

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)

Пасивні методи визначення місцезнаходження БПЛА  
за акустичним випромінюванням.  
(тема)

Виконав:  
студент 2 курсу, групи МІМ-22-1  
Красношاپка Т.Ю.  
(прізвище, ініціали)

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

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Медіаінженерія  
(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Олейніков В.М.  
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри \_\_\_\_\_ Володимир КАРТАШОВ  
(підпис)

2023 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

Освітня програма Медіаінженерія  
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студенту Красношапці Тарасу Юрійовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Пасивні методи визначення місцезнаходження БПЛА за акустичним випромінюванням.

затверджена наказом по університету від " 20 " 10 2023 р. № 1224 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 10.01.2024 р.

3. Вихідні дані до роботи Провести аналіз методів виділення акустичних сигналів на фоні завад, аналіз алгоритмів обробки сигналів мікрофонними решітками. Теоретично обґрунтувати алгоритм обробки сигналу БПЛА мікрофонними решітками у часовій області, що максимізує відношення сигнал/перешкода на виході. Провести модельний експеримент із виділення сигналу БПЛА із перешкод багатопозиційною акустичною системою мікрофонів. Провести дослідження ефективності роботи реалізованого алгоритму за умов, наближених до реальних.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі \_\_\_\_\_

Вступ

1 Аналіз задач виявлення та пеленгації БПЛА, а також підходів до їх вирішення.

2 Теоретичний аналіз методів пеленгації малих БПЛА по акустичному випромінюванню.

3 Експериментальне дослідження системи визначення координат БПЛА

за акустичними сигналами.

Висновки

Перелік посилань

Додатки

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

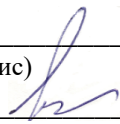
1. Методи виявлення БПЛА. (1 слайд).
2. Постановка задачі. (1 слайд).
3. Характерні ознаки звуку БПЛА (1 слайд).
4. Задача виявлення (1 слайд).
5. Пеленгація широкосмугових джерел (1 слайд).
6. Вдосконалені методи пеленгації (1 слайд).
7. Обробка сигналів мікрофонного масиву (1 слайд).
8. Умови модельного експерименту (1 слайд).
9. Конфігурація мікрофонних решіток (1 слайд).
10. Вибір кращої конфігурації (2 слайда).
11. Сигнали в системі обробки (1 слайд).
12. Оцінка просторової роздільної здатності. (1 слайд)
13. Визначення координат джерел.
14. Розрахунок оптимальних вагових коефіцієнтів.
15. Висновки.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітичний огляд літератури	01.09.23–27.09.23	
2	Теоретичне обґрунтування методу	28.09.23–11.10.23	
3	Програмна реалізація експерименту	12.10.23–10.11.23	
4	Визначення координат джерел	11.11.23–03.12.23	
5	Розрахунок вагових коефіцієнтів	04.12.23–17.12.23	
6	Графічна частина роботи	18.12.23–17.12.23	
7	Перевірка керівником	18.12.23–30.12.23	
8	Перевірка на академічний плагіат	02.01.24–05.01.24	
9	Перевірка завідувачем кафедри, рецензування	06.01.24–09.01.24	

Дата видачі завдання 20.10.2023 р.

Студент  Тарас КРАСНОШАПКА

Керівник роботи  Володимир ОЛЕЙНІКОВ

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи: 62 сторінки, 26 рисунків, 6 таблиць, 27 джерел.

АКУСТИЧНИЙ СИГНАЛ, БПЛА, ВЕКТОР СИГНАЛУ, ВИЯВЛЕННЯ, МІКРОФОННА РЕШІТКА, КОРЕЛЯЦІЙНА МАТРИЦЯ, МАТРИЦЯ ПЕРЕШКОД, СИГНАЛ-ПЕРЕШКОДА

Об'єкт дослідження – процеси приймання і обробки акустичних сигналів БПЛА просторово рознесеним мікрофонним масивом задля вирішення задачі визначення просторових координат БПЛА.

Мета роботи – аналіз пасивних акустичних методів виявлення і пеленгації БПЛА, виявлення найбільш ефективних методів і напрямів вирішення цих задач.

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

В кваліфікаційній роботі проведено аналіз методів виділення акустичних сигналів, аналіз алгоритмів обробки сигналів мікрофонними решітками. Теоретично обґрунтовано алгоритм обробки сигналу БПЛА мікрофонними решітками у часовій області, що максимізує відношення сигнал/перешкода на виході. Проведено модельний експеримент із виділення сигналу БПЛА із перешкод багатопозиційною акустичною системою мікрофонів. Проведено дослідження ефективності роботи реалізованого алгоритму за умов, наближених до реальних.

## ABSTRACT

Explanatory note to the qualification work: 62 pages, 26 figures, 6 tables, 27 sources.

ACOUSTIC SIGNAL, UAV, SIGNAL VECTOR, DETECTION, MICROPHONE ARRAY, CORRELATION MATRIX, OBSTRUCTION MATRIX, OBSTRUCTION SIGNAL

The object of research is the processes of receiving and processing acoustic signals of UAVs by a spatially distributed microphone array in order to solve the problem of determining the spatial coordinates of UAVs.

The purpose of the work is to analyze passive acoustic methods of detection and direction finding of UAVs, to identify the most effective methods and directions for solving these problems.

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

In the qualification work, the analysis of acoustic signal isolation methods, the analysis of signal processing algorithms with microphone arrays was carried out. The algorithm for UAV signal processing with microphone arrays in the time domain, which maximizes the signal/obstacle ratio at the output, is theoretically substantiated. A model experiment was conducted on the separation of the UAV signal from obstacles by a multi-position acoustic system of microphones. A study of the effectiveness of the implemented algorithm under conditions close to real ones was conducted.

## ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів.....	8
Вступ.....	9
1 АНАЛІЗ ЗАДАЧ ВИЯВЛЕННЯ ТА ПЕЛЕНГАЦІЇ БПЛА, А ТАКОЖ ПІДХОДІВ ДО ЇХ ВИРІШЕННЯ.....	11
1.1. Класифікація та особливості застосування БПЛА.....	11
1.2 Рушійна установка БПЛА.....	13
1.3 Принцип акустичного виявлення БПЛА.....	14
1.4 Поширення акустичних хвиль в атмосфері.....	18
1.5 Потенційна дальність пасивного акустичного виявлення БПЛА...20	
1.6 Висновки по розділу 1.....	26
2 ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПЕЛЕНГАЦІЇ МАЛИХ БПЛА ПО АКУСТИЧНОМУ ВИПРОМІНЕННЮ.....	28
2.1 Пеленгація ширококутових джерел звуку.....	28
2.2 Метод керованої потужності відгуку з фазовим перетворенням....30	
2.3 Метод пеленгації на основі середньоарифметичного нормування некогерентної комбінації частот.....	31
2.4 Застосування методів просторової обробки для одночасного вирішення задач виявлення і пеленгації.....	34
2.6 Висновки по розділу 2.....	36
3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ БПЛА ЗА АКУСТИЧНИМИ СИГНАЛАМИ.....	38
3.1 Опис експерименту.....	38
3.2 Вплив конфігурації розташування мікрофонів на точність пеленгу і виявлення сигналів БПЛА.....	39
3.3 Визначення роздільної здатності системи при вирішенні задачі пеленгації.....	45

3.4 Підбір оптимальних амплітудних коефіцієнтів.....	49
3.5 Ефективність виділення сигналу БПЛА на тлі інтенсивних завад.....	51
3.6 Висновки по розділу 3.....	52
Висновки.....	54
Перелік посилань.....	59
ДОДАТКИ.....	63
Додаток А. Графічний матеріал.....	64
Додаток Б. Відомість кваліфікаційної роботи.....	80

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,  
СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

- АРФ – адаптивний решітчастий фільтр;  
 АФМР – адаптивна фазована мікрофонна решітка;  
 БПЛА – безпілотний літальний апарат;  
 ДВЗ – двигун внутрішнього згорання;  
 ПЧФ – просторово-часовий фільтр;  
 СКВ – середньоквадратичне відхилення;  
 СЩП – спектральна щільність потужності;  
 Acoustic Sensor Network – мережа акустичних датчиків;  
 BLDC – безколекторні двигуни;  
 SNR – відношення сигнал/шум;  
 $a$  і  $b$  – різниці координат джерела і мікрофона  
 $A$  і  $A_{fi}$  – масштабні множники;  
 $F_s$  – частота дискретизації;  
 $p$  – загальне число точок простору сканування;  
 $s$  – виділений сигнал БПЛА на фоні акустичних завад;  
 $s_0$  – істинний сигнал БПЛА;  
 $r_i$  – відстань від джерела корисного сигналу до  $i$ -ого приймача  
 $r_{fi}$  – відстань від  $f$ -ого джерела перешкоди до  $i$ -ого приймача.  
 $t$  – номери відліків сигналів;  
 $T$  – довжина реалізації сигналу (кількість семплів);  
 $\tau_{opt}$  – оптимальний час затримки;  
 $\vec{\tau}$  – матриця затримок;  
 $c$  – швидкість звуку;  
 $x', y'$  – координати точки фокусування системи;  
 $x_0, y_0$  – фіксовані координати точкового джерела сигналу.

## ВСТУП

З появою середніх та малих безпілотних літальних апаратів (БПЛА) завдання протидії їх застосуванню в особливо контрольованих зонах суттєво актуалізувалися. Починаючи з середини 2000-х років у засобах масової інформації стали регулярно з'являтися повідомлення про небезпечне використання малих БПЛА в районах аеропортів, а з середини 2010-х – про застосування малих БПЛА для ведення несанкціонованого спостереження важливих об'єктів, проведення терактів та диверсій, перенесення заборонених вантажів (зброї, наркотиків) та широкому використанні БПЛА у військовій справі.

У зв'язку з цим у країнах розпочалася активна наукова розробка цього напрямку досліджень. При цьому дана проблематика є відносно новою, оскільки найраніша з робіт з тематики протидії БПЛА відноситься до 2008 р., а початок активних наукових публікацій з цієї тематики відноситься до 2016-2017 р.р. У результаті до 2020 р. у англomовній науковій пресі було введено відносно усталені терміни, а також визначено основні напрямки досліджень у цій предметній галузі:

- «противодія БПЛА» - використовуються такі терміни як «C-UAV», «CUAV», "C-UAVs", "CUAVs" (Counter Unmanned Aerial Vehicles);
- "Системи протидії БПЛА" - використовуються такі терміни як "C-UAS", "CUAS" (Counter Unmanned Aircraft Systems), "C-UAV system", "CUAV-system", "AUDS" (Anti-UAV Defense System), Counter-Drone Systems;
- "технології протидії БПЛА" - використовуються такі терміни як "Anti-Drone Technologies" та "Counter-UAVs Technologies".

Проблема виявлення і протидії БПЛА, особливо, малим БПЛА, є надзвичайно складною, багатогранною, і досі ефективно не вирішеною. Складність та багатоаспектність проблематики розробки справді ефективних систем протидії БПЛА призводить до появи комплексованих рішень, де поєднуються радіочастотні, радіолокаційні, оптико-електронні та акустичні

методи. При цьому разом з завданням виявлення ставиться також завдання визначення просторових координат БПЛА задля подальшої ефективної протидії.

Метою даної роботи аналіз пасивних акустичних методів виявлення і пеленгації БПЛА, виявлення найбільш ефективних методів і напрямів вирішення цих задач.

# 1 АНАЛІЗ ЗАДАЧ ВИЯВЛЕННЯ ТА ПЕЛЕНГАЦІЇ БПЛА, А ТАКОЖ ПІДХОДІВ ДО ЇХ ВИРІШЕННЯ

## 1.1. Класифікація та особливості застосування БПЛА

Безпілотний літальний апарат (БПЛА) – літальний апарат літакового або вертолітного типу без екіпажу на борту, політ якого здійснюється або заздалегідь закладеною на борт програмі, або шляхом віддаленого управління каналами зв'язку.

На сучасному етапі розвитку БПЛА призначені для вирішення широкого спектра завдань: спостереження (розвідки), завдання ударів, транспортування вантажів, цілевказівки іншим засобам ураження, ретрансляції даних і т.д. при їх дистанційному управлінні оператором або шляхом автономних дій за заздалегідь закладеною програмою.

При розгляді задач виявлення і пеленгацій БПЛА слід класифікувати їх за масогабаритними характеристиками, висотою польоту, радіусом дії, а також за застосуванням [1]. Класифікація БПЛА наведена у табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Класифікація БПЛА

Клас БПЛА	Категорія	Позначення	Назва	Злітна маса, кг	Радіус дії, км	Висота, км	Час польоту, год
1	2	3	4	5	6	7	8
Малі	I	η	Нано	до 0,25	до 1	0,1	<1
		μ	Мікро	до 5	до 10	3	1
		Mini	Міні	до 25	10	3	<4
Легкі	II	CR	Ближньої дії класу 1	25-50	25-70	3	2-4
			Ближньої дії класу 2	50-150	50-100	3	<6
Середні	III	SR	Малої дальності	до 200	до 150	4	6-8
		MR	Середньої дальності	до 500	200	5	10-12
	IV	MRE	Середньої дальності з більшою тривалістю польоту	500	500	8	10-18
		LADP	Маловисотні великої дальності	до 250	>250	до 4	1,5-2

Продовження табл. 1.1

1	2	3	4	5	6	7	8
Важкі	V	LALE	Маловисотний великої дальності і тривалості польоту	до 250	>500	4	18
	VI	MALE	Середньовисотний великої дальності і тривалості польоту	до 1000	>1000	8	24
Бойові	VII	HALE	Висотний великої дальності і тривалості польоту	до 2500	>4000	20	>24
	VIII	UCAV	Безпілотні ударні	>1000	>500	12	1,5-2

Зважаючи на велике значення саме швидкості БПЛА при його виявленні і пеленгації, в роботі [2] пропонується розрізняти наступні типи БПЛА в залежності від їх функціональної швидкості польоту:

- малошвидкісні БПЛА – зі швидкостями польоту до 200 км/год;
- середньошвидкісні БПЛА – зі швидкостями польоту від 150 до 400 км/год;
- швидкісні БПЛА – зі швидкостями польоту від 350 до 800 км/год.

Проведений у роботах [21, 44, 47-49] аналіз показав, що найбільш складними щодо протидії є малі БПЛА – малогабаритні та малошвидкісні. До додаткових факторів, які перешкоджають ефективному протидії таким БПЛА відносяться:

- використання високоманеврених (наприклад, «змійка») та «рваних» (з періодичним зависанням або різким зниженням швидкості) режимів польоту;
- використання в конструкції БПЛА пластикових і композиційних матеріалів, що слабо відбивають електромагнітне випромінювання;
- використання для управління БПЛА не виділених радіоканалів на основі окремих засобів зв'язку, а вже зв'язкової інфраструктури мобільних операторів зв'язку та точок доступу Wi-Fi.

До малих БПЛА можна віднести (табл. 1.1):

- нано БПЛА – масою менше 0,25 кг, тривалістю польоту менше 1 год,

з висотою польоту до 300 м, радіусом дії до 1 км;

- мікро БПЛА – масою до 5 кг, тривалістю польоту близько 1 год, з висотою польоту до 3 км, радіусом дії до 10 км;

- міні БПЛА – масою до 25 кг, тривалістю польоту менше 4 год, з висотою польоту до 3 км, радіусом дії до 40 км.

Відповідно до кількості одночасно застосовуваних БПЛА слід розрізняти [3]:

- БПЛА поодинокого застосування;
- БПЛА групового застосування.

Відповідно до принципу польоту БПЛА слід розрізняти [3]:

- БПЛА літакового типу;
- БПЛА вертолітного типу.

Для пасивного акустичного виявлення і пеленгації БПЛА вирішальне значення має шум рушійної установки.

## 1.2 Рушійна установка БПЛА

Як правило, рухова установка малих БПЛА літакового типу, являє собою гвинтовий (поршневий) або турбогвинтовий (газотурбінний) двигун, який у загальних принципах відповідає рушійній установці пілотованих літальних апаратів [4,5].

Разом з тим, останнім часом як БПЛА набули широкого поширення малі БПЛА вертолітного типу, так звані «мультикоптери», «квадрокоптери», «дрони». Для даних БПЛА характерно використання установки принципово іншого роду – на основі використання 4, 6 або більшої кількості двигунів.

В якості двигунів малих БПЛА вертолітного типу застосовують двигуни двох типів [4,5]:

- колекторні – обмотки знаходяться на роторі (що обертається);
- безколекторні – обмотки знаходяться на статорі (нерухомій частині).

Безколекторні двигуни (BLDC-двигуни) не використовують щітки та

колектори і за наявності хороших підшипників вимагають мінімального технічного обслуговування. Ротор BLDC-двигунів виготовляється з постійного магніту і не має обмоток. Статор містить обмотки, змінне поле яких призводить до обертання ротора [4,5].

Управління двигунами здійснюється за допомогою завдання напрямку і швидкості обертання гвинтів через електронні регулятори швидкості ESC (Electric Speed Controller), що підключаються до них. На вхід регуляторів подається напруга з акумулятора і сигнали керуючі з мікроконтролера, на вихід регулятор віддає напругу для приводу [4,5].

Збільшенням числа обертів гвинтів в одиницю часу задається підйом, зменшенням – опускання. Збільшення обертів двох бічних гвинтів задає крен, а передніх або задніх – тангаж з подальшим рухом убік або підйомом/зниженням по косій відповідно, а гвинтів, розташованих на одній з косих осей, – розворот апарата вліво або вправо (рискання). Для стабілізації руху одна пара гвинтів завжди обертається за годинниковою стрілкою, інша проти (рис. 1.1), компенсуючи цим крутний момент [4,5].

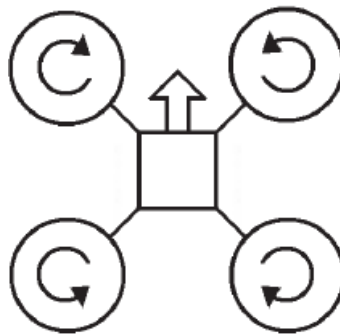


Рисунок 1.1 – Обертання гвинтів малих БПЛА вертолітного типу [4]

### 1.3 Принцип акустичного виявлення БПЛА

Акустична помітність є додатковим важливим фактором, який дозволяє підвищити достовірність виявлення БПЛА в умовах, за яких оптичні, радіочастотні та радіолокаційні засоби не можуть забезпечити необхідного рівня ймовірності його виявлення.

БПЛА в польоті генерує акустичні (звукові) хвилі, що приймаються акустичними мікрофонами, які перетворюють акустичний тиск у електричний сигнал (рис.1.2).

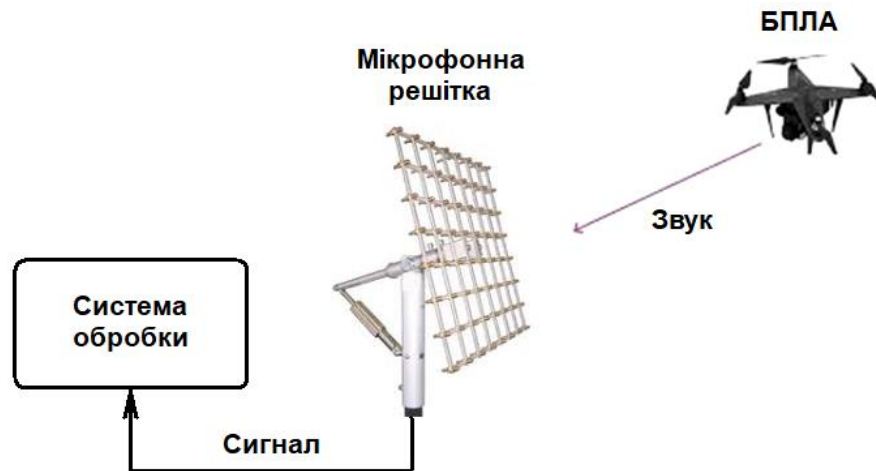


Рисунок 1.2 – Принцип акустичного виявлення БПЛА

Джерелами звукових хвиль, як правило, є рухові установки і лопаті повітряних гвинтів. Частота генерованого звуку кратна частоті вихлопу гарячих газів, кількості та частоті обертання лопат повітряного гвинта. Інтенсивність звуку залежить від швидкості обтікання лопатей [6,7].

Розглянемо БПЛА літакового типу з електродвигуном. Основним джерелом шуму в ньому є повітряний гвинт. Акустичний шум утворюється, в основному, в результаті силової взаємодії лопатей гвинта з навколишнім середовищем у процесі створення тяги і при витісненні повітря з фіксованого об'єму середовища лопатями. До точки спостереження будуть доходити імпульси, що викликані проходженням кожної лопаті, що збурює повітря.

Ці збурення відбуваються стільки разів, скільки лопатей  $M$  має гвинт. Оскільки шум обертання має визначену частоту, то про шум гвинта можна говорити як про звук певного тембру, тобто в ньому будуть існувати гармоніки [6,7]. Таким чином, акустичний сигнал БПЛА є сумою гармонік з частотами, що кратні частоті обертання ротора двигуна  $F$ .

Амплітуди гармонік, як правило, зменшуються зі збільшенням частоти. У загальному випадку амплітуди гармонік є випадковими величинами. Фази

гармонік також є випадковими величинами, що розподілені за рівномірним законом. Математична модель акустичного випромінювання повітряного гвинта БПЛА може бути подана у такому вигляді [8]:

$$s(t) = \sum_{i=1}^I A_i \cos(2\pi MF \cdot i \cdot t + \varphi_i), \quad (1.1)$$

де  $I$  – кількість гармонік зареєстрованого акустичного випромінювання;

$A_i$  – амплітуда  $i$ -ої гармоніки;

$\varphi_i$  – фаза  $i$ -ої гармоніки.

На коротких інтервалах часу (десятки мілісекунд) такі сигнали можна розглядати як стаціонарні і для їх аналізу використовувати методи спектрального оцінювання.

В разі БПЛА мультикоптерного типу, загальний акустичний сигнал складатиметься з сигналів окремих гвинтів, тому що вони працюватимуть в різних режимах [8]:

$$s(t) = \sum_{n=1}^N s_n(t) = \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I A_{ni} \cos(2\pi MF_n \cdot i \cdot t + \varphi_{ni}), \quad (1.2)$$

де  $N$  – кількість гвинтів мультикоптера.

Головним джерелом шуму БПЛА з двигуном внутрішнього згорання (ДВЗ) є безпосередньо двигун. Повітряний гвинт при цьому є другорядним джерелом шумів. Модель його акустичного сигналу можна записати у наступному вигляді [8]:

$$\begin{aligned} s(t) &= s_{ДВЗ}(t) + s_{гв}(t) = \\ &= \sum_{k=1}^K A_k \cos(2\pi MF \cdot k \cdot t + \varphi_k) + \sum_{i=1}^I A_i \cos(2\pi MF \cdot i \cdot t + \varphi_i), \end{aligned} \quad (1.3)$$

де  $K$  – кількість гармонік акустичного випромінювання ДВЗ.

Для дрону з двотактним ДВЗ і гвинтом з двома лопатями ( $M=2$ ), парні гармоніки акустичного випромінення матимуть амплітуду більше, ніж сусідні непарні гармоніки [8]. Якщо дрон має чотирьохтактний ДВЗ, то гармоніки, кратні 4-м, матимуть амплітуди більше за амплітуди сусідніх гармонік. Це явище пояснюється додаванням потужностей гармонік акустичного випромінення двигуна та повітряного гвинта. Перша гармоніка зазвичай має найбільшу амплітуду [8].

На рис.1.3 показано приклад спектру (а) і спектрограми (б) акустичного випромінення моноплану Skywalker Falcon 1340 mm EPO Flying Wing. На рис.1.4 показано приклад спектру (а) і спектрограми (б) акустичного випромінення квадрокоптера DJI Phantom 2 [9].

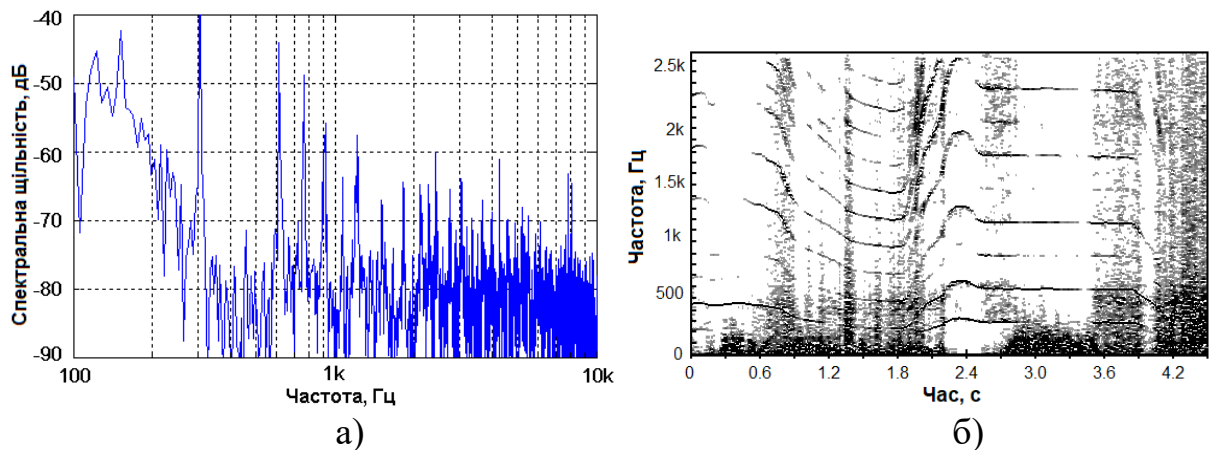


Рисунок 1.3 – Рисунок 1.4 – Спектр (а) і спектрограма (б) акустичного випромінення моноплану Skywalker Falcon

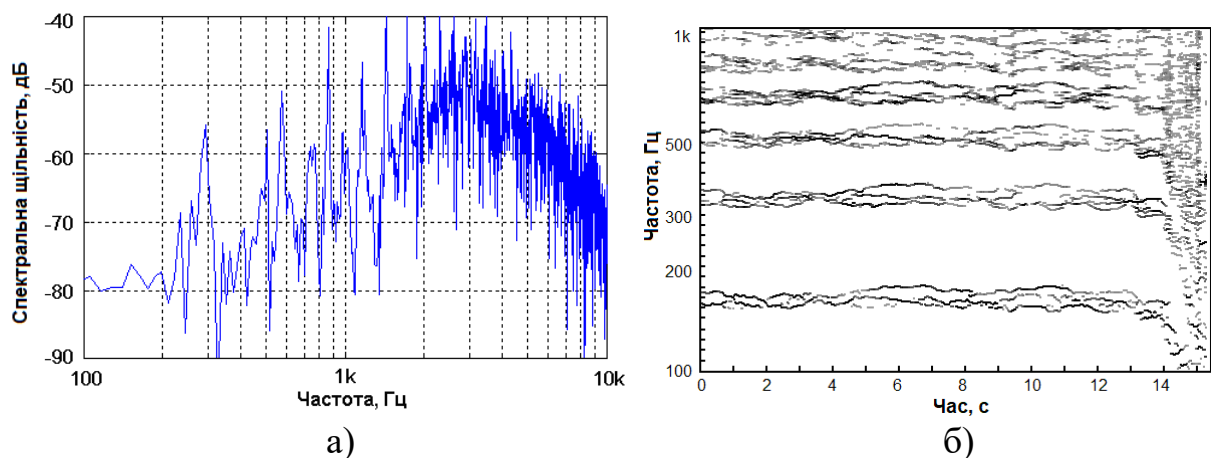


Рисунок 1.4 – Спектр (а) і спектрограма (б) акустичного випромінення квадрокоптера DJI Phantom 2

Спектр звукового сигналу моноплану (рис. 1.3) має у своєму складі велику кількість гармонік аж до частот 8...10 кГц. Спектральні лінії, на відміну від квадрокоптера, вузькі, що пояснюється наявністю одного двигуна в силовій установці.

Динаміка роботи системи компенсації вітрових збурень квадрокоптера добре помітна в частотно-часовій області. На рис. 1.4 у режимі активного вітру спектральні максимуми поділяються, їх кількість відповідає числу двигунів апарата. Останні 2 с на спектрограмі відповідають етапу посадки квадрокоптера зі зменшенням частоти обертання двигунів.

#### 1.4 Поширення акустичних хвиль в атмосфері

Дальність виявлення об'єктів при пасивній акустичній локації суттєвим чином залежить від стану атмосфери. На рівень прийнятого сигналу впливає поглинання енергії акустичної хвилі атмосферним газом.

Поглинання звуку – це явище незворотного перетворення енергії звукової хвилі на інший вид енергії, насамперед в енергію теплового руху частинок середовища. Поглинання звуку у повітрі супроводжується зменшенням звукового тиску. Нехай звук поширюється вздовж напрямку  $r$  від джерела. Тоді залежно від відстані  $r$  щодо джерела звуку амплітуда звукового тиску зменшується за експоненціальним законом [10]:

$$p_{зв}(r) = p_0 \cdot e^{-\delta \cdot r}, \quad (1.4)$$

де  $p_0$  – початковий звуковий тиск при  $r = 0$ ,

$\delta$  – коефіцієнт поглинання звуку.

Фізичний сенс коефіцієнта  $\delta$  полягає в тому, що коефіцієнт поглинання чисельно дорівнює величині, зворотній відстані, на якому звуковий тиск зменшується в  $e = 2,71$  разів [10]:

$$\frac{p_0}{p_{зв \max}} = e^1 = 2,71 \approx 3, \quad \delta \cdot r = 1, \quad \delta = \frac{1}{r}. \quad (1.5)$$

Одиниця вимірювання  $[\delta]=1/\text{м}$ . Оскільки сила звуку (інтенсивність) пропорційна квадрату звукового тиску, цей закон поглинання звуку можна записати як [10]:

$$I(r) = I_0 \cdot e^{-2\delta \cdot r}. \quad (1.6)$$

де  $I_0$  – сила звуку (інтенсивність) поблизу джерела при  $r = 0$ .

Графіки залежності  $p_{зв}(r)$  та  $I(r)$  представлені на рис. 1.5 [10].

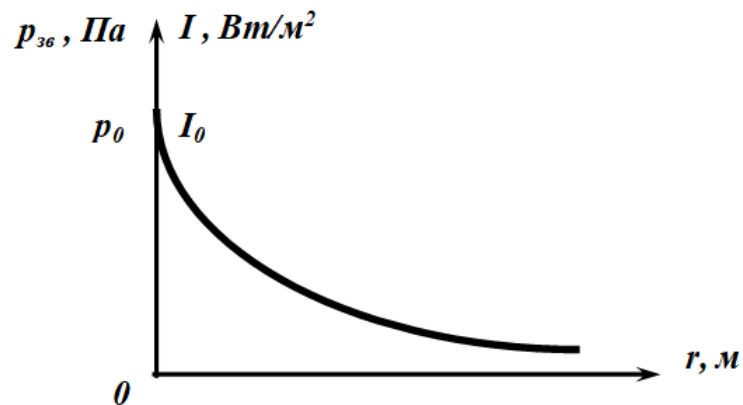


Рисунок 1.5 – Графіки залежності звукового тиску і сили звуку від відстані

З формули (1.6) випливає, що для рівня сили звуку справедливе рівняння [10]:

$$\ln\{I(r)\} = \ln\{I_0 \cdot e^{-2\delta \cdot r}\} = \ln\{I_0\} + (-2\delta \cdot r). \quad (1.7)$$

Тоді

$$2\delta \cdot r = \ln\{I_0\} - \ln\{I(r)\} = \ln\left(\frac{I_0}{I(r)}\right), \quad \delta = \frac{1}{2r} \ln\left(\frac{I_0}{I(r)}\right), \quad (1.8)$$

або

$$\delta = \frac{\lg e}{2r} \lg\left(\frac{I_0}{I(r)}\right) = \frac{1,15}{r} \lg\left(\frac{I_0}{I(r)}\right). \quad (1.9)$$

Отже, коефіцієнт поглинання можна обчислювати в децибелах на метр (дБ/м).

Поглинання звуку також можна характеризувати коефіцієнтом втрат, який дорівнює [10]:

$$\varepsilon = \frac{\delta \cdot \lambda}{\pi}, \quad (1.10)$$

де  $\lambda$  – довжина звукової хвилі,

$\delta \cdot \lambda$  – логарифмічний коефіцієнт загасання звуку.

Перша (класична) теорія поглинання звуку була створена Стоксом і заснована на врахуванні впливу в'язкості (внутрішнього тертя між шарами середовища) і теплопровідності (вирівнювання температури між шарами середовища). Спрощена формула Стокса має вигляд [10]:

$$\delta = 53 \cdot \frac{\eta}{\rho_0 \cdot \upsilon} \cdot \gamma^2, \quad (1.11)$$

де  $\eta$  – в'язкість повітря,

$\gamma$  – коефіцієнт Пуассона,

$\rho_0$  – густина повітря при 0 °С,

$\upsilon$  – швидкість звуку в повітрі.

Для звичайних умов ця формула набуде вигляду:

$$\delta = 4,24 \cdot 10^{-11} \cdot \gamma^2. \quad (1.12)$$

Проте формула Стокса (1.11) чи (1.12) справедлива лише одноатомних газів, атоми яких мають три поступальні ступеня свободи, тобто при  $\gamma = 1,67$ .

Для газів з 2, 3 або багатоатомних молекул значення  $\gamma$  суттєво більше, тому що звук збуджує обертальні та коливальні ступені свободи молекул. Для таких газів (в т. ч. для повітря) більш точною є формула [10]

$$\delta = 1,84 \cdot 10^{-11} \cdot \sqrt{\frac{T}{T_H}} \cdot \frac{p_H}{p} \cdot \gamma^2, \quad (1.13)$$

де  $T_H = 273,15$  К – абсолютна температура танення льоду,

$p_H = 1.013.105$  Па – нормальний атмосферний тиск,

$T$  і  $p$  – реальні (вимірювані) температура та атмосферний тиск повітря,  
 $\gamma=1,4$  для двоатомних газів,  $\gamma=1,29$  для трьох- та багатоатомних газів.

Акустичний сигнал БПЛА в середньому займає смугу частот до 10 кГц. Теоретичні розрахунки поглинання в цьому діапазоні дають відчутні розбіжності з результатами практичних вимірювань [10].

У зв'язку із цим положенням для визначення залежності поглинання звуку в атмосфері в зазначеному діапазоні частот часто користуються експериментальними даними, отримані С.М. Харрісом [11].

На основі даних Харріса в [12] отримано модель у вигляді апроксимуючої функції в області частот 100...5000 Гц:

$$\delta = a \cdot F^{1,99} + b, \quad (1.14)$$

де  $a = 23,5 \cdot 10^{-11}$ ,  $b = 1,4 \cdot 10^{-3}$ .

На рис. 1.6 наведені графіки моделі (1.14) та експерименту.

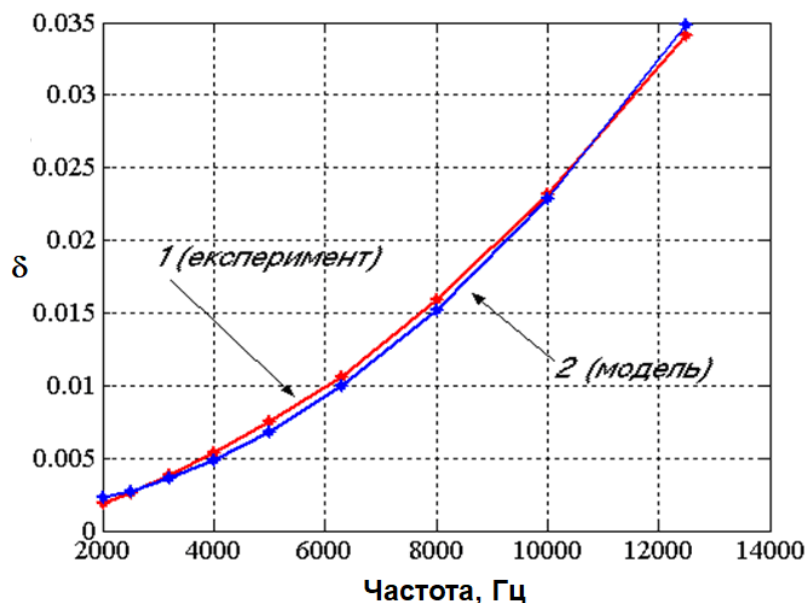


Рисунок 1.6 – Залежність коефіцієнту поглинання звуку в атмосфері від частоти

Аналітичний вираз (1.14) і наведені залежності дозволяють урахувати в моделі акустичного сигналу БПЛА відносні ослаблення частотних складових спектра акустичного сигналу БПЛА при поглинанні звукової хвилі в реальній атмосфері.

### 1.5 Потенційна дальність пасивного акустичного виявлення БПЛА

Акустичний шум БПЛА для задачі виявлення є корисним сигналом. При цьому фонові акустичні шуми і тепловий шум приймального пристрою є перешкодами.

Потенційною дальністю виявлення вважають гранично максимальне значення дальності  $r_{nom}$ , при якій у місці розташування приймача звуку (мікрофону) досягається порогове значення сигнал-шум [12]:

$$q_{\min} = \frac{\sigma_c}{\sigma_{ш}} \geq 3,16 \text{ (10 дБ)}. \quad (1.15)$$

де  $\sigma_c$  – середньоквадратична напруга на виході мікрофона,

$\sigma_{ш}$  – середньоквадратична напруга теплового шуму приймача.

У виразі (1.15) вважається, що фоновий акустичний шум на вході приймального пристрою відсутній ( $\sigma_{\phi_{ш}} = 0$ ). Тобто, мінімальний рівень звукового тиску сигналу, який може бути виявлений приймачем, визначається чутливістю мікрофона  $s_M$  і значенням  $\sigma_{ш}$ , тобто [12]:

$$P_{\min} = \frac{\sigma_{ш}}{s_M}, \text{ [Па]}. \quad (1.16)$$

З урахуванням порогу (1.15), отримаємо:

$$p_{\min} = \frac{0,316 \cdot \sigma_{ш}}{s_M}, \quad (1.17)$$

або

$$L_{\min} = 20 \lg \frac{p_{\min}}{p_0} = 20 \lg \frac{0,316 \cdot \sigma_{ш}}{2 \cdot 10^{-5} \cdot s_M} = 84 \lg \frac{\sigma_{ш}}{s_M} \quad (1.18)$$

у рівнях звукового тиску в дБ відносно порога чутливості  $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$  Па.

Звуковий тиск біля приймача  $p$  визначається звуковим тиском біля джерела  $p_{\max}$  і функцією ослаблення звуку  $K(r)$  при поширенні акустичної хвилі в повітряному середовищі. Функція  $K(r)$  має вигляд [12]

$$K(r) = 20 \lg \left( \frac{r_0 + r}{r_0} \right), \quad (1.19)$$

де  $r_0$  – початкова точка траси поблизу від БПЛА;

$r$  – відстань відносно початкової точки.

Тоді залежність рівня звукового тиску від відстані можна описати виразом [12]

$$L(r) = L_0 - K(r) = L_0 - 20 \lg \left( \frac{r_0 + r}{r_0} \right), \quad (1.20)$$

або при  $r \geq r_0$

$$L(r) \approx L_0 - 20 \lg \left( \frac{r}{r_0} \right), \quad (1.21)$$

де  $L_0$  – рівень звукового тиску, виміряний поблизу БПЛА.

З виразу (1.21) слідує, що

$$\frac{L_0 - L(r)}{20} = \lg \left( \frac{r}{r_0} \right). \quad (1.22)$$

Нехай треба мати мінімальний рівень звуку в точці приймання  $L_{\min}$ . Тоді максимальна відстань виявлення [12]

$$r_{\max} = r_0 \cdot 10^{\left(\frac{L_0 - L(r)}{20}\right)}. \quad (1.23)$$

Залежність згідно (1.21) можна побудувати, якщо відомі значення  $L_0$  та  $r_0$ . Ці дані наводяться у описаннях реальних вимірювань шуму БПЛА, наприклад в [13]. У табл. 1.2 показані числові значення вимірюної в [13] залежності звукового тиску від відстані, а на рис. 1.7 дана залежність наведена у вигляді графіка.

Таблиця 1.2 – Значення звукового тиску  $L(r)$ , дБ

$r$ , м	5	10	15	20	25	30	Фон
$L(r)$ , дБ	57,9	55	54,4	50	49,25	45,9	43,5

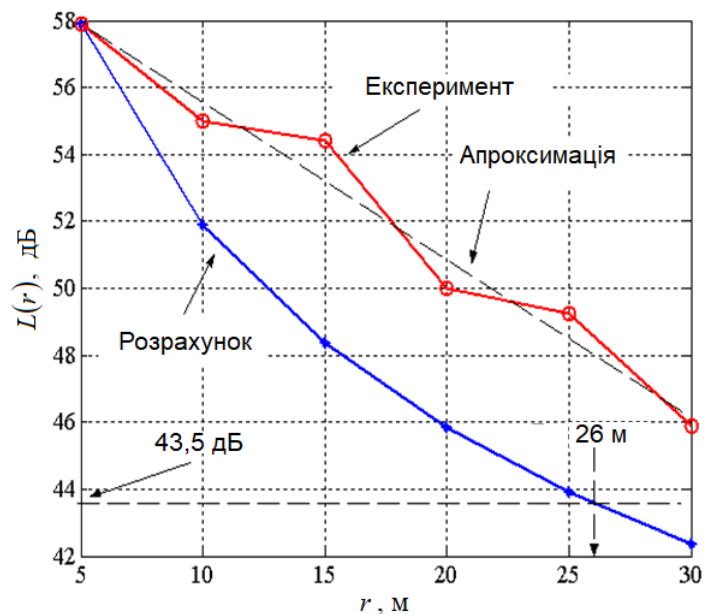


Рисунок 1.7 – Експериментальна і теоретична залежності рівнів звукового тиску залежно від відстані

У наведеному випадку маємо рівень фонового шуму 43,5 дБ, і як наслідок, дальність виявлення обмежена  $r_{\max} = 26$  м.

Тому для потенційної дальності визначимо шуми приймальної установки. Дисперсія теплового шуму:

$$\sigma_{ш}^2 = 4kTR\Delta T, \quad (1.24)$$

де  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  – постійна Больцмана,

$T$  – температура  $K^o$ ,

$R$  – активний опір вхідного кола прийомного пристрою.

При вирішенні завдання виявлення БПЛА, смугу частот його шумового сигналу доцільно обмежити інтервалом  $\Delta F = 100 \dots 5000$  Гц.

При  $R = 1200 \text{ Ом}$ ,  $T = 293^o \text{ К}$ ,  $\Delta F = 100 \dots 5000$  Гц з (1.24) одержимо  $\sigma_{ш}^2 = 1,15 \cdot 10^{-13} \text{ В}^2$  або  $\sigma_{ш} = 0,34 \cdot 10^{-6} \text{ В}$ . Звідки, з урахуванням умови (1.15), одержимо  $\sigma_c = 1,1 \cdot 10^{-6} \text{ В}$ .

Використовуючи конденсаторний мікрофон (наприклад, Superflux ЕСМ-999) з чутливістю  $s_m = 14 \text{ мВ/Па}$  одержимо величину  $p_{min} = 5,37 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$ , що відповідає рівню звукового тиску  $L_{min} = 8,6 \text{ дБ}$ .

З виразу (1.23)

$$r_{max} = 10 \cdot 10^{\left(\frac{55-8,6}{20}\right)} = 1460 \text{ м.} \quad (1.25)$$

В результаті розрахунку згідно (1.23) одержимо  $D_{qcmax} = 1459 \text{ м}$ .

На рис.1.8 наведений графік дистанційної залежності, що ілюструє залежність ослаблення акустичного шуму БПЛА залежно від відстані між БПЛА й прийомним пристроєм, розрахований відповідно до виразу (1.23).

Дана залежність показує, що потенційна дальність  $r_{max}$  виявлення істотно залежить від рівня фонового шуму. Наприклад, при  $L_N = 20 \text{ дБ}$  максимальна дальність складе  $r_{max} = 400 \text{ м}$ , але при  $L_N = 40 \text{ дБ}$  величина  $r_{max} < 50 \text{ м}$ .

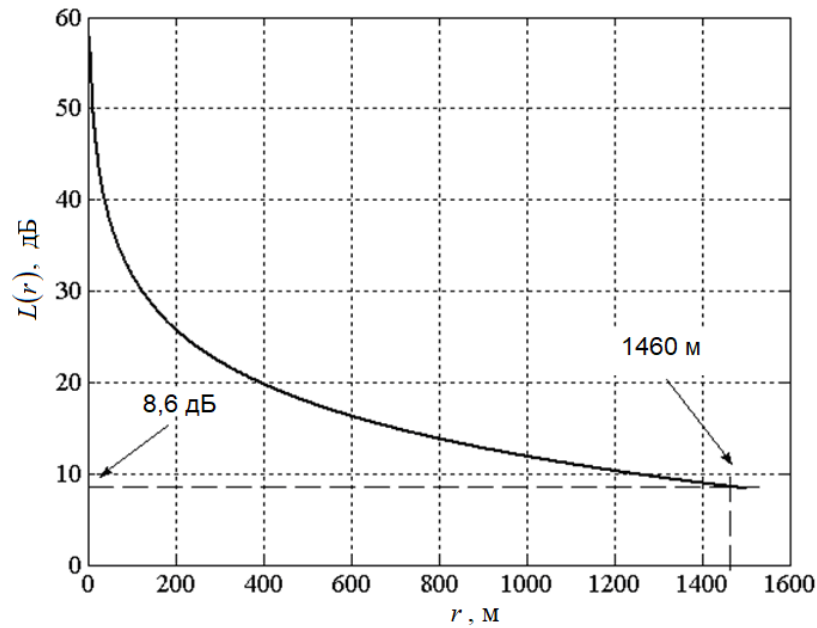


Рисунок 1.8 – Залежність рівня акустичного шуму малого БПЛА від відстані

Тобто ефективність використання пасивної акустичної системи виявлення істотно обмежується зовнішніми фоновими акустичними шумами.

## 1.6 Висновки по розділу 1

1. Проблема виявлення БПЛА, особливо, малих БПЛА, є надзвичайно складною, багатогранною, і досі ефективно не вирішеною. Складність та багатоаспектність проблеми призводить до появи комплексованих рішень, де поєднуються радіочастотні, радіолокаційні, оптико-електронні та акустичні методи. При цьому разом з завданням виявлення ставиться також завдання визначення просторових координат БПЛА задля подальшої ефективної протидії.

2. Характерною ознакою акустичних шумів БПЛА є їх періодична структура і лінійчатий спектр. Найбільш поширеними ознаками для систем ідентифікації акустичних сигналів БПЛА є частота основного тону, наявність та амплітуди гармонічних складових, ширина спектральних ліній.

У БПЛА з ДВЗ суттєво відрізняються амплітуди парних і непарних

гармонік. У коптерів спектральні лінії шуму ширші або зовсім розділяються, що пояснюється несинхронною роботою двигунів.

3. Перед вирішенням задачі пеленгації потрібно виявити БПЛА. Основною умовою надійного виявлення є забезпечення відношення сигнал-шум вище порогового.

Проведені оцінки показують, що потенційна дальність виявлення малих БПЛА, обмежена шумами приймача, достатньо велика і складає приблизно 1,5 км. Однак зовнішні акустичні шуми сильно обмежують дальність дії системи до декількох десятків метрів.

В такому випадку можуть бути більш ефективними рішення на основі просторово-розподілених акустичних систем.

4. Кваліфікаційна робота виконується на кафедрі МІРЕС ХНУРЕ. На кафедрі проводяться дослідження в таких наукових областях, як виявлення та розпізнавання БПЛА за результатами акустичного спостереження [14-17], створення систем зондування атмосфери за допомогою акустичних хвиль [18-21]. Отже, дослідження в даній роботі пов'язані і ґрунтуються на традиційному напрямку робіт колективу і студентів кафедри МІРЕС.

## 2 ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПЕЛЕНГАЦІЇ МАЛИХ БПЛА ПО АКУСТИЧНОМУ ВИПРОМІНЕННЮ

### 2.1 Пеленгація широкосмугових джерел звуку

Специфіка систем пасивного акустичного виявлення БПЛА полягає в тому, що пеленгація об'єктів здійснюється в них на фоні розподілених у просторі перешкод, за малого часу взаємодії.

Часто застосовують взаємкореляційний метод визначення кута пеленга джерела сигналу в акустичній системі [22, 23]. Акустичні сигнали, отримані від БПЛА, являють собою широкосмугові випадкові процеси. Приймальна частина акустичного пеленгатора складається із двох мікрофонів, рознесених на відстань  $d$  (рис.2.1).

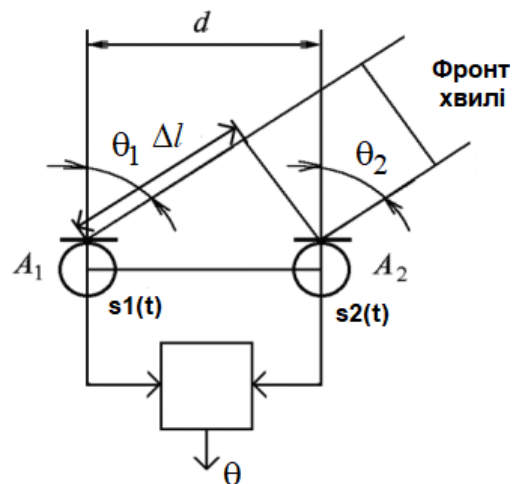


Рисунок 2.1 – Функціональна схема двоканального пеленгатора

Зробимо такі припущення [23]:

- амплітудні центри антен  $A_1$  і  $A_2$  збігаються;
- фазові центри рознесені відстань  $d$  (рис. 2.1);
- локалізовані джерела випромінювання перебувають у нескінченності, тобто  $\theta_1 = \theta_2$ ;

– сигнали  $s_1(t)$  та  $s_2(t)$  розглядаються на інтервалі  $T$  прийняття рішення, на якому їх можна вважати стаціонарними.

На основі першого припущення спектральні густини даних сигналів вважатимуться збігаються, тобто [23]

$$S_1(\omega) = S_2(\omega) = S(\omega). \quad (2.1)$$

Вважаючи сигнали та перешкоди некорельованими, кореляційний метод аналізу фактично можна використовувати для встановлення кута пеленгу  $\theta$  джерела енергії, рівномірно випромінюваної у всі боки, шляхом визначення часу запізнення  $\tau$  прийнятих коливань на виході.

Якщо швидкість  $c$  поширення звукової енергії відома, то запізнення  $\tau$  між вихідними сигналами можна розглядати як кут  $\theta$  падіння хвилі, що відповідає співвідношенню [23]

$$\theta = \arcsin\left(\frac{c\tau}{d}\right). \quad (2.2)$$

Запізнення  $\tau$  двох вихідних сигналів  $s_1(t)$  та  $s_2(t)$ , викликаних одним джерелом, можна обчислити, використовуючи як взаємкореляційну функцію, так і взаємну спектральну щільність [23].

Функція взаємної кореляції сигналів двох мікрофонів, розміщених у різних точках простору, визначається як [23]

$$R_{12}(\tau) = \sum_{n=1}^N \Phi \cdot A_1(n) \cdot A_2^*(n) \cdot \exp(j2\pi f\tau), \quad (2.3)$$

де –  $A_1(n), A_2^*(n)$  комплексні амплітуди сигналів 1-го і 2-го мікрофонів;

символ  $*$  – позначає комплексне спряження;

$n=0 \dots N$  – номер відліку ДПФ;

$\tau$  – часова затримка сигналів двох рознесених у просторі каналів;

$\Phi$  – вагова функція фазового перетворення РНАТ (Phase Transform – РНАТ) для відбілювання сигналу, яка позитивно позначається на стійкості даного алгоритму до реверберацій та шумів, і визначається як [23]

$$\Phi = \frac{1}{|A_1(n) \cdot A_2^*(n)|}. \quad (2.4)$$

Оцінка часової затримка сигналів визначається за найбільшим піком функції взаємної кореляції [23]

$$\tilde{\tau} = \arg\{\max[R_{12}(\tau)]\}. \quad (2.5)$$

Тоді оцінка напрямку приходу корисного сигналу [23]

$$\tilde{\theta} = \arcsin\left(\frac{c \arg\{\max[R_{12}(\tilde{\tau})]\}}{d}\right). \quad (2.6)$$

Описаний алгоритм пеленгації називають методом узагальненої крос-кореляції з фазовим перетворенням (GCC-РНАТ – General Cross Correlation - Phase Transform).

Існує інший метод, заснований на формуванні променя, а саме метод керованої потужності відгуку з фазовим перетворенням (SRP-РНАТ – Steered-Response Power with Phase Transform).

## 2.2 Метод керованої потужності відгуку з фазовим перетворенням

Метод SRP-РНАТ можна розглядати як розвиток методу GCC-РНАТ [23]. Він заснований на обчисленні та попарному додаванні вихідних даних GCC-РНАТ у сітку простору сканування (рис.2.2). Пошук розташування джерела працює перебором просторових точок на сітці досліджуваної області.

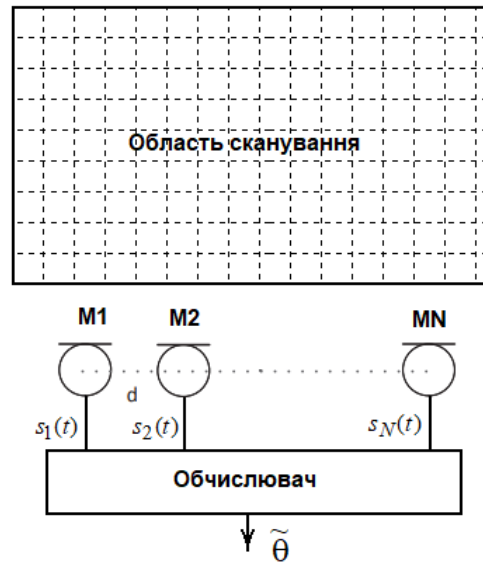


Рисунок 2.2 – Функціональна схема багатоканального пеленгатора зі скануванням простору

Потужність керованого відгуку можна обчислити за виразом [24]

$$P(\theta) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=i+1}^N R_{ij}[\tau(\theta)]. \quad (2.7)$$

Оцінка напрямку приходу сигналу відповідатиме максимуму потужності керованого відгуку

$$\tilde{\theta} = \arg \{ \max P(\theta) \}. \quad (2.5)$$

Метод SRP-РНАТ показує стабільну роботу в умовах реверберації, що досягається завдяки використанню функції фазового нормування РНАТ.

2.3 Метод пеленгації на основі середньоарифметичного нормування некогерентної комбінації частот

В даному методі на відміну від SRP-РНАТ застосовується нормування до амплітуд просторового спектру (NAM – Normalized Arithmetic Mean).

Некогерентна модель усереднення базується на нормалізованому середньому арифметичну (NAM), що спрямовано на зменшення впливу неправильної оцінки потужності відгуку через зміну відношення сигнал-шум на кожній частоті. Мета полягає в тому, щоб отримати спектр SRP, в якому кожна частота дає однаковий внесок у кінцевий результат. Це досягається за допомогою нормалізації спектра потужності [25]:

$$P_{NAM}(\theta) = \sum_{f=0}^{L-1} \frac{P(f, \theta)}{\max[P(f, \theta)]}. \quad (2.6)$$

де  $P(f, \theta)$  – є вектором спектральної потужності для всього бажаного напрямку  $\theta$ .

На рис.1.26 представлено порівняння функцій  $P_{NAM}(\theta)$  при наявності двох сигналів БПЛА, що діють з напрямів  $25^\circ$  та  $32^\circ$ . ПС отримані за допомогою алгоритмів SRP, SRP-PHAT та SRP-NAM при відношенні сигнал-шум 20 дБ [25].

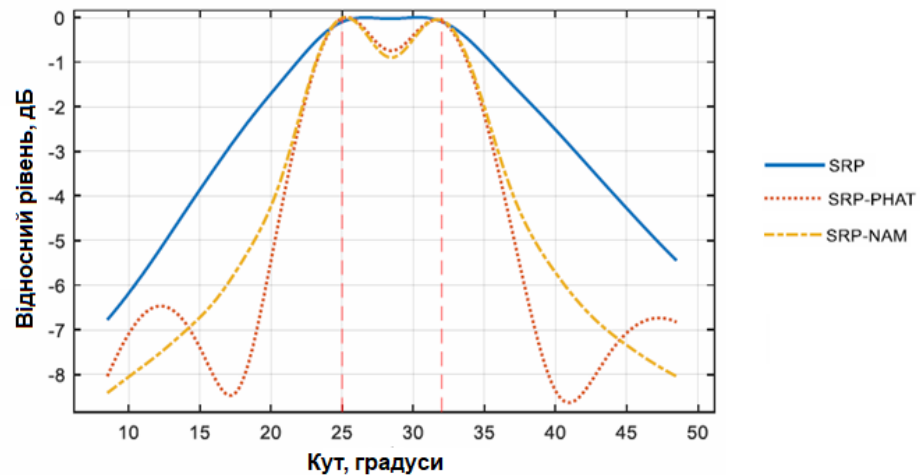


Рисунок 2.3 – Просторові спектри, отримані за допомогою алгоритмів SRP, SRP-PHAT та SRP-NAM, при впливі на вхід системи двох сигналів БПЛА, що діють із напрямків  $25^\circ$  та  $32^\circ$

Порівняння точності визначення куту приходу звукових сигналів методами SRP, SRP-PHAT і SRP-NAM проводилося в [25] шляхом

знаходження середньоквадратичного відхилення  $RMS$  між оцінкою кута і істинним кутом як функції від відношення сигнал-шум, за формулою

$$RMS = \frac{1}{K} \sqrt{\sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K (\tilde{\theta}_j - \theta_j)^2}. \quad (2.7)$$

де  $J$  – кількість джерел випромінювання,

$K$  – кількість випробувань.

На рис. 2.4 показано графік  $RMS$ , отриманий в [25] при кількості випробувань  $K=100$  у процесі моделювання, у діапазоні відношення сигнал-шум від -20 до 20 дБ для двох акустичних сигналів БПЛА, працюючих з напрямів  $25^\circ$  і  $35^\circ$ . Число елементів мікрофонної решітки – 30, смуга частот пропускання до 4 кГц.

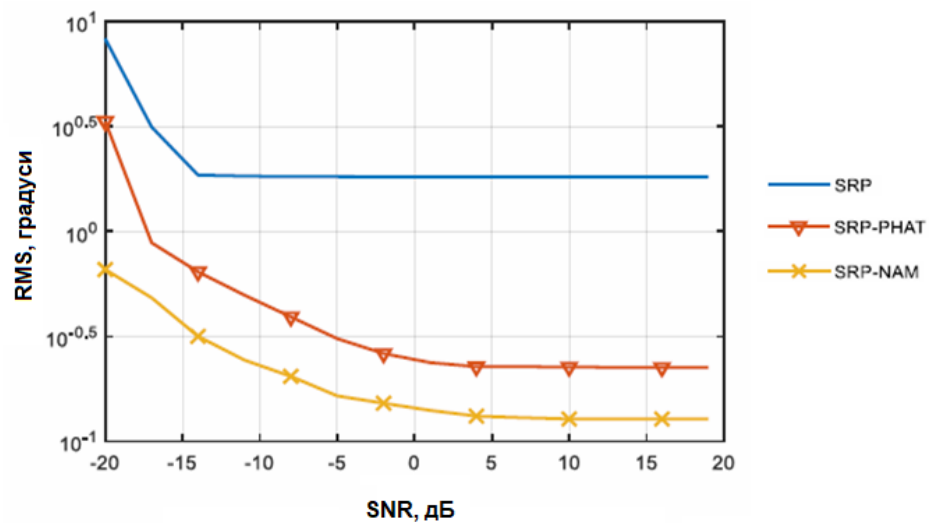


Рисунок 2.4 – Графік  $RMS$  визначення кутових координат джерела звуку в залежності від відношення сигнал-шум методами SRP, SRP-PHAT та SRP-NAM

Як випливає з рис.2.4, метод SRP-PHAT розрізняє джерела сигналів на відміну від класичного методу SRP, але при цьому на виході системи є хибні піки. Метод SRP-NAM вирішує проблему з хибними піками, забезпечуючи при цьому певне покращення роздільної здатності.

Метод SRP-NAM має найкращу точність оцінки та більшу стійкість до шумів. Метод SRP-PHAT трохи програє у зазначених показниках, а метод SRP має суттєво гірші якісні характеристики в порівнянні з першими двома методами.

#### 2.4 Застосування методів просторової обробки для одночасного вирішення задач виявлення і пеленгації

З аналізу розглянутих методів стає зрозумілим, що задачі виявлення і пеленгації БПЛА не слід розділяти. Просторова обробка звукових сигналів мікрофонної решітки дозволяє одночасно підвищити відношення сигнал-шум і отримати оцінку координат конкретного джерела.

На рис.2.5. показана структурна схема просторової обробки сигналів БПЛА, прийнятих мікрофонною решіткою.

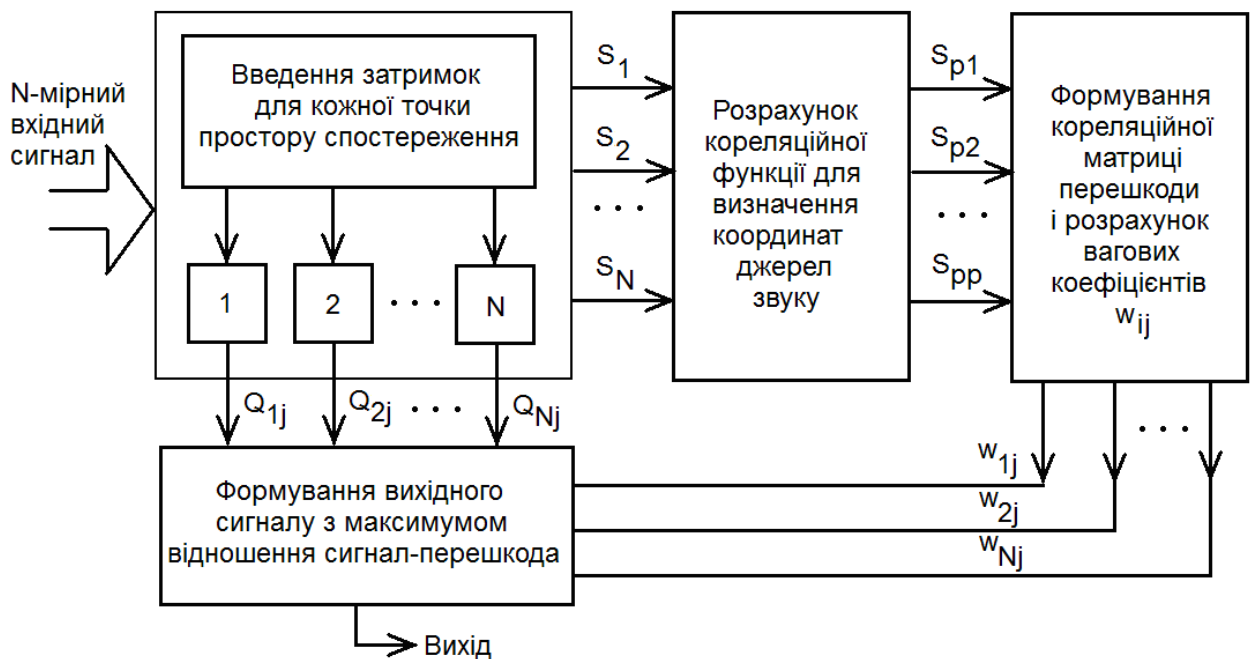


Рисунок 2.5 – Структурна схема методу обробки сигналів дронів мікрофонною решіткою у часовій області

Особливість схеми полягає у введенні в канали певних затримок у часі. Затримки залежать від просторових координат розташування джерела сигналу, тобто на першому етапі йде сканування простору.

Після виділення всіх джерел звуку за максимумами кореляційної матриці йде етап підвищення відношення сигнал-шум за рахунок обчислення оптимальних на інтервалах стаціонарності вагових коефіцієнтів мікрофонних каналів.

І тільки на наступному етапі можна вирішувати задачу розпізнавання сигналу (БПЛА-завада), а у разі позитивного рішення, координата даного джерела вже буде відомою.

На рис.2.6 показано послідовність дій при виявленні, розпізнаванні і пеленгації БПЛА.

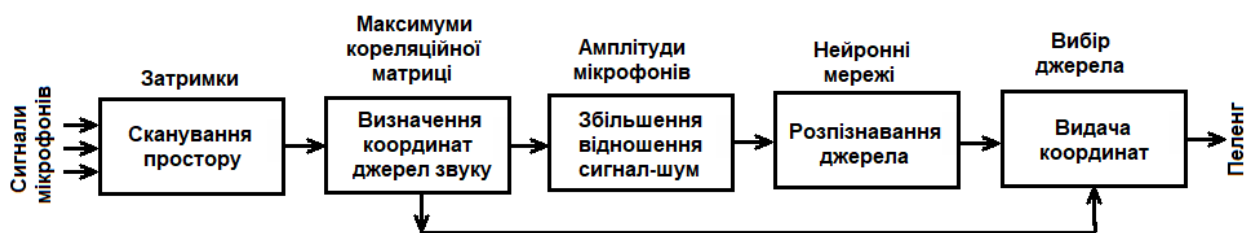


Рисунок 2.6 –Алгоритм дій при виявленні, розпізнаванні і пеленгації БПЛА

У блоці затримок у кожен мікрофонний канал для кожної точки простору сканування вводиться потрібна часова затримка і отримуються  $J$  вихідних сигналів для усіх точок. Блок розрахунку функції кореляції з  $J$  сигналів відбирає  $P$  сигналів максимальної потужності. По координатах обраних максимумів відбувається розрахунок координат усіх джерел, що діють одночасно.

Подальша обробка спрямована на збільшення відношення сигнал-шум обраних  $P$  джерел. Максимізація відношення сигнал-шум кожного виділеного сигналу досягається адаптивним обчисленням оптимальних на інтервалі стаціонарності  $T$  вагових коефіцієнтів кожного каналу. За кожний інтервал  $T$  обчислення оновлюються.

Вихідний сигнал багатопозиційної системи із  $N$  мікрофонів для заданої точки зони спостереження є суперпозицією сигналів усіх приймачів. При описаній просторовій обробці потужність обраного звукового сигналу зростає в  $N^2$  разів за рахунок синхронного прийому, а потужність

некорельованих шумів за рахунок взаємного накладання – у  $N$  разів. Отже, відношення сигнал-шум має збільшитися у  $N$  разів.

За рахунок когерентного сумування потужність корисного сигналу збільшується. Тому, в точках зони спостереження з координатами акустичного джерела знаходяться максимуми функції просторової кореляції. Тому, розрахунок функції просторової кореляції дозволяє розрахувати координати джерел акустичних сигналів.

Даний підхід можна застосовувати для паралельної схеми акустичного спостереження за великим числом джерел звуку, розташованих у зоні спостереження.

## 2.5 Висновки по розділу 2

1. Всі поширені методи пеленгації широкосмугових джерел звуку так чи інакше побудовані на визначенні часових затримок між сигналами дистанційно рознесених мікрофонів. При цьому вважають сигнали та перешкоди некорельованими на інтервалі спостереження.

2. Для визначення часових затримок використовують кореляційний метод аналізу. Максимум функції взаємної кореляції сигналів мікрофонів вказує на часову затримку між ними, з чого обчислюється азимут при відомій відстані між мікрофонами і швидкості поширення звуку.

3. Різні модифікації методів пеленгації джерел звуку мають за мету зменшити вплив ревербераційних завад і фонових шумів. Вони побудовані на врахуванні не тільки затримок, але на відмінності фазового і частотного спектрів сигналів корисного джерела і завад. З цих міркувань розроблені методи SRP-PHAT і SRP-NAM.

4. З аналізу розглянутих методів стає зрозумілим, що задачі виявлення і пеленгації БПЛА не слід розділяти. Просторова обробка звукових сигналів мікрофонної решітки дозволяє одночасно підвищити відношення сигнал-шум і отримати оцінку координат конкретного джерела.

5. Сформульована структурна схема методу обробки сигналів БПЛА мікрофонною решіткою у часовій області. Особливість схеми полягає у введенні в канали певних затримок у часі. Затримки залежать від просторових координат розташування джерела сигналу, тобто на першому етапі йде сканування простору.

Після виділення всіх джерел звуку за максимумами кореляційної матриці йде етап підвищення відношення сигнал-шум за рахунок обчислення оптимальних на інтервалах стаціонарності вагових коефіцієнтів мікрофонних каналів.

І тільки на наступному етапі можна вирішувати задачу розпізнавання сигналу (БПЛА-завада), а у разі позитивного рішення, координата даного джерела вже буде відомою.

6. При описаній просторовій обробці потужність обраного звукового сигналу зростає в  $N^2$  разів за рахунок синхронного прийому, а потужність некорельованих шумів за рахунок взаємного накладання – у  $N$  разів. Отже, відношення сигнал-шум має збільшитися у  $N$  разів.

## 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ БПЛА ЗА АКУСТИЧНИМИ СИГНАЛАМИ

### 3.1 Опис експерименту

Експериментальне дослідження проводимо методом моделювання в середовищі MATLAB. Задача моделювання – на основі реальних звукових сигналів БПЛА і фонових шумів реалізувати систему просторової обробки цих сигналів з метою визначення просторових координат БПЛА і виділення його сигналів на фоні шумів.

Моделювання виконано на ПЕВМ і реалізовано в середовищі MATLAB за таких умов і обмежень.

1. Умовний сканований простір був обраний прямокутної форми з площею  $9600 \text{ м}^2$  (розміри  $120 \text{ м} \times 80 \text{ м}$ ).

2. Пасивна акустична система виявлення має всеспрямовані мікрофони, які розміщуються в тій самій площині, що і всі акустичні джерела. При моделюванні третій вимір сканованого простору не враховувався.

3. Акустичні джерела сигналу і завад вважаємо точковими, всеспрямованими, звуковий тиск зменшується класично – зворотно пропорційно від відстані від джерела.

4. У якості джерела корисного сигналу застосовуємо звукозапис шуму БПЛА DJI Phantom 3 в режимі зависання. У якості джерел завад беремо записи звуків двигуна вантажівки, співу птахів, голосів групи людей. Всі записи приведені до єдиної частоти дискретизації  $F_s = 44,1 \text{ кГц}$ . Тривалість всіх реалізацій однакова і складає  $5 \text{ с}$ .

5. При моделюванні досліджуємо можливість виділення сигналів БПЛА, тому вважаємо, що акустичний сигнал досягає мікрофонів найкоротшим шляхом – по прямій, відбиття від площини землі і інших перешкод не враховується.

6. Енергія кожного звукового фрагмента однакова, це досягається методом нормування:

$$K = 20 \lg \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^T s_1^2(t)}{\sum_{t=1}^T s_0^2(t)}} , \quad (3.1)$$

де  $s_0(t)$  – відліки сигналу – зразка,

де  $s_1(t)$  – відліки нормованого сигналу.

7. Джерела акустичних сигналів і шумів є стаціонарними у просторі за період спостереження  $T$ . В процесі обробки сигналів будь-які переміщення відсутні.

### 3.2 Вплив конфігурації розташування мікрофонів на точність пеленгу і виявлення сигналів БПЛА

Вважаємо, що в розпорядженні у нас є 10 ненаправлених мікрофонів, сигнали з яких передаються по радіоканалах в аналоговій формі з мінімальними затримками, що не впливають на процес визначення координат джерел звуку.

Тобто, відносно простору сканування мікрофони можуть бути розташовані в будь-який спосіб. Потрібно встановити найкращу конфігурацію мікрофонного масиву для виявлення і пеленгації БПЛА по акустичному сигналу.

Було змодельовано три конфігурації решітки з 10-ти мікрофонів:

- розміщення по 1-й стороні простору сканування;
- розміщення по куту простору сканування;
- розміщення по периметру простору сканування (рис.3.1).

Для визначення найкращої конфігурації масиву було змодельовано одночасне звучання чотирьох джерел у зоні сканування: 1-е корисне джерело (БПЛА), і 3 інші джерела – перешкоди.

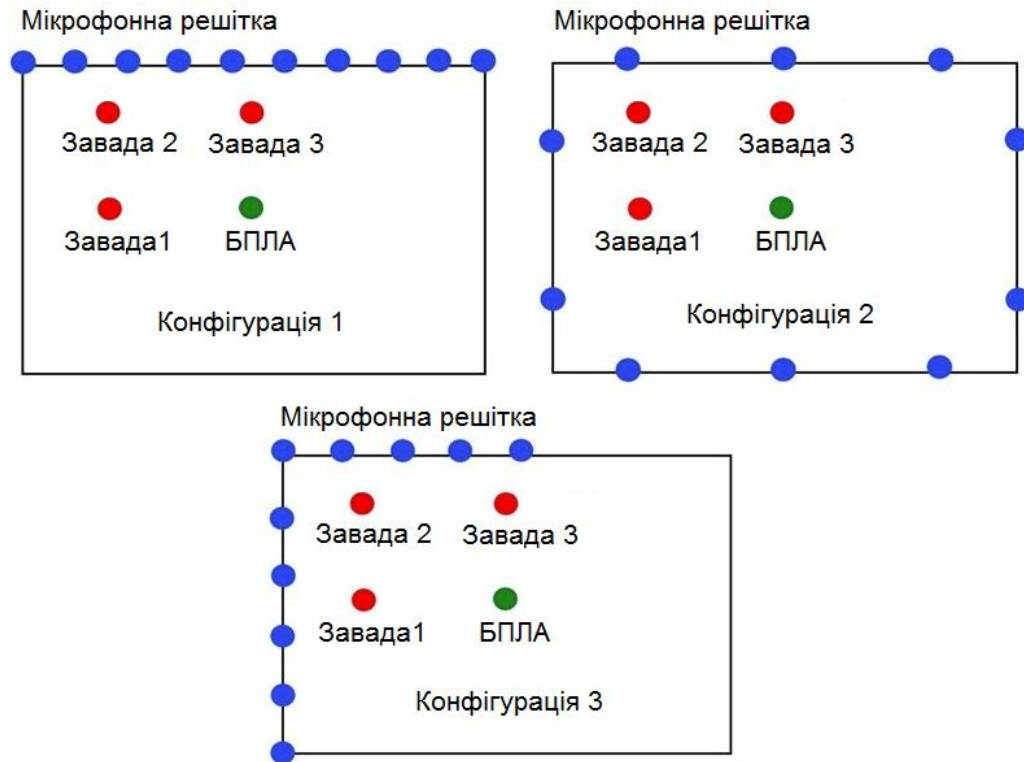


Рисунок 3.1 – Конфігурації масивів мікрофонів, що моделюються (корисний сигнал БПЛА розташовано центрі простору сканування)

Для модельної конфігурації 1 еквівалентна дистанція між мікрофонами становить 13,3 м; для модельної конфігурації 2 – 16 м і для модельної конфігурації 3 – 40 м. Отже, під час моделювання відомі як просторові координати джерел завод і БПЛА, так і координати розташування мікрофонів.

Для визначення найкращої конфігурації мікрофонного масиву обчислювалося відношення сигнал-перешкода. Визначення координат всіх джерел звуку – БПЛА і перешкод – виконувалося за допомогою введення затримок в кожний мікрофонний канал.

Затримка  $\tau_{mic}$  мікрофонного каналу при скануванні певної точки простору дорівнює відношенню шляху поширення звуку (діагональ, рис.3.2) до швидкості поширення звуку:

$$\tau_{mic} = \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{c}, \quad (3.2)$$

де  $a$  і  $b$  – різниці координат джерела і мікрофона (катети):

$$a = |x_1 - x|, \quad b = |y_1 - y|, \quad (3.3)$$

де  $(x_1, y_1)$  і  $(x, y)$  – координати мікрофона і точки сканування.

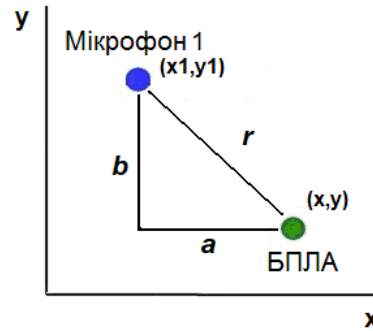


Рисунок 3.2 – Принцип введення затримок при скануванні простору

При цьому всі амплітудні коефіцієнти мікрофонних каналів дорівнюють 1.

Затримки  $\tau_{ij}$  для кожної точки простору сканування та для кожного мікрофонного каналу є індивідуальною. При відомих координатах  $N$  мікрофонів можна розрахувати матрицю затримок  $\vec{\tau}$  для кожної точки простору сканування:

$$\vec{\tau} = \begin{pmatrix} \tau_{11} & \tau_{21} & \dots & \tau_{p1} \\ \tau_{12} & \tau_{22} & \dots & \tau_{p2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \tau_{1N} & \tau_{2N} & \dots & \tau_{pN} \end{pmatrix}, \quad (3.4)$$

де  $p$  – загальне число точок простору сканування.

Система оброблює оцифрований сигнал, тому  $t$ -й відлік, прийнятий  $i$ -м мікрофоном, можна записати таким виразом

$$s_i(t) = \frac{A}{r_i} s\left(t - \frac{r_i}{c} F_s\right) + \sum_{j=1}^k \frac{A_{ji}}{r_{ji}} G_j\left(t - \frac{r_{ji}}{c} F_s\right), \quad (3.5)$$

де  $c$  – швидкість поширення акустичної хвилі;

$F_s$  – частота дискретизації;

$A$  і  $A_{fi}$  – амплітудні коефіцієнти;

$r_i$  – дистанція від джерела акустичного сигналу до  $i$ -го мікрофону;

$r_{ji}$  – дистанція від  $j$ -го джерела акустичної завади до  $i$ -го мікрофону.

Вихідний сигнал системи із  $N$  мікрофонів для  $j$ -ї точки простору сканування є суперпозицією сигналів усіх каналів:

$$s_j(t) = \sum_{i=1}^N s_i(t) = s\left(t - \tau_{ij} F_s\right) \sum_{i=1}^N \frac{A}{r_i} + \sum_{i=1}^N \sum_{f=1}^k \frac{A_{ji}}{r_{ji}} G_j \left( t - \left( \tau_{ij} + \frac{r_{ji}}{c} - \frac{r_{ij}}{c} \right) F_s \right). \quad (3.6)$$

Моделювання проведено для двох різних конфігурацій розташування БПЛА і джерел завади: БПЛА розташований у центрі простору сканування (рис.3.1) і БПЛА зміщений відносно центру простору сканування (рис.3.3).

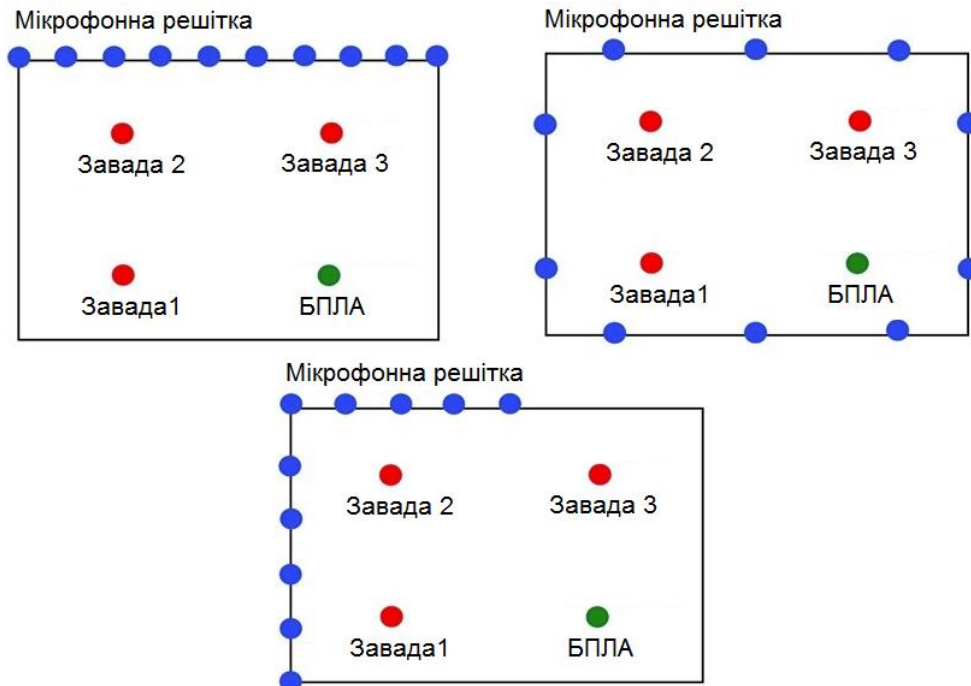


Рисунок 3.4 – Конфігурації масивів мікрофонів, що моделюються (БПЛА зміщено відносно центру простору сканування)

У табл. 3.1 показані результати розрахунку відношення сигнал-шум сигналів БПЛА, виділених за допомогою введення часових затримок для трьох розташувань мікрофонів та 2-х різних координат БПЛА.

Таблиця 3.1 – Розрахунки відношення сигнал-шум при введенні затримок часу для 3-ох конфігурацій мікрофонів для 2-х координат БПЛА

№	Конфігурація багатопозиційної системи	Відношення сигнал/перешкода виділеного сигналу БПЛА, відн. од.	
		Рис. 3.1	Рис. 3.3
1	розміщення мікрофонів по одній стороні	0,76	0,60
2	кутова конфігурація розміщення мікрофонів	0,71	0,82
3	розміщення мікрофонів по периметру площі	1,19	2,34

Відношення сигнал-шум розраховуємо за виразом

$$SNR = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^T s_0^2(t)}{\sum_{t=1}^T (s(t) - s_0(t))^2}}, \quad (3.7)$$

де  $s$  – виділений сигнал БПЛА на фоні акустичних завад;

$s_0$  – істинний сигнал БПЛА;

$t$  – номери відліків сигналів;

$T$  – довжина реалізації сигналу (кількість семплів).

На рис. 3.5 знаходиться діаграма порівняння отриманих відношень сигнал-шум для трьох конфігурацій мікрофонного масиву і двох положень БПЛА, показаних у табл. 3.1.

При виділенні звуку БПЛА у третій конфігурації для двох різних положень БПЛА досягається найбільше відношення сигнал-шум.

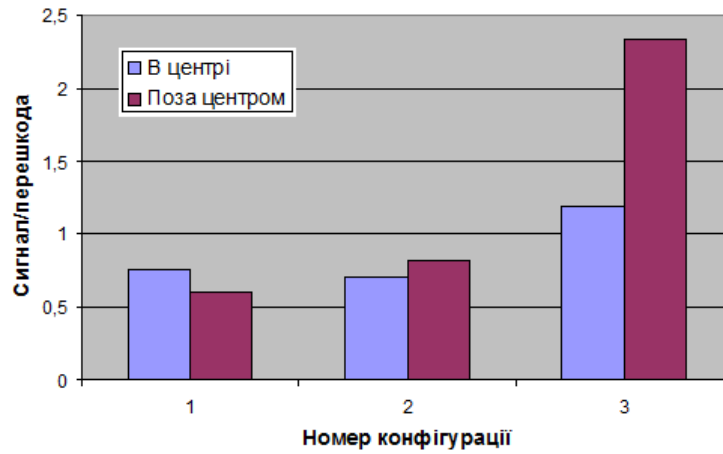


Рисунок 3.5 – Діаграма розрахованих відношень сигнал-шум для 3-ох досліджених конфігурацій мікрофонного масиву

На рис. 3.6 наведені реалізації прийнятого сигналу БПЛА: оригінального неспотвореного сигналу БПЛА (рис. 3.4, а) і виділеного із суміші з шумами з найбільшим відношенням сигнал-шум (рис. 3.4, б).

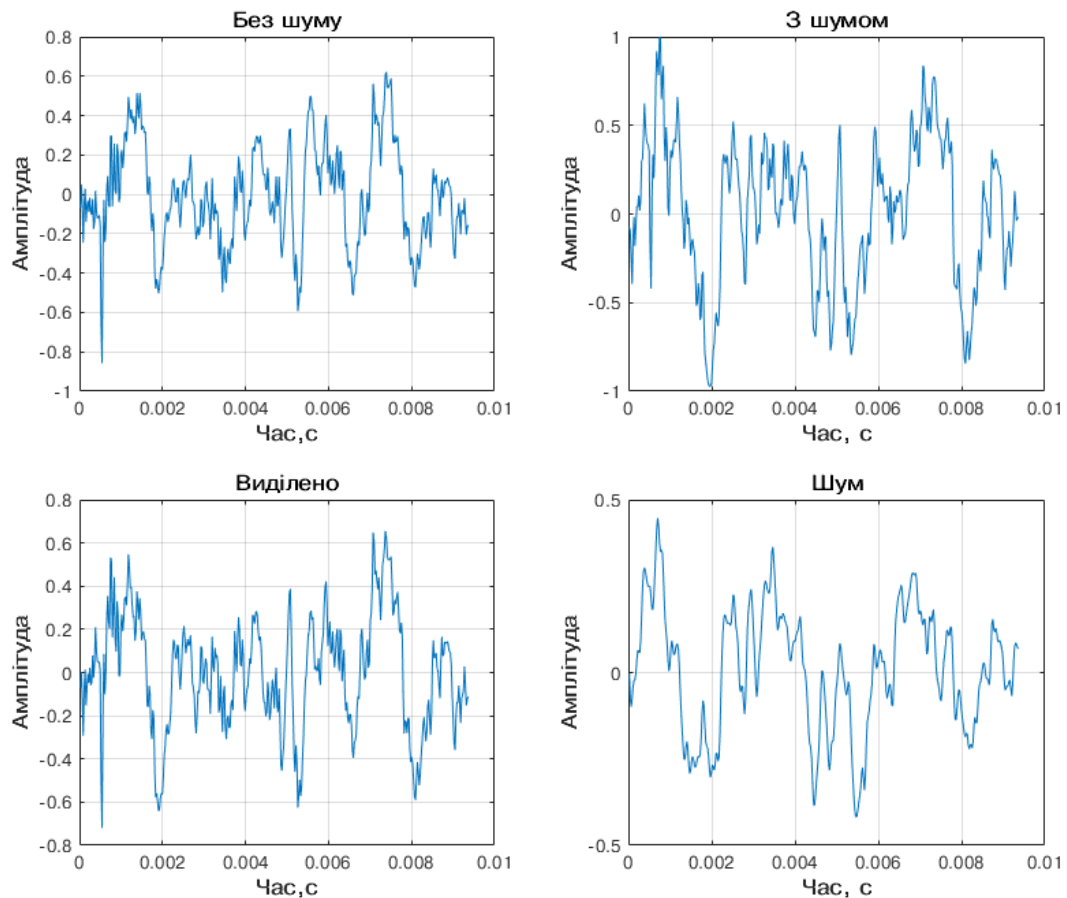


Рисунок 3.6 – Реалізації сигналу БПЛА без шумів, виділеного сигналу і завади при третій конфігурації мікрофонів і положенні БПЛА поза центром

На рис. 3.7 наведено графік коефіцієнту взаємної кореляції для незашумленого корисного сигналу БПЛА та виділеного із завад сигналу БПЛА.

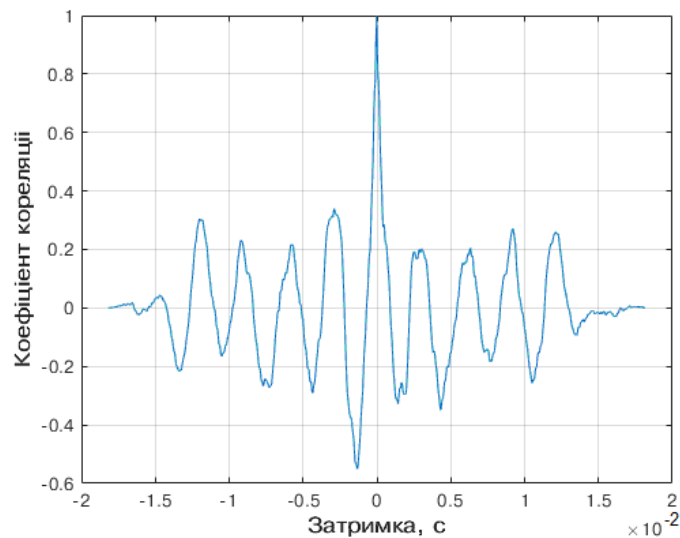


Рисунок 3.7 – Коефіцієнту взаємної кореляції для незашумленого корисного сигналу БПЛА та виділеного із завад сигналу БПЛА

При різному взаємному положенні сигналу БПЛА і акустичних перешкод 3-тя конфігурація показує найкращі показники відношення сигнал-шум. Отже, конфігурація масиву із розміщенням мікрофонів по периметру простору сканування є оптимальною для змодельованого методу обробки.

### 3.3 Визначення роздільної здатності системи при вирішенні задачі пеленгації

Для оцінки роздільної здатності пасивної системи акустичного виявлення БПЛА в моделюванні по периметру простору сканування було розташовано масив із 20 мікрофонів. У центрі простору сканування розташовано модель сигналу БПЛА, сторонні акустичні джерела відсутні.

Для кожної точки сканованої зони вводяться обчислені часові затримки згідно (3.2) – (3.4) та розраховується просторова функція кореляції. Результати обчислення просторової функції кореляції показані на рис. 3.8.

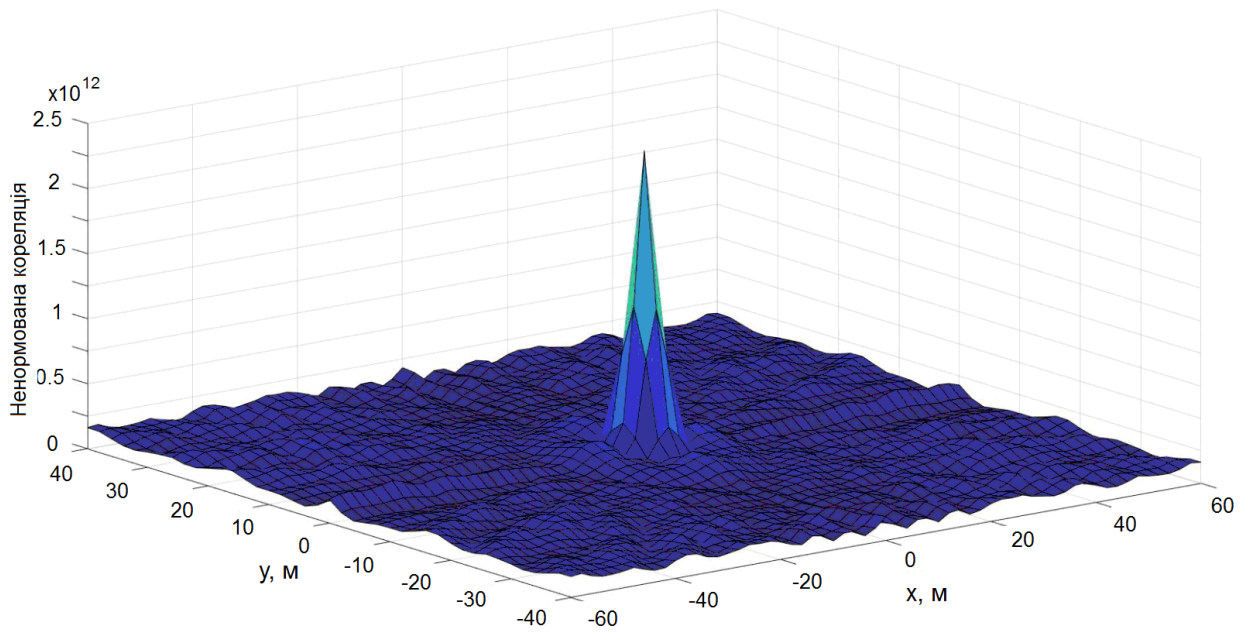


Рисунок 3.8 – Ненормована функція просторової кореляції для звукового сигналу БПЛА без акустичних шумів (до 7 кГц)

Роздільна здатність системи отримана як переріз функції кореляції за рівнем половинної потужності (-3 дБ, 0,707), рис.3.8.

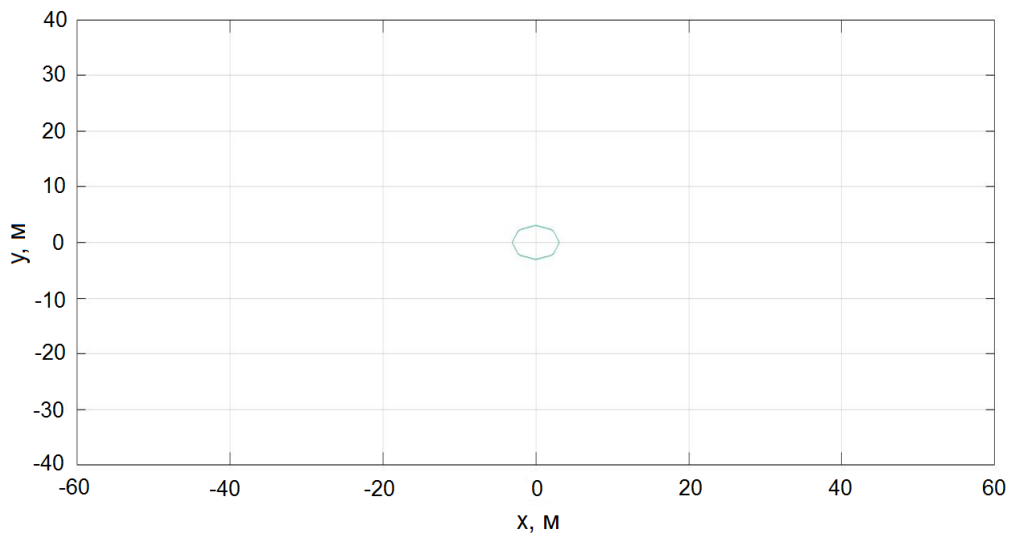


Рисунок 3.8 – Переріз просторової функції кореляції за половинною потужністю (-3 дБ, 0,707)

З рис.3.8 виходить, що просторова роздільна здатність пасивної системи акустичного виявлення при смузі частот сигналу до 7 кГц складає 5,6 м.

На рис.3.9 зображено графік спектру чистого сигналу БПЛА без акустичних шумів. Помітний лінійчатий характер спектру і швидке спадання спектральних ліній вище частоти 4 кГц.

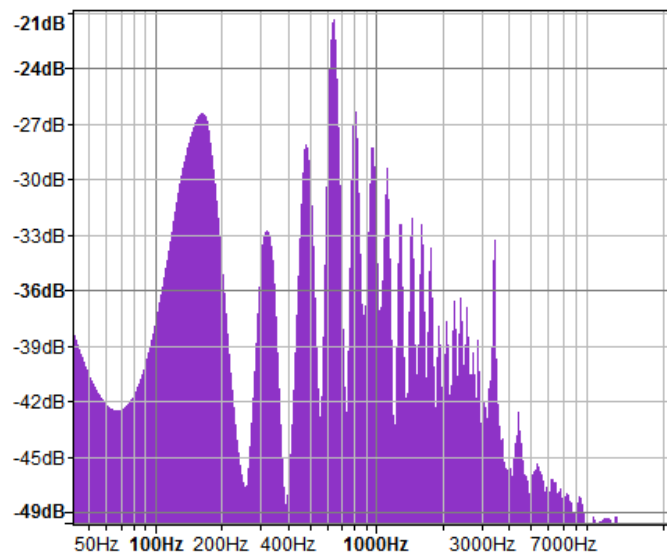


Рисунок 3.9 – Графік спектру чистого сигналу БПЛА

Зрозуміло, що обмеження діапазону частот системи (наприклад, до 4 кГц) без наявності акустичних шумів зменшить просторову роздільну здатність. В нашому експерименті вона склала 9,8 м. Відповідна функція кореляції наведена на рис. 3.10.

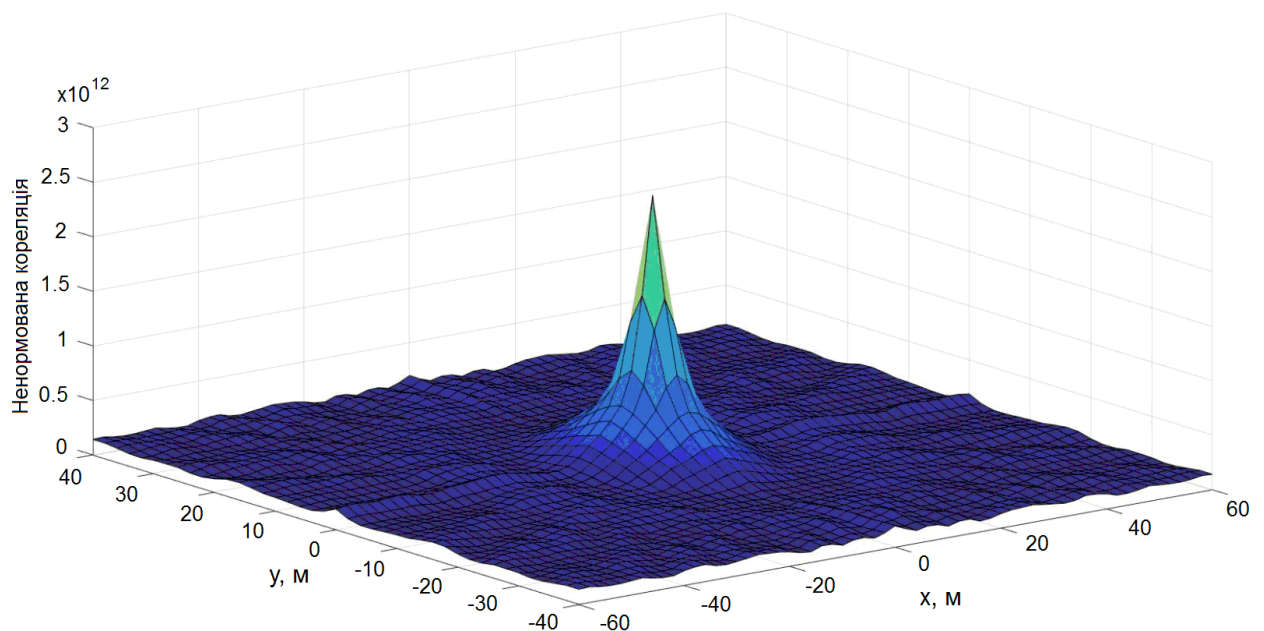


Рисунок 3.10 – Ненормована функція просторової кореляції для чистого сигналу БПЛА (до 4 кГц)

Але в той же час можна очікувати, що обмеження смуги частот при наявності акустичних шумів позитивно вплине на відношення сигнал-шум і, як наслідок, на роздільну здатність системи під час пеленгації.

Обчислення функції просторової кореляції дозволяє визначати координати джерел звуку. Дане ствердження підтверджується числовим експериментом з оцінки координат 8-ми одночасно працюючих акустичних джерел. Діапазон частот в експерименті склав від 0 до 7 кГц.

Координати джерел були заздалегідь невідомі, відомі тільки координати мікрофонів у масиві. Після призначення затримок часу для сканованого простору у відповідності з (3.2) – (3.4) виконаємо розрахунок функції просторової кореляції для кожної точки простору сканування. Результати розрахунку представлені на рис.3.11.

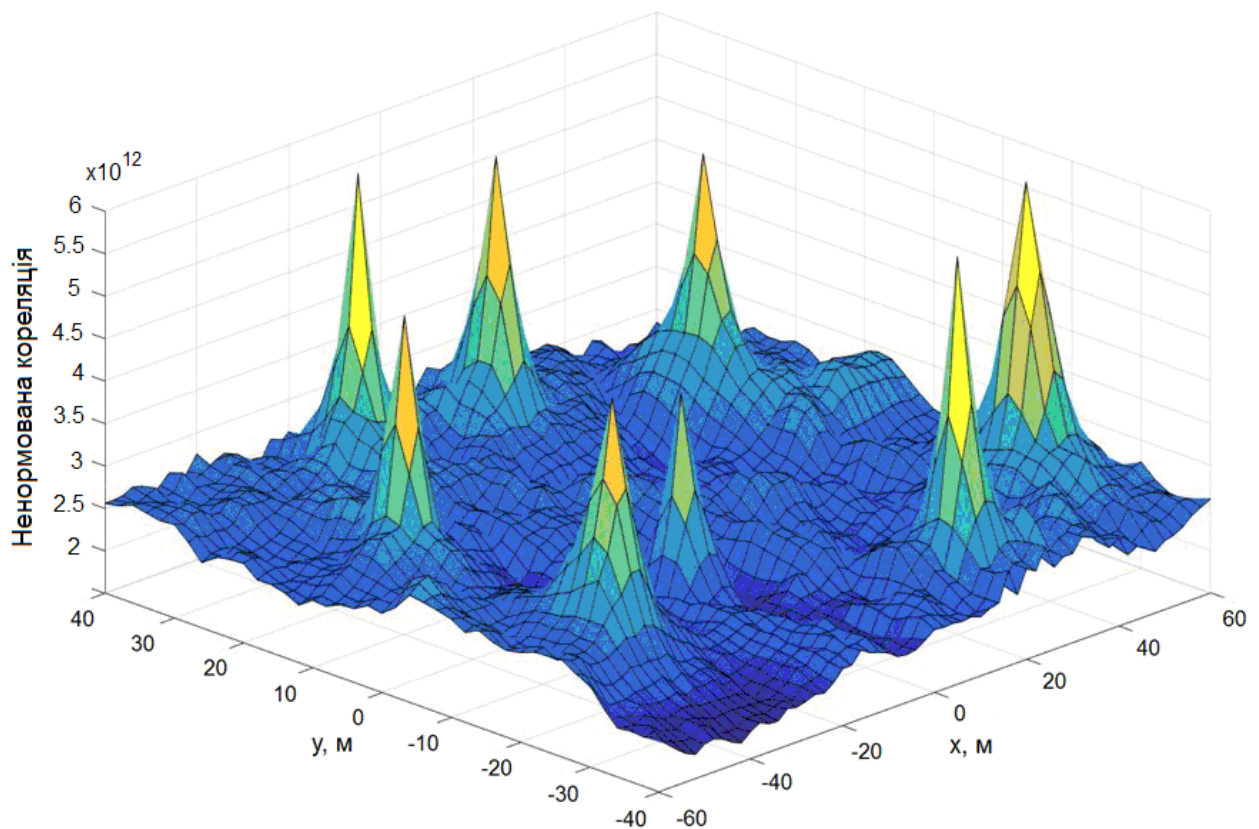


Рисунок 3.11 – Ненормована функція просторової кореляції для 8-и акустичних джерел (до 7 кГц)

З рис. 3.11 слідує, що наявність 8-и максимумів функції просторової кореляції відповідає 8-и акустичним джерелам. Координати максимумів чітко відповідають координатам акустичних джерел.

За положенням максимумів функції просторової кореляції можна визначити координати 8-и акустичних джерел (табл.3.2).

Таблиця 3.2 – Координати 8-и акустичних джерел

Номер джерела							
1	2	3	4	5	6	7	8
x1 = -10	x2 = 20	x3 = -40	x4 = 40	x5 = 10	x6 = -50	x7 = 40	x8 = -20
y1 = -30	y2 = -30	y3 = -20	y4 = -10	y5 = 10	y6 = 20	y7 = 20	y8 = 30

Таким чином, розрахунок функції просторової кореляції дозволяє обчислити координати всіх джерел. Роздільна здатність пасивної системи акустичного виявлення в діапазоні частот до 7 кГц склала 5,6 м. В діапазоні частот до 4 кГц – 9,8 м. Для дослідження простору сканування обробляти точки без втрати звукових джерел слід із кроком, відповідним роздільній здатності системи.

#### 3.4 Підбір оптимальних амплітудних коефіцієнтів

У підрозділі 3.3 показано, що система акустичного виявлення із 20-ти мікрофонів в змозі оцінити просторові координати 8-ми акустичних джерел. Отже, після введення затримок, відповідних координатам джерел звуку, може бути виділено до 8-ми сигналів  $s_{p1}, \dots, s_{p8}$ . На рис. 3.12 зображено взаємне розташування мікрофонів масиву і акустичних джерел.

Для розрахунку вагових коефіцієнтів каналів вважаємо сигнал БПЛА корисним  $S_{p1}$ , а інші  $S_{p2}, \dots, S_{p8}$  джерел – вважаємо джерелами сторонніх шумів. Після виділення даних сигналів система обробки формує матрицю кореляції для кожної завади, матрицю кореляції корисного сигналу, а

оптимальні амплітудні коефіцієнти обчислимо за максимальним відношенням сигнал-шум.

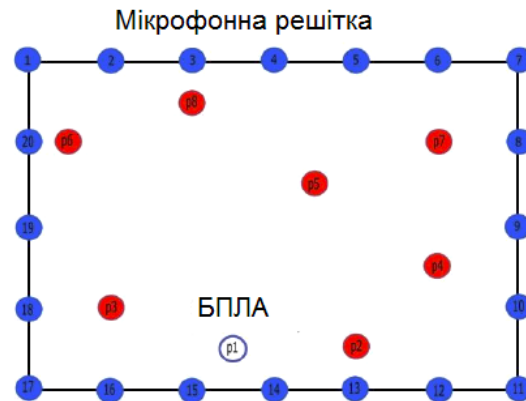


Рисунок 3.12 – Взаємне розташування 8-и акустичних джерел і мікрофонного масиву із 20-ти мікрофонів

В табл. 3.3 надані результати розрахунку амплітудних коефіцієнтів пасивної системи акустичного виявлення із 20-мікрофонним масивом.

Таблиця 3.3 – Амплітудні коефіцієнти пасивної системи акустичного виявлення з 20-мікрофонним масивом

$w1$	0,04761	$w6$	0,03294	$w11$	0,00664	$w16$	0,15032
$w2$	0,00004	$w7$	0,12427	$w12$	0,17115	$w17$	0,06687
$w3$	0,11972	$w8$	0,03599	$w13$	0,20674	$w18$	0,20680
$w4$	0,12166	$w9$	0,04965	$w14$	0,48802	$w19$	0,17697
$w5$	0,22382	$w10$	0,12916	$w15$	0,68042	$w20$	0,08472

Розглянемо сумісно результати розрахунку вагових коефіцієнтів, наданих у табл. 3.3 і конфігурацію мікрофонів і джерел на рис. 3.12. Найбільші значення амплітудних коефіцієнтів у мікрофонів №14 та №15. Це пояснюється найближчим розташуванням цих мікрофонів до БПЛА. Оптимальні амплітудні коефіцієнти сприяють підсилення корисних сигналів та ослаблення сигналів джерел акустичних завад. Тому максимальне та мінімальне значення амплітудних коефіцієнтів у розглянутому випадку відрізняється в 17.000 разів.

### 3.5 Ефективність виділення сигналу БПЛА на тлі інтенсивних завад

Ефективність виділення корисного сигналу визначається по відношенню енергії виділеного сигналу БПЛА до енергії завад від сторонніх акустичних джерел:

$$SNR = \frac{\sum \left( s(t - \tau_{ji} F_s) \sum_{i=1}^N \frac{A}{r_i} w_i \right)^2}{\sum \left( \sum_{i=1}^N \sum_{f=1}^k \frac{A_{ji}}{r_{ji}} w_i G_j \left( t_v - \left( \tau_{ji} + \frac{r_{ji}}{c} - \frac{r_{ij}}{c} \right) F_s \right) \right)^2}. \quad (2.20)$$

Взаємне розташування мікрофонного масиву та джерел акустичних сигналів відповідає конфігурації на рис. 3.12.

На першому етапі обробки алгоритм виділяє всі джерела звукових сигналів із застосуванням методу просторової фільтрації на основі введення часових затримок, що залежать від просторових координат точок простору сканування. Після цього обчислюється матриця кореляції завад.

Ефективність виділення акустичного сигналу БПЛА збільшується за допомогою подальшого обчислення на інтервалі стаціонарності амплітудних коефіцієнтів мікрофонних каналів. Оптимальний вектор амплітудних коефіцієнтів решітки визначається через матрицю кореляції завади (п.3.3).

Досліджуваний метод дозволяє покращити ефективність виділення акустичного сигналу БПЛА: шляхом введення часових затримок виділяються всі джерела сигналу, відношення сигнал-шум яких збільшується потім за рахунок застосування амплітудних коефіцієнтів.

В табл.3.4 надано результати оцінки в модельному експерименті відношення сигнал-шум.

Таблиця 3.4 – Результати оцінки відношення сигнал-шум на виході системи обробки акустичних сигналів мікрофонної решітки

Назва алгоритму	Відношення сигнал/перешкода, рази
Запис одним мікрофоном без просторової фільтрації	0,15
Просторова фільтрації з введенням точних часових затримок, що залежать від просторових координат мікрофонів	1,98
Алгоритм обробки сигналу мікрофонними решітками у часовій області, що максимізує відношення сигнал/перешкода	6,64

При виділенні звукового сигналу БПЛА методом просторової фільтрації без амплітудних коефіцієнтів досягається вигреш на 11,2 дБ по відношенню до акустичного спостереження єдиним мікрофоном (табл.3.4). Даний результат добре узгоджується з теоретичними оцінками, згідно яким при використанні масиву з 20-ти мікрофонів метод просторової фільтрації без вагових коефіцієнтів забезпечує вигреш у відношенні сигнал-завада до 20 разів (13 дБ). Подальше введення амплітудних коефіцієнтів збільшує вигреш у відношення сигнал-шум із 11,2 дБ до 16,5 дБ.

Тобто, ефективність змодельованого в роботі методу залежить від кількості мікрофонів у масиві, кількості одночасно працюючих джерел завад та їх взаємного розміщення у сканованому просторі.

### 3.6 Висновки по розділу 3

Чим ближче розташоване джерело корисного сигналу до одного з мікрофонів масиву, тим ефективнішою є робота просторової системи. При винесенні джерел із площини розташування мікрофонів відстань від корисного джерела до найближчого мікрофона збільшується, а різниця ходу

звукових хвиль до всіх мікрофонів масиву зменшується, що призводить до зниження ефективності просторового методу.

Отже, для просторового методу визначено найкращу конфігурацію мікрофонних решіток для пеленгації і виділення звукового сигналу БПЛА на фоні завад: мікрофонний масив з розташуванням мікрофонів по периметру простору сканування дозволяє виділяти сигнал БПЛА із найбільшим відношенням сигнал-завада.

Досліджено просторову роздільну здатність пасивної системи акустичного виявлення. Для смуги частот до 7 кГц роздільна здатність склала 5,6 м. обмеження діапазону частот системи (наприклад, до 4 кГц) без наявності акустичних шумів зменшить просторову роздільну здатність. В нашому експерименті вона склала 9,8 м.

Але в той же час можна очікувати, що обмеження смуги частот при наявності акустичних шумів позитивно вплине на відношення сигнал-шум і, як наслідок, на роздільну здатність системи під час пеленгації.

Виконані дослідження відносно застосування просторового методу обробки для виділення сигналу БПЛА із завад для певної точки простору сканування свідчать про максимальне досягнення виграшу у відношенні сигнал-завада більше ніж у  $N$  разів, де  $N$  – кількість мікрофонів у масиві.

## ВИСНОВКИ

Проблема виявлення і протидії БПЛА, особливо, малим БПЛА, є надзвичайно складною, багатогранною, і досі ефективно не вирішеною. Складність та багатоаспектність задачі створення ефективних систем протидії БПЛА призводить до появи комплексованих рішень, де поєднуються радіочастотні, радіолокаційні, оптико-електронні та акустичні методи. При цьому разом з завданням виявлення ставиться також завдання визначення просторових координат БПЛА задля подальшої ефективної протидії.

Метою даної роботи аналіз пасивних акустичних методів виявлення і пеленгації БПЛА, виявлення найбільш ефективних методів і напрямів вирішення цих задач.

В першому розділі проведено аналіз задач виявлення та пеленгації БПЛА. Характерною ознакою звуку БПЛА є його періодична структура і лінійчатий спектр. Найбільш поширеними ознаками для систем виявлення БПЛА є частота основного тону, наявність та амплітуди гармонічних складових, ширина спектральних ліній.

У БПЛА з ДВЗ суттєво відрізняються амплітуди парних і непарних гармонік. У коптерів спектральні лінії шуму ширші або зовсім розділяються, що пояснюється несинхронною роботою двигунів.

Класично першою задачею вважають виявлення. Основною умовою надійного виявлення є відношення сигнал-шум вище порогу. Проведені оцінки показують, що потенційна дальність виявлення малих БПЛА, обмежена шумами приймача, достатньо велика і складає приблизно 1,5 км. Однак зовнішні акустичні шуми сильно обмежують дальність дії системи до декількох десятків метрів. В такому випадку можуть бути більш ефективними рішення на основі просторово-розподілених акустичних систем.

В другому розділі виконано теоретичний аналіз методів пеленгації малих БПЛА по акустичному випроміненню. Специфіка систем пасивного

акустичного виявлення БПЛА полягає в тому, що пеленгація об'єктів здійснюється в них на фоні розподілених у просторі перешкод, за обмеженого часу спостереження.

Всі поширені методи пеленгації ширококутових джерел звуку так чи інакше побудовані на визначенні часових затримок між сигналами дистанційно рознесених мікрофонів. При цьому вважають сигнали та перешкоди некорельованими на інтервалі спостереження.

Для визначення часових затримок використовують кореляційний метод аналізу. Максимум функції взаємної кореляції сигналів мікрофонів вказує на часову затримку між ними, з чого обчислюється азимут при відомій відстані між мікрофонами і швидкості поширення звуку.

Різні модифікації методів пеленгації джерел звуку мають за мету зменшити вплив ревербераційних завад і фонових шумів. Вони побудовані на врахуванні не тільки затримок, але на відмінності фазового і частотного спектрів сигналів корисного джерела і завад.

З цих міркувань розроблений метод GCC-RHAT, в якому використовується вагова функція фазового перетворення RHAT для відбілювання сигналу, яка позитивно позначається на стійкості даного алгоритму до реверберацій та шумів.

Метод SRP-RHAT заснований на обчисленні та попарному додаванні вихідних даних GCC-RHAT у сітку простору сканування. В системі є решітка з  $N$  мікрофонів. Пошук розташування джерела працює перебором просторових точок на сітці досліджуваної області. Даний метод також показує стабільну роботу в умовах реверберації, завдяки функції фазового нормування RHAT.

В методі SRP-NAM застосовується нормування до амплітуд спектру. Це спрямовано на зменшення впливу неправильної оцінки потужності відгуку через зміну відношення сигнал-шум на кожній частоті. Мета полягає в тому, щоб отримати SRP, в якому кожна частота дає однаковий внесок у кінцевий результат. Метод SRP-NAM має найкращу точність оцінки пеленгу та більшу стійкість до шумів.

З аналізу розглянутих методів стає зрозумілим, що задачі виявлення і пеленгації БПЛА не слід розділяти. Просторова обробка звукових сигналів мікрофонної решітки дозволяє одночасно підвищити відношення сигнал-шум і отримати оцінку координат конкретного джерела.

Сформульована структурна схема методу обробки сигналів БПЛА мікрофонним масивом у часовій області. Особливість схеми полягає у введенні в канали певних затримок у часі. Затримки залежать від просторових координат розташування джерела сигналу, тобто на першому етапі йде сканування простору.

Після виділення всіх джерел звуку за максимумами кореляційної матриці йде етап підвищення відношення сигнал-шум за рахунок обчислення оптимальних на інтервалах стаціонарності вагових коефіцієнтів мікрофонних каналів.

І тільки на наступному етапі можна вирішувати задачу розпізнавання сигналу (БПЛА-завада), а у разі позитивного рішення, координата даного джерела вже буде відомою.

В системі MATLAB проведено математичне моделювання просторово рознесеної акустичної системи виявлення пеленгації БПЛА. Модель представляє умовний прямокутний простір сканування 120 x 80 м. Акустична система складається з масиву ненаправлених мікрофонів і розміщеного у площині джерел акустичних сигналів. Третій вимір не враховується.

Джерела сигналу БПЛА і завад моделювалися у виді звукозаписів. БПЛА – це квадрокоптер DJI Phantom 3. Шуми – це звук вантажівки, голос людини, шум птахів. Положення мікрофонної решітки відносно джерел моделювалося матрицею затримок, і матрицею ослаблень. Звуковий тиск зменшується обернено пропорційно відстані від джерела. Відбиті звукові хвилі в моделі не враховуються. За час спостереження 5 с джерела нерухомі.

Спочатку потрібно було встановити найкращу конфігурацію мікрофонного масиву для виявлення і пеленгації БПЛА.

Змодельовано три конфігурації – лінійна, кутова, по периметру простору сканування; а також два варіанти розміщення БПЛА – у центрі простору і поза його центром. Найкращим виявився варіант з розташуванням масиву по периметру простору сканування. Тільки таке розташування показало відношення сигнал-завада більше 1. Це невелике значення пов'язане з одночасною роботою в сканованому просторі 3-х завад з такою ж потужністю, що і звук БПЛА. При інших конфігураціях масиву відношення сигнал-шум менше 1.

Обчислені графіки сигналів БПЛА до і після обробки, а також графік взаємної кореляції для прийнятого та виділеного із шумів сигналу дрону. Помітна ефективність просторової фільтрації.

Для оцінки роздільної здатності пасивної системи акустичного виявлення БПЛА в моделюванні по периметру простору сканування було розташовано масив із 20 мікрофонів. У центрі простору сканування розташовано модель сигналу БПЛА, сторонні акустичні джерела відсутні. Для кожної точки сканованої зони вводяться обчислені часові затримки.

Роздільна здатність системи отримана як переріз функції кореляції за рівнем половинної потужності. Просторова роздільна здатність системи акустичного виявлення в смузі частот до 7 кГц склала 5,6 м.

У сигналу БПЛА помітне і швидке спадання спектральних ліній вище частоти 4 кГц. Зрозуміло, що обмеження діапазону частот системи (наприклад, до 4 кГц) без наявності акустичних шумів погіршить просторову роздільну здатність. В нашому експерименті вона склала 9,8 м. Але в той же час можна очікувати, що обмеження смуги частот при наявності акустичних шумів позитивно вплине на відношення сигнал-шум і, як наслідок, на роздільну здатність системи під час пеленгації.

Обчислення функції просторової кореляції дозволяє визначати координати джерел звуку. Координати максимумів відповідають координатам восьми джерел звуку.

Після визначення координат даних сигналів система обробки формує матрицю кореляції для кожної завади, матрицю кореляції корисного сигналу, а оптимальні амплітудні коефіцієнти обчислимо за максимальним відношенням сигнал-шум. Найбільші значення амплітудних коефіцієнтів у мікрофонних каналах, найближчих до БПЛА.

Збільшення відношення сигнал-шум після застосування матриці затримок становить 11,2 дБ в порівнянні із записом одним найближчим мікрофоном. Додаткове введення матриці амплітудних коефіцієнтів збільшує вигаш до 16,5 дБ.

Виконані дослідження відносно застосування просторового методу обробки для виділення сигналу БПЛА із завад для певної точки простору сканування свідчать про максимальне досягнення вигашу у відношенні сигнал-завада більше ніж у  $N$  разів, де  $N$  – кількість мікрофонів у масиві.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Michel A. H. Counter-drone systems. – Center for the Study of the Drone at Bard College, 2018. – 23 p.
2. Countering rogue drones. – FICCI Committee on Drones, EY, 2018. – 31 p.
3. de Visser E., Cohen M. S., LeGoullon M., Sert O., Freedy A., Freedy E., Weltman G., Parasuraman R. A Design Methodology for Controlling, Monitoring, and Allocating Unmanned Vehicles // Third International Conference on Human Centered Processes (HCP-2008). – 2008. – 5 p.
4. Hartmann K., Giles K. UAV exploitation: A new domain for cyber power // 8th International Conference on Cyber Conflict (CyCon). – IEEE, 2016. – С. 205-221.
5. Соколовський В.В. Проблемні питання та перспективні напрямки боротьби з малорозмірними надлегкими БЛА у внутрішньому збройному конфлікті / В.В. Соколовський, Ю.В. Самсонов // Системи озброєння і військова техніка. – 2015. – № 4(44). – С. 32-35.
6. В.М. Карташов, В.Н. Олейников, С.А. Шейко, С.И. Бабкин, И.В. Корытцев, О.В. Зубков, М.А. Анохин. Информационные характеристики звукового излучения малых беспилотных летательных аппаратов // Радиотехника. – 2017. – Вып. 191. – с. 181-187.
7. В.М. Карташов, В.Н. Олейников, С.А. Шейко, С.И. Бабкин, И.В. Корытцев, О.В. Зубков. Особенности обнаружения и распознавания малых беспилотных летательных аппаратов // Радиотехника : Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2018. – Вып. 195. – С. 235 – 243.
8. Ю.Г. Даник, І.В. Пулеко, М.В. Бугайов Виявлення безпілотних літальних апаратів на основі аналізу акустичних та радіолокаційних сигналів // Вісник ЖДТУ. Серія: Технічні науки. – Житомир: ЖДТУ, 2014. – № 71(4). – С. 71-80.
9. Олейников В.Н., Шейко С.А., Бабкин С.И. Исследование характеристик акустического излучения малых беспилотных летательных

аппаратов// Сборник научных трудов VI Международного радиоэлектронного форума “Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития (МРФ-2017)” Международная научная конференция “Радиолокация. Спутниковая навигация. Радиомониторинг”. 24-26 октября 2017 г. Харьков, Украина. – Изд. “Точка”. С. 11-17.

10. Грінченко В.Т., Вовк І.В., Маципура В.Т. Основы акустики, Київ, Наукова думка, 2007, 640 с.

11. Harris C.M. Absorption of sound in air versus humidity and temperature. – J. Acoust. Soc. America, V.40, 1966, N1, p.148-159.

12. Карташов В.М. та ін. Звіт про науково-дослідну роботу № 327. Розроблення системи комплексної обробки оптичних, інфрачервоних, акустичних і радіолокаційних сигналів для виявлення безпілотних літальних апаратів, визначення їх координат та параметрів руху. – Х.: ХНУРЕ, 2020. – 393 с.

13. Feight J.A. Acoustic characterization of a multi-rotor sUAV as a first step towards detection and identification via acoustic signature: Thesis for the degree of Bachelor of Science in Mechanical Engineering // West Virginia University. Morgantown, West Virginia. 2014. – 119 p.

14. В.Н. Олейников, О.В. Зубков, В.М. Карташов, И.В. Коротцев, 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.

15. V. Kartashov, V. Oleynikov, I. Koryttsev, S. Sheiko, O. Zubkov, S. Babkin, I. Selieznov. Use of Acoustic Signature for Detection, Recognition and Direction Finding of Small Unmanned Aerial Vehicles. 2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET). 2020. 4 p.

16. Kartashov V.M., Oleynikov V.N, Zubkov O.V., Koryttsev 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.

17.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.

18.V.M. Kartashov, G.I. Sidorov, S.A. Sheiko, M.M. Kolendovskaya, O.Yu. Sergienko. Principles of construction and assessment of technical characteristics of multi-frequency atmospheric sodar in the humidity measurement mode. Telecommunications and Radio Engineering. Vol. 79. N.4. 2020. – pp. 323-333.

19.S. Sheiko. Study of the method for assessing atmospheric turbulence by the envelope of sodar signals // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2/5 (92). – April, 2018. – p. 33–40.

20.Сідоров Г.І., Шейко С.О., Шаповалов С.В., Полонська А.С., Дмитренко А.І. Акустичний метод вимірювання турбулентного стану атмосферного прикордонного шару // Радіотехніка: Всеукр. міжвід. наук.-техн. зб. 2018. – Вип. 192. – С. 46–50.

21.Valerii V. Semenets, V. M. Kartashov, V. I. Leonidov. Registration of refraction phenomenon in the problem of acoustic sounding of atmosphere in airports zone. Telecommunications and Radio Engineering. Volume 77, Issue 5, 2018. – P. 461-468.

22. Sedunov, H. Salloum, A. Sutin, N. Sedunov and S. Tsyuryupa. UAV Passive Acoustic Detection // IEEE International Symposium on Technologies for Homeland Security (HST). 2018. P.1 – 6.

23. C. Knapp., G. Carter. The generalized correlation method for estimation of time delay. // IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, vol. 24. 1976. P. 320 – 327.

24. A. Ramamurthy, H. Unnikrishnan and K. D. Donohue. Experimental performance analysis of sound source detection with SRP PHAT- $\beta$  // IEEE Southeastcon. 2009. P. 422 – 427.

25. Salvati D., Drioli C., Foresti G.L. Incoherent Frequency Fusion for Broadband Steered Response Power Algorithms in Noisy Environments // IEEE Signal Process. Lett. Vol. 21. Num. 5. P. 581 – 585.

26. Красношарпа Т. Ю. Пасивні методи визначення місцезнаходження БПЛА з акустичного випромінювання / Т. Ю. Красношарпа // Радіоелектроніка та молодь у ХХІ столітті : тези доповідей 27-го Міжнародного молодіжного форуму, 10–12 травня 2023 р. – Харків : ХНУРЕ, 2023. – Т. 3. – С. 140–141.

27. Методичні вказівки з виконання атестаційної магістерської роботи за спеціальністю 8.05090102 «Апаратура радіозв'язку, радіомовлення і телебачення». Освітньо-кваліфікаційний рівень – магістр / Упоряд. В.М. Карташов, В.А. Тихонов, І.В. Савченко – Харків: ХНУРЕ, 2012. – 68 с.