

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет інформаційних радіотехнологій та технічного захисту інформації  
(повна назва)

Кафедра медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем  
(повна назва)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**Пояснювальна записка**

рівень вищої освіти другий (магістерський)  
(позначення документа)

Радіолокаційна станція виявлення БПЛА

(тема)

Виконав:  
студент 2 курсу, групи МІМ-21-1  
Руслан ГОЛОЗУБОВ  
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка  
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Медіаінженерія  
(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Володимир КАРТАШОВ  
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

Володимир КАРТАШОВ  
(прізвище, ініціали)

2022 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інформаційних радіотехнологій та технічного захисту інформації

Кафедра Медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка

(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма "Медіаінженерія"

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_

(підпис)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ р.

## ЗАВДАННЯ

### НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Студентові Голозубову Руслану Олеговичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Радіолокаційна станція виявлення БПЛА

затверджена наказом по університету від " 24 " 10 2022 р. № 1384 Ст

2. Термін подання студентом роботи 09.12.2022 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) \_\_\_\_\_

1. Виконати огляд і аналіз відомих методів і засобів виявлення безпілотних летальних апаратів.

2. Обрати енергетичні і неенергетичні параметри зондуєчого радіолокаційного сигналу, в якості якого використовувати імпульсний сигнал.

3. Забезпечити дальність виявлення середнього БПЛА - 40 км.

4. Синтезувати схеми аналого-цифрового перетворення сигналів, захисту від завад активних і пасивних завад.

5. Розробити структурну схему радіолокаційної станції, яка реалізує запропоновані методи обробки сигналів

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

ВСТУП

1. Методи виявлення і спостереження БПЛА

2. Побудова структури РЛС виявлення БПЛА

3. Методи, алгоритми і пристрої обробки сигналу

ВИСНОВКИ

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

ДОДАТКИ


5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням обов'язкових креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій:

*Класифікація БПЛА; БПЛА класу 1, БПЛА класу 2; ТТХ і загальний вигляд станції МР-18; ЗРК Patriot – ТТХ і загальний вигляд; Структурна схема РЛС; Діапазони частот і довжини хвиль; Схема захисту від пасивних завад; Захист РЛС від активних завад; Схема захисту від активних завад;*

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термин виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналітичний огляд літературних джерел	25.10.22–30.10.22	
2.	Огляд існуючих методів	1.11.22–5.11.22	
3.	Розробка структурної схеми	6.11.22–9.11.22	
4.	Вибір оптимального зондуючого сигналу	11.11.22–13.11.22	
5.	Вибір огляду простору	15.11.22 – 20.11.22	
6.	Метод захисту від пасивних перешкод	22.11.22 – 27.11.22	
7.	Графічна частина роботи	01.11.21–06.12.21	
8.	Перевірка керівником	8.12.21–10.12.21	
9.	Перевірка на академічний плагіат	15.12.21	
10.	Перевірка завідувачем кафедри, рецензування	15.12.21–22.12.21	

Дата видачі завдання \_\_\_\_\_ 24.10.2022 р. \_\_\_\_\_

Студент \_\_\_\_\_  \_\_\_\_\_ **Руслан ГОЛОЗУБОВ**  
 (підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ **проф. Володимир КАРТАШОВ** \_\_\_\_\_  
 (підпис) (посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи має: 81 с., 23 рис., 4 табл., 1 додатків, 21 джерел.

### БЕЗПЛОТНИЙ ЛІТАЛЬНИЙ АПАРАТ, РАДІОЛОКАЦІЯ, ВИЯВЛЕННЯ, ОЦІНКА, ЗАВАДА, ПРИЙМАЧ, ПЕРЕДАВАЧ, АНТЕНА

*Об'єкт дослідження* – безпілотні літальні апарати.

*Предмет дослідження* – радіолокаційна станція виявлення і спостереження безпілотних літальних апаратів.

*Мета кваліфікаційної роботи* – розробка структурної схеми і елементів структурної схеми системи виявлення СБЛА.

*Методи дослідження* – теоретичний аналіз, числові розрахунки, математичне моделювання, статистична обробка даних.

У кваліфікаційній роботі проведено аналіз літератури за темою роботи, визначені основні вимоги до радіолокаційної системи виявлення і спостереження безпілотних літальних апаратів, що розробляється. Синтезовано структурну схему радіолокаційної системи, обґрунтовано вибір зондуючого радіолокаційного сигналу, розроблені основні алгоритми функціонування системи та визначені її основні енергетичні і неенергетичні параметри.

Отримані в роботі результати можуть бути використані на практиці при проектуванні систем радіолокаційного зондування повітряного простору, виявлення і спостереження БПЛА.

## ABSTRACT

The explanatory note of the qualification work has: 81 pages, 23 figures, 4 tables, 1 appendix, 21 sources.

UNMANNED AIRCRAFT, RADIO LOCATION, DETECTION,  
INSTRUMENT, RECEIVER, PROTECTION, CONTROL

*The object of research* – medium unmanned aerial vehicles.

*The subject of research* – a radar station for the detection of medium unmanned aerial vehicles.

*The purpose of the qualification work* – to develop a structural diagram of the anti-aircraft missile detection system

*Research methods* – theoretical analysis, numerical calculations, mathematical modeling, statistical data processing.

In this work, an analysis of the literature on the topic of the work was carried out, the main requirements for the medium unmanned aerial vehicle detection system under development were determined. The structural diagram of the radar system was synthesized, the choice of the sounding radar signal was justified, the main algorithms of the system's functioning were developed, and its main energy parameters were determined.

The results obtained in the work can be used in practice when designing systems for radar sounding of airspace and detection of UAVs.

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АПЧ – автоматичне підстроювання частоти;

АТО – антитерористична операція;

АЦП – аналогове цифровий перетворювач;

БПЛА - безпілотний літальний апарат

ДСТУ – Державний стандарт України;

ЕПВ – ефективна поверхня відображення;

ЕПР – ефективна площа розсіювання;

ЗС – зондуєчий сигнал;

ПЛІС – програмована логічна інтегральна схема;

РЕБ – радіоелектронна боротьба;

РЛС – радіолокаційна станція;

РТВ – радіотехнічні війська;

СБЛА – середні безпілотні літальні апарати;

ТТХ – тактико-технічні характеристики;

ФАР – фазова антенна решітка.

## ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень .....	6
Вступ.....	9
<b>1 ОГЛЯД БПЛА ТА МЕТОДІВ ЇХ ВИЯВЛЕННЯ .....</b>	<b>11</b>
1.1 Історія створення БПЛА .....	11
1.2 Класифікація БПЛА .....	13
1.2.1. Класифікація UVS International .....	14
1.2.2. Стандарти НАТО в безпілотній авіації .....	17
1.3 Аналіз існуючих середніх БПЛА.....	20
1.4 Методи виявлення БПЛА .....	25
1.5. Огляд існуючих радіолокаційних станцій .....	27
<b>2 РОЗРОБКА СТРУКТУРИ РЛС ВИЯВЛЕННЯ БПЛА .....</b>	<b>35</b>
2.1 Розробка структурної схеми системи виявлення СБЛА .....	35
2.2.1. А- та В-діапазони (ВЧ та ОВЧ).....	38
2.2.2. С-діапазон (УВЧ) .....	39
2.2.3. D-діапазон (L-діапазон).....	40
2.2.4. E/F-діапазон (S-діапазон) .....	41
2.2.4 G-діапазон (C-діапазон).....	41
2.2.5. I/J-діапазон (X- та Ku-діапазони) .....	42
2.2.6. K-діапазон (K- та Ka-діапазони).....	43
2.2.7. V-діапазон .....	43
2.2.8. W-діапазон .....	44
2.3. Обчислення дальності дії РЛС з урахуванням втрат при поширенні радіохвиль .....	47
2.4 Способи огляду простору.....	51

	8
2.5. Вибір поляризації під час проектування РЛС .....	60
3 МЕТОДИ І ТЕХНІЧНІ ПРИСТРОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ І ЗАВАД.....	64
3.1. Антенна система.....	64
3.2. Цифрові антени .....	66
3.3 Захист РЛС від пасивних завад.....	68
3.4 Захист РЛС від активних завад	
ВИСНОВКИ.....	77
Перелік посилань.....	79
Додатки.....	82
Додаток А.....	95
ДОДАТОК Б.....	86

## ВСТУП

Технології безпілотних літальних апаратів (БПЛА) розвиваються надзвичайно швидко в останні роки. Сфера впровадження БПЛА особливо широка, від «споживих дронів» до складних наукових або військових застосувань. На жаль, кожна технологія, і БПЛА не є виключенням, має не тільки переваги, але й загрози. БПЛА становлять величезну небезпеку для безпеки аеропортів та інших місць критичної інфраструктури. Також дрони можуть бути використані для контрабанди незаконних товарів, або можуть бути використані навіть як зброя терористами. В військових цілях, як показує досвід української війни, БПЛА використовуються обома сторонами, як для розвідки, так і для нанесення урону іншій стороні.

Технології БПЛА розвиваються досить швидко, значно швидше ніж розвивається законодавство.

Наприклад, електронна система управління БПЛА U-SPACE є тільки в стадії концепту на даний момент. Тому подолати проблеми, пов'язані з БПЛА, покладаючись лише на контроль і заходи управління неможливо. Потрібні необхідні ефективні засоби виявлення та знешкодження. Існує багато засобів виявлення та знешкодження БПЛА, основні чотири технології виявлення безпілотних літальних апаратів такі:

- оптичні технології різних діапазонів;
- пасивні акустичні;
- пасивні радіолокаційні;
- активні радіолокаційні.

Однак всі ці технології мають деякі недоліки, пов'язані з малими розмірами БПЛА, що є суттєвою проблемою при виявленні БПЛА. Також із проблем відмічають слабке випромінювання сигналів і звуку, а також слабке відбиття радіохвиль за рахунок композитних матеріалів, що в них використовуються.

Радар для виявлення БПЛА є кращим із засобів, оскільки він стійкий до таких умов навколишнього середовища, як темрява, туман, дощ і шум, порівняно з альтернативними рішеннями. Багато пропонується рішень, де різні типи радарів працюють на різних частотах, дальністях, та можуть бути застосовані для виявлення дронів.

Зазвичай засоби знешкодження БПЛА розташовуються на землі і мають дуже обмежений асортимент. Є спроби застосувати інші БПЛА, або авіацію для знешкодження, але там завжди є проблемою виявлення (переслідуваного) БПЛА. В знешкодженні БПЛА за допомогою БПЛА ще спостерігаються проблеми пов'язані з вказівками та керуванням у швидкозмінному режимі середовища в повітрі. Тому на даний момент немає повністю ефективних рішень виявлення та знешкодження БПЛА.

# 1 ОГЛЯД БПЛА ТА МЕТОДІВ ЇХ ВИЯВЛЕННЯ

## 1.1 Історія створення БПЛА

Спочатку визначимося з поняттям "БПЛА" – це безпілотний літальний апарат, запрограмований на виконання будь-яких дій. Частіше під цим поняттям криється літальний апарат, який або пілотується людиною (оператором) через пульт дистанційного управління, або програмується заздалегідь.

З початку 21 століття безпілотні літальні апарати та наземні дрони почали активно використовуватися в побуті людини.

Але історія БПЛА розпочалася військовим шляхом. Формально історія БПЛА починається в 1782 році, коли брати Етьєн і Жозеф Монгольф'є підняли в повітря кулю, наповнену димом. Діаметр несучої оболонки був 3,5 метра, а вага всього апарату – 154 кілограми. Куля протрималася в повітрі близько 10 хвилин, при цьому вона піднялася на висоту майже 300 метрів і пролетіла понад кілометр.

Початок був покладений, і винахідники замислилися над розвитком проекту. Під час наступного запуску до кулі прикріпили кошик, в який помістили тварин. Політ тривав 8 хвилин на дистанції близько 4-х кілометрів.

Повітряні кулі, які згодом названі дирижаблями, відіграли велику роль в історії авіації, але саме БПЛА стали справжньою знахідкою у військовій справі.

Початком же використання БПЛА в військовій історії можна вважати Італійську революцію 1848-1849 років, коли австрійські війська провели бомбардування бунтівної Венеціанської республіки з аеростатів.

Місцеві умови рельєфу не давали можливості для ефективної роботи артилерії, тому над повсталим містом запустили два аеростата які переносили у собі бомби.

Повітряні кулі були оснащені механізмами автоматичного скидання боєприпасів. І хоч бомбардування особливого успіху не принесло, венеціанці були в паніці, а день 12 липня 1849 увійшов в історію бойових дронів.

У 1898 році на озері в Медісон-сквер гардені (Нью-Йорк, США), відомий фізик, інженер та винахідник Нікола Тесла, демонструє перший човен з радіокеруванням.

Хоч досвід з човном був вдалим, проте другим бойовим «безпілотником» стало не судно, а військовий літак. Американець Чарльз Кеттерінг створює «літаючу бомбу».

Літак, начинений вибухівкою мав керуватися не пілотом, а годинниковим механізмом. У запрограмований момент він скидав крила і падав на голову ворога.

Ідея знайшла підтримку в уряді США. Проект отримав фінансування, але кілька невдалих «бомбардувань» призвели до того, що виробництво «дронобомби» було припинено ще до початку Першої світової війни.

1933 рік став проривом для радіокерованих «безпілотників». Британські інженери сконструювали перший БПЛА, який керувався дистанційно по радіо та використовувався багаторазово.

Моделі DH.82B Queen Bee успішно служили армії з 1934 по 1943 роки як літаки-мішені. З їхньою допомогою навчали майбутніх асів та зенітників.

З початком Другої Світової БПЛА для армії стали випускатися масово. СРСР, США та Німеччина стали відчувати переваги БПЛА. І тому під час Другої світової війни кожна з цих країн виробляла та застосовувала їх:

США у 1939 року масово випускають (понад 14 тис. примірників) радіоплан типу Target – модель QQ-2;

Німеччина проектує та використовує радіокеровані бомби Henschel Hs 293 та Fritz X, а також ракети Фау-1 та Фау-2;

СРСР у 1941 році використовує важкий безпілотний бомбардувальник ТБ-3 для знищення мостових конструкцій.

Після Другої Світової війни безперечним лідером у розробці та застосуванні БПЛА вважаються США. Так, БПЛА вже багато років перебувають на озброєнні американської армії нарівні з пілотованими апаратами.

Історія розвитку цивільних дронів бере початок, мабуть, з початку 21 століття, коли набули широкого застосування FPV-системи та відеозйомки з квадрокоптерів. Популярність цього виду БПЛА змусила уряди багатьох країн замислитись про законодавче регулювання їх застосування.

Вже зараз практикується доставка дронами вантажів, збирання різної інформації на великих територіях, аеро- та фотозйомка. Можливості БПЛА все ще вивчаються, а апарати удосконалюються.

Серед явних переваг БПЛА перед пілотованими апаратами можна виділити:

Дешевизна виробництва та техобслуговування. Дрони не вимагають витрат на забезпечення захисту персоналу, та й у плані навчання пілотуванню вони набагато простіші.

Мінімальна витрата палива та можливість використання альтернативної енергії. Цей фактор досягається завдяки малій вазі апаратів.

Висока варіативність злітно-посадкових майданчиків. Більшість дронів обходяться малими площами для зльоту/посадки, а деякі так і взагалі можуть сідати на ганок перед будинком або на підвіконня.

В даний час дрони на піку популярності ще й завдяки здешевленню їх виробництва та використанню прогресивних матеріалів та технологій у бюджетних радіокерованих моделях.

## 1.2 Класифікація БПЛА

Безпілотні літальні апарати розрізняють не тільки за способом їх застосування в певних сферах нашого життя або різницею конструкції, але і

за більш стійкими параметрами та характеристиками, наприклад, злітній масі, дальності, висоті та тривалості польоту, розмірах самих апаратів тощо.

### 1.2.1. Класифікація UVS International

Міжнародною асоціацією з безпілотних літальних систем UVSI (Association for Unmanned Vehicle Systems International, до 2004 року вона називалася Європейською асоціацією з безпілотних систем – EURO UVS) була запропонована універсальна класифікація БПЛА (Таблиця 1), яка об'єднує багато з названих критеріїв.

Таблиця 1. - Універсальна класифікація БПЛА Таблиця 1. -  
Універсальна класифікація БПЛА

Група	Категорія	Злітна маса, кг	Дальніс ть польот у, км	Висота польоту, м	Трива лість польо ту, ч
Малі БПЛА	Nano БПЛА	< 0,025	< 1	100	< 0,5
	Micro БПЛА	< 5	< 10	250	1
	Mini БПЛА	20 - 150	< 30	150 - 300	< 2

	Легкі БПЛА для контролю переднього краю оборони	25- 150	10 - 30	3000	2 - 4
	Легкі БПЛА з малою дальністю польоту	50 – 250	30 -70	3000	3 - 6
	Середні БПЛА	150 - 500	70 - 200	5000	6 - 10
Тактичні	Середні БПЛА с великою тривалістю польоту	500- 1500	>500	8000	10 - 18
	Маловисотні БПЛА для проникнення в глибину оборони супротивника	250 2500	>250	50 - 9000	0,5 - 1
	Маловисотні БПЛА з великою тривалістю польоту	15 - 25	>500	3000	>24

	Середньовисотні БПЛА з великою тривалістю польоту	1000-500	> 500	5000-8000	24 - 48
	Висотні БПЛА з великою тривалістю польоту	2500-5000	> 2000	20000	24 - 48
Стратегічні	Бойові (ударні) БПЛА	>1000	1500	12000	2
	БПЛА, оснащені бойовою частиною (літальної дії)	•	300	4000	3 - 4
	БПЛА - хибні цілі	150 – 500	0 - 500	50 - 5000	< 4
Спеціального призначення	Стратосферні БПЛА	> 2500	> 2000	> 20000	> 48
	Екзостратосферні БПЛА	•	•	> 30500	•

Наведена вище класифікація на сьогоднішній день поширюється як на вже існуючі, так і на майбутні моделі БПЛА, що розробляються. Здебільшого ця класифікація склалася до 2000 р., коли безпілотні апарати лише набирали популярності, але з того часу багато разів переглядалася. Її і зараз не можна вважати усталеною. Крім того, багато особливих типів апаратів з нестандартними комбінаціями параметрів важко віднести до якогось певного класу.

### **1.2.2. Стандарти НАТО в безпілотній авіації**

В одному з стандартів НАТО – STANAG 4670 (АТР 3.3.7.) визначається класифікація безпілотних авіаційних комплексів (БПАК) НАТО, яка ділить їх на три класи:

Клас I - включає в себе БПЛА трьох категорій (Рис 1.1) максимальною вагою до 150 кг.

- Малі – БПЛА які важать понад 15 кг, їх рівень застосування – батальйони, полки. Висота застосування до 5000 футів (1500 метрів), радіус дії 50 км. Приклад: Scan Eagle - максимальна вага 18 кг, маса корисного навантаження 6 кг, швидкість 140 км/год, максимальна дальність польоту – 100 км.
- Міні – це БПЛА які важать менше 15 кг, їх рівень застосування - роти, взводи, відділення. Висота застосування до 3000 футів (914 метрів), радіус дії до 25 км. Приклад: Skylark. Максимальна вага - 7,5 кг, маса корисного навантаження 1,1 кг, радіус дії від 20 до 40 км.
- Мікро –це надлегкі БПЛА, які застосовують у взводах, відділеннях, індивідуально, висота застосування до 200 футів (61 метр), радіус дії до 5 км. Приклад: Black Hornet Nano. Вага 18 грам, швидкість до 5 м/с, радіус дії до 1 км.



Рисунок 1.1 – БПЛА класу I

Клас II – це тактичні БПЛА з вагою від 150 до 600 кг, застосовують у підрозділах бригадного рівня, висота польоту до 18 000 футів (5500 метрів), радіус дії до 200 км. Приклад: Hermes 450 (Рисунок 1.2.). Максимальна вага 450 кг, маса корисного навантаження 150 кг, радіус дії 200 км.



Рисунок 1.2 – БПЛА класу II: Hermes 450

Клас III – БПЛА вагою понад 600 кг. Своєю чергою діляться на три підкласи за застосуванням на стратегічному та оперативному театрах бойових дій.

- MALE – це клас тривало-баражуючих БПЛА середньої висоти до 45 000 футів (13716 метрів), довгої тривалості польоту, необмеженого радіусу дії. Приклад: Heron. Максимальна вага 1150 кг, максимальна швидкість 240 км/год, практична стеля 9150 м, радіус дії 1000 км.
- HALE – клас тривало-баражуючих БПЛА великої висоти до 65 000 футів (19812 метрів), довгої тривалості польоту, необмеженого радіусу дії. Приклад: Global Hawk. Максимальна вага 12 000 кг, корисне навантаження 900 кг, максимальна швидкість 645 км/год, дальність польоту 25 000 км, час патрулювання 36 годин.



Рисунок 1.3 – БПЛА Класу III MQ-9 Reaper

– Ударні БПЛА великої висоти застосування (20 000 метрів) із необмеженим радіусом дії. Приклад: MQ-9 Reaper (Рисунок 1.3). Максимальна вага 4760 кг, корисне навантаження 1700 кг, максимальна

швидкість 400 км/год, дальність польоту 6000 км, час патрулювання 24 години.

Таблиця 1.2. - Класифікація безпілотних авіаційних комплексів за STANAG 4670

Клас	Категорія	Рівень воєнних дій	Висота застосування	Радіус дії	Рівень застосування	Приклад платформи
Клас III (> 600 кг)	ударні	стратегічний	до 20 000 м	необмежений	ТВД	Reaper
	HALE	стратегічний	до 20 000 м	необмежений	ТВД	Global Hawk
	MALE	оперативний	до 14 000 м	необмежений	Оперативна група	Heron Bayraktar TB2
Клас II (150—600 кг)	тактичні	тактичний	до 5500 м	до 200 км	Бригада	Hermes 450
Клас I (<150 кг)	малі (>15 кг)	тактичне формування	до 1500 м	до 50 км	Батальйон	Scan Eagle PD-2
	міні (<15 кг)	тактичний підрозділ	до 900 м	до 25 км	рота, взвод, відділення	Skylark
	мікро (<66 Дж)	тактичний підрозділ	до 60 м	до 5 км	взвод, відділення	Black Widow

### 1.3 Аналіз існуючих середніх БПЛА

При виявленні СБЛА розглядаються різні види апаратів. В середні БПЛА можна віднести клас II та «Малі БПЛА» класу I.

Основні характеристики БПЛА - це маса БПЛА, швидкісні характеристики, тривалість польоту, габаритні характеристики та матеріал виробу.

Нижче представлені деякі СБЛА.

AAI Shadow 200 – військовий американський безпілотний літальний апарат, розроблений корпорацією AAI Corporation.

БПЛА моделі AAI Shadow 200 призначений для розвідки, спостереження, та патрулювання в військовій сфері. Для цього він використовує електрооптичну камеру високої роздільної здатності та

інфрачервону камеру, завдяки цьому він може використовуватися цілодобово.

Американський військовий безпілотний літальний апарат має конструкцію середніх розмірів, зокрема цей пристрій має довжину свого фюзеляжу рівну 3 метри 40 сантиметрів, при розмаху крил, що становить 4 метри 20 сантиметрів. Незважаючи на досить велику максимальну злітну масу цього пристрою, запуск безпілотного літального апарату може здійснюватися шляхом розгону по злітно-посадковій смугі, так і шляхом використання пневматичної катапульти. Хороша аеродинамічна форма дрону забезпечує йому високі показники маневреності та аеродинаміки.

Силова установка БПЛА AAI Shadow 200 представлена одним бензиновим ротативним двигуном, який дозволяє пристрою розвивати швидкість до 175 км/год. (максимальний показник), при цьому ефективна дальність польоту пристрою становить 125 кілометрів.

AAI Shadow 200 при низькій ціні має високі льотно-технічні та експлуатаційні характеристики.



Рисунок 1.4 - ААІ Shadow 200

Технічні характеристики ААІ Shadow 200:

- Довжина: 3,4 м;
- Розмах крил: 4,2 м;
- Висота: 1,05 м;
- Максимальна злітна вага: 212 кг.;
- Крейсерська швидкість польоту: 140 км/год;
- Максимальна швидкість польоту: 175 км/год;
- Максимальна дальність польоту: 125 км;
- Максимальна висота польоту: 3660 м;
- Тип авіадвигуна: ротативний.

Switchblade 600- це БПЛА сімейства Switchblade є легкими у транспортуванні, і швидкими в підготовці(10 хвилин), а також простим для швидкого навчання користування. Апарати запускаються так само, як

мінометний снаряд, з труби, далі за допомогою GPS та камер, як денних так і інфрачервоних є можливість стежити за тим що відбувається в реальному часі в польових умовах та націлюватися їх як на нерухомі так і на рухомі об'єкти допоки він не досягне цілі і не вибухне.

Switchblade 600 складно виявити та перехопити, бо окрім невеликих розмірів БПЛА має ще електродвигун, що забезпечує тихий політ.



Рисунок 1.5 - Switchblade 600

Switchblade 600 несе протитанкову бойову частину типу Javelin.

Технічні характеристики:

- Тривалість польоту: 40 хв;
- Маса: 54,4 кг.;
- Крейсерська швидкість польоту: 110 км/год;
- Максимальна швидкість польоту: 185 км/год;
- Максимальна дальність польоту: 40 км;
- Допустима висота: 150-4500 м.

Bayraktar (Байрактар) – це турецький ударний БПЛА. Значною перевагою цього БПЛА є його тривалість польоту, яка досягає 24 години.

Bayraktar побив світовий рекорд серед безпілотних літальних апаратів за тривалістю польоту. Він був у небі на висоті 8 км 24 години 34 хвилини.

Bayraktar використовується для патрулювання та спостереження з повітря за противником, та завдання ударів, адже цей апарат може переносити керовані протитанкові ракети та авіаційні бомби.

Перевагою цього БПЛА є те, що оператор може знаходитися не тільки в десятках, а й в сотнях і тисячах км від самоапарата, тому його життя знаходиться в безпеці.



Рисунок 1.6 – Bayraktar

#### Технічні характеристики:

- довжина – 6,5 м;
- радіус дії – 150 км, оновлена версія – до 300 км;
- максимальна швидкість – 222 км/год;
- крейсерська швидкість (найвигідніша швидкість руху літака, що досягається при найменшій кілометровій витраті палива) - 130 км/год;
- максимальна злітна маса – 650 кг;
- максимальна висота, на яку може підніматися апарат – 8200 м.

#### 1.4. Методи виявлення БПЛА

Існує багато методів виявлення БПЛА. Розглянемо їх класифікацію:

- аудіо виявлення;
- візуальне виявлення;
- за тепловим послідом;
- радіолокаційні;
- радіо (RF);

Розглянемо більш детально кожний із цих методів.

Аудіо виявлення відбувається за допомогою звуків БПЛА, який під час роботи він видає. В даний час проводиться багато досліджень в цій області, тому ці звуки відслідковуються і є можливість перехресної перевірки по існуючій базі даних (БД) відомих звукових сигнатур БПЛА.

Проте мінус такого виявлення заключається в тому, що він працює лише на близьких відстанях(декілька сотень метрів) і не можливий в шумних зонах, таких як місто. Також великою завадою знаходження дронів цим методом є зміни характеристик БПЛА, купуючи різні гвинти або вносячи інші зміни.

Візуальне виявлення – цей спосіб використовує в собі камеру, яка фіксує і визначає рухомі повітряні об'єкти, а потім намагається розрізнити за такими характеристиками об'єкта, як: розмір, поведінка руху в повітрі, розмір та ін. чи являється об'єкт птахом, чи БПЛА. Пластиковий кожух, що захищає внутрішню роботу дрона, не є теплопровідником, і двигун дрона виробляє набагато менше тепла, ніж можна собі уявити. Однак літєвий акумулятор, який живить більшість споживачів БАС, виробляє достатню кількість тепла, щоб його помітив оператор-людина за допомогою інфрачервоної камери. Інфрачервоні камери корисні з моменту різниці температур і можуть «бачити» в повній темряві без додаткового освітлення, що робить їх ідеальними для використання вночі або під час місій, де

перебування непомітного є обов'язковим. Однак навіть комп'ютерні алгоритми не завжди можуть визначити чи птах перед ними, чи БПЛА.

Так, було визнано, що деякі ключові показники польоту БПЛА (наприклад, ширяючий) тако ж виконують багато видів птахів.

-За тепловим послідом визначають теплову сигнатуру БПЛА, але проблема в тому що більшість БПЛА виготовляються з пластику, а значить випромінюють незначну теплову сигнатуру.

В методі Радіо (RF) - аналізують радіохвильові сигнали в діапазонах частот, на яких відбувається керування дроном (він включає в себе моніторинг частот 2,4 і 5,8 ГГц, а також виявлення SSID і MAC адреси Wi-Fi, які транслюються низькобюджетними комерційними БПЛА. Але всім цим пристроям складно визначити напрямок (азимут, кут місця), з якого летить цей самий дрон.

Радар може забезпечити ефективно виявлення присутності дронів на великій відстані. Його можна успішно поєднати з іншими технологіями, такими як ВЧ або оптика, щоб забезпечити більш ретельне покриття за бажанням. Радіолокаційна система має передавач, який випромінює радіохвилі, звані радіолокаційними сигналами, які або відбиваються назад, або розсіюються об'єктами, з якими вони стикаються. Спотворені хвилі повертаються до радіолокаційного приймача, де алгоритми перетворюють їх у візуальний екранний формат, що дає уявлення про форму, розмір та щільність об'єкта. Більшість аеропортів використовують комбінацію радарів в діапазоні далекої дії, і діапазону короткого радіусу дії в своїх операціях управління повітряним рухом. Але оскільки дрони набагато менші за будь-який літак або вертоліт, вони потребують іншого підходу. РЛС часто використовуються для низького повітряного спостереження, включаючи виявлення БПЛА, причому кращим є довжинах хвиль (8,0 - 12,0 ГГц), вони забезпечують вищий рівень видимості та більш пристосовані для виявлення малих цілей.

Окрім стандартних методів виявлення в Україні створили додаток “єППО“, задля того що б і цивільне населення допомагало в виявленні ворожих цілей.

В єППО цивільна людина, після того як побачила в небі ворожу ракету або безпілотник “шахід”, то вона може обрати в додатку тип повітряної цілі, направити смартфон у напрямку руху цілі, та передати за допомогою червоної кнопки інформацію, що передається відміткою на карті, яку потім побачать фахівці ППО, і зможуть з більшою вірогідністю захистити населення України від терористичних дій країни окупанта.

### 1.5. Огляд існуючих радіолокаційних станцій

РЛС – це система для виявлення повітряних, морських і наземних об’єктів, а також визначення їх дальності до станцій та геометричних параметрів.

РЛС використовують в військових цілях, для знаходження, та знешкодження ворожих об’єктів. Їх існує велика кількість, і вони поділяються за класифікаціями, такими як:

#### 1. За призначенням:

- РЛС виявлення;
- РЛС управління і стеження;
- панорамні РЛС;
- РЛС бічного огляду;
- метеорологічні РЛС;
- РЛС цілевказівні;
- РЛС контрбатареїної боротьби;
- РЛС огляду обстановки;
- Поліцейський радар;
- РЛС виміру швидкості снарядів для артилерійських систем ;

#### 2. За характером носія:

- берегові РЛС;
- морські РЛС;
- бортові РЛС;
- мобільні РЛС;

3. За типом дії:

- первинні або пасивні;
- вторинні або активні;
- суміщені;

4. За методом дії:

- надобрійний радіолокатор;
- заобрійний радіолокатор;

5. За діапазоном хвиль:

- метрові;
- дециметрові;
- сантиметрові;
- міліметрові.

Нижче приведені деякі з військових РЛС:

Високомобільний радар кругового огляду МР-18.

Радіолокаційна станція метрового діапазону МР-18 виготовляється в Україні на підприємстві «Науково-виробничий комплекс «Іскра» та призначена для:

- автоматичного виявлення, супроводу та виміру азимута, дальності і курсової швидкості повітряних об'єктів, в тому числі виконаних за технологією «Стелс»;
- визначення напрямків(пеленгів) на постановників активних завад;
- видачі інформації споживачам.



Рисунок 1.7. – РЛС МР-18

Таблиця 1.3 - Тактико-технічні характеристики станції

Діапазон робочих частот	УКХ
Межа роботи станції:	
за дальністю, км	400
за азимутом, град.	360
за висотою, км	40
Період огляду, с	10,20
Дальність виявлення цілей ЕПР=3-5 м <sup>2</sup> (P=0,8 F=10-6):	
при висоті польоту 100 м, км	27
при висоті польоту 10 км, км	260
при висоті польоту 10...30 км, км	300...360

Тип антени	активна фазована антенна решітка
Придушення пасивних завад, дБ	50
Придушення активних завад, дБ	>20
Кількість супроводжувальних трас	300
Кількість транспортних одиниць	1
при виносі пункту керування	2
Час розгортання/згортання, хвилин	10/5

П-18 «Малахит» — наземна рухома завадозахищена радіолокаційна станція з висвітленням повітряної та надводної обстановки з цифровою обробкою та автоматичною передачею інформації. Ця станція призначена для виявлення радіолокаційних цілей, навіть при дії завад, як пасивних, так і активних, як штучних, так і природніх, а також для визначення координат: азимуту, дальності, радіальної швидкості; зав'язки і супроводження траєкторій цілей та видачі їх координат і трас споживачам.

П-18 «Малахит» є модернізованою версією РЛС П-18МУ «Терек». В «Малахита» з'явилася цифрова обробка сигналів, вимірювання швидкості руху повітряних цілей, їх автоматичний пошук і супровід, а також компенсація активних перешкод.

«Малахит» здатний також в автоматичному режимі передавати дані про виявлені повітряні цілі.



Рисунок 1.8 - П-18 «Малахіт»

Радіолокаційна станція розміщується на шасі КраЗ і одному вантажному причепі. Радар може виявляти цілі, що рухаються зі швидкістю до 1000 м/с і супроводжувати до 256 з них.

Технічні характеристики РЛС модифікації «Малахіт» дозволяють:

- виявляти за один огляд зони дії 256 цілей;
- дальність виявлення винищувача типу МіГ (на висотах понад 10 км) — 400 км;
- максимальна висота виявлення — 20 км;
- дальність виявлення малорозмірних цілей на висотах до 300 м — 30-70 км;
- потужність РЛС — 6,5 кВт;
- Час напрацювання на відмову — 2000 годин.

Patriot - американський РЛС супроводу з фазованими антеною решіткою для перехоплення цілі по лінії візування.

Комплекс використовує універсальні РЛС, що виконують функції як виявлення та відстеження цілей, так і цілевказівки та управління ракетами. Може отримувати цілевказівку від РЛС повітряного базування Е-3 «Сентрі» безпосередньо без участі посередницьких командних пунктів. З мінусів Patriota можна назвати те, що радар працює лише в секторі 90 градусів. Зазвичай усі комплекси ППО мають круговий огляд.

Наведення ракети МІМ-104 на ціль здійснюється радіокомандним управлінням із землі за допомогою методу «стеження через ракету». Ракета, що летить, приймає відбитий від мети сигнал наземної РЛС і ретранслює його по односторонньому каналу зв'язку на командний пост. Так як ракета в польоті завжди знаходиться ближче до мети, ніж радар, що супроводжує ціль, то відбитий від мети сигнал приймається ракетою більш ефективно, що забезпечує більшу точність і більш ефективну протидію перешкодам. Таким чином, випромінювач РЛС наведення працює на дві приймальні станції: приймач самого радара та приймач ракети. Керуючий комп'ютер зіставляє дані, отримані від наземної РЛС і від ракети і виробляє поправки до траєкторії, направляючи ракету в ціль.



Рисунок 1.9 – ЗРК Patriot

Модель МІМ-104В має режим автономного пасивного наведення ракети на джерело сигналу. Такий режим може використовуватися для ефективного ураження літаків, постановників радіоперешкод та наземних радарів, що діють у радіусі дії системи.

Склад ЗРК Patriot:

- пункт керування (КП батареї) AN/MSQ-104
- багатофункціональна станція радіолокації (РЛС) AN/MPQ-65
- до восьми пускових установок (ПУ) M901
- зенітні керовані ракети МІМ104 (МІМ104С для модифікації РАС-2)
- джерела енергопостачання AN/MJQ-20
- засоби зв'язку комплексу
  - a. радіорелейні станції AN/MCR-137
  - b. антено-щоглові пристрої (максимальна висота 30,5 м)
- допоміжне експлуатаційне обладнання
  - a. транспортно-зарядні машини (тягач М819 з підйомним краном та напівпричіп М269А1 з чотирма ТПК)
  - b. рухомий пункт технічного обслуговування на шасі М814 з генератором, розміщеним на причепі
  - c. автомобіль для транспортування малогабаритних запасних частин
  - d. тягач М819 з підйомним краном та напівпричіп для великих запасних частин
- засоби радіотехнічного та тактичного маскуваня

Patriot використовує багатофункціональна РЛС AN/MPQ-65, основна приймально-передавальна ФАР якої, діаметром 2,44 метра, використовується при виявленні, супроводі та підсвічуванні цілей, стеженні за ракетами та передачі команд. Вона представляє собою грати з просторовим прохідним методом живлення, що складається з 5161 випромінюючого елемента з феритовими фазообертачами. Вся зона, що переглядається, ділиться на 32

сектори (по 90 квадратних градусів), при перегляді кожної з них РЛС сканує рядково променем ФАР, час сканування становить 3,2 с.

Характеристики AN/MPQ-65:

- Діапазон довжин хвиль 5,5 - 6,7 см (4-6 ГГц);
- Сектор огляду в режимі пошуку:
  - о по азимуту від +45 до -45 °;
  - о по кутку місця 1 - 73 °;
- Сектор супроводу в режимі наведення через ракету:
  - о по азимуту від +55 до -55 °;
  - о по кутку місця 1 - 83 °;
- Дальність виявлення при ЕПР мети:
  - о 0,1 м<sup>2</sup> (головна частина ракети) 70 км;
  - о 0,5 м<sup>2</sup> (ракета) - 100 км;
  - о 1,5 м<sup>2</sup> (винищувач) - 130 км;
  - о 10 м<sup>2</sup> (бомбардувальник) - 180 км;
- Одночасний супровід до 125 цілей;
- Максимальна швидкість цілі 2200 м/с;
- Одночасне наведення до 6 ракет;
- Час виявлення 8-10 с;
- Час розгортання 25 хв;

РЛС встановлюється у напрямі очікуваної загрози та зберігає це положення у процесі стрілянини. Напрямок антени по азимуту може бути змінено у перервах між відображеннями нальотів дистанційно: за командою з пункту керування шляхом повороту всієї РЛС щодо напівпричепа.

## 2 РОЗРОБКА СТРУКТУРИ РЛС ВИЯВЛЕННЯ БПЛА

### 2.1 Розробка структурної схеми системи виявлення БПЛА

Задачею пірозділа є дослідження існуючих методів виявлення БПЛА та їх використання у системі радіолокаційного виявлення і спостереження для комплексного застосування і підвищення ефективності радіолокаційних систем. Основні технічні характеристики системи, що проектується, такі:

- дальність виявлення- більше 40 км;
- ЕПР радіолокаційного об'єкту- 0,1 кв. м;
- діапазон електромагнітних хвиль- сантиметровий;
- принцип дії станції виявлення і спостереження- імпульсна РЛС.

Основні функції розроблюваної радіолокаційної системи такі:

- моніторинг повітряного простору на наявність безпілотних літальних апаратів;
- можливість роботи з виявлення об'єктів у ручному та автоматичному режимі;
- відображення вхідної радіолокаційної інформації на зовнішньому екрані або екрані смартфона чи комп'ютеру;
- індикація технічного стану станції.

Узагальнена структурна схема проектованої РЛС наведена на рисунку 2.1.

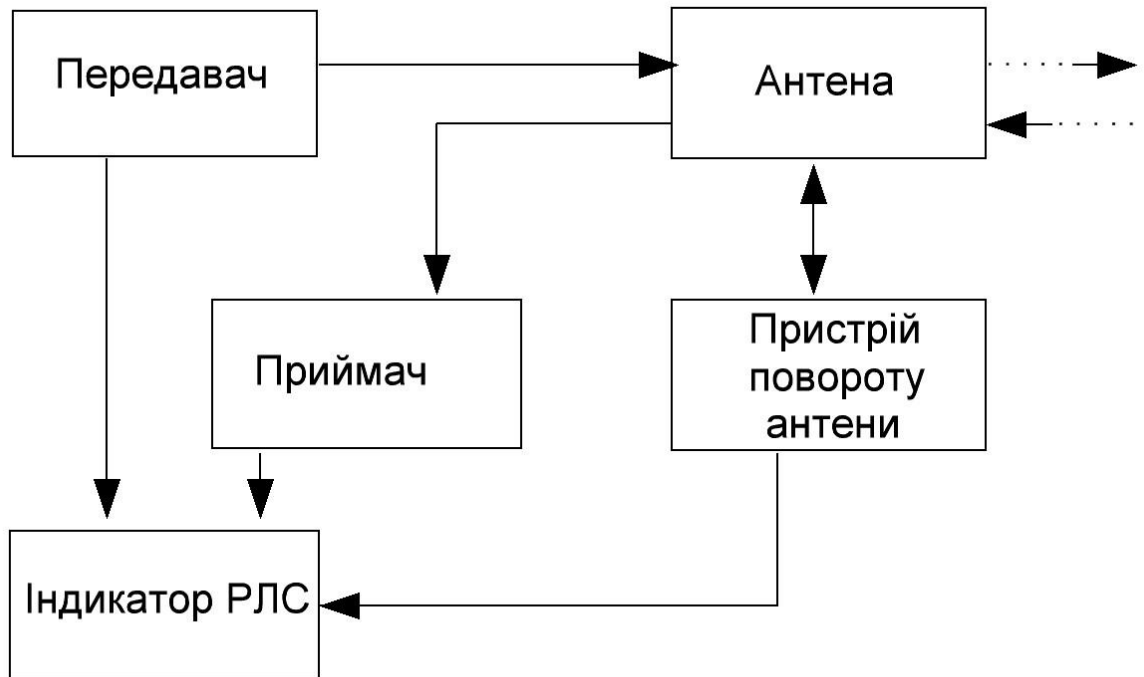


Рисунок 2.1 – Структурна схема радіолокаційної станції для виявлення СБПЛА

Спираючись на наведений вище рисунок структурної схеми можна виділити такі основні елементи системи:

- радіопередавач;
- індикатор РЛС;
- антена РЛС;
- радіоприймальний пристрій.

Передавач формує зондуючий сигнал, який через антену випромінюється в простір. Відбитий від цілі розсіяний сигнал поступає через антену на вхід радіоприймача, виділяється на фоні шуму, оброблюється, і в індикатор вимірюється час затримки  $\Delta t$  між зондуючим та відбитим сигналами. Час затримки характеризує дальність  $D$  до цілі  $\Delta t=2D/c$ , де  $c \approx 3 \cdot 10^8$  м/с-швидкість поширення електромагнітних хвиль у просторі.

У процесі роботи станції пристрій повороту антени переміщує антену і діаграму спрямованості за кутовими координатами, та інформація про кути повороту антени надходить на індикатор РЛС. У момент прийому відбитого

від цілі сигналу на індикаторі відображається кутове положення антени, відповідне кутовим координатам цілі.

Далі індикатор РЛС виконує розрахунок координат азимуту, дальності, кута місця, висоти виявлених ехо-сигналів.

Антенна РЛС виконує випромінювання сигналу радіопередавача в заданому напрямку та прийом відбитого від мети сигналу. Залежно від реалізації прийом відбитого радіосигналу може здійснюватися або тією ж антенною, або іншею, яка іноді може розташовуватися на значній відстані від передавальної.

У випадку, якщо передача та прийом поєднані в одній антені, ці дві дії виконуються по черзі, а щоб потужний сигнал радіопередавача не просочувався в приймач, перед приймачем розміщують спеціальний пристрій, що закриває вхід приймача в момент випромінювання сигналу зондувального сигналу.

Приймальний радіопристрій виконує посилення та обробку прийнятого сигналу. У найпростішому випадку результуючий сигнал подається на променеву трубку (екран), яка формує і показує зображення, синхронізоване з рухом антени.

## 2.2 Вибір довжини хвиль

Важливим фактором при виборі діапазону довжин хвиль є характер відображення радіохвиль від цілей, якщо розміри мети менші за довжину хвилі, то інтенсивність відображення мала. При цьому ціль можна уподібнити антені з дуже малою діючою висотою або малою ефективною площею. При виборі довжини хвиль опираємося на загальний стандарт РЛС (рис.2.2).

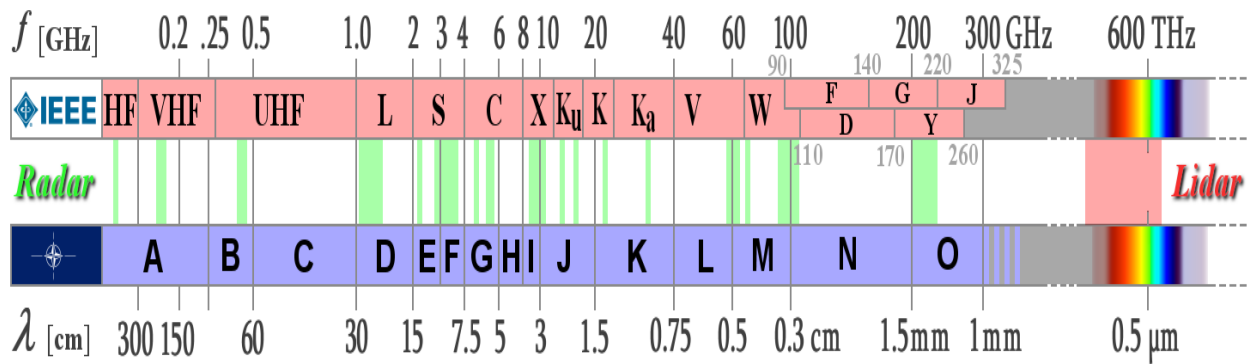


Рисунок 2.2. – Діапазони частот і довжин електромагнітних хвиль, що використовуються в радіолокації

У верхній частині рисунка показано розподіл спектру електромагнітних хвиль, що склався історично та офіційно прийнятий Інститутом інженерів з електротехніки та радіоелектроніки (Institute of Electrical and Electronic Engineer, IEEE). Нижче показано сучасну класифікацію діапазонів частот, прийняту для використання в структурах НАТО. З рисунка видно, що межі частотних діапазонів у цих двох класифікаціях не завжди збігаються.

Діапазони та піддіапазони частот електромагнітних хвиль називають великими літерами. Такий підхід виник ще на зорі радіолокації, коли точне значення робочої частоти засобу радіолокації намагалися тримати в таємниці.

Радіолокаційні системи працюють у широкому діапазоні випромінюваних частот. Чим вище робоча частота радіолокатора, тим більше впливають на поширення електромагнітних хвиль атмосферні явища і гідрометеори, такі як дощ чи хмари. Але водночас на більш високих частотах досягається значно більш краща точність роботи радіолокаційного засобу. На рисунку 2.2 показані діапазони частот електромагнітних хвиль, використовувани радіолокаційними засобами.

### 2.2.1. А- та В-діапазони (ВЧ та ОВЧ)

Ці діапазони високих частот (ВЧ) і дуже високих частот (ОВЧ, іноді називають метровим діапазоном, а в англійській літературі – діапазони HF (High Frequency) і діапазоном VHF (Very High Frequency).

Ці діапазони близько і нижче 300 МГц стосовно радіолокації мають давню історію застосування, оскільки саме в цих діапазонах активно розвивалися радіотехнології в роки Другої світової війни. В даний час ці частоти використовуються в радіолокаторах раннього виявлення і так званих загоризонтних радіолокаторах (Over The Horizon, ОТН). Для таких низьких частот легше будувати високопотужні передавачі. Згасання електромагнітних хвиль на таких частотах менше, ніж при використанні вищих частот. З іншого боку, точність таких радіолокаторів обмежена, оскільки низькі частоти вимагають антен з дуже великими фізичними розмірами, що визначає точність виміру і роздільну здатність за кутовими координатами. Крім того, ці діапазони частот використовуються й іншими службами, зв'язком та радіомовленням, тому смуга частот для радіолокаторів значно обмежена (що, знову ж таки впливає на точність та роздільну здатність).

Однак, останнім часом, інтерес до використання цих діапазонів частот у радіолокації знов повертається, оскільки на саме цих частотах технології зниження помітності радіолокаційних об'єктів Stealth не забезпечують необхідного ефекту.

### **2.2.2. С-діапазон (УВЧ)**

Цей діапазон називається діапазоном ультрависоких частот (УВЧ) чи дециметровим діапазоном. В англійській літературі - Ultra High Frequency (UHF).

Існує не так багато радіолокаційних систем, розроблених для цього частотного діапазону (від 300 МГц до 1 ГГц). Ці частоти добре підходять для виявлення радіолокаційних об'єктів і супроводу супутників і балістичних ракет на великих відстанях. Радіолокатори, що працюють у цьому діапазоні

частот електромагнітних хвиль, використовуються для раннього виявлення та попередження про цілі, як, наприклад, оглядовий радіолокатор у системі протиповітряної оборони середньої дальності MEADS (Medium Extended Air Defense System). Деякі метеорологічні системи радіолокації, наприклад, призначені для вимірювання і побудови профілю вітру, працюють саме в цьому діапазоні, оскільки поширення електромагнітних хвиль на таких частотах слабо залежить від гідрометеорів - хмар і дощу.

Нові технології надширокосмугової радіолокації (Ultrawideband, UWB) використовують усі частоти від А- до С-діапазону. Надширокосмугові радіолокатори випромінюють дуже короткі імпульси на всіх частотах одночасно. Вони використовуються для неруйнівного контролю матеріалів та об'єктів, а також як радіолокатори підповерхневого зондування (Ground Penetrating Radar, GPR), наприклад, для археологічних досліджень, досліджень руйнувань.

### **2.2.3. D-діапазон (L-діапазон)**

Цей частотний діапазон електромагнітних хвиль (від 1 до 2 ГГц) є кращим для роботи радіолокаторів дальнього виявлення з дальністю дії до 250 морських миль (близько 450 кілометрів). Вони випромінюють імпульси високої потужності з широким спектром і найчастіше з внутрішньоімпульсною модуляцією. Внаслідок кривизни земної поверхні максимальна дальність виявлення обмежена для цілей, що знаходяться на досить малих висотах. Такі радіолокаційні цілі, зі збільшенням дальності, дуже швидко зникають за радіогоризонтом.

У цьому діапазоні частот працюють радіолокатори далекого виявлення в системі керування повітряним рухом, такі як оглядовий трасовий радіолокатор (Air Route Surveillance Radar, ARSR). При поєднанні з моноімпульсним вторинним оглядовим радіолокатором (Monopulse

Secondary Surveillance Radar, MSSR) вони використовують відносно велику повільно обертову радіоантену.

Якщо букву L мати на увазі як першу в слові Large (великий), то позначення L-діапазон є гарною мнемонічною римою для великого розміру антени або великої дальності дії радіолокаційної станції.

#### **2.2.4. E/F-діапазон (S-діапазон)**

У цьому діапазоні електромагнітних хвиль атмосферне ослаблення вище, ніж у D-діапазоні. Радіолокаторам, які працюють у цьому діапазоні хвиль, потрібна значно більша випромінювана потужність для того, щоб досягти хороших значень максимальної дальності дії. Як приклад, можна навести РЛС середньої потужності MPR (Medium Power Radar) з імпульсною потужністю порядку 20 МВт. У цьому частотному діапазоні вплив погодних умов на електромагнітну хвилю сильніший, ніж у D-діапазоні. Тому кілька метеорологічних радіолокаторів працюють в E/F-діапазоні, але, в основному, у тропічних та субтропічних кліматичних зонах, оскільки вони можуть «бачити» за межами сильного шторму.

Спеціальні аеродромні оглядові радіолокатори (Airport Surveillance Radar, ASR) використовуються в аеропортах для виявлення, спостереження та відображення становища літаків у повітряному просторі аеропортів, в середньому, на відстані 50...60 морських миль (близько 100 км). Аеродромні радіолокатори визначають положення літаків та погодні умови в районах як цивільних, так і військових аеродромів.

Позначення S-діапазону (Small, Short – малий, короткий), на противагу позначенню L-діапазону, може трактуватися як позначений менших розмірів антен або меншої дальності дії радіолокаційних засобів.

#### **2.2.4 G-діапазон (C-діапазон)**

У G-діапазоні електромагнітних хвиль (від 4 до 8 ГГц) працює багато військових мобільних радіолокаторів (огляду поля бою, управління зброєю та наземної розвідки) з малою та середньою дальністю дії. Розміри антен забезпечують відмінну точність вимірювання і роздільну здатність і, при цьому, вони є порівняно невеликими, не перешкоджають швидкому переміщенню. Вплив поганих погодних умов в даному випадку дуже суттєвий. Тому в РЛС цього діапазону, призначених для роботи з повітряними об'єктами, часто використовуються антени з круговою поляризацією зондуючого сигналу. Цей діапазон частот відведений для більшості типів метеорологічних радіолокаторів, які використовуються для виявлення опадів у помірних кліматичних зонах, таких як Європа.

#### **2.2.5. I/J-діапазон (X- та Ku-діапазони)**

У цьому діапазоні частот електромагнітних хвиль (від 8 до 12 ГГц) співвідношення між довжиною хвилі і розміром антени, що використовується, істотно краще, ніж у діапазонах нижчих частот. I/J-діапазон є порівняно поширеним у військових застосуваннях, таких як бортові радіолокатори, що забезпечують функції перехоплення повітряної цілі та ведення вогню по ній, а також для здійснення атаки наземних цілей. Дуже малий розмір антени визначає хорошу застосованість. Системи наведення ракет в I/J-діапазоні мають прийнятні розміри для комплексів, для яких важливими є мобільність і мала вага, а велика дальність дії не є основною вимогою.

Цей діапазон частот радіосигналів широко використовується у морських навігаційних радіолокаторах як цивільного, так і військового застосування. Невеликі та недорогі антени з високою швидкістю обертання забезпечують значні максимальні дальності дії та гарну точність. У таких радіолокаторах використовуються хвилеводно-щілинні та невеликі смужкові антени, розміщені, як правило, під антеними обтічниками.

Крім перерахованих випадків, цей частотний діапазон хвиль поширений в космічних і бортових радіолокаторах побудови зображень, заснованих на антенах із синтезованими апертурами (Synthetic Aperture Radar), призначених як для військової електронної розвідки, так і для цивільного географічного картографування.

Спеціалізовані радіолокатори із зворотною синтезованою апертурою (Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR) використовуються у морських повітряних засобах контролю забруднення.

### **2.2.6. К-діапазон (К- та Ка-діапазони)**

Чим вище частота, тим сильніше атмосферне поглинання та згасання електромагнітних хвиль. З іншого боку, потенційна точність і роздільна здатність теж зростають. Радіолокаційні системи, що працюють у цьому діапазоні, забезпечують невелику дальність дії, але дуже високу роздільну здатність та високу швидкість оновлення інформативних даних. У системах керування повітряним рухом такі системи використовуються як радіолокатори керування наземним рухом (Surface Movement Radar, SMR) або (як частина) обладнання для виявлення цілій на поверхні аеропорту (Airport Surface Detection Equipment, ASDE). Використання коротких зондувальних імпульсів тривалістю декілька наносекунд забезпечує розрізнення по дальності, при якому на екрані цього радіолокатора можна побачити і розпізнати контур літака або наземного транспортного засобу.

### **2.2.7. V-діапазон**

Внаслідок явища розсіювання на молекулах (вплив вологості повітря) згасання електромагнітних хвиль у цьому діапазоні дуже високе. Радіолокаційне застосування тут обмежене дальністю дії кілька метрів.

### 2.2.8. W-діапазон

У цьому діапазоні спостерігаються два явища: максимальне згасання близько 75 ГГц та відносний мінімум на частоті близько 96 ГГц. Обидва ці ефекти використовуються практично. У автомобілебудуванні невеликі вбудовані радіолокаційні засоби працюють на частотах 75...76 ГГц у асистентах паркувальних, для перегляду сліпих зон і асистентах гальмування. Високе згасання (вплив молекул кисню O<sub>2</sub>) знижує рівень перешкод від радіолокаційних засобів.

Радіолокаційні установки, що працюють на частотах радіосигналів від 96 до 98 ГГц, часто використовуються як лабораторне обладнання. Вони дозволяють отримати уявлення про застосування радіолокаційних засобів на надзвичайно високих частотах, таких як 100 ГГц.

Якщо узагальнити вище вказану інформацію то усі діапазони довжин хвиль можна поділити на метровий(HF, P, VHF), дециметровий(UHF, L, S), сантиметровий(C, X, Ku, K, Ka) та міліметровий(mm, V) діапазон.

Метрові хвилі (з довжиною 1-100м) поширюються в межах прямої видимості на відстані до декількох десятків кілометрів. Характеристики поширення сигналів метрових хвиль істотно залежать від рельєфу місцевості і типу підстильної поверхні. Вплив атмосфери Землі виражається в розсіянні метрових хвиль слабкими неоднорідностями іоносфери і тропосфери, відображення метрових хвиль від іонізованих слідів метеорів і штучно іонізованих областей в атмосфері, що призводить до далекого поширення сигналів метрових хвиль.

Хвилі використовуються у радіозв'язку, радіолокації на великих відстанях (для виявлення великих радіолокаційних цілей), у телебаченні та радіо.

Дециметрові хвилі (10см-1м) при розповсюдженні вздовж земної поверхні поширюються лише в межах прямої видимості та передачі, за нормальних умов, більш ніж на 100 кілометрів утруднена. Дальність прийому

сигналу то, можливо збільшена рахунок можливості дециметрових хвиль розсіюватися на неоднорідностях тропосфери. Використовується у радіорелейному зв'язку, радіолокації (на відстань зони видимості), у телебаченні, сотовому зв'язку та мережі Wi-Fi.

Сантиметрові хвилі (1-10см) цього діапазону знаходять різноманітне застосування у сучасній радіотехніці. Наприклад, стандартом частоти для мікрохвильових печей та промислових плазмових НВЧ установок є близька до діапазону сантиметрових хвиль частота 2,45 ГГц. Це частота резонансного поглинання для молекул води, а оскільки у всі продукти харчування входить вода, то у НВЧ-печі з цією частотою можна ефективно нагрівати будь-який продукт. Крім того, для випромінювання на цій частоті атмосфера непрозора через його поглинання парами води. Частоти порядку 5,8 ГГц використовуються в радіокерованому авіамоделізмі для пілотування за зображенням відеокамери.

Відмінною рисою міліметрового діапазону (1-10мм) є малі розміри антен і велика абсолютна смуга частот (що забезпечує можливість спільного використання діапазону великим числом радіосистем). Однак, в порівнянні з більш низькочастотними діапазонами, радіохвилі міліметрового діапазону відчують сильне загасання при поширенні в земній атмосфері. Внаслідок цього земні радіосистеми міліметрового діапазону характеризуються малою дальністю дії (від десятків кілометрів до декількох сотень метрів) і сильною залежністю від погодних умов. Їх використання доволі поширене майже у багатьох сферах, таких як наукові дослідження (зондування землі, моніторинг атмосфери, термоядерний синтез), телекомунікації, озброєння (РЛС по виявленню ракет, зенітно-артилерійських комплексів на кораблях), медицина (сканер на міліметрових хвилях, КВЧ-терапія).

При виборі довжини хвилі ми опираємося на такі параметри як дальність випромінювання, можливість перетину природних атмосферних явищ (пар, дощ, туман, хмари) та ефективність виявлення об'єкта.

З вищевказаного  $\lambda$  можна зробити висновок що потрібно зробити вибір опираючись на переваги та недоліки довжини хвиль. Згадуючи що ціль нашої РЛС є БПЛА потрібно вважати що ЄПР об'єкту буде до  $2,5\text{м}^2$ , а відстань до 40 км ми можемо виключити міліметрові (через велику кількість пасивних перешкод з котрими будуть зіштовхуватися на шляху до цілі та маленька дальність виявлення) та метрові хвилі (через малі розміри цілі на фоні діаграми направленості вона буде нерозрізнюєма). У нашому випадку підходять довжини хвиль L (1,5 – 3 дцм), S (0,7 – 1,5 дцм), C (3,75 см – 7,5 см) та X (2,5 – 3,75 см). Дециметровий діапазон використовують для контролю повітряного простору, але нам потрібно пам'ятати що БПЛА менші за звичні нам літаки, тому нам більше підійде сантиметровий діапазон котрий використовується для спостереження у РЛС аеропортів навіть за птахами.

При виборі довжини хвилі несущого коливання слід враховувати що зменшення довжини хвилі  $\lambda$  дозволяє при менших габаритах антени одержати необхідну ширину діаграми спрямованості за половинною потужністю  $\theta$ . Проте, чим менше довжина хвилі сигналу  $\lambda$ , тим більше втрати електромагнітної енергії при поширенні сигналу в атмосфері, зокрема, втрати у молекулах кисню, водяній парі, краплях дощу та туману.

Ефективна площа вторинного випромінення  $S_{\text{ц}}$  реальних об'єктів залежить від довжини хвилі. Якщо  $\lambda$  більше, ніж геометричні розміри радіолокаційної цілі, то ціль  $S_{\text{ц}}$  виявляється дуже малою. Наприклад, для сферичного об'єкта з діелектричною проникністю  $\epsilon$ , діаметр якого  $d \ll \lambda$ , відома формула Релея:

$$S_{\text{ц}} = \pi^5 \frac{d^6(\epsilon-1)}{\lambda^4(\epsilon+1)} \quad (2.1)$$

Підставивши у рівняння відомі параметри отримаємо довжину хвилі, яка необхідна для виявлення та спостереження цілі:

$$0,3\text{м}^2 = 3,14^5 \frac{0,23\text{м}^2{}^6}{\lambda^4} \left( \frac{0,01\text{м}^2-1}{0,01\text{м}^2+1} \right)^2 \Rightarrow \lambda = 0,0545\text{м} \approx 5,5\text{см}. \quad (2.2)$$

У результаті розрахунків бачимо, що для виявлення цілі з ефективною поверхнею розсіювання  $0,3\text{м}^2$  потрібно використовувати довжину хвилі зондуючого радіосигналу  $6,3\text{ см}$ , що дозволяє досягнути в РЛС заданих значень тактичних параметрів.

2.3. Обчислення дальності дії РЛС з урахуванням втрат при поширенні радіохвиль

Однією з основних завдань під час проектування РЛС є розрахунок і забезпечення максимальної дальності виявлення і спостереження цілій, яка також є одним з найважливіших тактичних показників радіолокаційної системи.

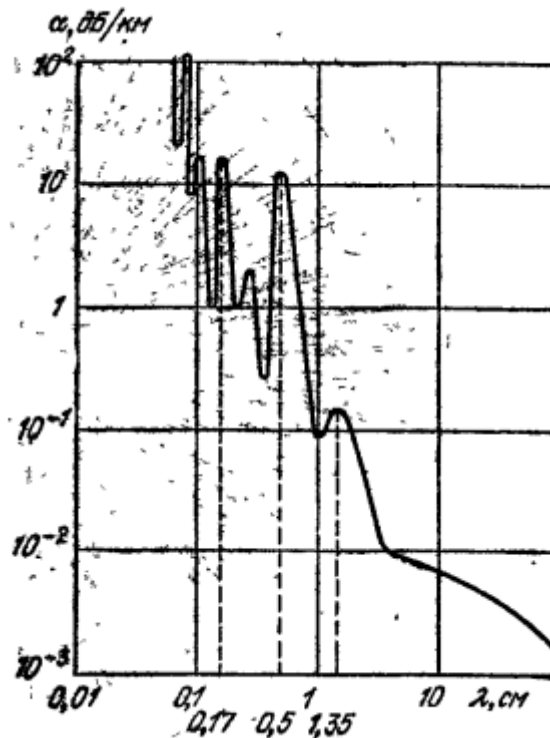


Рисунок 2.3 – Залежність коефіцієнта згасання радіохвиль в атмосфері від частоти

Вплив на дальність дії РЛС зовнішніх атмосферних умов зумовлений поглинанням та розсіюванням радіохвиль в атмосфері, відзеркаленням їх від поверхні Землі та присутністю атмосферної рефракції.

Зменшення дальності дії РЛС внаслідок поглинання та розсіювання радіохвиль. Якби атмосфера не містила гідрометеорів, то електромагнітна енергія поглиналася тільки наявними в тропосфері газами. Енергія радіохвиль викликає у молекулах газів перехід електронів з одного енергетичного рівня в інший. Оскільки внутрішньоатомним переходам властиві власні частоти, то коли з будь-якої з них співпадає частота хвилі, що поширюється, настає резонанс і поглинання різко зростає. У водних парах резонансне поглинання відбувається при довжинах хвиль  $\lambda=1,7$  мм (коефіцієнт згасання  $\alpha=14$  дБ/км) та  $\lambda = 1,35$  см ( $\alpha = 0,1$  дБ/км), а у кисні — при  $\lambda = 1,7$  мм ( $\alpha =12$  дБ/Км) (Рисунок 2.3.)

Якщо в атмосфері є опади, то ЕМВ викликають у краплях вологи струми усунення, які стають джерелами вторинного випромінювання. Тим

Найбільш енергія хвиль розсіюється поза прямою, що з'єднує РЛС з метою. Одночасно відбувається поглинання енергії радіохвиль, оскільки частки вологи мають деяку активну провідність. Чим більша частота та інтенсивність опадів, тим більше втрата енергії.

Реальна дальність дії  $D$  активної РЛС визначається співвідношенням:

$$D = \sqrt{\frac{P_{\text{max}}}{P_{\text{min}}}} \cdot \frac{1}{\alpha}, \quad (2.3)$$

де  $\alpha$  - коефіцієнт поглинання енергії електромагнітних хвиль у кисні та водяному парі (у децибелах на кілометр);

$\chi_{0i}$  - коефіцієнт поглинання в атмосферних опадах (дБ/км);

$R_{0i}$  - довжина частини траси поширення хвиль з атмосферними опадами (км);

$n$  - число ділянок з атмосферними опадами;

$D_0$  - максимальна дальність радіовиявлення цілі у вільному просторі (км).

Числові значення коефіцієнта поглинання радіохвиль міститься у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Коефіцієнт поглинання радіохвиль  $\chi$ , дБ/км

Характеристика середовища	Довжина хвилі $\lambda$ , см						
	1,5	2	3	4	6	8	10
сильний дощ (16 мм/год.)	1,4	0,8	0,3	0,13	0,04	0,016	0,006
середній дощ (4 мм/год.)	0,3	0,15	0,05	0,022	0,01	0	0
слабкий дощ (1 мм/год.)	0,05	0,03	0,01	0,005	0	0	0
туман видимість 150 м	0,5	0,3	0,12	0,063	0,03	0,016	0,01
туман видимість 60 м	0,2	0,13	0,06	0,02	0,013	0,005	0
туман видимість 30 м	0,1	0,06	0,023	0,012	0,005	0	0
водяна пара, 20 <sup>0</sup> С, 760 мм рт.ст.	0,1	0,03	0,003	0,001	0	0	0
кисень повітря 20 <sup>0</sup> С, 760 мм рт.ст.	0,015	0,013	0,01	0,006	0,006	0,006	0,006

Для обчислення потужності зондувального сигналу необхідно визначити  $D_0$ .

Співвідношення (2.3) можна записати в іншій формі:

$$P_{\text{сиг}} = P_{\text{вх}} \cdot \left[ \frac{1}{1 + \chi_{0i} R_{0i}} \right]^n$$

Оскільки  $\chi_{0i}$  та  $R_{0i}$  відомі або обрані, значення експоненційного множника, що містить ці змінні, легко обчислюється. Щодо множника, який враховує втрати у молекулах кисню та водяної пари, то суттєво, що ці втрати

існують на всій трасі поширення радіохвиль. У цьому випадку доводиться обчислювати дальність  $D_0$  шляхом розв'язання трансцендентного математичного рівняння

$$1 - \frac{\alpha D}{\lambda} \left( 1 - \frac{\alpha D}{\lambda} \right)^{\frac{D}{\lambda}} = 0 \quad (2.4)$$

Рівняння (2.4) не має, як відомо, аналітичного розв'язку. Одержати наближений математичний розв'язок рівняння можна графоаналітичним методом.

Проте, можна легко одержати значення  $D_0$  шляхом розкладання експоненти у степеневий ряд. Позначимо для скорочення  $\alpha = Q_1 \lambda^{-1}$ . Із співвідношення (2.3) одержуємо таке рівняння

$$1 - \frac{\alpha D}{\lambda} \left( 1 - \frac{\alpha D}{\lambda} \right)^{\frac{D}{\lambda}} = 1 - \frac{\alpha D}{\lambda} \left( 1 - \frac{\alpha D}{\lambda} \right)^{\frac{D}{\lambda}} = 0 \quad (2.5)$$

Ряд (2.5) збігається монотонно для всіх  $\alpha D < \infty$ . Якщо  $\alpha D \ll 1$ , ряд збігається дуже швидко. Саме такі значення добутку  $\alpha D$  відповідають більшості радіолокаційних систем.

Оскільки у нас станція для виявлення СБПЛА, дальність дії  $D = 60$  км, довжина хвилі  $\lambda = 5,5$  см. Знайдемо дальність радіовиявлення цілі у вільному просторі  $D_0$  без урахування втрат в атмосферних опадах (гідрометеорах).

Згідно з таблицею 2.1, коефіцієнт поглинання у молекулах кисню дорівнює  $\chi = 0,016$ ; втратами енергії у водяній парі можна в даному випадку можна знехтувати. Тоді допоміжна змінна дорівнює  $\alpha = Q_1 \lambda^{-1}$ :

$$\chi = 0,016$$

В такому випадку отримаємо

$$\begin{aligned}
 D &= D \left( 1 + \alpha D + \frac{1}{2} a^2 D^2 + \alpha D + \frac{1}{6} a^3 D^3 \dots \right) = \\
 &= 60 \left( 1 + 7 \times 10^{-4} \times 60 + \frac{1}{2} 49 \times 10^{-8} \times 3600 + \dots \right) = \\
 &= 60(1 + 0.42 + 0.00088 + \dots) = 82.73
 \end{aligned}$$

Оскільки дальність  $D_0$  пропорційна потужності  $P_e$  зондувального сигналу в степені  $1/4$ , то для збільшення дальності радіовиявлення у 1,232 рази треба збільшити потужність  $P_v$  у  $(1,232)^4=2,3$  рази. Таким чином, в даному випадку більше половини енергії зондувального радіолокаційного сигналу втрачається при поширенні радіохвиль у реальній атмосфері.

#### 2.4 Способи огляду простору

Інформацію про наявність цілей у зоні огляду РЛС отримують у процесі огляду її елементів огляду. Час, що витрачається на одноразовий огляд зони, та черговість перегляду її елементів розрізнення визначаються методами огляду простору. Крім того, від способу огляду залежить і значення середньої потужності зондувальних сигналів РЛС. Безперервний огляд зони огляду є обов'язковим режимом функціонування РЛС.

У існуючих РЛС виявлення БПЛА використовують різні способи огляду. Вибір того або іншого способу огляду простору залежить від призначення РЛС, оскільки від нього залежать багато тактичних і технічних показників РЛС:

- час виявлення цілі у зоні;
- кількість вимірюваних координат та точність їх вимірювання;
- роздільні можливості по кутових координатах, дальності - та радіальної швидкості;
- швидкість оновлення інформації;
- перешкодозахищеність РЛС (особливо від пасивних перешкод).

Необхідна форма зони огляду може формуватись відповідним вибором форми діаграми спрямованості ДСА РЛС (на прийом та на передачу) та закону зміни її положення у просторі, при яких найбільшою мірою забезпечуються задані методи виявлення.

Залежно від часу, що витрачається для отримання інформації від усіх елементів зони огляду, розрізняють такі види огляду:

- паралельний (кількість антенних променів дорівнює числу елементів розподілу за кутовими координатами, рисунок 2.3);

- послідовний (зона виявлення проглядається одним антенним променем, переміщення якого здійснюється послідовно в часі по кутку місця та азимуту, рисунок 2.4);

- змішаний (по одній кутовій координаті (найчастіше по куту місця) здійснюється паралельний огляд, а за іншою (азимуту) – послідовний, рисунок 2.6.

Число антенних променів дорівнює числу елементів розрізнення за кутовими координатами.

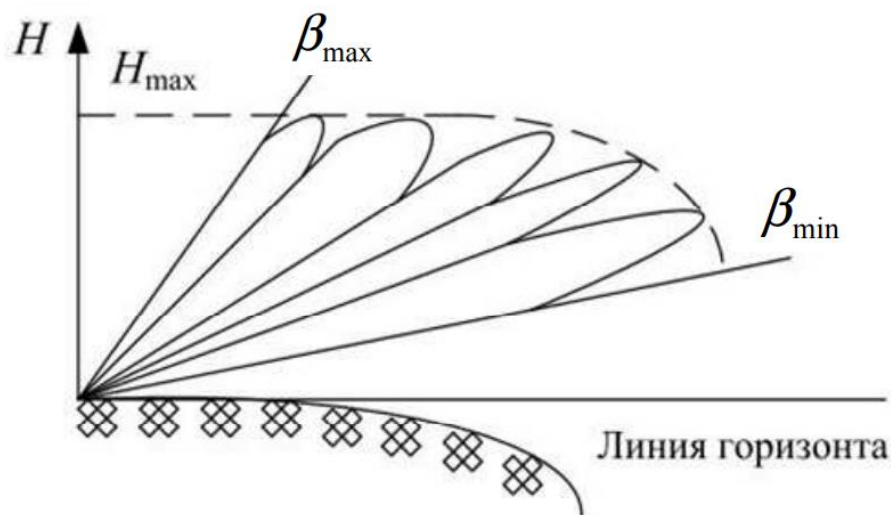


Рисунок 2.3 – Паралельний огляд простору кутовій площині

Число антенних променів діаграми спрямованості дорівнює числу елементів дозволу за кутовими координатами.

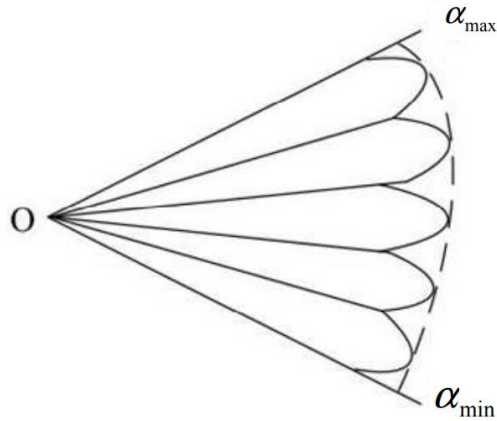


Рисунок 2.4. – Паралельний огляд простору в азимутальній площині

Зона виявлення проглядається одним антенним променем, переміщення якого здійснюється послідовно в часі по кутку місця та азимуту.

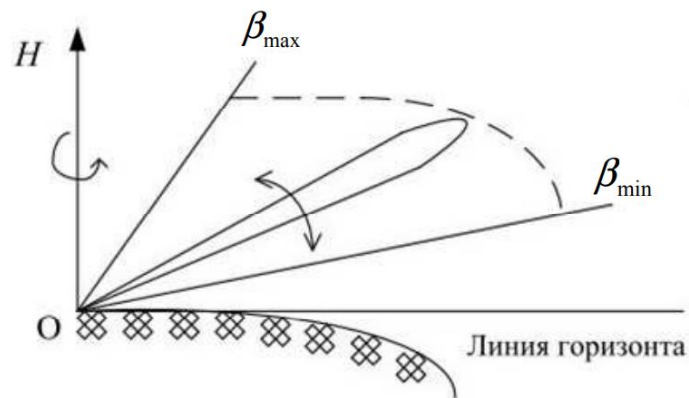


Рисунок 2.5 – Послідовний огляд по куту місця та по азимуту

По одній кутовій координаті (найчастіше по куту місця) здійснюється паралельний огляд, а по іншій координаті (азимуту) – послідовний огляд.

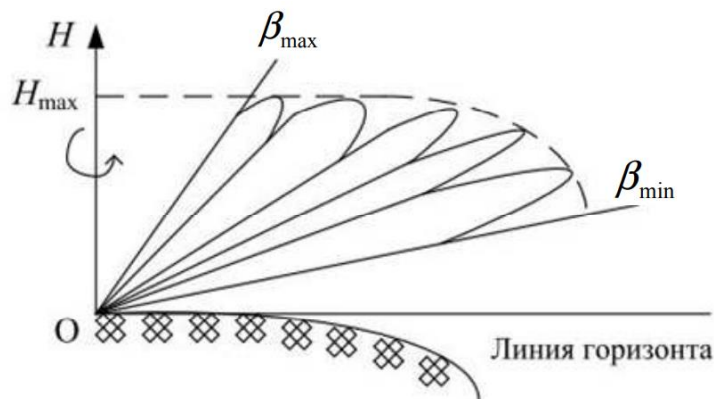


Рисунок 2.6 – Змішаний огляд: паралельний по кутку місця та послідовний за азимутом

Огляд зони виявлення за дальністю здійснюється послідовно в міру поширення електромагнітної енергії після випромінювання зондувального сигналу з кінцевою швидкістю до мети і назад.

Паралельний огляд за кутовими координатами має найбільший, в порівнянні з іншими видами огляду, темпом поновлення радіолокаційної інформації.

Однак він суттєво ускладнює реалізацію антеною системи, особливо у випадку паралельного огляду з обох кутових координат.

Форма і ширина діаграми спрямованості антени в азимутальній та вертикальній площинах визначають потенційну роздільну здатність, потенційну точність оцінювання кутових координат, дальність дії системи та її завадостійкість і завадозахищеність. При виборі параметрів антен слід урахувувати такі співвідношення.

Потенційна роздільна здатність за кутовою координатою, яка визначається за формулою

$$\Delta \varphi_{\text{ном}} \approx \theta. \quad (2.6)$$

Це співвідношення дає змогу визначити необхідну ширину діаграми спрямованості за половинною потужністю  $\theta$  у відповідній площині.

Треба зазначити, що співвідношення  $\Delta \varphi_{\text{ном}}^* \approx \theta$  не може бути підставою для вибору ширини діаграми спрямованості  $\theta$ . Згідно з наступним співвідношенням маємо

$$\Delta \varphi_{\text{ном}}^* \approx \frac{\Delta \varphi_{\text{ном}}}{2}.$$

Тут  $\sigma^*(\varphi)_{\text{ном}}$  вказує, яку помилку ми допускаємо, якщо оцінюємо координату за даними порогового пристрою („1” або „0”) вузла виявлення сигналу без пошуку середини пачки.

Отже, для обчислення ширини діаграми спрямованості антени  $\theta$  треба виходити з роздільної здатності за відповідною кутовою координатою  $\delta\varphi_{\text{ном}}$ , яка відповідає виразу (2.6).

Ширина діаграми спрямованості  $\theta_{\text{аз}}$  (або  $\theta_{\text{км}}$ ) пов'язана з розмірами розкриття антени та довжиною хвилі радіосигналу  $\lambda$ . Для прямокутного розкриття антени маємо

$$\theta^\circ \approx \frac{60\lambda}{\ell}, \quad (2.7)$$

де  $\ell$  – розмір розкриття у відповідній площині.

Для круглого розкриття параболоїдного дзеркала маємо

$$\theta^\circ \approx \frac{70\lambda}{d}, \quad (2.8)$$

де  $d$  – діаметр дзеркала.

Коефіцієнт спрямованої дії  $g$  за умов  $\theta_{\text{аз}} \ll \pi$ ,  $\theta_{\text{км}} \ll \pi$  дорівнює

$$g = \frac{4\pi}{\theta_{\text{аз}}\theta_{\text{км}}} \approx \frac{410}{\theta_{\text{аз}}\theta_{\text{км}}}$$

З урахуванням коефіцієнта корисної дії антени  $\eta=0.6$  коефіцієнт підсилення  $G$  визначається за формулою

$$G = g \approx \frac{2500}{\theta_{az} \theta_{kl}} \quad (2.9)$$

Ефективна площа антени будь-якого типу визначається за такою формулою

$$S_{ef} = \frac{G \lambda^2}{4\pi} \quad (2.10)$$

Геометрична площа дзеркальних антен  $S_{geom}$  звичайно більша, ніж  $S_{ef}$ . Оптимальним розподілом поля у площині розкриття зменшують рівень бічних та зворотних пелюсток діаграми спрямованості. В ескізних розрахунках можна вважати

$$S_{geom} \approx 1.4 S_{ef} \quad (2.11)$$

У РЛС виявлення повітряних цілей (літаків), а також в РЛС кругового огляду земної поверхні з літака часто застосовують такі антени, діаграма спрямованості яких у вертикальній площині має „косекансну” форму. Для того, щоб сигнали, відбиті від цілей, що знаходяться на різних дальностях  $D$ , але на однаковій висоті  $H$ , мало відрізнялися за потужністю, треба, щоб коефіцієнт підсилення  $G$  був змінною величиною, яка залежить від кута місця  $\varphi_{km}$ . Саме таким вимогам задовольняє „косекансна” антена, в якій маємо

$$G = C \frac{1}{\sin^2 \varphi_{km}} \quad (2.12)$$

де  $C$  – певна константа.

Пояснити співвідношення (2.12) можна таким прикладом. Відомо, що нахильна дальність  $D$  обчислюється за формулою

$$D_4 \sqrt{\frac{P_e G_e S_y}{(4\pi)^3 P_c}} \quad (2.13)$$

де  $P_e$  – потужність, що випромінюється;

$S_y$  – ефективна площа вторинного випромінення цілі;

$P_c$  – потужність прийнятого сигналу.

Якщо випромінювання зондувального сигналу та приймання відбитого сигналу здійснюються єдиною антеною, то вираз (2.13) з урахуванням (2.11) набуває вигляду:

$$D_4 \sqrt{\frac{P_e^2 S_y}{(4\pi)^3 P_c}} \quad (2.14)$$

Оскільки  $\sin \theta_{az} = \sin \theta_{az} \cos \varphi$ , за умов  $H = \text{const}$ ,  $P = \text{const}$ ,  $\theta_{az} = \text{const}$  з формули (2.14) одержуємо співвідношення (2.12).

Через те, що  $\cos \varphi \rightarrow 0$  при  $\varphi \rightarrow 0$ , формула (2.12) має сенс лише коли  $\varphi_{km} \geq \varphi_m$ , де  $\varphi_m$  – це мінімальний кут місця, за якого досягається максимум коефіцієнта підсилення  $G_m$ . Цей максимум залежить лише від розмірів антени, що використовується. Горизонтальний розмір  $l_z$ , який визначає  $\theta_{az}$  та роздільну здатність за азимутом, вважаємо відомим або обчисленим раніше. Тому  $G_m$  залежить від вертикального розміру антени  $l_v$ . Обравши максимальний прийнятний розмір антени  $l_v$ , можна за формулами (2.7) та (2.9) обчислити найбільше значення  $G_m$  для антени з розмірами  $l_z, l_v$ .

Таким чином,  $\theta_m = 60^\circ l_v$ ;  $\theta_{az} = 60^\circ l_z$ ;

$$G_m = \frac{250}{\theta_m \theta_{az}}$$

Величина  $G_m$  відповідає деякій антені з „голкоподібною” діаграмою спрямованості, оскільки звичайно  $l_v \approx l_z$ . Тепер антену можна „перетворювати” у „косекансну”, розміщуючи додаткові випромінювачі або деформуючи край дзеркала за певним законом.

Константу  $C$  у формулі (2.12) знайдемо з умови:  $G_{\text{км}} = G_m$  при  $\Phi_{\text{км}} = \Phi_m$ . Тоді  $G_{\text{км}} = G_m \frac{C \cos^2 \Phi_m}{C \cos^2 \Phi_m}$  і остаточно одержуємо

$$G_{\text{км}} = \frac{G_m C \cos^2 \Phi_m}{C \cos^2 \Phi_m}, \quad (2.15)$$

де  $\Phi_{\text{км}} \geq \Phi_m$ .

Мінімальний кут місця  $\Phi_m$  вибирають з урахуванням специфіки системи, але завжди виконується співвідношення

$$\Phi_m \geq \frac{\Theta_m}{2}.$$

Розглянемо такий приклад. Хай відомо, що наземна РЛС призначена для виявлення повітряних цілей (літаків або БПЛА) у режимі кругового огляду і наближеного оцінювання азимуту та дальності цілі. Для випромінювання та приймання радіохвиль застосовується спільна радіоантена. Ширина діаграми спрямованості антени за потужністю на рівні 0,5 в азимутальній площині складає  $\Theta_{az} = 2^\circ$ . Довжина хвилі  $\lambda = 10 \text{ м}$ . Сектори огляду  $\Phi_{az} = 360^\circ$ ,  $\Phi_{км} = 60^\circ$ .

Треба сформулювати вимоги до антени та розрахувати коефіцієнт підсилення  $G$ .

Очевидно, антена має бути такою, щоб одночасно оглядати кутовий сектор  $\Phi_{км} = 60^\circ$ . Тоді послідовний огляд за азимутом і дальністю полягає лише в обертанні антени навколо вертикальної осі. Це типовий випадок


застосування антени з „косекансною” діаграмою спрямованості (з урахуванням призначення РЛС виявлення БПЛА).

Вважатимемо, що розкриття антени має прямокутну форму. Тоді, згідно з (2.14), горизонтальний розмір такий

$$l_z = \frac{60 \times \lambda}{2} = \frac{60 \times 0.055}{2} = 1.65 \text{ м}$$

З конструктивних міркувань вертикальний розмір  $l_v$  повинен не перевищувати  $0,5 l_z$ . Оберемо  $l_v = 0,5 l_z = 1.5 \text{ м}$ , щоб досягти максимального значення  $G_m$ . Тоді  $\theta_m = 60\lambda / l_v = 60 \cdot 0.1 / 1.5 = 8^\circ$ . Відповідно до формули (2.13),

$$G_m = G(\varphi_m) = \frac{25000}{\theta_{as}^\circ \theta_m^\circ} = \frac{25000}{8^\circ \cdot 4^\circ} = 781.$$

Мінімальний кут місця, починаючи з якого  тобто діаграма спрямованості стає „косекансною”, дорівнює

$$\varphi_m = \frac{\theta_m}{2} = 2^\circ.$$

Обчислені значення  а також відомі  $\lambda, \Phi_{km}$  та співвідношення (2.16) складають технічні вимоги до антени, за яких здійснюється її проектування.

Треба зазначити, що в межах дуже малих кутів місця, коли має місце  $0 < \Phi_{km} \leq \Phi_m$ , коефіцієнт підсилення  $G(\varphi_{km})$  швидко зменшується, оскільки діаграма спрямованості косекансної антени за таких кутів співпадає з діаграмою спрямованості прямокутної синфазної антени, що має розміри  $l_v, l_z$ .

Якщо  $\Phi_{KM} \geq \Phi_m$ , то  $G(\Phi_{KM})$ , згідно з (2.15), набуває таких значень:

$$G(2^\circ) = \frac{G_m}{\operatorname{cosec}^2(2^\circ)} \cdot \operatorname{cosec}^2(2^\circ) = 781;$$

$$G(5^\circ) = \frac{G_m}{\operatorname{cosec}^2(2^\circ)} \cdot \operatorname{cosec}^2(5^\circ) = 130;$$

$$G(10^\circ) = \frac{G_m}{\operatorname{cosec}^2(2^\circ)} \cdot \operatorname{cosec}^2(10^\circ) = 71;$$

$$G(60^\circ) = \frac{G_m}{\operatorname{cosec}^2(2^\circ)} \cdot \operatorname{cosec}^2(60^\circ) = 1,3;$$

## 2.5. Вибір поляризації радіосигналу під час проектування РЛС

Існують апостеріорні статистичні дані щодо ефективної площі розсіювання різних об'єктів, що підлягають виявленню радіолокаційними засобами при різних поляризаціях. Відповідно до них літаки мають більшу ЕПР при горизонтальній поляризації. Тому як у вітчизняних РЛК управління повітряним рухом «Дніпро», так і у закордонних ASR-9 та С-511 використовують антени з горизонтальною поляризацією.

У РЛС 36Д6 при зондуванні і виявленні радіолокаційних цілей також використовують горизонтальну поляризацію. Однак прийом сигналів в цьому випадку здійснюють як з горизонтальною поляризацією (основний радіолокаційний канал), так і з вертикальною поляризацією сигналу (канал захисту головного променя ДНА від активних шумових перешкод). Наявність прийому перешкодових сигналів з вертикальною поляризацією при одночасному прийомі сигналів з горизонтальною поляризацією дозволяє забезпечити фільтрацію корисних сигналів при дії активних шумових перешкод по головному променю ДСА.

У РЛС 1РЛ141 основний режим роботи з поляризації аналогічний відомої РЛС 36Д6. Однак, є одна особливість - до складу РЛС 1РЛ141 введено поляризатор, який змінює поляризацію сигналів. Зокрема, поляризатор дозволяє використовувати кругову поляризацію сигналів. При перевідображенні від гідрометеорів (дрібних крапель кулястої форми) їхня поляризація змінюється на ортогональну. Ортогональні поляризації відбитих сигналів антеною не приймаються. При цьому відбиті від несиметричних цілей (наприклад, літаків) сигнали мають поляризацію дуже близьку до поляризації сигналів зондуючих і приймаються антеною РЛС. Це підвищує помехозащищенность за умов впливу пасивних перешкод, які отримуються від гідрометеорів. Однак, при дощах великої інтенсивності краплі змінюють свою форму та ефективність поляризаційної селекції значно погіршується. Тому ефективність поляризаційної селекції можна оцінити величиною близько 10...15 дБ.

Якщо виявленню підлягають такі об'єкти, як міни чи артелірійські снаряди, вибір поляризації здійснюють залежно від траєкторії їх польоту, і навіть залежно від того, на якій ділянці траєкторії їх треба знайти. Так, для виявлення мін близькою до оптимальної є вертикальна поляризація (оскільки траєкторії польоту мін близькі до вертикальних); для виявлення снарядів близькою до оптимальної є горизонтальна поляризація (оскільки для снарядів характерні настільні траєкторії).

В радіолокаційній станції виявлення БПЛА будемо використовувати горизонтальну поляризацію сигналу, що випромінюється.

## 2.5 Обосновання використання імпульсного методу радіолокації

На Рисунок 2.7 показано загальний принцип роботи імпульсної радіолокаційної станції, що використовує імпульсні зондуючі сигнали з тривалістю імпульсу  $T_p$  та періодом повторення імпульсів  $T_r$ .

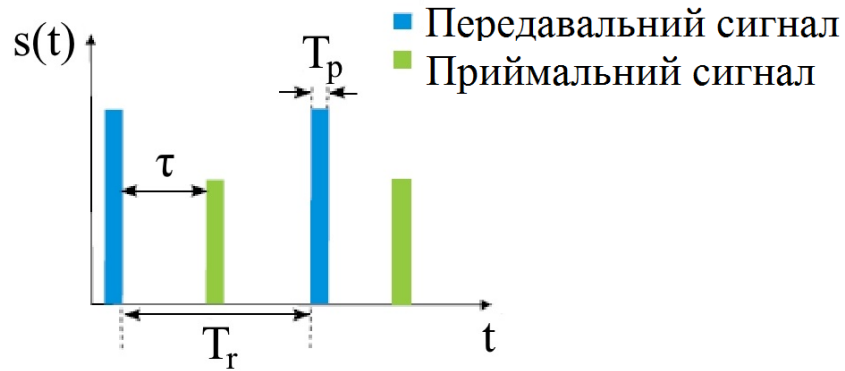


Рисунок 2.7 – Принцип роботи імпульсного методу раділокації

В імпульсних РЛС виявлення БПЛА оглядового типу тривалість пачки імпульсів  $\tau_{пачки}$  та число імпульсів у пачці  $N_c$  залежать від  $T_i$ , швидкості обертання антени  $n$  та ширини діаграми спрямованості  $\theta_{аз}$ . Тривалість сигналу пачки визначається за формулою  $\tau_c = \tau_{пачки}$ ,

$$\tau_c = \frac{\theta_{аз} \cdot T_i}{360 \cdot n} \quad (2.16)$$

де  $T_{огл.аз}$  – час одноразового огляду простору за азимутом;  $n$  – число обертів антени РЛС за хвилину.

Число імпульсів у пачці визначається з урахуванням формули (2.4)

$$N_c = \frac{T_{огл.аз} \cdot \theta_{аз}}{T_i \cdot \theta_{аз}} \quad (2.7)$$

де  $T_{опр}$  – час опромінення сигналом зосередженої цілі у вигляді БПЛА.

Період випромінювання імпульсів  $T_i$  вибирають виходячи з умови однозначного визначення дальності цілій:

$$T_i \leq \frac{2D_c}{c}, \quad 1 \leq k \leq 15. \quad (2.18)$$

У формулі (2.18)  $D$  відповідає граничній дальності індикатора, яка може суттєво перебільшувати дальність радіовиявлення цілі з заданим значенням ЕПЦ.

Наприклад, нехай дальність радіовиявлення цілі з ефективною площею ЕПЦ  $S_{ц1}=0,09\text{м}^2$  дорівнює 160 км. Якщо задано  $S_{ц2}=0,08\text{м}^2$ , це не означає, що не може з'явитися ціль з більшою ЕПЦ, зокрема, з  $S_{ц1}=0,6\text{м}^2$ . Тоді дальність радіовиявлення збільшиться у  $(S_{ц1}/S_{ц2})^{1/4}$  разів, тобто буде у  $\sqrt[4]{5,5} = 1,647$  рази більшою, а саме – на дальності 247 км. Якщо  $S_{ц1} = 1,44\text{м}^2$ , тоді  $D=300\text{км}$ . Очевидно, щоб мати можливість появи хибної позначки від цілі з великою  $S_{ц}$ , необхідно визначити  $T_i$  не тільки згідно з формулою (2.10), але також з урахуванням імовірності перевищення заданого значення ЕПЦ.

Також при виборі імпульсного зонduючого сигналу слід обирати шпаруватість, з якою буде випромінюватися сигнал. Шпаруватість – безрозмірна величина, характеристика імпульсних систем, що визначає відношення періоду повторення послідовності імпульсів до тривалості імпульсу. Таким чином, для імпульсного періодичного сигналу справедливе співвідношення:

$$S = \frac{T}{\tau} = \frac{1}{D}, D = \frac{\tau}{T} = \frac{1}{S}. \quad (2.19)$$

## 3 МЕТОДИ І ТЕХНІЧНІ ПРИСТРОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ І ЗАВАД

### 3.1. Антенна система

Призначенням антени є перетворення зондувальних сигналів у просторове електромагнітне поле випромінювання на передачі та зворотне перетворення поля у місці прийому відбитих сигналів в зоні відповідальності.

В Залежності від цільового призначення радара - або це станція кругового огляду (КО), або це станція, що функціонує у секторному режимі, їх антени будуть відрізнятися конструктивними особливостями, секторами огляду, поляризацією та методами сканування простору.



Рисунок 3.1 - 1Л220У «Зоопарк-2»

РЛС кругового огляду є більш універсальними, але такі станції можуть працювати також і в секторному режимі огляду. Секторні станції

можуть, наприклад, вирішувати завдання контрбатареїної або контрракетної боротьби у військовій справі. Вони можуть також використовуватися як танції об'єктової протиповітряної оборони (ППО). Прикладом секторної РЛС може бути РЛК української розробки 1Л220У (рисунок 3.1), що вирішує завдання контрбатареїної або контрракетної боротьби. Антенні системи таких радіолокаційних станцій являють собою фазовані антенні решітки ФАР з електронним скануванням променю.

Для отримання інформаційних сигналів з простору необхідно забезпечити сканування діаграми спрямованості антени як по азимуту, так і куту місця. Сучасні РЛС військового призначення зазвичай використовують паралельно-послідовний огляд простору. З урахуванням економічних обмежень у РЛС кругового огляду в азимутальній площині використовують електромеханічне сканування (послідовне знімання інформації аз азимутом).

По кутку місця зазвичай використовують електронне сканування променя, яке може бути аналоговим - частотним, фазовим або комбінованим цифровим. У першому випадку, при частотному скануванні, як аналог в розробці можна використовувати англійську станцію AR-3D або українську РЛС 36Д6, при комбінованому скануванні - українську станцію РЛС 80К6 (12 променів) або зарубіжні аналоги - британську танцію Martello фірми Алєнія Марконі Системз (або американську AN/TRS-59(Рисунок 3.2) фірми Локхїд Мартїн або її модифїкації (11 променів).

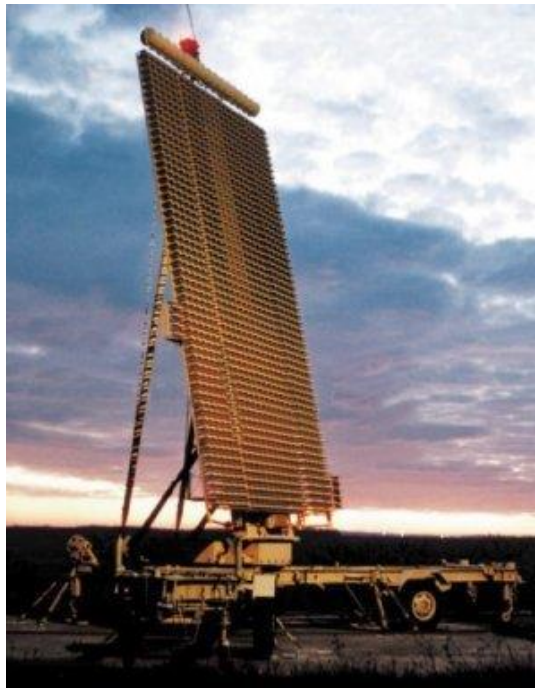


Рисунок 3.2 –антенна система РЛС AN/TRS-59

### 3.2. Цифрові антени

У міру розвитку систем радіолокації зростає кількість функцій, що виконуються приймальною антеною. Інтенсивно розвиваються антени з цифровою обробкою сигналу, зокрема адаптивні антенні решітки ААР з цифровим формуванням діаграм спрямованості - цифрові антенні решітки (ЦАР), в яких сигнал, прийнятий кожним елементом решітки, перетворюється на цифровий код і формування ДС і подальша обробка сигналу здійснюються, наприклад, у цифровому сигнальному процесорі (DSP). Іноді оцифровується сигнал, який приймається не одним елементом решітки, а їхньою групою (решіткою), наприклад рядком плоских решіток зі скануванням променю по куту місця або стовпцем – при скануванні по азимуту. Таким чином, цифрова обробка інформації в таких системах починається безпосередньо в самій антенній системі. Метод дискретної цифрової обробки сигналів, прийнятих антенною решіткою, та технічна реалізація цих методів розроблені досить давно і розглянуті у великій кількості джерел, наприклад, [8].

У структурну схему решітки ЦАР (рис. 3.3) входить набір випромінювачів 1, аналого-цифрових модулів (АЦМ) 2 та цифрова система формування діаграм спрямованості (СФДН), а також генератори допоміжних сигналів та процесор керування променем ДС.

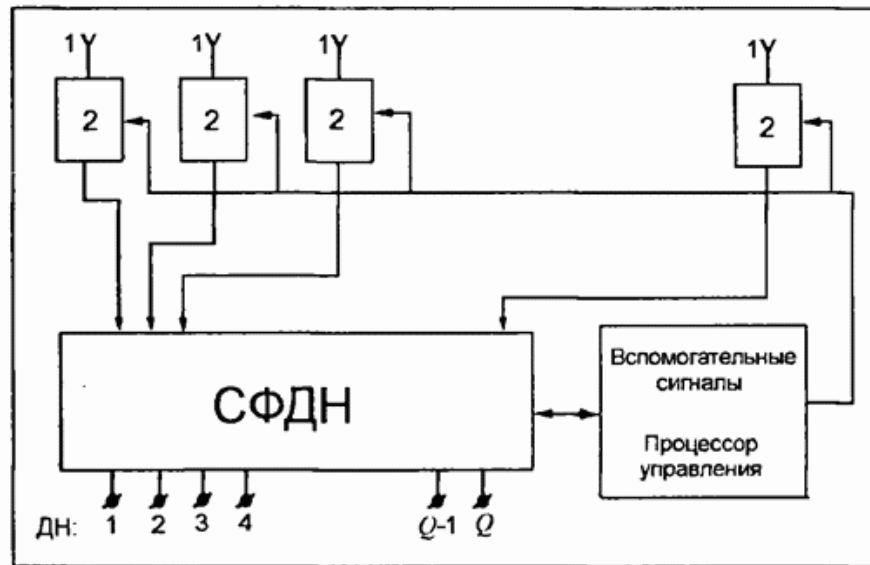


Рисунок 3.3 - Узагальнена структура ЦАР

У сучасних РЛС з виходу кожного АЦМ на СФДН подаються дві квадратури, що мають вигляд числових послідовностей. Вони визначають амплітуду та фазу коливання, яке прийнято вхідною антеною модуля.

Утворення діаграм спрямованості та управління їх становищем та формою здійснюється в СФДН. Архітектура СФДН як обчислювального пристрою визначається загальним алгоритмом обробки інформації, прийнятої антеною, а цей алгоритм, своєю чергою, залежить від вимог до РЛС. Основним завданням СФДН є дискретне перетворення Фур'є вхідних сигналів та формування ДН решітки. Тому алгоритм формування ДС є найважливішою частиною загального алгоритму системи. Крім того, в СФДН вирішується завдання зміни форми ДС як в області головного променя, так і в області бічних півюстках. Це необхідно, з одного боку, з метою адаптації РЛС до завдань, які змінюються у процесі роботи, з другого боку, для підстроювання станції до зміни зовнішньої обстановки. Характер цих змін і буде визначатиме вимоги до алгоритму, що реалізує адаптацію. З іншого

боку, зміна ДС може знадобитися у разі відхилення її форми від заданої форми під впливом нестабільностей, що виникають в апаратурі самої радіолокаційної системи. Щоб повернути ДС у вихідний потрібний стан, включають відповідний адаптивний алгоритм.

Функціонування схеми цифрового формування ДС (рис.3.3) зводиться до наступного. Прийнятий кожним випромінювачем радіолокаційний сигнал підсилюється, перетворюється за частотою, проходить смуговий фільтр і за допомогою АЦП перетворюється на цифрову послідовність. Формування ДС з числової послідовності можна провести трьома способами:

- пряме складання значень сигналів, прийнятих випромінювачами антенної решітки і відквантованих у певні моменти часу, у разі можливо формування діаграм спрямованості дискретно розташованих у просторі і закриття таким чином системою потрібної зони простору;

- складання між собою обчислених за допомогою перетворення Гільберта, пов'язаних прийнятим, значень інформаційних сигналів від випромінювачів у такі моменти часу, що забезпечують квазінеперервне переміщення ДС у просторі (між двома послідовними в часі моментами квантування);

- введення в числові послідовності випромінювачів фазових зруше і змін з наступним складанням одержуваних значень, відповідних одним і тим же моментам квантування у часі.

У всіх випадках можливе керування амплітудним розподілом поля шляхом множення значень сигналів випромінювачів на амплітудні коефіцієнти перед їх загальним складанням.

### 3.3 Захист РЛС від пасивних завад

Підвищені вимоги до рівня достовірності інформації, що надходить на обчислювальні комплекси автоматизованих систем управління АС УВС, потребують використання спеціальних методів захисту РЛС від перешкод.

Вплив перешкод проявляється у зменшенні ймовірності правильного виявлення, у підвищенні рівня хибних тривог, у зниженні точності визначення координат цілей станціями огляду повітряного простору.

Розрізняють перешкоди двох видів: шуми приймального пристрою РЛС та перешкоди, створювані зовнішніми джерелами.

Зовнішні перешкоди поділяються на активні та пасивні. До активних можна віднести коливання, які випромінюють сусідні радіотехнічні засоби, атмосферні та індустріальні перешкоди, шуми космічного простору; до пасивним-сигнали, відбиті від підстилаючої поверхні, місцевих предметів, метеоутворень, сигнали, розсіяня на розкиданих в атмосфері великої кількості дипольних відбивачів та спорадичні перешкоди.

До основних відмінностей цілей і перерахованих джерел перешкод можна віднести наступні:

1. Літаки, ракети та інші цілі, як правило, є точковими цілями, а маскувальні пасивні перешкоди - розподіленими;

2. Швидкість переміщення цілей в більшості випадків перевищує швидкість переміщення джерел пасивних перешкод ПП (дипольні відбивачі рухаються зі швидкістю вітру, а літаки зі швидкістю 900-2000км/годину і більше), що призводить до відмінності частоти, фази сигналів, відбитих від цілей і пасивних перешкод;

3. Джерела елементарних ПП в вигляді гідрометеорів мають форму близьку до сферичної.

Реальні цілі, в переважній більшості випадків мають форму, що не володіє властивістю центральної симетрії, а значить буде мати місце відмінність в поляризації відбитих сигналів від цілей і пасивних перешкод.

Перша відмінність використовується оператором РЛС при виявленні ПП і виборі сектора придушення ПП.

На основі другої відмінності в апаратурі захисту від ПП широко застосовується "когерентно-амплітудний метод селекції цілей що рухаються" (селекції рухомих цілей- СЦР), принцип якого оснований на ефекті Доплера

(зміні частоти сигналу відбитого від об'єкта, що рухається відносно частоти сигналу, випроміненого антеною РЛС).

РЛС випромінює сигнал:

$$U_1 = U_{m1} \sin(\omega_0 t + \varphi_0).$$

В приймальній пристрій надходить відбитий сигнал:

$$U_2 = U_{m2} \sin(\omega_0(t - t_3) + \varphi_0),$$

де  $U_1$  - миттєве значення випроміненого сигналу;

$U_2$  - миттєве значення прийнятого сигналу;

$U_{m1}$ ,  $U_{m2}$  - амплітуди випроміненого і прийнятого сигналів відповідно;

$\omega_0$  - несуча частота зондуючого сигналу;

$\varphi_0$  - початкова фаза зондуючого сигналу ЗС;

$t_3$  - час запізнення відбитого сигналу.

Якщо прийняти  $\varphi_0$  зондуючого сигналу незмінною, то фаза відбитого сигналу від нерухомого об'єкта буде незмінною і буде визначатися дальністю до об'єкту.

Якщо об'єкт нерухомий, то в цьому в цьому випадку фаза сигналу

$$\varphi_0 = \omega_0 t_3 = \omega_0 2D/C,$$

де  $D$  - дальність до об'єкта

$C$  - швидкість поширення енергії зондуючого сигналу.

Т.ч. від імпульсу до імпульсу зміни дальності ( $\Delta D$ ) немає, то і приріст фази ( $\Delta \varphi = 0$ ) буде рівним нулю.

Фаза, в залежності від дальності  $D$  до об'єкту може змінюватися від 0 до  $2\pi$ .

Якщо об'єкт рухається, то відстань до об'єкта, в цьому випадку, що володіє радіальною швидкістю ( $V_r$ ) від періоду до періоду повторювання імпульсів РЛС ( $T_n$ ) буде змінюватися на величину:

$$\Delta D = V_r T_n,$$

відповідно буде змінюватися і фаза відбитих сигналів

$$\Delta\varphi = \omega_0 \Delta D / C = \omega_0 2V_r T_n / C = 2\pi f_0 2V_r / CF_n,$$

$$\Delta\varphi = 4\pi f_0 V_r / CF_n = 4\pi V_r T_n / \lambda \quad \Delta\varphi = (2V_r / \lambda) 2\pi / F_n = 2\pi F_D / F_n,$$

де  $V_r$  - радіальна швидкість цілі;

$\lambda$  - довжина хвилі ЗС РЛС;

$f_0$  - несуча частота ЗС РЛС;

$T_n, F_n$  - період і частота повторення ЗС РЛС.

Тобто приріст фази буде визначатися частотою повторювання імпульсів РЛС  $F_n$ , несучою частотою  $f_0$ , і радіальною швидкістю об'єкту  $V_r$ .

Як правило розглядають зміну фази в зв'язку з тим, що частота Доплера по відношенню до несучої частоти ПП має малу величину. (Наприклад, при  $f_0=3000$ МГц;  $V_r=1200$ км/г;  $F_D=6,6$ кГц.)

Отже, використовуючи відмінність в фазі відбитого сигналу від рухомого і нерухомого об'єктів можлива СЦР і ефективне придушення ПП (використовуючи пристрій компенсації).

Інформацію про зміну фази сигналу відносно опорної напруги можна отримати використовуючи фазовий детектор ФД в приймальному пристрої, отже пристрій СЦР використовує вхідні сигнали приймального пристрою після фазового детектування прийнятих сигналів відбитих від цілей і перешкод.

Як правило в РЛС використовується два фазових детектора ФД, АФХ яких зсунуті на  $90^\circ$  ( $\pi/2$ ) для виключення втрати інформації.

Сигнал на виході ФД буде визначатися наступними виразами:

$$U_{\text{вихФД1}} = (U_c + U_{\text{оп}} \sin(\omega_0 t + \Omega_D t)) / 2,$$

$$U_{\text{вихФД2}} = (U_c + U_{\text{оп}} \cos(\omega_0 t + \Omega_D t)) / 2$$

де  $\varphi_0 = 0$ , початкова фаза зонduючого сигналу РЛС;

$\Omega_D = 2\pi F_D$  - частота Доплера;

$U_{\text{оп}}$  - амплітуда опорної напруги;

$U_c$  - амплітуда сигналу.

Тоді  $\Delta\varphi = \Omega_D t = 2\pi f_0 2V_r / CF_n$  при  $F_n = 800 \text{ Гц}$ ;  $f_0 = 2500 \text{ МГц}$ ;  $V_r = 6 \text{ м/с}$ ;  
 $\Delta\varphi = \pi/4 = 45^\circ$ .

Амплітуда ПП (МП) на виході ФД від імпульсу до імпульсу буде незмінна, тоді використовуючи віднімання (компенсацію), сигнали від корисних цілей (рухомих перешкод) будуть присутні на виході пристрою, а сигнали, відбиті МП, будуть придушенні.

Якість селекції цілей, що рухаються, буде тим вище, чим краще роздільна здатність станції за частотою. Отже, реалізація принципу селекції рухомих цілей можлива тільки при використанні таких зондувальних сигналів, що забезпечують одночасно високу роздільну здатність по дальності  $D$  і по швидкості  $V_r$ .

Розглянемо когерентну пачку вузькосмугових і широкосмугових одинарних радіоімпульсів. При умові, що тривалість пачки імпульсів перевищує часову протяжність джерела пасивних перешкод, маємо

$$\tau_{\text{пч}} = M_n T_n \gg \tau_n = 2\delta D_n / C.$$

При використанні в РЛС когерентної пачки роздільна здатність за дальністю  $D$  визначається шириною спектра одиночного імпульсу

$$\delta D_n = C/2\Pi_n = C/2\Delta f = C\tau_n/2,$$

і роздільною здатністю РЛС за частотою

$$\delta F = 1/M_n T_n,$$

де  $M_n$  - кількість імпульсів в пачці;

$T_n$  - період повторювання імпульсів РЛС.

Вимогам високої роздільної здатності по параметрах  $D$  і по  $F$  задовольняє також одиночний шумоподібний сигнал з великою тривалістю, але він має суттєві недоліки:

- наявність заважаючого фону, на виході фільтру стиснення:  $P_f = P_{\text{шп}} \tau_{\text{шп}} / 4\tau_n$  і визначає граничні можливості системи обробки по придушенню ПП.

- складності розв'язки передавального пристрою і приймального, т. я. необхідно використовувати роздільні антени на прийом і передачу.

Зондуючий сигнал у вигляді когерентної пачки також має недолік - неоднозначність вимірювання дальності  $D$ .

Оскільки вибирають з умови однозначного вимірювання  $D$ , то це призводить до появи "сліпих" швидкостей і до обмеження можливостей селекції (приймають спеціальні заходи для боротьби з сліпими швидкостями). Але в наш час існують ефективні методи послаблення відміченого недоліку, що і визначає широке використання когерентної пачки в сучасних РЛС.

В загальному випадку ЗС може уявляти і некогерентну пачку, але обов'язковою умовою є когерентність імпульсів в пачці на вході пристрою режекції ПП.

Енергетичний спектр пасивних перешкод при когерентному періодичному зондуєчому сигналі, як і спектр корисного сигналу, має зубчасту структуру з інтервалом між зубцями рівним частоті слідування зондувальних  $F_n$  імпульсів.

Мінімально можлива ширина окремих зубців спектру визначається тривалістю пачки

$$\delta F = 1/M_n T_n$$

Реально ширина зубців спектру перешкоди виявляється більшою внаслідок впливу ряду факторів.

Структурна схема системи захисту РЛС виявлення БПЛА від пасивних завад наведено на рис. 3.4

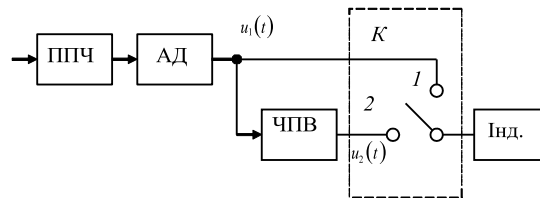


Рис. 3.4 Схема системи захисту від пасивних завад

### 3.4 Захист РЛС від активних завад

Поряд із прийняттям заходів по зниженню рівня бічних пелюсток ДС антени в сучасних РЛС виявлення БПЛА здійснюють адаптивне придушення завад кожного постановника завади шляхом компенсації цієї завади, що діє з бічного напрямку по бічній пелюстці. Діаграма спрямованості допоміжної антени перекриває бічні пелюстки основної антени (рис. 3.5), де  $\beta_a$  – напрямок максимуму основної антени.

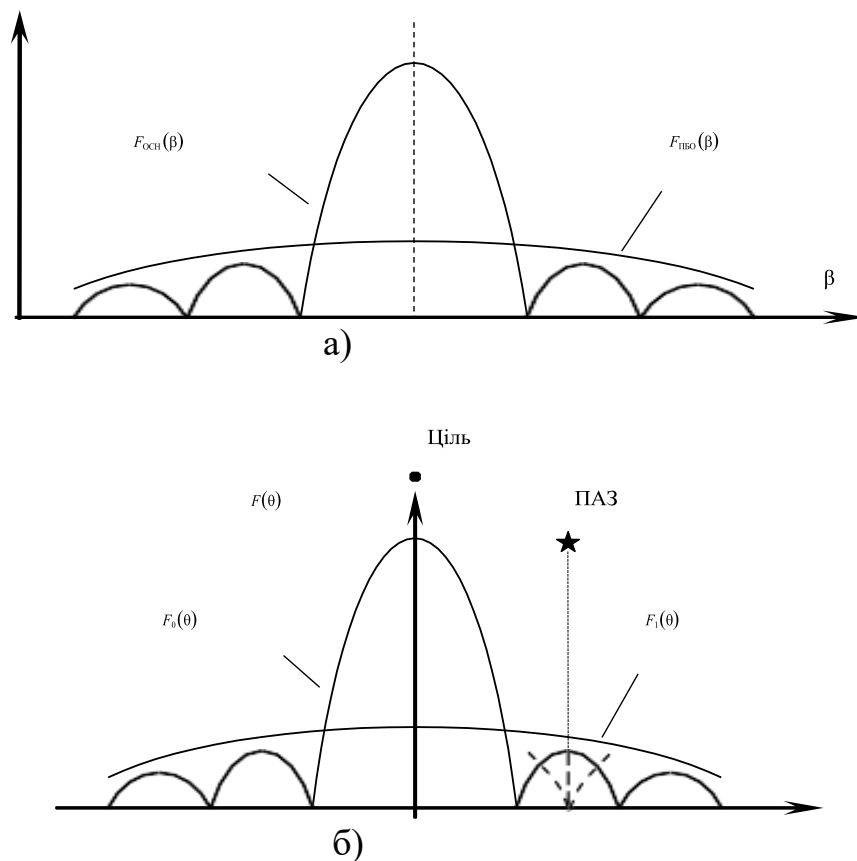


Рисунок 3.5 -Захист РЛС від активних завад: а) діаграми спрямованості основної і додаткової антени; б) придушення завади, яка діє з бокової пелюстки даграми спрямованості

В роботі використовується одноканальний квадратурний автокомпесатор активної завади, що надходить на вход приймача по бокової пелюстці ДС антени.

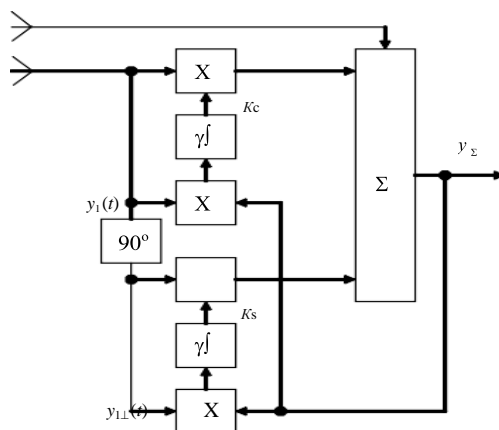


Рисунок 3.6 – Структурна схема одноканального квадратурного автокомпенсатора активних завод

При використанні просторових розбіжностей сигналу і завади завдання вирішується шляхом формування провалів у ДСА за допомогою компенсаційних антен в очікуваному напрямку прийому корисного сигналу, тобто в області головної пелюстки ДСА антени основного каналу (рис. 3.5).

## ВИСНОВКИ

Кваліфікаційна робота присвячена розробці структурної схеми радіолокаційної станції виявлення і спостереження БПЛА, визначенню основних енергетичних і неенергетичних параметрів зонduючого сигналу, а також розробці основних елементів структурної схеми.

Структурна схема побудована за принципом дії імпульсної радіолокаційної станції з великою шпаруватістю. В якості зонduючого сигналу використовується простий за структурою імпульсний сигнал у вигляді імпульсної послідовності з великою шпаруватістю. Антена формує косекансну за виглядом форму діаграму спрямованості. Вона має досить вузьку ширину в горизонтальній площині і досить широка в вертикальній або кутоместній площині.

Велике значення в роботі приділено захисту від різноманітних завад. В даний час радіолокаційні станції виявлення і спостереження БПЛА повинні бути дуже добре захищені від дії завад, які створює супротивник або зловмисник, тому що станції даного призначення часто працюють в конфліктній ситуації.

Захист від пасивних завад, які створюються гідрометеорами або піхвильовими диполями, які використовує супротивник, в станції реалізований у вигляді системи селекції рухомих цілій. Дана станція є когерентною.

Захист від дії активних маскуючих завад побудований на використанні одноканального квадратурного автокомпенсатора, якій адаптивно створює провал у діаграмі спрямованості антени радіолокаційної станції за допомогою допоміжної компенсуючої антени. Придушення завад за допомогою автокомпенсатора складає 30 Дб.

Додаткові можливості з захисту від активних і пасивних завад надає поляризаційна селекція, яка реалізується за допомогою адаптивного поляризаційного фільтру. Виділення корисного сигналу на фоні завад

здійснюються за допомогою узгодженого фільтру, який також надає додаткові можливості для виявлення сигналів БПЛА на фоні завад, які перевищують на практиці за рівнем корисний сигнал на десятки Дб.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Методичні вказівки до підготовки атестаційної роботи бакалавра для студентів усіх форм навчання спеціальності 171 «Електроніка» освітньої програми «Системи, технології і комп'ютерні засоби мультимедіа» / Упоряд.: В.М. Карташов.– Харків: ХНУРЕ, – 2020. – 36 с.
2. ДСТУ 3008-2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлення: Введ. 2015-22-06. – К.: Вид-во стандартів, 2016 – 26 с.
3. В.А.Сергієнко, В.М.Карташов. Можливості виявлення оперативно-тактичних та тактичних безпілотних літальних апаратів // Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті. Т. 1 : Конференція "Інформаційні радіотехнології та технічний захист інформації " : матеріали 25-го Міжнар. молодіж. форуму, 17–19 квіт. 2021 р. / М-во освіти і науки України, Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. – Харків : ХНУРЕ, 2021. С.49 – 50.
4. В.М. Карташов, В.Н. Олейников, С.А. Шейко. Особенности обнаружения и распознавания малых беспилотных летательных аппаратов // Радиотехника. 2018. Вып. 195 – с.235 – 242.
5. Kartashov V.M., Oleynikov V.N, Zubkov O.V., Korytsev I.V., Babkin S. I., Sheiko S.A., Kolendovskaya M.M. Spatial-temporal Processing of acoustic Signals of Unmanned Aerial Vehicles/ Telecommunications and Radio Engineering. –New York. – 2020. – Vol. 79, №9. – P.769-780.
6. V. Kartashov, V. Oleynikov , I. Koryttsev, S. Sheiko, O. Zubkov, S. Babkin. Processing of Wide Band Acoustic Signals During Detection of Unmanned Aerial Vehicles // 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW). Kharkiv, Ukraine, September 21 - 25, 2020. Volume 1 on 2020 IEEE 12th International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT). pp. 35-39.
7. V. Kartashov, V. Oleynikov, O. Zubkov, S. Sheiko. Optical detection of unmanned air vehicles on a video stream in a real-time // The Fourth International

Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo'2019), 9–13 September 2019, Odessa, Ukraine, 4 p.

8. I. Koryttsev, S. Sheiko, V. Kartashov, O. Zubkov, V. Oleynikov, I. Selieznov, M. Anohin. Practical Aspects of Range Determination and Tracking of Small Drones by Their Video Observation // 2020 International Scientific-Practical Conference. Problems of Infocommunications. Science and Technology. Kharkiv, Ukraine. October 6-9, 2020. – 5 p.

9. И.В. Корытцев, С.А. Шейко, В.М. Карташов, О.В. Зубков, В.Н. Олейников, С.И. Бабкин, И.С. Селезнев. Обработка сигналов при пеленгации и определении дальности до среднеразмерных БПЛА в радиолокационном диапазоне // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2020. – Вып. 202. – С. 125 – 134.

10. В.М. Карташов, И.В. Корытцев, С.А. Шейко, В.Н. Олейников, О.В. Зубков, С.И. Бабкин. Оптико-электронные методы обнаружения воздушных 82 объектов и измерения их координат // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2020. – Вып. 202. – С. 153 – 159.

11. U. Jayamohan, "Not Your Grandfather's ADC: RF Sampling ADCs Offer Advantages," 2015.

12. "RF Sampling S-Band Radar Receivers," Texas Instruments Design, 2016.

13. J. G. Proakis and D. K. Manolakis, "Digital Signal Processing: Principles, Algorithms and Application," 4th Edition, Pearson, 2006.

14. "Mixed-Signal and DSP Design Techniques," Analog Devices, 2002.

15. Цифровая обработка сигналов. Практическое руководство для инженеров и научных работников. – М.: Додэка-XXI, 2012, – 720с.

16. "Model-Based DSP Design Using System Generator, UG897," Xilinx, 2016.

17. "Power Analysis and Optimization, UG907," Xilinx, 2015.

18. Радиотехнические системы: Учебник для вузов / Ю. М. Казаринов [и др.]; Под ред. Ю. М. Казаринова. — М.: Академия, 2008. — 590 с.:

19. В.Н. Олейников, О.В. Зубков, В.М. Карташов, И.В. Корытцев, С.И. Бабкин, С.А.Шейко, И.С. Селезнев. Экспериментальная оценка эффективности алгоритмов пеленгования беспилотных летательных аппаратов по акустическому излучению. Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2019. – Вып. 199. – С. 29 – 37. 81

20. <https://www.radartutorial.eu/html/sm03.ru.html>

21. [https://learn.ztu.edu.ua/pluginfile.php/93446/mod\\_resource/content/1/%D0%A2%D0%A0-19-2-A%D0%B8%D0%A1\\_%D0%98C-T2-6.pdf](https://learn.ztu.edu.ua/pluginfile.php/93446/mod_resource/content/1/%D0%A2%D0%A0-19-2-A%D0%B8%D0%A1_%D0%98C-T2-6.pdf)