналізують лише канали управління БПЛА, запропонована система не залежить від наявності активного радіообміну між безпілотником та оператором. Це дозволяє виявляти як керовані, так і автономні цілі, що використовують навігацію за супутниковими сигналами або запрограмованими маршрутами. Крім того, система забезпечує вимірювання дальності та азимуту цілі, що значно розширює її функціональні можливості.

Комплексний аналіз показує, що запропоноване рішення характеризується підвищеною чутливістю, достатньою дальністю виявлення малорозмірних об'єктів, адаптивністю до складних умов поширення радіохвиль та можливістю інтеграції з іншими підсистемами спостереження. Це дозволяє розглядати розроблену систему як ефективний інструмент радіотехнічного моніторингу повітряного простору, орієнтований на виявлення сучасних БПЛА з малою ефективною площею розсіювання.

### 3.5 Висновки до третього розділу

У третьому розділі виконано математичне моделювання функціонування системи радіотехнічного моніторингу та проведено аналіз її основних характеристик у задачі виявлення малорозмірних БПЛА. На основі рівняння радіолокації досліджено залежність дальності виявлення від ефективної площі розсіювання цілі та підтверджено, що зменшення ЕПР призводить до пропорційного скорочення радіусу зони контролю. Отримані результати узгоджуються з теоретичними положеннями радіотехніки та свідчать про достатній енергетичний потенціал системи для контролю повітряного простору на відстанях до 2–2,5 км для типових малорозмірних цілей.

Проведено аналіз параметрів прийнятого сигналу із застосуванням кодованих радіоімпульсів (коду Баркера), що дозволило оцінити виграш у

					КПЕК.023027.01.01 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

співвідношенні сигнал/шум після кореляційної обробки. Показано, що використання оптимального фільтра забезпечує зниження рівня бічних пелюсток автокореляційної функції та підвищення завадостійкості системи.

Оцінювання чутливості приймального тракту підтвердило здатність системи реєструвати сигнали надмалого рівня, а комплексний підхід до обробки інформації – підвищувати достовірність виявлення в умовах завад і складної радіоелектронної обстановки. Таким чином, результати моделювання довели ефективність запропонованої структури системи радіотехнічного моніторингу та її придатність для практичної реалізації в задачах контролю повітряного простору.

					КПЕК.023027.01.01 ПЗ	Арк.
						58
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		



використовується інтегральний стабілізатор напруги DA1 типу 7805, який формує стабілізовану напругу живлення +5 В. Конденсатори C1–C3 виконують функції фільтрації та згладжування пульсацій живлення, що дозволяє зменшити вплив зовнішніх завад на роботу генератора.

Частота генерованих імпульсів визначається параметрами часозадавального RC-ланцюга, утвореного резисторами R2–R4 та конденсатором C5. Змінний резистор R2 забезпечує можливість плавного регулювання частоти генерації в необхідному діапазоні. Світлодіод HL1 разом із резистором R1 використовується для індикації роботи пристрою та наявності імпульсного сигналу.

Сформований таймером сигнал знімається з виходу мікросхеми NE555 та через розділовий конденсатор надходить на вихідний роз'єм RF OUT. Розділовий конденсатор виключає проходження постійної складової напруги та забезпечує передачу лише змінної компоненти сигналу до наступних каскадів системи. Конденсатори C6 та C7 виконують функцію додаткової фільтрації та підвищують стабільність роботи генератора.

Розроблена схема забезпечує формування стабільної послідовності синхроімпульсів із можливістю регулювання частоти, що дозволяє використовувати її як вузол часової синхронізації в системі радіотехнічного моніторингу. Простота реалізації, низька вартість компонентів та висока надійність роботи роблять дане технічне рішення доцільним для використання у складі експериментального макета системи.

Підсистема синхронізації формує імпульсні сигнали керування, що визначають:

- період повторення зондувальних імпульсів;
- часові інтервали приймання відбитих сигналів;
- запуск алгоритмів цифрової обробки.

					КПЕК.023027.01.01 ПЗ	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Формування тактової послідовності здійснюється генератором імпульсів на базі інтегрального таймера типу NE555, який працює в режимі автогенератора. Вихідний сигнал має прямокутну форму з регульованою частотою повторення, що дозволяє адаптувати режим роботи системи залежно від максимальної дальності моніторингу.

Частота генерації визначається параметрами RC-кола та може бути описана співвідношенням:

$$f = \frac{1}{\ln(2) (R_{\text{екв}} \cdot C)}$$

де  $R_{\text{екв}}$  – еквівалентний опір частотозадавального ланцюга,  $C$  – ємність конденсатора.

Регулювання частоти здійснюється змінним резистором, що забезпечує можливість зміни періоду повторення імпульсів у межах заданого діапазону.

Стабілізація напруги живлення генератора реалізована окремим лінійним стабілізатором, що мінімізує вплив пульсацій джерела живлення на стабільність частоти. Фільтрувальні конденсатори забезпечують зменшення високочастотних перешкод.

Таким чином, підсистема синхронізації виконує ключову функцію – формування часової структури роботи всієї системи радіотехнічного моніторингу.

#### 4.2 Реалізація алгоритмів керування та цифрової обробки сигналів

Для реалізації блоку синхронізації розроблено двосторонню друковану плату на основі склотекстоліту FR4 товщиною 1,5 мм із мідним покриттям 35 мкм. Обраний матеріал характеризується високою механічною міцністю, стабільністю діелектричних параметрів, достатньою теплостійкістю та

					КПЕК.023027.01.01 ПЗ	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

придатністю до гальванічних технологій виготовлення, що відповідає вимогам до пристроїв радіотехнічного моніторингу.

Монтаж елементів виконано на верхньому шарі плати із застосуванням змішаної технології (ТНТ + SMD), що дозволяє поєднати компактність конструкції та підвищену механічну надійність силових елементів.

Розрахунок площі друкованої плати проводився з урахуванням габаритів компонентів, технологічних зазорів, зон кріплення та трасування провідників. Сумарна площа, необхідна для розміщення елементів, склала

$$S_{\text{заг}} = 628 \text{ мм}^2.$$

З урахуванням технологічного запасу прийнято габаритні розміри плати  $30 \times 40$  мм, що забезпечує раціональне компонування елементів, мінімізацію довжини сигнальних ліній та зменшення паразитних індуктивностей і ємностей.

Параметри провідників визначались виходячи з допустимої густини струму та обмеження падіння напруги. Для силових ліній живлення (5 В, 0,05 А) прийнято ширину провідника 0,3 мм, що забезпечує необхідну струмову провідність із тепловим запасом. Для сигнальних ліній (до 0,001 А) використано мінімальну технологічно допустиму ширину 0,3 мм. Міжпровідниковий зазор прийнято 0,35 мм відповідно до вимог електричної ізоляції та технологічних норм виробництва.

Діаметр металізованого перехідного отвору визначено за залежністю

$$d = \gamma H,$$

де  $\gamma = 0,33$  – технологічний коефіцієнт;  $H = 1,5$  мм – товщина плати.

У результаті отримано

$$d = 0,495 \text{ мм.}$$

Діаметр контактної майданчика становить

$$D = 0,825 \text{ мм.}$$

					КПЕК.023027.01.01 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

Загальний вигляд друкованої плати після завершення трасування наведено на рисунку 4.2. Як видно з рисунка 4.2, елементи розміщені компактно, силові та сигнальні лінії розділені, а топологія провідників виконана з урахуванням мінімізації перехресних перешкод і забезпечення електромагнітної сумісності.

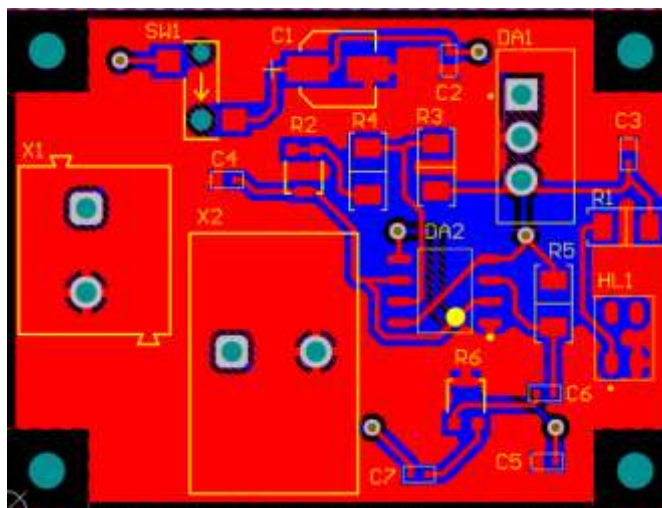


Рисунок 4.2 – Плата після виконання трасування (вигляд зверху)

Отримані параметри відповідають стандартам виготовлення плат середнього класу точності.

#### 4.3 Конструктивна реалізація та інтеграція підсистеми

Після завершення трасування та проведення перевірки коректності друкованої плати було виконано її тривимірну візуалізацію. 3D-модель дозволила оцінити просторове розміщення елементів та перевірити відсутність механічних конфліктів. Загальний вигляд плати у тривимірному представленні наведено на рисунку 4.3.

На рисунку 4.3 представлено тривимірну модель друкованої плати разом із попередньо спроектованим корпусом, що дозволяє оцінити взаємне розташування електронних компонентів і конструктивних елементів.

					КПЕК.023027.01.01 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

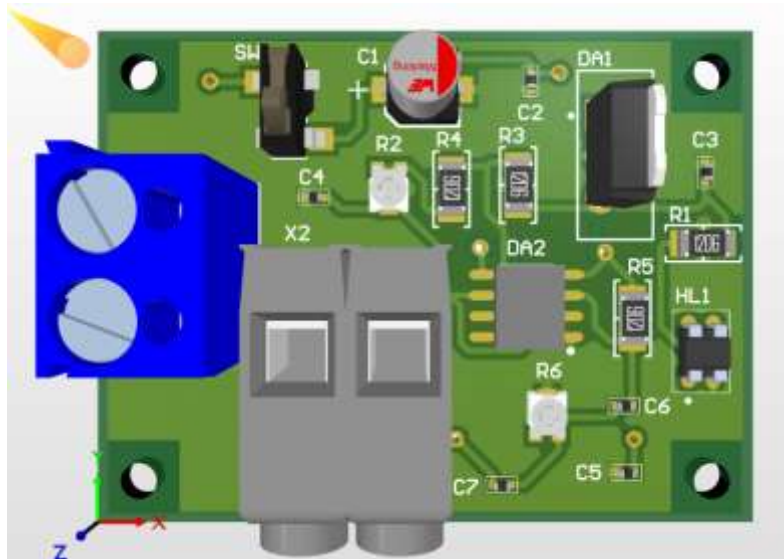


Рисунок 4.3 – Тривимірна візуалізація друкованої плати з розробленим корпусом для розміщення підсистеми (вид зверху)

Після завершення електронного проектування 3D-модель плати була експортована із середовища Altium Designer до системи автоматизованого проектування SolidWorks для розробки механічної частини пристрою.

У середовищі SolidWorks на основі габаритних розмірів плати та розташування компонентів було спроектовано корпус з урахуванням:

- монтажних отворів;
- точок фіксації друкованої плати;
- технологічних прорізів;
- отворів під роз'єми живлення та сигналів;
- виведення елементів індикації;
- зручності складання і подальшого технічного обслуговування.

Конструкція корпусу забезпечує:

- механічний захист електронних компонентів;
- жорстку фіксацію друкованої плати;

- зручний доступ до роз'ємів живлення та сигнальних ліній;
- можливість природної вентиляції та відведення тепла.

Проектування виконувалося з використанням спеціалізованих програмних середовищ:

- Altium Designer – розробка електричної частини;
- SolidWorks – розробка механічної частини.

Комплексний підхід до проектування дозволив забезпечити повну сумісність електронної та конструктивної складових підсистеми радіотехнічного моніторингу.

#### 4.4 Висновки до четвертого розділу

У четвертому розділі розроблено підсистему керування та синхронізації системи радіотехнічного моніторингу, яка забезпечує узгоджену роботу передавального, приймального та обчислювального трактів.

Сформовано структурно-функціональну схему блоку синхронізації, що дозволяє генерувати стабільні синхроімпульси та забезпечувати часову координацію процесів випромінювання, приймання та обробки сигналів. Запропоноване технічне рішення гарантує необхідну точність формування імпульсів та стабільність параметрів у заданому діапазоні частот.

Виконано проектування електричної принципової схеми та розроблено двосторонню друковану плату на основі матеріалу FR4 товщиною 1,5 мм. Обґрунтовано вибір матеріалу, типу монтажу та методу виготовлення плати. Проведено розрахунок площі, параметрів провідників і перехідних отворів, що забезпечує надійність електричних з'єднань та відповідність вимогам струмових навантажень.

Розроблено конструктивне виконання корпусу з урахуванням габаритів плати, елементної бази та умов експлуатації. Забезпечено механічну фіксацію,

					КПЕК.023027.01.01 ПЗ	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

електричну ізоляцію та можливість монтажу підсистеми в складі загальної системи радіотехнічного моніторингу.

Таким чином, у розділі реалізовано повний цикл проєктування підсистеми керування – від структурної схеми до конструктивного виконання, що забезпечує технічну готовність модуля до інтеграції в систему радіотехнічного моніторингу для виявлення малорозмірних БПЛА.

					КПЕК.023027.01.01 ПЗ	Арк.
						66
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

## ВИСНОВКИ

У кваліфікаційному проєкті запропоновано концепцію та виконано інженерне опрацювання системи радіотехнічного моніторингу, призначеної для виявлення, аналізу та контролю радіосигналів у визначеній зоні спостереження.

У першому розділі здійснено узагальнення сучасних підходів до побудови систем радіотехнічного моніторингу, проаналізовано їх функціональне призначення, технічні можливості та сфери практичного застосування. Обґрунтовано доцільність інтеграції активних і пасивних методів спостереження з алгоритмами цифрової обробки сигналів для підвищення достовірності виявлення малорозмірних об'єктів із низькою ефективною площею розсіювання.

У другому розділі сформовано структурну модель системи та визначено її основні технічні параметри. Проведено енергетичні розрахунки, оцінено мінімальний рівень приймальної потужності, обґрунтовано параметри зондувального сигналу та визначено дальність виявлення цілей з різними значеннями ЕПР. Розроблено антенну підсистему на базі фазованої антенної решітки, встановлено її коефіцієнт підсилення та параметри діаграми спрямованості у горизонтальній та вертикальній площинах.

У третьому розділі побудовано математичну модель функціонування системи та виконано аналіз характеристик прийнятого сигналу. Розглянуто застосування фазокодованих сигналів із використанням коду Баркера, що забезпечує підвищення відношення сигнал/шум у процесі кореляційної обробки. Здійснено оцінювання чутливості, завадостійкості та граничної дальності виявлення, а також виконано порівняльний аналіз ефективності запропонованого технічного рішення.

У четвертому розділі розроблено підсистему синхронізації та керування, спроектовано друковану плату й конструктивне виконання пристрою з використанням сучасних САД-систем. Забезпечено узгодженість електричних і

					КПЕК.023027.01.01 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

механічних рішень, що підтверджує технічну реалізованість запропонованої системи.

Узагальнюючи результати виконаної роботи, можна стверджувати, що поставлена мета досягнута: розроблено структурно та параметрично обґрунтовану систему радіотехнічного моніторингу, здатну забезпечити виявлення малорозмірних радіоб'єктів у межах заданої дальності з необхідним рівнем достовірності. Отримані результати можуть бути використані під час створення сучасних засобів контролю повітряного простору та радіочастотного спектра.

					КПЕК.023027.01.01 ПЗ	Арк.
						68
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Ковальчук В. П. Проектування ширококутових антен для бездротових систем зв'язку // Вісник НТУУ «КПІ». – 2023.
2. Литвиненко Л. М. Основи радіотехнічних систем моніторингу. – Київ : НТУУ «КПІ», 2021.
3. Гончаренко В. І. Теорія та техніка радіолокації. – Харків : ХНУРЕ, 2020.
4. Биков Ю. С. Радіотехнічні системи виявлення та супроводження цілей. – Львів : Вид-во ЛП, 2022.
5. Синельников О. М. Цифрова обробка сигналів у радіотехнічних системах. – Київ : Каравела, 2021.
6. Кравченко С. П. Основи теорії сигналів та систем. – Одеса : ОНАЗ ім. О. С. Попова, 2019.
7. Шевченко О. Г. Антени та пристрої НВЧ. – Київ : Ліра-К, 2022.
8. Мельник І. В. Радіомоніторинг та спектральний контроль. – Київ : НУБіП, 2023.
9. Дудник П. І., Ільченко М. Ю. Радіолокаційні системи. – Київ : Вища школа, 2018.
10. Іваненко С. Л. Радіотехніка: навч. посіб. – Київ : Видавничий центр «Київський університет», 2022.
11. Петров В. М. Теорія радіолокаційних систем: навч. посіб. – Харків : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2021.
12. Козлов О. П. Основи цифрової обробки сигналів: навч. посіб. – Одеса : ОНУ ім. І. І. Мечникова, 2020.
13. Городецький М. В. Антени та хвильові процеси: конспект лекцій. – Львів : ЛНУ ім. І. Франка, 2021.
14. Кириченко І. В. Електромагнітні поля і хвилі: навч. посіб. – Дніпро : ДНУ, 2022.

					КПЕК.023027.01.01 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		69

15. Смірнов Ю. С. Приймальні радіотехнічні тракти: конспект лекцій. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021.
16. Мартиненко А. Л. Сигнали та системи: навч. посіб. – Чернігів : ЧНУ, 2020.
17. Богданова Н. В. Розподілені антени та фазовані решітки: навч. посіб. – Харків : ХНУРЕ, 2022.
18. Семенов П. І. Основи радіофізики: конспект лекцій. – Львів : НУ «Львівська політехніка», 2019.
19. Климчук Є. А. Радіолокаційні імпульси та коди: навч. посіб. – Київ : Науковий світ, 2021.
20. Соловійов О. П. Аналіз сигналів у радіотехнічних системах: конспект лекцій. – Одеса : ОНАЗ ім. О. С. Попова, 2022.
21. Дорошенко В. М. Фільтрація та спектральний аналіз: навч. посіб. – Вінниця : ВНТУ, 2020.
22. Чернишенко Н. О. Цифрові методи обробки радіосигналів: навч. посіб. – Харків : ХНУРЕ, 2023.
23. Ющенко І. Г. Проектування радіоелектронних пристроїв: конспект лекцій. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022.
24. Кравченко С. В. Методика розрахунку параметрів антен: навч. посіб. – Львів : ЛІТ, 2019.
25. Галкін Ю. О. Проблемні питання радіолокаційного виявлення малорозмірних БПЛА // Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. – 2021. – № 2 (68). – С. 45–52.
26. Бабенко В. О., Кузнєцов О. М. Аналіз методів виявлення безпілотних літальних апаратів засобами радіотехнічного моніторингу // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2022. – № 1 (63). – С. 87–93.
27. Пономаренко В. П., Литвиненко О. М. Підвищення завадостійкості радіолокаційних систем виявлення малорозмірних повітряних об'єктів // Радіотехніка. – 2020. – № 202. – С. 112–118.

					КПЕК.023027.01.01 ПЗ	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

28. Шевченко С. І., Ткаченко А. В. Особливості радіолокаційного спостереження малих повітряних цілей у складній радіоелектронній обстановці // Військово-технічний збірник. – 2021. – № 25. – С. 60–67.

29. Лисенко О. П., Кравченко М. І. Використання фазованих антенних решіток у системах контролю повітряного простору // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Радіоелектроніка та телекомунікації. – 2023. – № 954. – С. 21–28.

30. Коваленко І. М., Руденко Д. С. Дослідження ефективності фазокодованих сигналів у радіолокаційних системах спостереження // Проблеми телекомунікацій. – 2020. – № 1 (26). – С. 34–41.

31. Мироненко В. В., Сидоренко П. Ю. Моделювання процесів виявлення малопомітних цілей у сучасних радіолокаційних системах // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – 2022. – № 4 (70). – С. 15–23.

32. Черняк О. О., Довженко С. П. Пасивні методи радіотехнічного моніторингу повітряних об'єктів // Збірник наукових праць Державного університету телекомунікацій. – 2021. – № 2. – С. 98–105.

33. Гончаренко А. В., Іщенко І. Г. Аналіз електромагнітних ознак безпілотних літальних апаратів у задачах радіотехнічної розвідки // Оборонний вісник України. – 2022. – № 3. – С. 74–81.

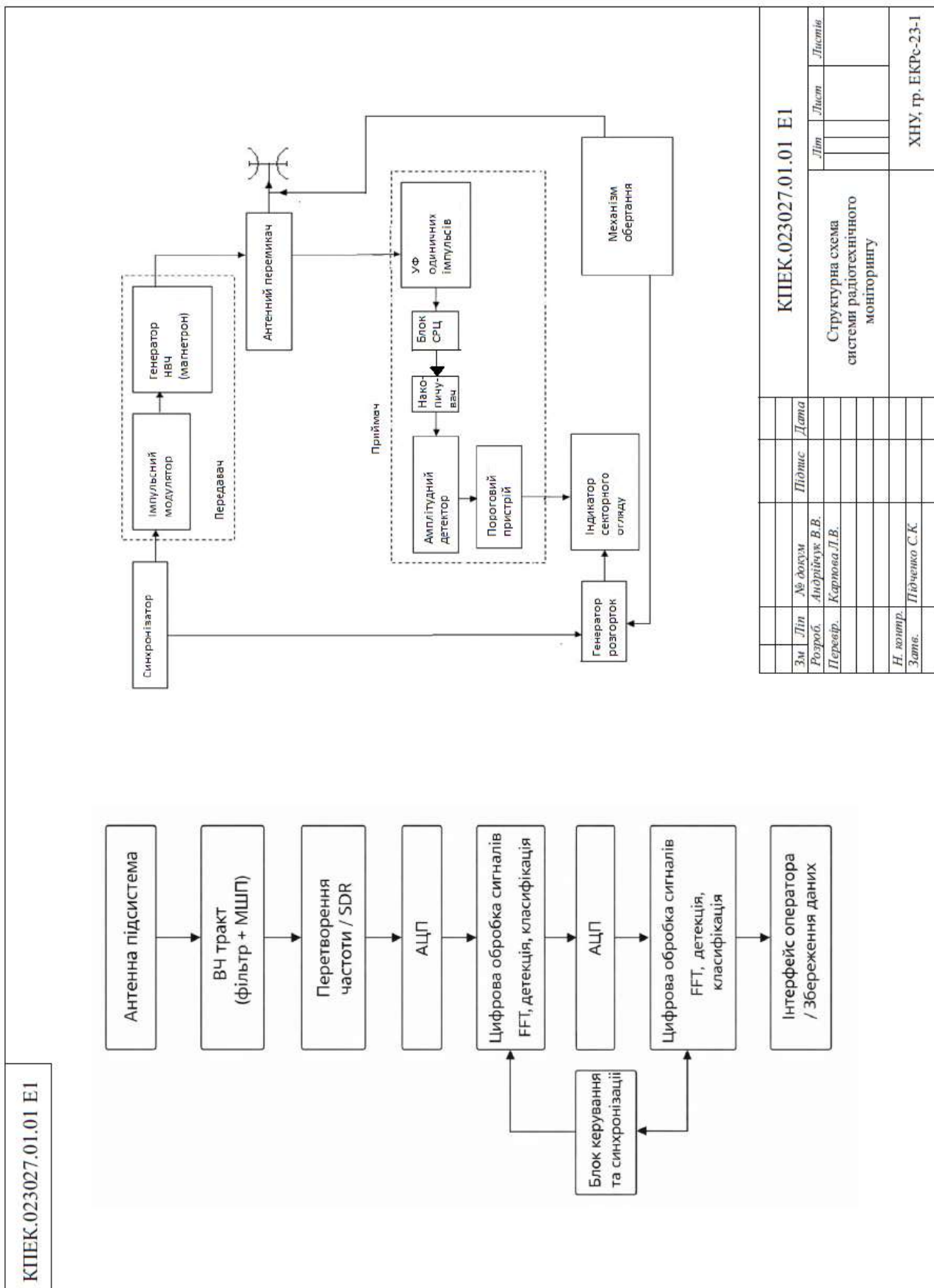
34. Криворучко М. С. Оцінювання енергетичного потенціалу радіолокаційних станцій малої дальності // Вісник НТУУ «КПІ». Серія: Радіотехніка та радіоелектронні апарати. – 2023. – № 91. – С. 39–46.

					КПЕК.023027.01.01 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		71

## ДОДАТКИ

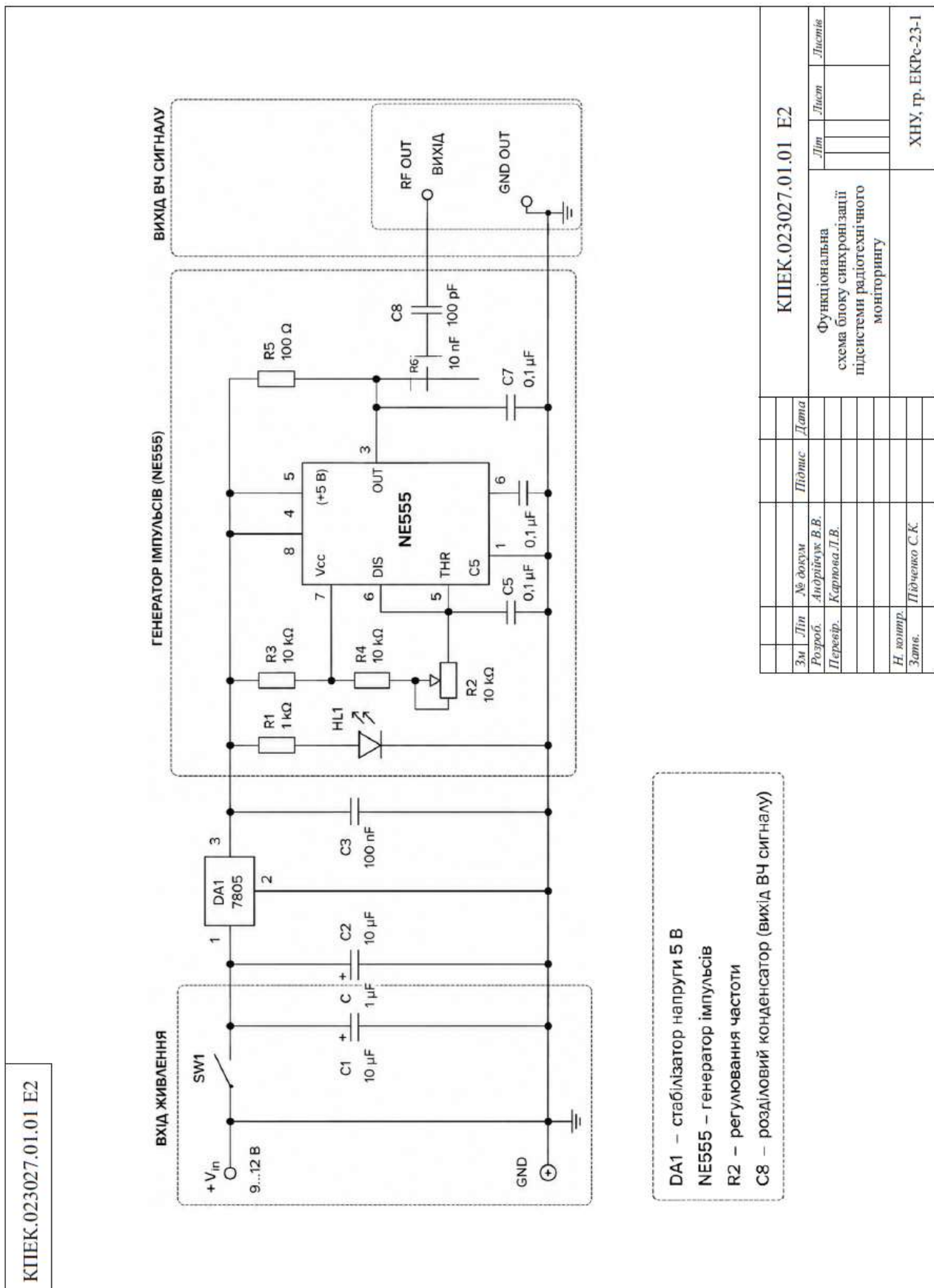
# Додаток А

## Структурна схема системи радіотехнічного моніторингу



## Додаток Б

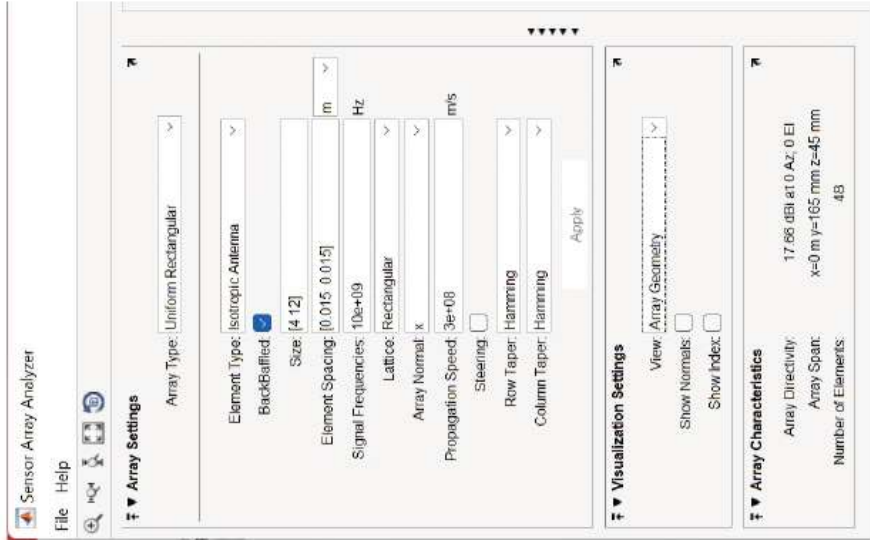
### Функціональна схема блоку синхронізації системи радіотехнічного моніторингу

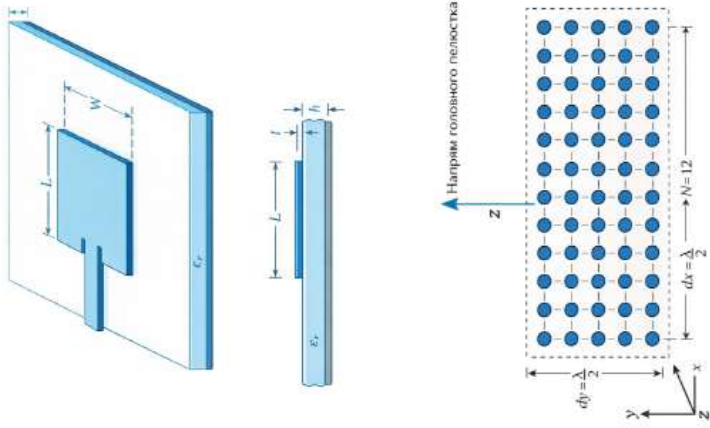


# Додаток В

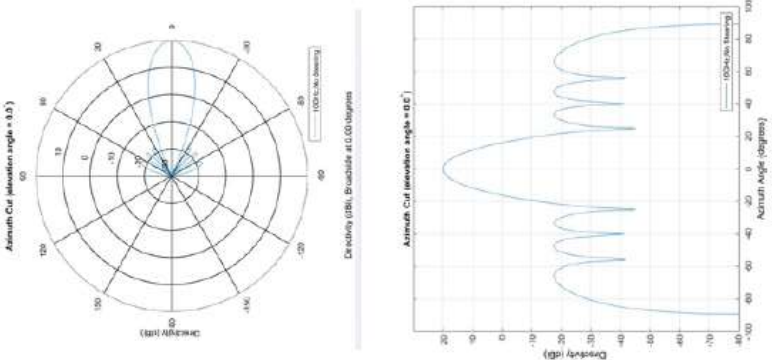
## Антенна решітка системи РТ моніторингу та результати її моделювання

КПЕКР.23027.01.01 E2





Напрямок головного лепестка



Зм.		№ докум.	Підпис	Дата
Розроб.	Перевір.	Андрушук В.В.	Карлова Л.В.	
Н. контр.	Затв.	Підченко С.К.		

**КПЕКР.023027.01.01 E2**

Антенна решітка системи  
радіотехнічного моніторингу  
та результати її моделювання

Лист	Лист	Листів
1	1	1

ХНУ, гр. ЕКРС-23-1

ФАКУЛЬТЕТ:

ФІТ

КАФЕДРА:

ТМІТ

## КВАЛІФІКАЦІЙНИЙ ПРОЕКТ



# СИСТЕМА РАДІОТЕХНІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

Спеціальність:

**172 Електронні  
комунікації та  
радіотехніка**

ВИКОНАВ:  
ЗДОБУВАЧ ІІІ КУРСУ,  
ГРУПА ЕКРс-23-1  
Віталій АНДРІЙЧУК

НАУКОВИЙ КЕРІВНИК:  
К.Т.М.Н., ДОЦЕНТ  
Леся КАРПОВА

## АКТУАЛЬНІСТЬ ТА ПРОБЛЕМАТИКА

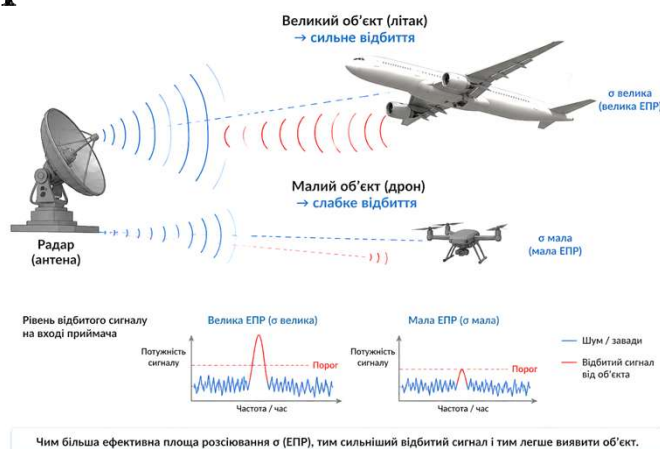
Зростання кількості малопотужних  
радіооб'єктів (БПЛА, IoT)

Мала ефективна площа  
розсіювання ( $\sigma \downarrow$ )

Низький рівень сигналу на вході  
приймача

Вплив завад та шумів

Необхідність підвищення  
чутливості та завадостійкості



### МЕТА КВАЛІФІКАЦІЙНОГО ПРОЕКТУ

Проектування системи радіотехнічного моніторингу для виявлення об'єктів з малою ефективною площею розсіювання

### ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Процеси виявлення, приймання та аналізу радіосигналів

### ЗАСТОСУВАННЯ

- Моніторинг повітряного простору
- Виявлення БПЛА
- Системи безпеки та спостереження
- Радіоконтроль середовища

Українські зразки БПЛА як об'єкти моніторингу



## СТРУКТУРНА СХЕМА СИСТЕМИ

Визначення дальності

$$R = \frac{c \cdot \tau}{2} \quad (1)$$

Виявлення сигналу

$$SNR = \frac{P_s}{P_n} \quad (2)$$

Доплерівський ефект

$$f_d = \frac{2v}{\lambda} \quad (3)$$

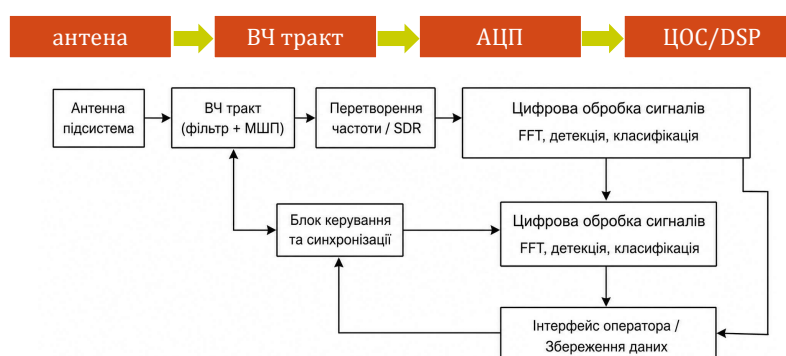


Рис. 1. Структурна схема системи радіотехнічного моніторингу

## ФУНКЦІОНАЛЬНА СХЕМА СИСТЕМИ

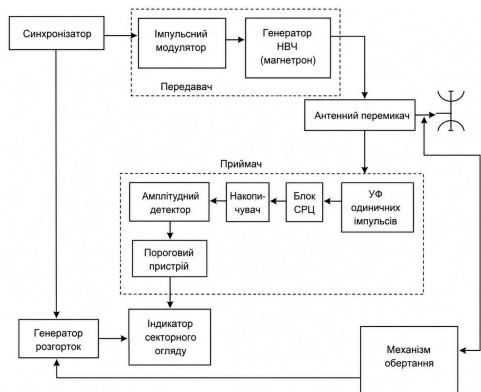


Рис. 2. Функціональна схема системи радіотехнічного моніторингу



5

### Принцип роботи РЛС:

1. Синхронізатор формує керуючі імпульси.
2. Передавач генерує НВЧ-сигнал.
3. Антена випромінює сигнал у простір.
4. Відбитий сигнал приймається антеною.
5. Приймач виконує підсилення та обробку сигналу.
6. Результат відображається на індикаторі секторного огляду.

## ОСНОВНІ ТЕХНІЧНІ ПАРАМЕТРИ СИСТЕМИ

### Дальність та часові параметри

- Максимальна дальність: **2,5 км**
- Період повторення імпульсів: **16,7 мкс**
- Тривалість імпульсу: **100 нс**

### Роздільна здатність і сигнал

- Роздільна здатність: **15 м**
- Смуга сигналу: **10 МГц**
- Необхідне S/N: **17,3 дБ**

### Обробка сигналу

- Фазокодовий сигнал (код Баркера, 13)
- Підвищення завадостійкості
- Ефективне зниження вимог до сигналу

### Енергетичні параметри

- Мін. потужність сигналу:  **$10^{-17}$  Вт**
- Потужність передавача: **≈ 40 Вт**
- Частота: **10 ГГц**
- Підсилення антени: **15 дБ**

### Доплерівські характеристики

- Кількість каналів: **20**
- Аналіз швидкості цілей

### Обмеження

- Сліпа зона: **~195 м**

- ✓ Виявлення БПЛА (ЕПР  $0,1 \text{ м}^2$ ) на 2,5 км
- ✓ Забезпечена роздільна здатність 15 м
- ✓ Система енергетично реалізована

6

## ПРОЄКТУВАННЯ АНТЕННОЇ ПІДСИСТЕМИ

Довжина хвилі:

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_0} \quad (4)$$

Ширина патча:

$$W \approx \frac{c}{2f_0} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (5)$$

Довжина патча:

$$L \approx \frac{c}{2f_0 \sqrt{\epsilon_{eff}}} - 2\Delta L \quad (6)$$

Ефективна проникність:

$$\epsilon_{eff} \approx \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + 12h/W}} \quad (7)$$

Крок решітки:

$$d \approx \frac{\lambda_0}{2} \quad (8)$$

Основні параметри

- $f_0 = 10$  ГГц
- $\lambda_0 = 30$  мм
- $d \approx 15$  мм
- $W \approx 6.1$  мм,  $L \approx 3.2$  мм

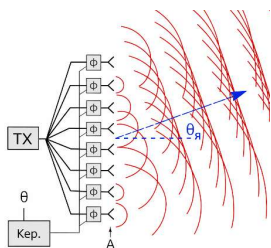


Рис. 3. Антенна решітка з електронним скануванням

Антенна решітка забезпечує електронне сканування, високу завадостійкість та точну пеленгацію джерел випромінювання

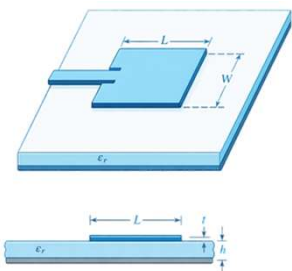


Рис. 4. Патч-елемент як випромінювач антенної решітки

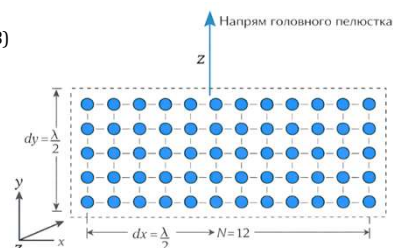


Рис. 5. Геометрія антенної решітки

7

## ОЦІНЮВАННЯ ПІДСИЛЕННЯ ТА ДІАГРАМИ СПРЯМОВАНОСТІ

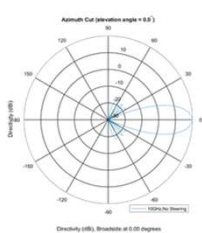


Рис. 6. Діаграма направленості у горизонтальній площині

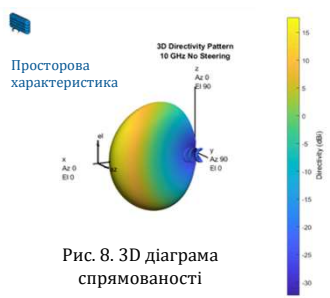
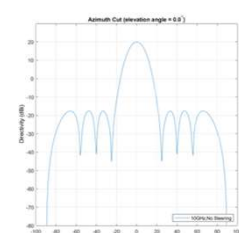


Рис. 8. 3D діаграма спрямованості

Кутові параметри

- Ширина ДС (азимут): **12°**  
→ забезпечує точну пеленгацію
- Ширина ДС (кут місяця): **60°**  
→ забезпечує покриття по висоті

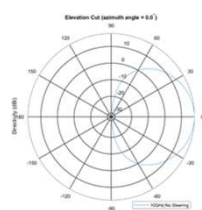
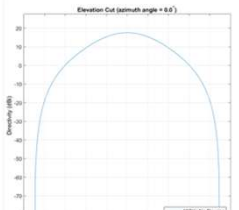
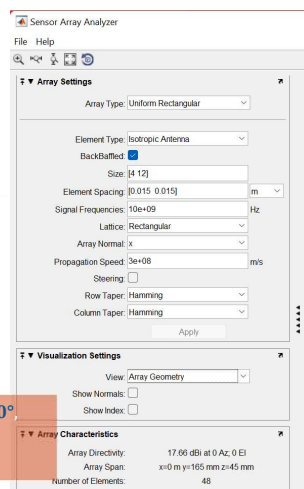


Рис. 7. Діаграма направленості у вертикальній площині



Результати розрахунку параметрів антенної підсистеми в середовищі аналізу решіток



Отримано підсилення **17,7 дБ** та ДС **12° / 60°** що забезпечує ефективну просторову селекцію та виявлення БПЛА

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТА РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

### Основне рівняння дальності:

$$R = \sqrt[4]{\frac{P_{\text{пр}} G^2 \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 P_{\text{пр.min}}}}$$

Залежність дальності виявлення від ЕПР цілі

ЕПР $\sigma_{\text{в}}, \text{м}^2$	Дальність R, км
0,1	2,5
0,07	2,287
0,05	2,102
0,01	1,406
0,005	1,182

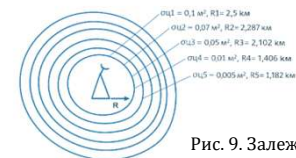


Рис. 9. Залежність дальності від ЕПР

Відомі коди Баркера		
Довжина N	Послідовність	Рівень бокових пелюсток
2	+1 -1; +1 +1	-3,01 дБ
3	+1 +1 -1	-6,53 дБ
4	+1 +1 -1 +1; +1 +1 +1 -1	-6,02 дБ
5	+1 +1 +1 -1 +1	-7,96 дБ
7	+1 +1 +1 -1 -1 +1 -1	-9,12 дБ
11	+1 +1 +1 -1 -1 -1 +1 -1 -1 +1 -1	-10,83 дБ
13	+1 +1 +1 +1 +1 -1 -1 -1 -1 +1 -1 +1 -1	-11,49 дБ

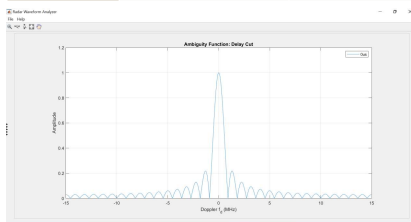


Рис. 10. АЧФ сигналу Баркера (N=13)

- код Баркера N = 13 при нульовій затримці
- покращення SNR після стиснення

- Чутливість:
  - $P_{\text{min}} \approx 10^{-17} \text{ Вт}$
- Дальність:
  - $0,1 \text{ м}^2 \rightarrow 2,5 \text{ км}$
  - $0,01 \text{ м}^2 \rightarrow 1,4 \text{ км}$

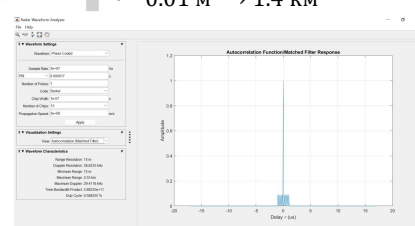


Рис. 11. Сигнал після кореляційної обробки

7

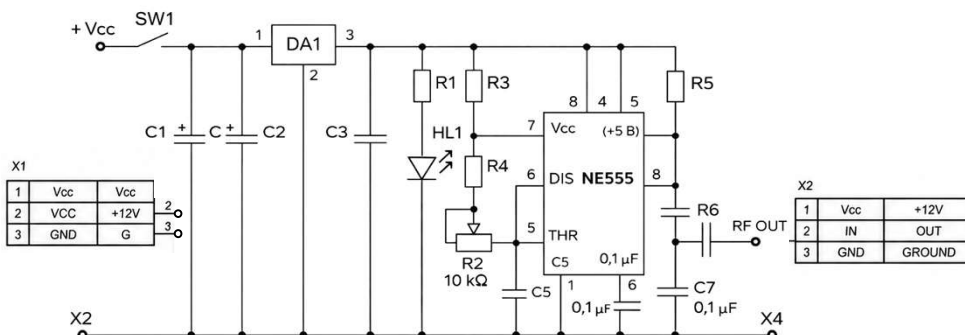
## ОРГАНІЗАЦІЯ СИНХРОНІЗАЦІЇ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ БЛОКІВ

### Призначення

- Узгодження роботи передавача, приймача та обробки
- Формування часової структури системи
- Синхронізація зондування та обробки сигналів

### Основні функції

- Формування періоду повторення імпульсів
- Керування інтервалами приймання сигналів
- Запуск цифрової обробки даних

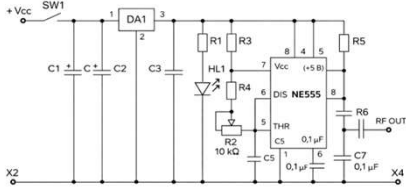


$$f = \frac{1}{\ln(2) (R_{\text{екв}} \cdot C)}$$

Рис. 12. Принципова схема блоку синхронізації системи радіотехнічного моніторингу

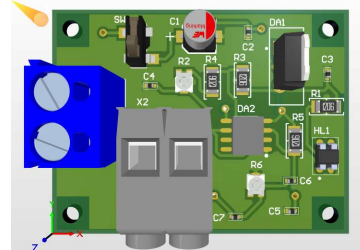
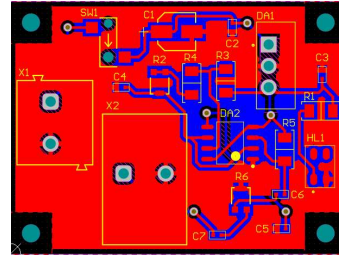
10

# КОНСТРУКТОРСЬКА РЕАЛІЗАЦІЯ



## Основні параметри плати

- Площа: **628 мм<sup>2</sup>**
- Розміри: **30 × 40 мм**
- Ширина доріжок:
  - живлення: **0,3 мм**
  - сигнали: **0,3 мм**
- Зазор: **0,35 мм**



- Двостороння PCB (FR4, 1,5 мм, Cu 35 мкм)
- Змішаний монтаж: **THT + SMD**
- Оптимізація під EMI та мінімізацію паразитних параметрів

# КОНФЕРЕНЦІЯ

Міністерство освіти і науки України  
Київський національний університет імені Тараса Шевченка  
Факультет інформаційних технологій  
Кафедра інформаційних систем та технологій



3-я Міжнародна науково-практична конференція

«ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ: РЕЗУЛЬТАТИ І ПЕРСПЕКТИВИ» (IST 2026)



10 березня 2026 р.

Кваліфікаційний проєкт 2026

Міністерство освіти і науки України, Київський національний університет імені Тараса Шевченка

## ІНФОРМАЦІЙНО-АНАЛІТИЧНА СИСТЕМА РАДІОТЕХНОЛОГІЧНОГО МОНИТОРИНГУ

Віталій Андрушків, Юлія Коваленко, Лєся Карпова

Анотація. Розроблено систему радіотехнологічного моніторингу з метою виявлення та аналізу сигналів в радіочастотній області. Система складається з приймача, аналізатора сигналів та бази даних. Використано методи швидкого Фур'є та алгоритми машинного навчання для класифікації сигналів.

**Ключові слова:** радіотехнологічний моніторинг, аналіз сигналів, машинне навчання, швидкий Фур'є.

**ВСТУП**  
Сучасні системи безпеки вимагають високоточного моніторингу радіочастотного спектру. Це дозволяє виявляти потенційні загрози та оперативно реагувати на них. У даній роботі розглядається розробка системи моніторингу радіотехнологічного спектру з використанням методів машинного навчання.

**В. ДАНІ ТА МЕТОДИ**  
Для дослідження встановлено тестову систему радіотехнологічного моніторингу, яка включає в себе приймач, аналізатор сигналів та базу даних. Використано методи швидкого Фур'є та алгоритми машинного навчання для класифікації сигналів.

Міністерство освіти і науки України, Київський національний університет імені Тараса Шевченка

## РЕЗУЛЬТАТИ АНАЛІЗУ

Аналіз показує, що система радіотехнологічного моніторингу ефективно виявляє та аналізує сигнали в радіочастотній області. Використано методи швидкого Фур'є та алгоритми машинного навчання для класифікації сигналів.

**Висновки:** Система радіотехнологічного моніторингу ефективно виявляє та аналізує сигнали в радіочастотній області. Використано методи швидкого Фур'є та алгоритми машинного навчання для класифікації сигналів.

**Висновки:** Система радіотехнологічного моніторингу ефективно виявляє та аналізує сигнали в радіочастотній області. Використано методи швидкого Фур'є та алгоритми машинного навчання для класифікації сигналів.

**Висновки:** Система радіотехнологічного моніторингу ефективно виявляє та аналізує сигнали в радіочастотній області. Використано методи швидкого Фур'є та алгоритми машинного навчання для класифікації сигналів.

**Висновки:** Система радіотехнологічного моніторингу ефективно виявляє та аналізує сигнали в радіочастотній області. Використано методи швидкого Фур'є та алгоритми машинного навчання для класифікації сигналів.

**Висновки:** Система радіотехнологічного моніторингу ефективно виявляє та аналізує сигнали в радіочастотній області. Використано методи швидкого Фур'є та алгоритми машинного навчання для класифікації сигналів.

Міністерство освіти і науки України, Київський національний університет імені Тараса Шевченка

## ДЖЕРЕЛА

1. Boko, J., & Karova, L. (2023). Increasing efficiency in the convolution processing of information signals for radar. In Proceedings of Fourth International Conference on Communications, Computing and Electronic Systems (Lecture Notes in Electrical Engineering, Vol. 977, pp. 290-299). Springer.

2. Boko, J., Polukhovskiy, O. I., Yabluchik, M., & Karova, L. (2023). Design concept for enable cooperative detection fading system. In Habbo: Cooperative and Sustainable Information Systems (Lecture Notes in Data Engineering and Communications Technologies, Vol. 166, pp. 89-107). Springer.

3. Boko, J., Ryba, I., Enkash, O., & Karova, L. (2023). Optimization of System Feedback Loop for Adaptive SAR. In Proceedings of 2023 IEEE International Conference on Intelligent Systems (ICIS), pp. 1-6.

4. Polukhovskiy, O. I., Karova, L. O., Karova, L. V., Gida, I. V., & Molyshchak, V. M. (2019). Using of neural network system as mathematical basis for software defined radar. Voprosy NTUU KPI Seriia «Radiofizika Radiotekhnika», (30), 21-28.

5. Soudaia, M. G., & Saad, M. (2016). Improved spectrum prediction model for cognitive radio networks using DNN for beamforming. Journal of Intelligent Networks, 3, 285-292.

**ВІТАЛІЙ АНДРУШКІВ**  
Доктор філософії, асистент кафедри інформаційних систем та технологій, Київський національний університет імені Тараса Шевченка.  
Email: vitalii.andruskiv@knu.edu.ua

**ЮЛІЯ КОВАЛЕНКО**  
Доктор філософії, асистент кафедри інформаційних систем та технологій, Київський національний університет імені Тараса Шевченка.  
Email: yulia.kovalenko@knu.edu.ua

**ЛЕСЯ КАРПОВА**  
Доктор філософії, асистент кафедри інформаційних систем та технологій, Київський національний університет імені Тараса Шевченка.  
Email: lesia.karпова@knu.edu.ua

Запропоновано концепцію системи радіотехнічного моніторингу для виявлення та аналізу радіосигналів

Виконано розрахунок основних параметрів системи та розроблено антенну підсистему на базі ФАР


Побудовано математичну модель і досліджено характеристики сигналів та завадостійкість системи

Розроблено підсистему керування, друковану плату та підтверджено технічну реалізованість проєкту

## ВИСНОВКИ

У майбутньому перспективним є подальше вдосконалення системи та її адаптація до реальних умов експлуатації

13

 **ДЯКУЮ ЗА УВАГУ!**



## ВІДГУК

на кваліфікаційний проект  
студента групи ЕКРс-23-1 Віталія АНДРІЙЧУКА  
«СИСТЕМА РАДІОТЕХНІЧНОГО МОНІТОРИНГУ»

Кваліфікаційний проект присвячений актуальній науково-технічній проблемі – створенню системи радіотехнічного моніторингу, здатної забезпечувати виявлення та аналіз малопотужних радіосигналів у визначеній зоні контролю. У роботі виконано узагальнення сучасних підходів до побудови систем моніторингу, розроблено структурну та параметричну модель, здійснено енергетичні розрахунки та обґрунтовано технічні характеристики антенної та приймально-обробної підсистем.

У процесі виконання кваліфікаційного проекту студент продемонстрував високий рівень володіння теоретичним матеріалом, здатність до аналітичного мислення, вміння застосовувати сучасні методи цифрової обробки сигналів та інженерні засоби проектування. Особливо слід відзначити використання фазованої антенної решітки, застосування фазокодованих сигналів із кодом Баркера та проведення аналізу відношення сигнал/шум, що забезпечило підвищення достовірності виявлення малорозмірних об'єктів.

У конструкторському розділі розроблено підсистему синхронізації та керування, виконано друковану плату та конструктивне рішення пристрою із застосуванням сучасних САД-систем. Це підтверджує технічну реалізованість запропонованої системи та її практичну значущість.

Оформлення пояснювальної записки відповідає вимогам до кваліфікаційних робіт. Структура проекту є логічною, виклад матеріалу – послідовний, з належним рівнем технічної грамотності. Отримані результати мають як наукову новизну, так і прикладне значення.

Кваліфікаційний проект виконано на високому технічному рівні, має безперечну актуальність у сфері сучасних систем радіотехнічного моніторингу, а студент Віталій АНДРІЙЧУК заслуговує оцінки «відмінно».

Керівник:  
к. техн. наук, доцент



Леся КАРПОВА

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНИЙ ПРОЕКТ

Дипломник: АНДРІЙЧУК Віталій Васильович

Тема роботи: Система радіотехнічного моніторингу

Спеціальність 172 «Електронні комунікації та радіотехніка»

Обсяг кваліфікаційного проекту

Кількість листів креслень 4 Кількість сторінок записки 70

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень в результаті виконаного наукового дослідження Кваліфікаційний проєкт присвячений розробці системи радіотехнічного моніторингу, здатної забезпечувати виявлення малорозмірних об'єктів із малою ефективною площею розсіювання. У роботі виконано узагальнення сучасних підходів до побудови систем моніторингу, розроблено структурну та параметричну модель, проведено енергетичні розрахунки, обґрунтовано параметри зондувального сигналу та розроблено антенну підсистему на базі фазованої антенної решітки. Виконано математичне моделювання процесів приймання та обробки сигналів, застосовано фазокодовані сигнали з кодом Баркера, що забезпечило підвищення відношення сигнал/шум. Розроблено підсистему синхронізації та керування, друковану плату та конструктивне виконання пристрою.

2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню Каліфікаційний проєкт відповідає виданому завданню

3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки та техніки і передових методів роботи: Робота виконана з використанням сучасних наукових підходів та інженерних методів. У першому розділі наведено аналіз сучасних систем моніторингу та обґрунтовано доцільність інтеграції активних і пасивних методів спостереження. У другому розділі розроблено структурну модель системи, виконано енергетичні розрахунки та визначено параметри антенної решітки. У третьому розділі побудовано математичну модель функціонування системи, виконано аналіз характеристик сигналу та оцінку чутливості й завадостійкості. У четвертому розділі розроблено підсистему синхронізації та керування, друковану плату й конструктивне виконання пристрою.

4. Позитивні сторони роботи: Робота присвячена актуальній темі створення систем радіотехнічного моніторингу, що має практичну значущість у сфері контролю повітряного простору та радіочастотного спектра. Відзначається

комплексний підхід до аналізу, проєктування та моделювання системи, застосування сучасних методів цифрової обробки сигналів, використання фазованої антенної решітки та обґрунтованість технічних рішень.

5. Негативні сторони роботи: Робота виконана на високому рівні, однак потребує уточнення окремих параметрів антенної підсистеми та більш детального обґрунтування довготривалої надійності системи. У пояснювальній записці трапляються незначні стилістичні та форматувальні недоліки.

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: графічне оформлення та пояснювальна записка відповідають вимогам до кваліфікаційних проєктів

7. Відгук про роботу в цілому: У цілому кваліфікаційний проєкт виконаний якісно, демонструє вміння студента працювати з сучасними технічними рішеннями, застосовувати інженерні методи аналізу та проєктування. Робота має практичну значущість, відповідає поставленій меті та заслуговує позитивної оцінки.

8. Інші зауваження: немає

9. Оцінка дипломної роботи: Кваліфікаційний проєкт відповідає встановленим вимогам і заслуговує оцінки «відмінно», а її автору Віталію АНДРІЙЧУКУ, присвоєння кваліфікації бакалавра зі спеціальності «Електронні комунікації та радіотехніка»

10. Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, місце роботи) ЄРЬОМЕНКО Олександр Іванович – к.т.н., доцент кафедри фізики, математики та інформатики

«05» червня 2026р.

  
підпис

Завідувачу кафедри телекомунікацій,  
медійних та інтелектуальних технологій  
д.т.н., професору ПІДЧЕНКУ Сергію  
здобувача вищої освіти  
Віталія АНДРІЙЧУКА  
ФІТ, гр. ЕКРс-23-1

### ЗАЯВА

З правилами чинного Положення про систему забезпечення академічної доброчесності у Хмельницькому національному університеті, згідно з яким виявлення академічного плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту і застосування заходів академічної відповідальності, ознайомлений (а). Про використання спеціалізованих програмних засобів (СПЗ) StrikePlagiarism та Anti-Plagiarism для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на наявність академічного плагіату оповіщений (а). Надаю університету право на передачу мого кваліфікаційного проєкту для обробки та збереження в базах даних СПЗ і використання роботи для виявлення академічного плагіату в інших роботах, які перевіряються СПЗ.

Також надаю свою згоду на обробку й збереження університетом мого кваліфікаційного проєкта «Система радіотехнічного моніторингу» в Інституційному репозитарії Хмельницького національного університету.

Робота надається для перевірки в електронному варіанті. Електронна версія мого кваліфікаційного проєкту збігається (ідентична) з друкованою.

28 травня 2026 р.

дата



підпис

## Anti-Plagiarism (<http://ap.km.ua>) v-16.718

Максимальне співпадіння з одним документом 1.0%

Словники перевірки: UA, US, RU. Помилки в документах: 12%

ID: 273200 Назва: Система радіотехнічного моніторингу Додано в БД: 2026-06-02 Автора: Андрійчук Віталій Васильович Керівники: Карпова Леся Вікторівна Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	72594	669	1929 (3%)	32 (5%)

### Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми

## Протокол аналізу звіту подібності науковим керівником

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

**Автор:** Віталій АНДРІЙЧУК\_ЕКРс-23-1

**Співавтор:**

**Назва:** Система радіотехнічного моніторингу

**Науковий керівник:** Леся КАРПОВА к.т.н., доц.

**Підрозділ:** Кафедра телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій

**Коефіцієнт подібності 1:** 5.12%

**Коефіцієнт подібності 2:** 1.12%

**Мікропробіли:** 0

**Заміна букв:** 52

**Інтервали:** 0

**Білі знаки:** 0

**Дата створення звіту:** 2026-06-03 07:53:23.0

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

Запозичення, виявлені в роботі є законними і не є плагіатом. Рівень подібності не перевищує допустимої межі. Таким чином робота незалежна і приймається.

Запозичення не є плагіатом, але перевищено граничне значення рівня подібностей. Таким чином робота повертається на доопрацювання.

Виявлено запозичення і плагіат або навмисні текстові спотворення (маніпуляції), як передбачувані спроби укряття плагіату, які роблять роботу невідповідною вимогам законодавства (Ст. 32. ЗУ Про вищу освіту, пункт 3.1, Ст. 42. ЗУ Про освіту) та вимог НАЗЯВО (Критерій 5), а також кодексу етики і процедур. Таким чином робота не приймається.

**Обгрунтування:** Виявлені запозичення не підлягають трактуванню як плагіат, адже вони належать до термінологічних конструкцій та загальнонаукових стандартних формулювань, що є загальноприйнятими у науково-технічній літературі

Дата 03.06.2026 р.

експерт Олег ПИВОВАР

## РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ

### КАФЕДРИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ, МЕДІЙНИХ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОГО ПРОЕКТУ ДО ЗАХИСТУ

Назва кваліфікаційного проекту: Система радіотехнічного моніторингу  
 Автор: Віталій АНДРІЙЧУК  
 Освітня програма Телекомунікації, медійні технології та інтелектуальні мережі  
 Рівень вищої освіти перший (бакалаврський) рівень  
 Спеціальність: 172 Електронні комунікації та радіотехніка  
 Керівник кваліфікаційного проекту: к.т.н., доцент Леся КАРПОВА

На основі аналізу кваліфікаційної роботи на дотримання вимог академічної доброчесності (у т.ч. відсутності ознак академічного плагіату) з урахуванням результатів перевірки роботи спеціалізованим програмним засобом(ами) комісія зробила такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Ознаки академічного плагіату	
1.1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є академічним плагіатом (далі – зазначаються підстави віднесення запозичень до правомірних, якщо потрібно). Робота приймається до захисту.	+
1.2	Виявлені запозичення не є академічним плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи (далі – зазначаються детальні та аргументовані підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована.	-
1.3	Виявлені запозичення не є академічним плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота може бути допущена до захисту після того як буде відкоригована та доопрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	-
1.4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття текстових запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	-
2	Інші види порушень академічної доброчесності	-

Підтвердження:

Виявленні запозичення не є плагіатом так як розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження (є власні терміни, визначення тощо), коефіцієнти подібності складають 5,1% та 1,1%, а також мають посилання на приведений список літературних джерел.

«03» червня 2026 р.

Завідувач кафедри ТМІТ

Гарант освітньої програми

Керівник кваліфікаційного проекту

Сергій ПІДЧЕНКО

Олег ПИВОВАР

Леся КАРПОВА