

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)

Просторово-розподілена система акустичного моніторинга.
(тема)

Виконав:
студент 2 курсу, групи СТМм-22-1
Королович Р.Д.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 171 Електроніка
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна
Освітня програма Системи, технології і комп'ютерні засоби мультимедіа
(повна назва освітньої програми)

Керівник ас. Желанов О.О.
(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 171 Електроніка
(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Системи, технології і комп'ютерні засоби мультимедіа
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

«____» _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студенту Короловичу Роману Дмитровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Просторово-розподілена система акустичного моніторингу.

затверджена наказом по університету від " 20 " 11 2023 р. № 1371 Ст _____

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

3. Вихідні дані до роботи Виконати обґрунтування просторово-розподіленої системи моніторингу акустичної обстановки. Скласти загальну архітектуру системи виявлення. Аналітично описати сигнали мікрофонного масиву. Розробити загальний алгоритм виявлення БПЛА за допомогою акустичного сигналу. Описати процес сканування простору. Обґрунтувати алгоритм формування променя на основі критерію максимуму потужності. Оцінити похибки сканування. Обрати метод ідентифікації джерел звуку і алгоритм виділення ознак звуків БПЛА. Розробити алгоритм супроводу знайденого БПЛА. Провести моделювання трекінгу БПЛА.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

Вступ

1 Аналіз акустичних методів і засобів виявлення БПЛА.

2 Обґрунтування просторово-розподіленої системи моніторингу акустичної обстановки.

3 Розробка методик класифікації та супроводу джерел звукових сигналів.

Висновки

Перелік посилань

Додатки

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

1. Класичний акустичний моніторинг (1 слайд).
2. Військове застосування БПЛА (1 слайд).
3. Концепція акустичного виявлення (1 слайд).
4. Мета роботи (1 слайд).
5. Пеленгація джерела звуку (1 слайд).
6. Конфігурація системи (1 слайд).
7. Алгоритм виявлення БПЛА (1 слайд).
8. Сканування променя мікрофонної решітки (1 слайд).
9. Сигнали на виході решітки (1 слайд).
10. Вплив кількості мікрофонів (1 слайд).
11. Відношення пікової потужності до середньої (1 слайд).
12. Два джерела звуку (1 слайд).
13. Алгоритм процедури MFCC (1 слайд).
14. Розпізнавання звуків БПЛА (1 слайд).
15. Адаптивне формування променя (1 слайд).
16. Результати трекінгу БПЛА в ідеальних умовах (1 слайд).
17. Відстеження БПЛА в умовах шуму (1 слайд).
18. Відстеження в умовах перешкод (1 слайд).
19. Висновки (1 слайд).

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітичний огляд літератури	25.09.23–01.10.23	
2	Теоретичне обґрунтування методу	02.10.23–11.10.23	
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 _____ 25.09.2023 р. _____

Студент _____  _____ Роман КОРОЛОВИЧ _____

(підпис)

Керівник роботи _____  _____ Олексій ЖЕЛАНОВ _____

(підпис)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи: 64 сторінки, 26 рисунків, 4 таблиці, 24 джерела.

АКУСТИЧНИЙ СИГНАЛ, БПЛА, ВЕКТОР ОЗНАК, ВИЯВЛЕННЯ, МІКРОФОННА РЕШТКА, КОРЕЛЯЦІЙНА МАТРИЦЯ, МАТРИЦЯ ПЕРЕШКОД, СИГНАЛ-ПЕРЕШКОДА

Мета роботи – розробка концепції просторово-розподіленої системи акустичного моніторингу, яка би могла виявляти, аналізувати ознаки присутності шуму БПЛА у звуковому потоці, і передавати дані про пеленг БПЛА на центральний пульт.

Об'єкт дослідження – процеси приймання і обробки акустичних шумів БПЛА з метою їх виявлення і пеленгації.

Предмет дослідження – методи обробки акустичних шумів БПЛА в просторово-розподілених системах акустичного моніторингу.

Методи дослідження – теоретичний аналіз, математичні розрахунки, модельний експеримент.

Проведено аналіз акустичних методів і засобів виявлення БПЛА. Виконано обґрунтування просторово-розподіленої системи моніторингу акустичної обстановки. Розроблена методика класифікації та супроводу джерел звукових сигналів. Система змодельована в MATLAB і показала свою працездатність як в ідеальних умовах, так і при наявності шумів і завад.

ABSTRACT

Explanatory note to the qualification work: 64 pages, 26 figures, 4 tables, 24 sources.

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

The goal of the work is to develop the concept of a spatially distributed acoustic monitoring system, which could detect and analyze signs of the presence of UAV noise in the sound stream, and transmit data about the direction of the UAV to the central control panel.

The object of research is the processes of reception and processing of UAV acoustic noises for the purpose of their detection and direction finding.

The subject of the study is methods of processing acoustic noises of UAVs in spatially distributed acoustic monitoring systems.

Research methods – theoretical analysis, mathematical calculations, model experiment.

An analysis of acoustic methods and means of UAV detection was carried out. The substantiation of the spatially distributed acoustic environment monitoring system has been completed. A method of classification and monitoring of sound signal sources has been developed. The system is modeled in MATLAB and has shown its performance both in ideal conditions and in the presence of noise and interference.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів.....	8
Вступ.....	9
1 АНАЛІЗ АКУСТИЧНИХ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ВИЯВЛЕННЯ БПЛА.....	11
1.1 Принципи акустичного виявлення БПЛА.....	11
1.2 Аналіз поширення акустичних хвиль в атмосфері.....	13
1.3 Визначення напрямку на джерело звуку.....	18
1.4 Вплив рефракції на помилку визначення координат джерела.....	21
1.5 Висновки по розділу 3.....	24
2 ОБГРУНТУВАННЯ ПРОСТОРОВО-РОЗПОДІЛЕНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ АКУСТИЧНОЇ ОБСТАНОВКИ.....	26
2.1 Постановка задачі.....	26
2.2 Загальна архітектура системи виявлення.....	26
2.3 Описання сигналів мікрофонного масиву.....	29
2.4 Загальний алгоритм виявлення БПЛА за допомогою акустичного сигналу.....	30
2.5 Описання процесу сканування простору.....	31
2.5.1 Алгоритм формування променя на основі критерію максимуму потужності.....	31
2.5.2 Оцінка точності сканування.....	33
2.6 Висновки по розділу 2.....	39
3 РОЗРОБКА МЕТОДИКИ КЛАСИФІКАЦІЇ ТА СУПРОВОДУ ДЖЕРЕЛ ЗВУКОВИХ СИГНАЛІВ.....	41
3.1 Метод ідентифікації джерел звуку.....	41
3.1.1 Алгоритм виділення ознак звуків БПЛА.....	41
3.1.2 Розпізнавання звуку дрона за допомогою метода НММ.....	44
3.2 Алгоритм супроводу знайденого БПЛА за акустичним випромінюванням	47

3.2.1 Критерії оптимізації вагових коефіцієнтів.....	47
3.2.2 Застосування алгоритму RLS для оновлення вагового вектору.....	49
3.2.3 Результати моделювання трекінгу БПЛА.....	51
3.3 Висновки по розділу 3.....	55
Висновки.....	57
Перелік посилань.....	62
ДОДАТКИ.....	65
Додаток А. Графічний матеріал.....	66
Додаток Б. Відомість кваліфікаційної роботи.....	85

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,
СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

- БПЛА – безпілотний літальний апарат;
- ДВЗ – двигун внутрішнього згоряння;
- ДЗ – джерело звуку;
- M1, M2 ... MN – приймальні мікрофони;
- НММ – Hidden Markov Model – прихована марківська модель;
- PAPR – Peak to Average Power Ratio – відношення пікової потужності до середньої;
- RLS – Recursive Least Squares – адаптивному алгоритм рекурсивних найменших квадратів;
- SBF – sound beam forming – алгоритм формування променя;
- UCA – uniform circular array – кільцевий мікрофонний масив;
- α – кут пеленгу;
- θ – кут нахилу;
- ϕ – кут азимута;
- $E(.)$ – математичне очікування;
- i, j – номери точки сканування по нахилу і азимуту;
- I, J – кількість точок сканування по нахилу і азимуту;
- N_g – загасання внаслідок в'язкості середовища;
- N_m – молекулярне згасання;
- $p_{зв}$ – звуковий тиск;
- $R(n)$ – коваріаційна матриця сигналу для n -ї вибірки;
- τ – запізнення сигналів мікрофонів;
- T – інтервал спостереження сигналів;
- w – комплексний ваговий коефіцієнт;
- W – вектор ваги.

ВСТУП

Сучасні системи акустичного моніторингу шумової обстановки призначені для забезпечення правопорядку та профілактики правопорушень на території муніципальних утворень. Такі системи служать для збору інформації про акустичну обстановку, для виявлення та аналізу ознак тривожних подій у звуковому потоці та забезпечують:

- безперервний контроль за звуковою обстановкою;
- розпізнавання тривожних подій;
- відображення подій із картографічною прив'язкою інформації;
- інтеграцію аудіоінформації із системою відеоспостереження;
- привернення уваги оператора з метою своєчасного реагування, вжиття заходів та усунення наслідків;
- архівацію подій з можливістю автоматизованого пошуку інформації, що запитується.

Повномасштабне вторгнення Росії в Україну в лютому 2022 року розширило потенційні задачі таких систем. Це перший військовий конфлікт, в якому масово застосовуються безпілотні літальні апарати (БПЛА). Вони виконують як задачі військової розвідки, так і задачі нанесення ударів. Особливо небезпечне застосування ворогом ударних БПЛА на території великих міст. Такі БПЛА, як Шахед-136 або подібні, коштують відносно недорого в порівнянні з ракетами – декілька десятків тисяч доларів – але можуть нести на своєму борту близько 40 кг вибухівки.

Отже, подібні БПЛА, або як їх ще називають – барражуючий снаряд – становлять велику небезпеку. Тому дуже актуальною є задача їхнього своєчасного виявлення і знешкодження. Дані БПЛА оснащуються двигунами внутрішнього згоряння (ДВЗ), тому мають суттєву акустичну помітність. Що робить можливим успішне застосування просторово-розподілених систем акустичного моніторингу для їхнього виявлення.

Метою даної роботи є розробка концепції просторово-розподіленої системи акустичного моніторингу, яка би могла виявляти, аналізувати ознаки присутності шуму БПЛА у звуковому потоці, і передавати дані про пеленг БПЛА на центральний пульт.

Об'єкт дослідження – процеси приймання і обробки акустичних шумів БПЛА з метою їх виявлення і пеленгації.

Предмет дослідження – методи обробки акустичних шумів БПЛА в просторово-розподілених системах акустичного моніторингу.

Методи дослідження – теоретичний аналіз, математичні розрахунки, модельний експеримент.

1 АНАЛІЗ АКУСТИЧНИХ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ВИЯВЛЕННЯ БПЛА

1.1 Принципи акустичного виявлення БПЛА

Акустична помітність є важливим фактором, що доповнює, який дозволяє підвищити надійність виявлення БПЛА в умовах за яких «традиційні» засоби: оптичні та радіолокаційні, не можуть забезпечити необхідного рівня ймовірності виявлення повітряної цілі [1,2].

Повітряна ціль у польоті генерує акустичні (звукові) хвилі, що сприймаються акустичними мікрофонами, які перетворюють акустичний тиск на електричний сигнал (рис.1.1).

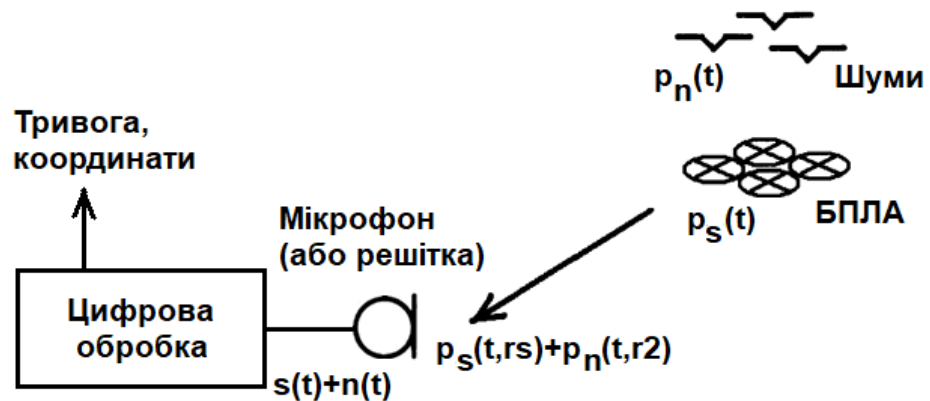


Рисунок 1.1 – Загальна концепція акустичного виявлення

Джерелами звукових хвиль, як правило, є рухові установки і лопаті повітряних гвинтів. Частота генерованого звуку кратна частоті обертання колінвала ПД (частота вихлопу гарячих газів), кількості та частоті обертання лопат повітряного гвинта. Інтенсивність звуку залежить від швидкості обтікання лопатей.

Русійні установки БПЛА відрізняють по кількості (однороторні або мультироторні БПЛА – три-, quadro-, гекса-, октокоптери) і побудові повітряних гвинтів [3] (рис.1.2 – зеленим позначені повітряні гвинти зустрічного обертання).

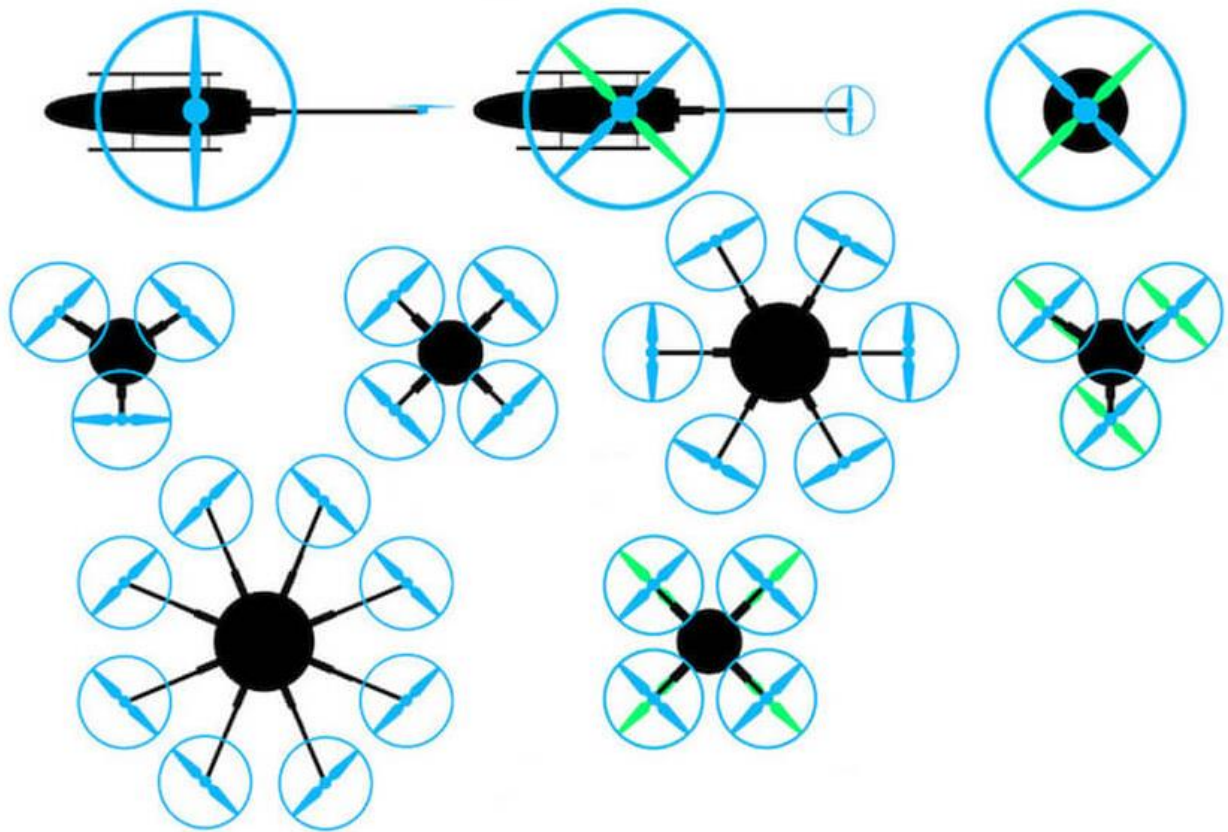


Рисунок 1.2 – Класифікація БПЛА по типу рушійної установки: однороторні або мультироторні БПЛА – три-, quadro-, гекса-, октокоптери (зеленим позначені повітряні гвинти зустрічного обертання)

У реальних середовищах звукові хвилі згасають внаслідок в'язкості повітряного середовища та молекулярного згасання. Повне згасання N являє собою суму [4]:

$$N = N_{\epsilon} + N_{\mathcal{M}}, \quad (1.1)$$

де N_{ϵ} – загасання внаслідок в'язкості середовища;

$N_{\mathcal{M}}$ – молекулярне згасання.

Звукові хвилі додатково згасають при поширенні вздовж поглинаючої поверхні і чим вище коефіцієнт поглинання цієї поверхні, тим більше загасання вона вносить у хвилю, що поширюється. Однак більш істотну роль у згасанні звукових хвиль відіграє турбулентність повітря. Неабиякою мірою

у цьому грає вітер і висхідні потоки повітря. На низьких частотах додаткове загасання залежить від відстані до джерела звуку. А на далеких (більше 4 км) відстанях високих частот практично не чути [5].

Поширення акустичних хвиль залежить стану атмосфери [5].

Застосування акустичних систем виявлення забезпечує:

- визначення пеленгу літального апарату;
- визначення класу (типу) літального апарату.

Акустичні системи мають такі переваги [6]:

– забезпечують стійке автоматичне виявлення малошвидкісних маловисотних повітряних цілей у будь-яких погодних умовах, в умовах поганої оптичної видимості та в умовах складних рельєфів;

– скритність роботи та збереження працездатності в умовах радіоелектронної протидії;

– малі габарити, низьке енергоспоживання та краще інших систем (радіолокаційних, оптико-електронних) задовольняють критерію «ефективність – вартість».

Акустичні системи знайшли своє застосування в охоронних системах, прикордонних структурах і непогано зарекомендували себе при виявленні одиночних цілей у відносно незашумлених умовах.

Основними недоліками, що обмежують застосування акустичних та акустичних систем при вирішенні завдань боротьби з БПЛА, є:

- низька точність визначення координат повітряних цілей;
- невеликі рубежі виявлення повітряних цілей: до 1,5...2,0 км за дальністю і до 1 км по висоті;
- низька чутливість до малозумних БПЛА.

1.2 Аналіз поширення акустичних хвиль в атмосфері

Дальність виявлення повітряних цілей при пасивному акустичному методі сильно залежить від стану атмосфери.

Акустична хвиля в атмосфері – коливальний рух частинок середовища з малими амплітудами стисливої речовини. У кожному місці речовини в акустичній хвилі відбуваються поперемінні стискування та розрідження.

Акустична хвиля переносить імпульс енергії. Приходить позитивна фаза хвилі та прискорює частинки речовини. Так як вплив позитивної фази відбувається деякий час, то різним гідродинамічним частинкам повідомляється в межах цієї фази різна позитивна швидкість, внаслідок чого одна частка наздоганяє іншу – стиснення. Потім приходить негативна фаза хвилі і повідомляє тим самим гідродинамічним частинкам швидкість протилежного напрямку – розрідження (рис.1.3). Тим часом тиск в точці спостереження описується виразом [5]:

$$p(t) = p_n + p_{зв}(t), \quad (1.2)$$

де $p_n \approx 10^5$ Па – нормальний атмосферний тиск;

$p_{зв}$ – звуковий тиск.

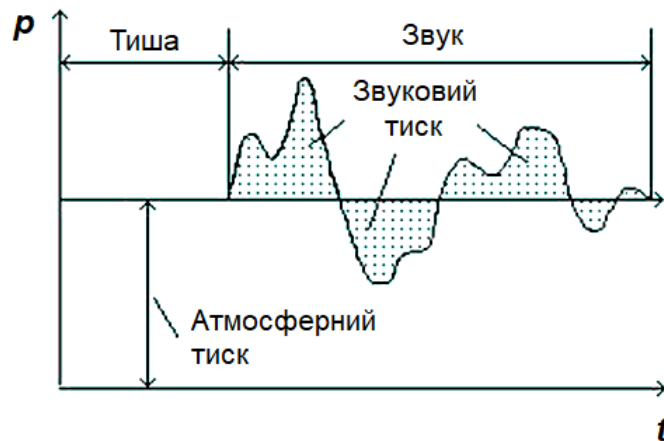


Рисунок 1.3 – Звуковий тиск

Звукова хвиля є носієм енергії у напрямку свого руху. Кількість енергії, що переноситься звуковою хвилею за одну секунду через переріз площею 1 м^2 , перпендикулярний до напрямку руху, називається інтенсивністю звуку.

Інтенсивність звуку визначається відношенням звукового тиску до акустичного опору середовища та вимірюється в $[\text{Вт}/\text{м}^2]$:

$$I = p_{зв}^2 / Z_A, \quad (1.3)$$

де $Z_A = \rho c$ – акустичний опір середовища;

ρ – густина середовища;

c – швидкість поширення звуку.

Для сферичної хвилі від джерела звуку з потужністю P , Вт інтенсивність звуку на поверхні сфери радіусу r дорівнює [5]

$$I = \frac{P}{4\pi r^2}. \quad (1.4)$$

Перенос енергії акустичних хвиль дозволяє одночасно переносити інформацію про джерело. При поширенні звуку в атмосферному повітрі та у будь-якому іншому середовищі відбувається його поглинання. Поглинання звуку – це явище незворотного перетворення енергії звукової хвилі на інший вид енергії, насамперед в енергію теплового руху частинок середовища. Поглинання супроводжується зменшенням звукового тиску.

Нехай звук поширюється вздовж осі Ox . Тоді залежно від відстані x відносно джерела звуку амплітуда звукового тиску зменшується по експоненційному закону [5]:

$$p_{зв}(x) = p_0 \exp(-\delta x), \quad (1.5)$$

де p_0 – звуковий тиск при $x = 0$,

δ – коефіцієнт звукопоглинання.

Фізичний сенс коефіцієнта звукопоглинання полягає в тому, що він

чисельно дорівнює величині, зворотній до відстані, на якій звуковий тиск зменшується в e разів [5]:

$$\frac{P_0}{P_{зв \max}} = e^1 = 2,71 \approx 3, \quad \delta \cdot x = 1, \quad \delta = \frac{1}{x}. \quad (1.6)$$

Одиниця вимірювання коефіцієнта звукопоглинання 1/м. Так як сила звуку (або інтенсивність) пропорційна до квадрату звукового тиску, закон звукопоглинання можна записати у вигляді [5]:

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

де I_0 – сила звуку (або інтенсивність) при $x = 0$.

Графіки залежностей $p_{зв}(x)$ та $I(x)$ показані на рис. 1.4 [5].

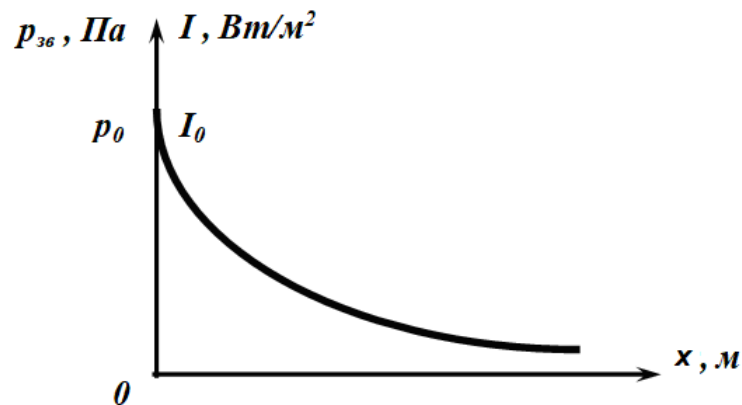


Рисунок 1.4 – Графіки залежності звукового тиску і сили звуку від відстані

З формули (1.7) слідує, що для рівня інтенсивності звуку справедливий вираз [5]:

$$\ln\{I(x)\} = \ln\{I_0 \cdot e^{-2\delta \cdot x}\} = \ln\{I_0\} + (-2\delta \cdot x). \quad (1.8)$$

Тоді

$$2\delta \cdot x = \ln\{I_0\} - \ln\{I(x)\} = \ln\left(\frac{I_0}{I(x)}\right), \quad \delta = \frac{1}{2x} \ln\left(\frac{I_0}{I(x)}\right), \quad (1.9)$$

або

$$\delta = \frac{\lg e}{2x} \lg\left(\frac{I_0}{I(x)}\right) = \frac{1,15}{x} \lg\left(\frac{I_0}{I(x)}\right). \quad (1.10)$$

Таким чином, коефіцієнт звукопоглинання можна вимірювати в децибелах на метр (дБ/м).

Звукопоглинання також можна описувати коефіцієнтом втрат, що дорівнює [5]:

$$\varepsilon = \frac{\delta \cdot \lambda}{\pi}, \quad (1.11)$$

де λ – довжина акустичної хвилі,

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

Класична теорія звукопоглинання була створена Стоксом і заснована на обліку впливу в'язкості (тобто, внутрішнього тертя між шарами повітря) і теплопровідності (вирівнювання температури між повітряними шарами). Спрощений вираз Стокса записується як [5]:

$$\delta = 53 \cdot \frac{\eta}{\rho_0 \cdot \nu} \cdot \gamma^2, \quad (1.12)$$

де η – в'язкість повітря,

ρ_0 – густина повітря при температурі 0°C ,

γ – коефіцієнт Пуассона,

ν – швидкість поширення звукової хвилі.

Для нормальних умов дана формула набуде такого вигляду:

$$\delta = 4,24 \cdot 10^{-11} \cdot \gamma^2. \quad (1.13)$$

Але формула Стокса (1.12) або (1.13) справедлива тільки для одноатомних газів, атоми яких мають три ступені свободи, що відповідає коефіцієнту Пуассона $\gamma = 1,67$.

Для газів з двох-, трьох- або багатоатомних молекул значення коефіцієнта Пуассона γ суттєво більше, оскільки звукова хвиля збуджує обертальні та коливальні ступені свободи молекул. Для газів такого типу (в тому числі, для повітря) більш точним є вираз [5]

$$\delta = 1,84 \cdot 10^{-11} \cdot \sqrt{\frac{T}{T_H}} \cdot \frac{p_H}{p} \cdot \gamma^2, \quad (1.14)$$

де $T_H = 273,15$ К – абсолютна температура, що відповідає 0°C ;

$p_H = 1013105$ Па – атмосферний тиск в нормальних умовах;

T і p – поточна температура та атмосферний тиск.

1.3 Визначення напрямку на джерело звуку

В основі методу пеленгації лежить визначення різниці ходу акустичної хвилі від джерела сигналу (рис. 1.5) до приймальних мікрофонів M1 і M2 по часовому зсуву (різниці фаз) прийнятого мікрофонами сигналу від поточного джерела акустичного випромінювання [7].

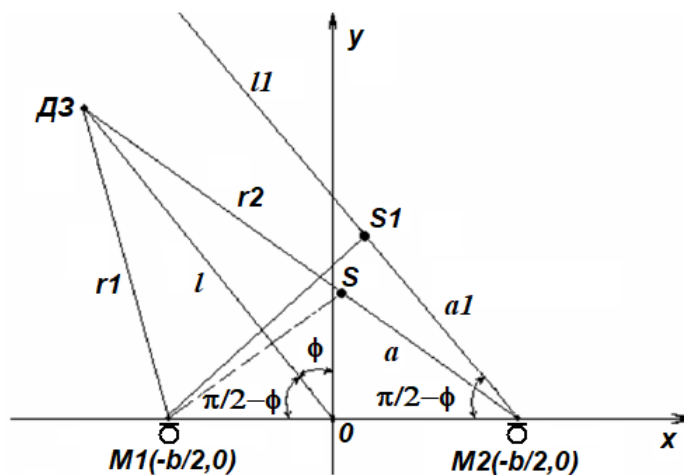


Рисунок 1.5 – Схема пеленгації джерела звуку

На рис. 1.5 позначені:

- ДЗ – джерело звуку;
- М1 та М2 – приймальні мікрофони;
- r_1 та r_2 – відстані від ДЗ до приймальних мікрофонів (довжина ходу звукової хвилі до М1 та М2);
- a – різниця ходу хвиль, що дорівнює відрізку $[S; M2]$;
- b – база мікрофонів, відповідно, вони мають координати прийнятої на рис. 1.5 системі координат $M1(-b/2; 0)$, $M2(b/2; 0)$;
- l – пеленгаційний промінь (і одночасно l позначає відстань від початку координат до ДЗ);
- α – кут пеленгу;
- a_1 – відрізок $[S1; M2]$, що приблизно представляє різницю ходу хвиль до мікрофонів (співвідношення 2);
- l_1 – допоміжний промінь, на ньому будується відрізок a_1 .

Зазначимо, що трикутник ДЗ, М1, М2 – основний пеленгаційний трикутник, що визначає схему пеленгації.

$$a_1 = b \cdot \sin \varphi, \quad (1.15)$$

$$a = c\tau, \quad (1.16)$$

де τ – часовий зсув між сигналами в мікрофонах М1 і М2;

c – швидкість звуку.

При $l \gg b$ можна стверджувати, що $a \approx a_1$, тобто

$$c\tau \approx b \cdot \sin \varphi, \quad (1.17)$$

звідки кут пеленгу [7]

$$\varphi = \arcsin \frac{c\tau}{b}. \quad (1.18)$$

Запізнення τ двох вихідних сигналів $s_1(t)$ та $s_2(t)$, викликаних одним джерелом, можна обчислити, використовуючи взаємкореляційну функцію [7]

$$R(\tau) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} s_1(t)s_2(t + \tau)dt, \quad (1.19)$$

де T – інтервал спостереження сигналів.

На рис.1.6 показано приклад реалізації звукових сигналів $s_1(t)$ та $s_2(t)$, а також обвідної взаємкореляційної функції $|\bar{R}(\tau)|$ при базі $b = 1$ м [7].

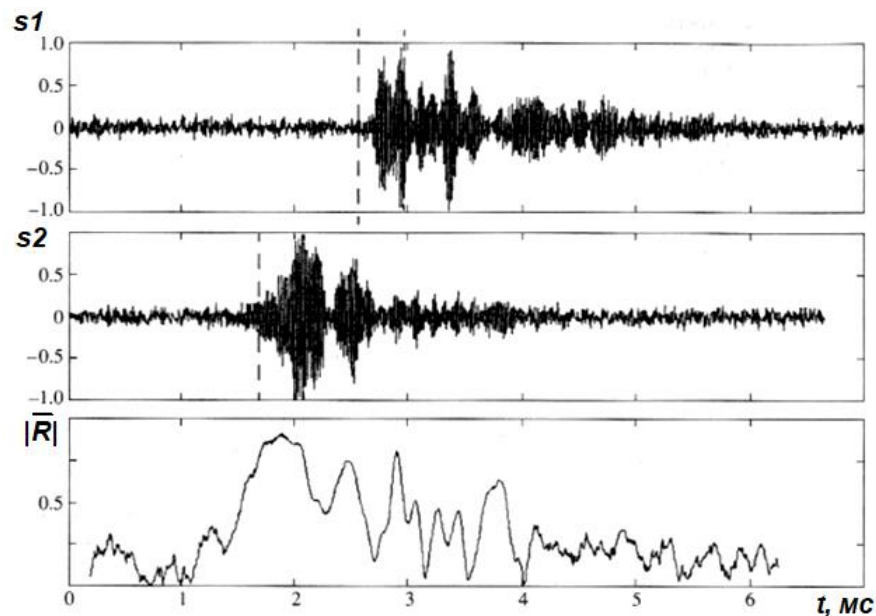


Рисунок 1.6 – Реалізації звукових сигналів $s_1(t)$ та $s_2(t)$, а також обвідної взаємкореляційної функції $|\bar{R}(\tau)|$ при базі $b = 1$ м [7]

Високочастотні звукові коливання мають меншу довжину хвилі, вони є найбільш швидкозмінними, що призводить до загострення піку функції $R(\tau)$. Тобто за допомогою високочастотних звукових коливань можна максимально точно виробляти пеленг об'єктів, але в той же час вони найшвидше загасають.

Низькочастотні коливання мають більшу довжину хвилі, вони повільніше змінюються в часі, і точність пеленгу частково залежатиме від бази акустичних датчиків.

1.4 Вплив рефракції на помилку визначення координат джерела

Атмосферна рефракція звукових хвиль визначається градієнтами зміни метеорологічних величин – температури та швидкості вітру. Вологість зневажно мало впливає на вигляд траєкторії поширення. Також можна зневажити впливом горизонтальних градієнтів метеовеличин на рефракційні ефекти, тому що ці градієнти на відстанях менше 1000 м зневажно малі.

Вертикальні градієнти швидкості вітру (так званий зсув) спостерігаються в приповерхньому шарі атмосфери $h = 1...2$ м і на висоті першої інверсії температури $h = 100...200$ м, тобто в областях висот, на яких використання БПЛА не має практичного значення. Крім того, при швидкостях вітру $v_2 > 7$ м/с рух малих БПЛА стає нестійким.

Основний внесок у явище рефракції акустичних хвиль в атмосфері дають вертикальні градієнти температури [8]

$$\gamma_T = -\frac{dT}{dh}. \quad (1.20)$$

На рис.1.7 наведено схематичне пояснення впливу рефракції на помилку визначення дальності та кута місця БПЛА. Вихідними даними для розрахунку помилок є горизонтальна дальність D_i і кут місця β_2 , визначені методом пасивної акустичної локації.

На етапі розрахунку кута β_2 приходу акустичної хвилі використовується значення величини швидкості звуку c в приземному шарі, що розраховується по формулі [8]:

$$c = 20,06\sqrt{T}, \quad (1.21)$$

де T – температура повітря в K° у приземному шарі.

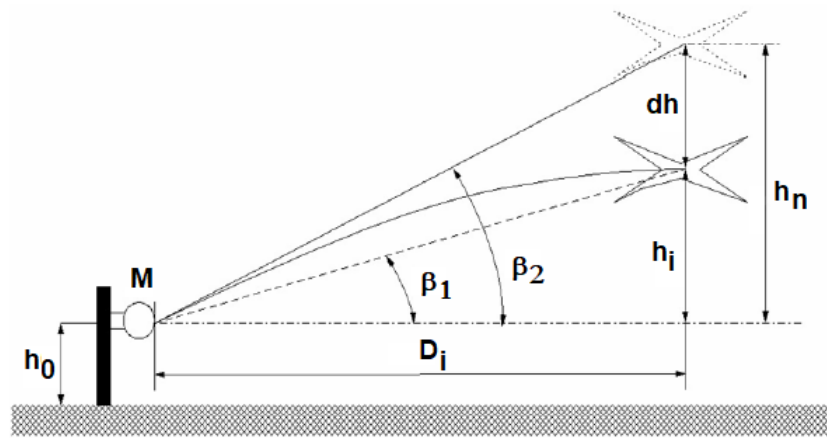


Рисунок 1.7 – Вплив рефракції на похибку визначення координат БПЛА [8]

Отже, у структурі системи обробки сигналів повинен бути присутнім вимірювач температури приземного повітря [8].

Наступна операція процедури обробки це визначення істинного положення цілі. Для розрахунку істинної траєкторії поширення акустичної хвилі від цілі до приймача використовується припущення про вертикальний профіль температури повітря, що задається рядом дискретних значень [8]:

$$T(h_i) = [T(h_0 + \Delta h(i - 1))], \quad (1.22)$$

де $i = 1..n$, $n\Delta h = h_{\max}$.

Вони отримані на дискретних рівнях висоти h_i з інтервалом Δh . Тоді застосовуючи закон Снелліуса, одержимо для кожного кроку висоти послідовний ряд кутів переломлення β при переході хвилі із i -го шару в $i + 1$ шар [8]:

$$\beta_{i+1} = \arcsin\left(\sin \beta_i \sqrt{\frac{T_{i+1}}{T_i}}\right), \quad (1.23)$$

де T_i і T_{i+1} – температура попереднього і наступного шару повітря відповідно на висоті h_i і h_{i+1} .

Для кожного з отриманих значень β_i , розраховується збільшення горизонтальної дальності ΔD і проекції збільшення траєкторії поширення акустичної хвилі в досліджуваному діапазоні відстаней $D = 0 \dots D_{\max}$ у межах кожного дискретного збільшення висоти Δh за формулою [8]:

$$\Delta D_i = \Delta h \cdot \operatorname{tg} \beta_i. \quad (1.24)$$

У результаті проведених розрахунків одержимо ряд значень збільшень дальності $D_i = (\Delta D_1, \Delta D_1, \dots, \Delta D_{n-1})$ для кожного Δh_i значення збільшення висоти.

Розрахунок значень функції $\Psi(D, h)$ припиняється при виконанні рівності $D_i = D_y$.

Тоді координати D і h кінцевої точки траєкторії $\Psi(D, h)$ визначається в такому вигляді [8]:

$$D_y(k) = \sum_{i=1}^k \Delta D_i, \quad h_y = \Delta h \cdot k, \quad (1.25)$$

де $k = 1 \dots n - 1$.

Звідки помилка вимірювання висоти БПЛА визначиться як [8]

$$dh = D_y / \operatorname{tg} \beta_a - h_y, \quad (1.26)$$

а помилка визначення кута місця

$$d\beta = \beta_a - \arctg(h_y / D_y). \quad (1.27)$$

В (1.26) і (1.27) входять істинна висота і істинний кут місця цілі при лінійній траєкторії поширення акустичної хвилі.

1.5 Висновки по розділу 1

1. Сучасні системи акустичного моніторингу шумової обстановки призначені для забезпечення правопорядку та профілактики правопорушень на території муніципальних утворень. Такі системи служать для збору інформації про акустичну обстановку, для виявлення та аналізу ознак тривожних подій у звуковому потоці.

2. Повномасштабне вторгнення Росії в Україну в лютому 2022 року розширило потенційні задачі таких систем. Це перший військовий конфлікт, в якому масово застосовуються безпілотні літальні апарати (БПЛА). Вони виконують як задачі військової розвідки, так і задачі нанесення ударів.

3. Особливо небезпечне застосування ворогом ударних БПЛА на території великих міст. Такі БПЛА, як Шахед-136 або подібні, коштують відносно недорого в порівнянні з ракетами – декілька десятків тисяч доларів – але можуть нести на своєму борту близько 40 кг вибухівки. Тому дуже актуальною є задача їхнього своєчасного виявлення і знешкодження.

4. Дані БПЛА оснащуються двигунами внутрішнього згорання (ДВЗ), тому мають суттєву акустичну помітність. Що робить можливим успішне застосування просторово-розподілених систем акустичного моніторингу для їхнього виявлення.

5. Пасивні акустичні системи містять декілька мікрофонів і систему обробки звукової інформації, що поступає з мікрофонів. Головним обмеженням системи є зовнішні акустичні шуми. В разі БПЛА з електродвигунами вони обмежують радіус дії системи до десятків метрів, а у

разі БПЛА з двигунами внутрішнього згоряння – до сотень метрів. Тому використання просторово розподілених систем дасть можливість підвищити надійність роботи систем виявлення.

6. Пасивні акустичні системи з мікрофонними решітками можуть виконувати функцію пеленгації джерела звуку по різниці часу запізнення сигналів в мікрофонних каналах. Розрахунок часу запізнення можна проводити шляхом обчислення функції взаємної кореляції сигналів в каналах і подальшого визначення часової координати її максимуму.

7. Кваліфікаційна робота виконується на кафедрі МІРЕС ХНУРЕ. На кафедрі проводяться дослідження в таких наукових областях, як виявлення та розпізнавання БПЛА за результатами акустичного спостереження [7-14], створення систем зондування атмосфери за допомогою акустичних хвиль [15-18]. Отже, дослідження в даній роботі пов'язані і ґрунтуються на традиційному напрямку робіт колективу і студентів кафедри МІРЕС.

2 ОБГРУНТУВАННЯ ПРОСТОРОВО-РОЗПОДІЛЕНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ АКУСТИЧНОЇ ОБЧСТАНОВКИ

2.1 Постановка задачі

Досліджувана просторово-розподілена система акустичного моніторингу складається з трьох основних частин:

– по-перше, використовується масив мікрофонів, що розташовані по єдиному колу (uniform circular array – UCA), щоб сформувати діаграму спрямованості для сканування простору і знаходження джерела звуку;

– по-друге, в системі використовується прихована марківська модель (Hidden Markov Model – HMM) для розпізнавання та класифікації джерела звуку, щоби визначити це БПЛА чи якесь інше джерело.

– по-третє, якщо це БПЛА, то система фіксує його звук елементами мікрофонного масиву і використовує записаний звук як опорний сигнал для відстеження, заснованого на адаптивному алгоритмі формуванні променя (Recursive Least Squares – RLS).

Задача дослідження – шляхом моделювання в системі MATLAB, що проводиться в ідеальних умовах (без фонового шуму і звуків перешкод) і в неідеальних умовах (з фоновим шумом і звуками перешкод), оцінити ефективність даної конфігурації просторово-розподіленої системи під час відстеження БПЛА.

2.2 Загальна архітектура системи виявлення

Акустична система має виявляти БПЛА на основі їх звуку, відділяти звук БПЛА шляхом алгоритму розпізнавання з прихованою харківською моделлю HMM та подальшого відстеження шляхом формування променя за допомогою круглого мікрофонного масиву.

В даній роботі розглядається масив з 32 мікрофонних елементів ($m = 1, 2, 3, \dots, 32$) для сканування зони огляду.

На рис.2.1 показана архітектура досліджуваної просторово-розподіленої системи для виявлення та ідентифікації БПЛА за допомогою акустичних сигналів.

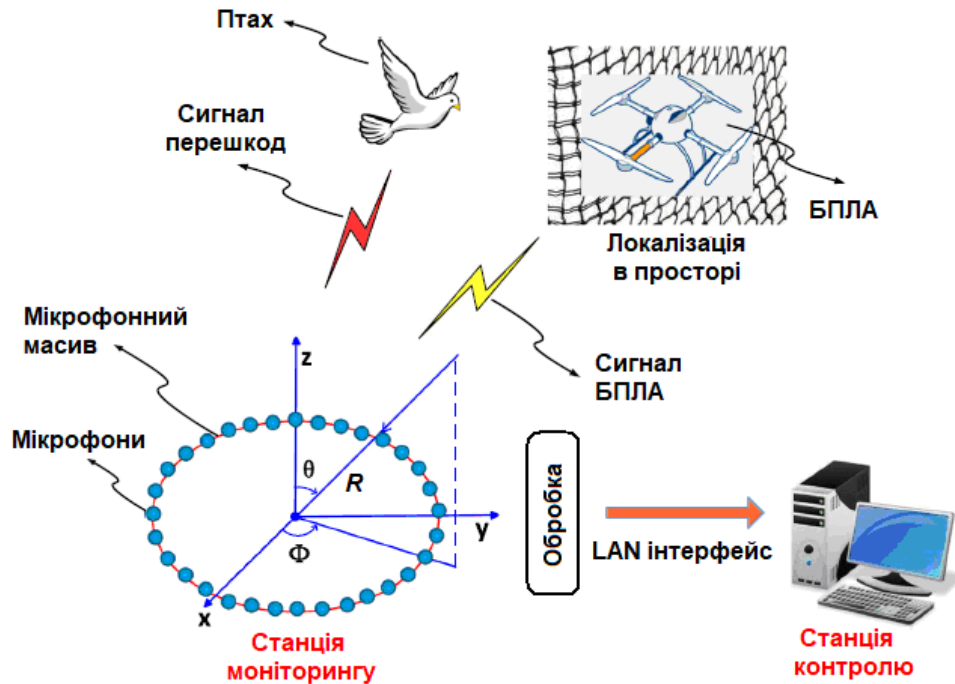


Рисунок 2.1 – Архітектура досліджуваної просторово-розподіленої акустичної системи для виявлення та ідентифікації БПЛА

Мікрофонні елементи масиву розподілені рівномірно по колу з кутовою відстанню

$$\phi_m = \frac{2\pi(m-1)}{12}, \quad (2.1)$$

і радіусом $R = 0,2$ м.

Вибірка сигналу $x_m(n)$ приймається m -м елементом масиву, де n – часовий індекс. Вважатимемо, що частота дискретизації сигналів мікрофонів становить $F_s = 44$ кГц у процесі збору даних.

Напрямок знаходження об'єкта в повітрі розраховується по азимуту і куту місця. Таким чином, азимут знаходиться на площині xy по відношенню до осі x і позначається як ϕ , а зенітний кут по відношенню до осі z позначається як θ .

Спочатку використовується алгоритм формування променя (sound beam forming – SBF) для сканування простору і локалізації джерел акустичних сигналів в небі. Сканування виконується від $\theta = 0^\circ$ до 90° по зенітному куту та від $\phi = 0^\circ$ до 360° азимуту.

Сканування простору має виявляти звуки БПЛА, але й інші об'єкти також можуть бути в небі, наприклад птахи або літаки. Взагалі, літаки літають на дуже великій висоті, тому птахи можуть бути основним джерелом перешкод під час сканування цілей в повітрі.

Модель в даній роботі розглядає сигнали БПЛА (звуковий сигнал цілі), а також птахів (звуковий сигнал перешкоди), як показано на рис. 2.1.

Рівномірна кругова решітка (uniform circular array – UCA) може забезпечити сканування в межах 360° по азимуту та може надати оцінку як азимуту, так і зенітного кута одночасно.

Пропонується використовувати саме круглу мікрофонну решітку з горизонтальним розташуванням для 3D сканування простору, оскільки така конфігурація дає рівномірну роздільну здатність по всьому азимутальному виміру, а також забезпечує найкращу продуктивність сканування коли точне місце розташування джерела невідоме [19].

Зазвичай в круглому мікрофонному масиві UCA використовується від 6 до 36 мікрофонів. У даній роботі обрано конфігурацію з 32 мікрофонів, тому що ця кількість дає достатньо швидке сканування при потрібному просторовому розрізненні.

На рис.2.2 показано конфігурацію круглого мікрофонного масиву, в якому рівномірно розміщені 32 мікрофони. Осі x , y та z представляють координати масиву формування променя, в якому вісь x і вісь y позначають горизонтальну площину, а вісь z вказує висоту.

2.3 Описання сигналів мікрофонного масиву

Розглянемо джерело акустичного сигналу з напрямом (θ, ϕ) , звук від якого потрапляє на мікрофонний масив, і нехай $F(\theta, \phi)$ позначає коефіцієнт спрямованості мікрофонного масиву у напрямку (θ, ϕ) .

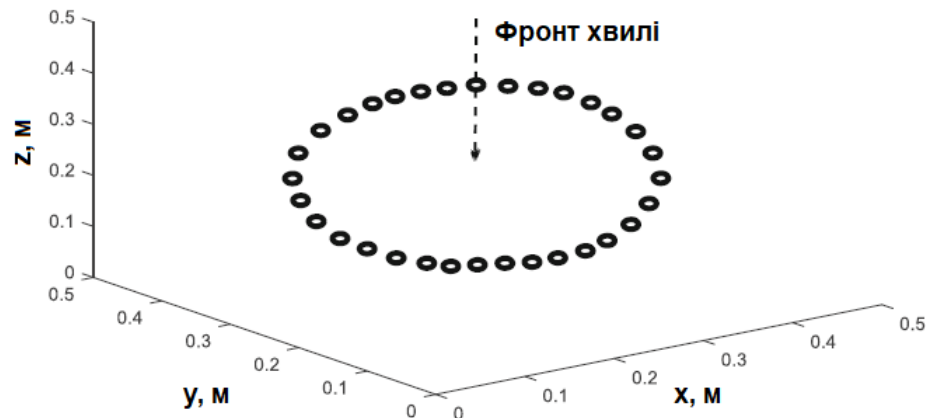


Рисунок 2.2 – Конфігурація мікрофонного масиву

Сигнал кожного мікрофону в масиві зважений комплексним коефіцієнтом $W(m)$, $m = 0, 1, 2, \dots, M - 1$.

Оскільки мікрофони в масиві однаково віддалені від його центру та розташовані з радіусом R , азимутальний кут ϕ_m m -го мікрофону становить

$$\phi_m = \frac{2\pi m}{M}. \quad (2.2)$$

Фазовий зсув між сигналами мікрофонів описується таким чином:

$$\beta_m = -aR \cos(\phi - \phi_m) \sin \theta, \quad (2.3)$$

де $a = 2\pi/\lambda$, λ – довжина звукової хвилі.

З цього випливає, що діаграма спрямованості круглого мікрофонного масиву з M однаково віддалених елементів можна описати як:

$$F(\theta, \phi) = \sum_{m=0}^{M-1} A_m \exp\{j[\alpha_m - aR \cos(\phi - \phi_m) \sin \theta]\}, \quad (2.4)$$

де A_m – амплітуда сигналу в m -му мікрофоні решітки,

$A_m e^{j\alpha_m}$ – комплексний ваговий коефіцієнт для сигналу в m -му мікрофоні решітки.

Для того, щоби направити промінь мікрофонної решітки під кутом (θ_0, ϕ_0) у просторі, фазу вагового коефіцієнта для m -го мікрофону решітки можна вибрати як:

$$\alpha_m(\theta_0, \phi_0) = aR \cos(\phi_0 - \phi_m) \sin \theta_0. \quad (2.5)$$

Для виявлення БПЛА на основі розпізнавання звуку в досліджуваній системі спочатку виконується сканування джерел звуку в небі через алгоритм SBF – sound beam forming. Потім використовується прихована марківська модель НММ для класифікації джерела звуку.

2.4 Загальний алгоритм виявлення БПЛА за допомогою акустичного сигналу

Сканування за допомогою SBF базується на критерії максимізації вихідної потужності решітки в діапазоні сканування зенітного кута від 0° до 90° і азимута – від 0° до 360° . Коли алгоритм SBF завершує сканування, система визначає наявність джерел звуку. Це може бути літак, птах, БПЛА. Для того, щоби ідентифікувати джерело звуку існує відомий метод класифікації джерел на основі прихованих марківських моделей (НММ).

Якщо класифікатор НММ визначає звук як БПЛА, то адаптивне формування променя вимагає подальшого підсилення сигналів. Для цього

використовується рекурсивний метод найменших квадратів – RLS – Recursive Least Squares. Отже, отримання опорного сигналу для алгоритму RLS базується на процесах сканування та подільшої класифікації.

Крім того, навіть якщо потім одночасно будуть діяти інші заважаючі звукові сигнали, ми все одно зможемо відстежувати ціль за допомогою опорного сигналу та оновлення місцезнаходження БПЛА.

На рис.2.3 показано загальний алгоритм виявлення БПЛА за допомогою акустичного сигналу.

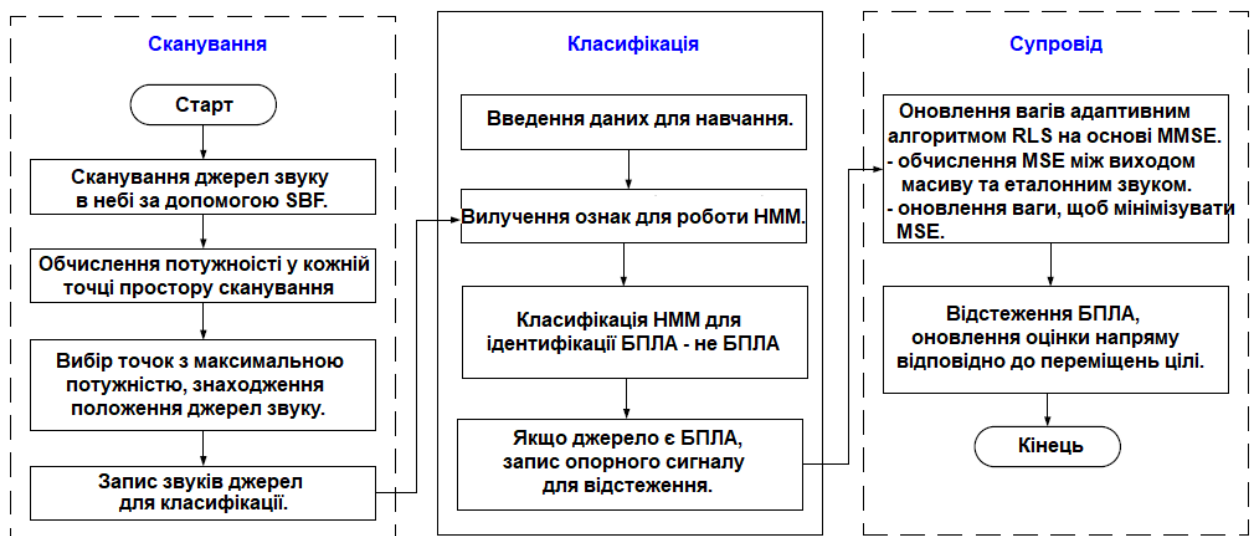


Рисунок 2.3 – Загальний алгоритм виявлення БПЛА за допомогою акустичного сигналу

Розглянемо більш детально процедури сканування, класифікації і супроводу.

2.5 Описання процесу сканування простору

2.5.1 Алгоритм формування променя на основі критерію максимуму потужності

Сканування та виявлення джерел звуку здійснюється на основі алгоритму SBF. В даному алгоритмі комплексний вектор вагових

коефіцієнтів мікрофонів масиву змінюється таким чином, щоб змінити напрямок променя у відповідності з заданою сіткою. Таким чином, вихідна потужність розраховується в кожній точці, і потім знаходиться максимальне значення.

Цей процес повторюється всі точки сітки сканування не будуть проскановані, а потім порівнюємо вихідну потужність кожного результату сканування.

Точка, яка дає максимальну вихідну потужність, вказує на розташування джерела звуку в тривимірному просторі, тобто максимум діаграми спрямованості збігається з напрямком на об'єкт. Вихідний сигнал формувача променя можна записати у вигляді:

$$y(n, \theta, \phi) = \sum_{m=1}^M w_m^*(\theta, \phi) x_m(n) = W^*(\theta, \phi) X(n), \quad (2.6)$$

де $W(\theta, \phi) = [w_1(\theta, \phi), w_2(\theta, \phi), \dots, w_M(\theta, \phi)]$ – ваговий вектор,

$X(n) = [x_1(n), x_2(n), \dots, x_M(n)]$ – вектор сигналу решітки на n -й вибірці.

Вихідна потужність кожної точки сканованої області розраховується як:

$$\begin{aligned} P(\theta, \phi) &= E\left(|y(n, \theta, \phi)|^2\right) = W^*(\theta, \phi) \cdot E\left(X(n)X^*(n)\right) \cdot W(\theta, \phi) = \\ &= W^*(\theta, \phi) \cdot R(n) \cdot W(\theta, \phi). \end{aligned} \quad (2.7)$$

де W^* – комплексно спряжений вектор ваги,

$E(.)$ – позначає математичне очікування,

$R(n)$ – коваріаційна матриця сигналу для n -ї вибірки:

$$R(n) = X(n)X^*(n). \quad (2.8)$$

Отже, ми можемо розрахувати вихідну потужність формувача променя згідно (2.8) і змінювати θ і ϕ , щоби знайти максимальну потужність, що спочатку ідентифікує положення джерела звуку.

2.5.2 Оцінка точності сканування

Оцінимо точність сканування методом SBF. На рис.2.4 показана траєкторія сканування простору.

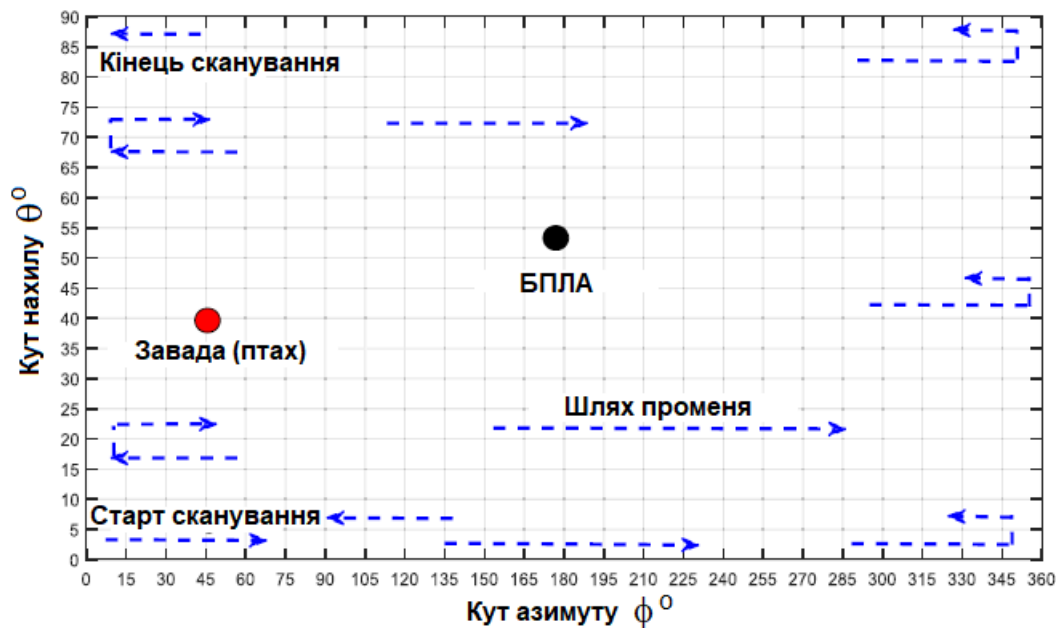


Рисунок 2.4 – Траєкторія сканування простору

Траєкторія починається з 0° по куту нахилу та 0° по азимуту. Спочатку сканування променем слідує за маршрутом, збільшуючи кут нахилу і азимутальний кут з кроком 5° і 15° відповідно. Стрілки вказують на рух променя при скануванні джерел звуку в 3D просторі. Вихідна потужність розраховується для кожної точки сітки сканування.

Після цього виконується порівняння вихідної потужності всіх точок сітки та обираються ті точки, які мають максимальний вихідний сигнал, що вказує на наявність джерела звуку в даному напрямі.

Розглянемо одне джерело звуку (БПЛА) і обчислимо вихідну потужність в даному напрямку.

На рис.2.5 показаний вихідний сигнал при кожному променевому скануванні по сітці за кутом нахилу та азимутом. Дані сигнали отримані шляхом моделювання в MATLAB.

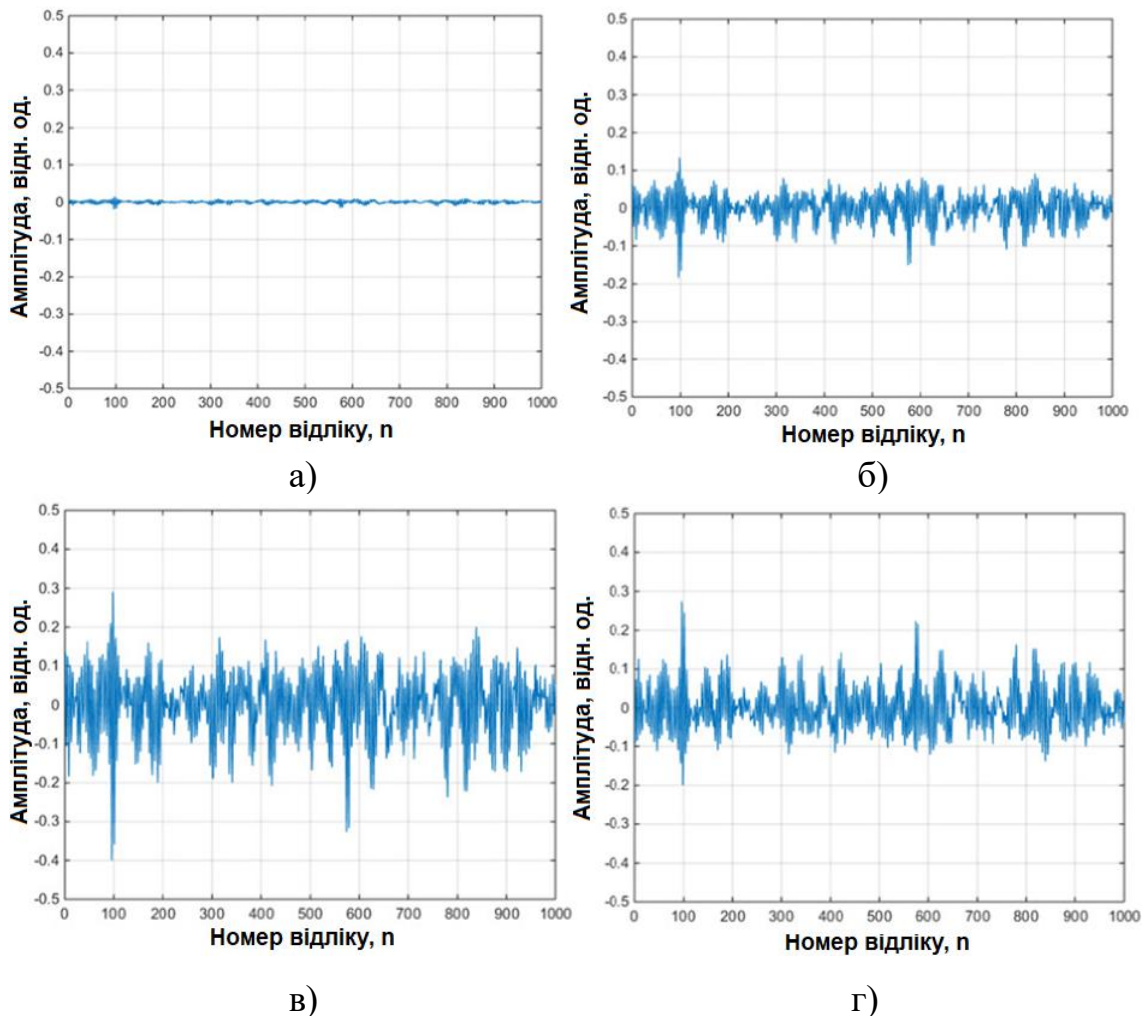


Рисунок 2.5 – Вихідний сигнал у певних точках сітки сканування променя (нахил, азимут): а (10° , 20°), б (75° , 90°), в (45° , 180°) і г (65° , 310°)

На рис. 2.5, в чітко помітно, що максимальна амплітуда сигналу спостерігається при куті нахилу 45° і азимуті 180° . Отже, джерело звуку має знаходитися в даному напрямку, оскільки вихідний сигнал більший за попередньо визначений поріг.

Зрозуміло, що потрібно також перевіряти вихідну потужність в інших точках сітки, але вихідна потужність сигналу низька, як показано на рис.2.5, а, б, г.

На рис.2.6 показані графіки вихідної потужності мікрофонної решітки при скануванні по азимуту і куту нахилу при різній кількості мікрофонів в масиві: 12 (а), 24 (б) і 32 (в).

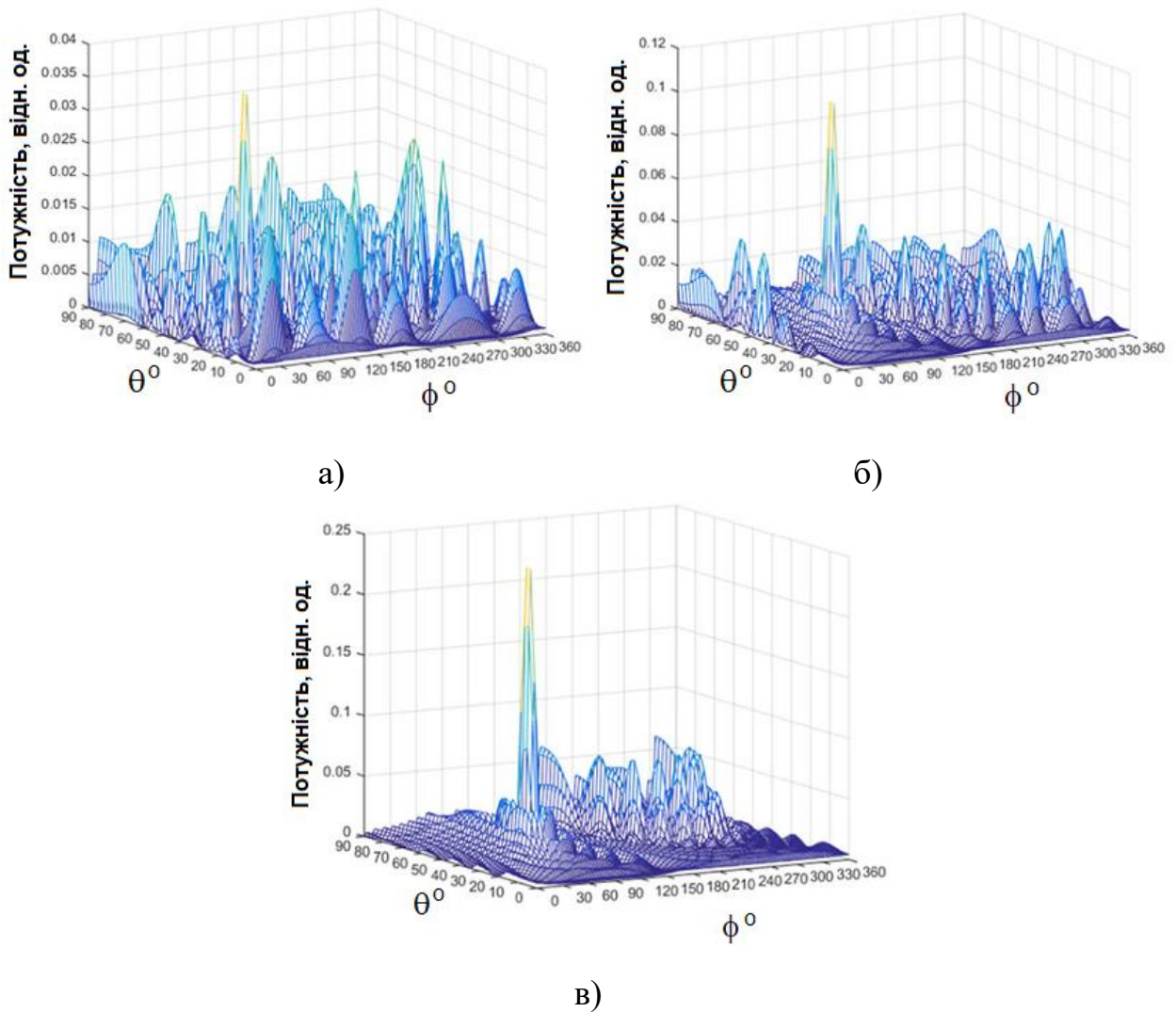


Рисунок 2.6 – Графіки вихідної потужності мікрофонної решітки при скануванні по азимуту і куту нахилу при різній кількості мікрофонів в масиві: 12 (а), 24 (б) і 32 (в).

Просторова роздільна здатність при скануванні променя по всій площі спостереження (тобто, азимут від 0° до 360° і кут нахилу від 0° до 90°) залежить від радіуса круглого мікрофонного масиву та числа мікрофонів.

В даній роботі використано радіус 0,2 м, і задачею є знайти кількість мікрофонів, що забезпечує діаграму спрямованості решітки з достатньо малим рівнем бічних пелюстків.

З рис. 2.6, а чітко видно, що 12 мікрофонів в решітці недостатньо, тому що жовта область максимального піку, побудована по рівню 0,707 (що вказує на розташування джерела звуку), не сильно відрізняється від пікової потужності для інших точок сітки. Це бічні пелюстки діаграми.

На рис. 2.6, б рівень бічних пелюстків менше, але все ще достатньо великий при 24 мікрофонах в решітці. Тому що пікова потужність жовтої області не є досить високою, порівняно з піковою потужністю інших точок сітки сканування.

Графік на рис. 2.6, в має найменший рівень бічних пелюстків (при 32 мікрофонах в решітці), оскільки пікова потужність жовтої області досить висока порівняно з іншими піками. В табл.2.1 зазначені відносні максимальні рівні бічних пелюстків для різної кількості мікрофонів в решітці.

Таблиця 2.1 – Відносні максимальні рівні бічних пелюстків для різної кількості M мікрофонів в решітці

M , шт.	12	24	32
Основний пелюсток, відн. од.	0,03	0,09	0,21
Максимальний бічний пелюсток, відн. од.	0,022	0,039	0,06
Рівень максимального бічного пелюстка, відн. од.	0,73	0,43	0,29

Таким чином, обираємо конфігурацію 32 мікрофонних елемента з радіусом 0,2 м для пошуку джерела звуку, оскільки така конфігурація забезпечує рівень максимального бічного пелюстка менше 0,3.

Крім того, досліджена залежність відношення пікової потужності до середньої при скануванні всього простору (Peak to Average Power Ratio – PAPR) від кількості мікрофонів при різних радіусах круглого масиву мікрофонів (0,18 м, 0,2м, 0,22 м і 0,25 м). Дана залежність показана на рис. 2.7.

Значення відношення пікової потужності до середньої $PAPR$ визначається по формулі

$$PAPR = \frac{\max\{P(\theta_i, \phi_j)\}}{\sum_i \sum_j P(\theta_i, \phi_j) / IJ}, \quad (2.9)$$

де i, j – номери точки сканування по нахилу і азимуту відповідно;

I, J – кількість точок сканування по нахилу і азимуту відповідно.

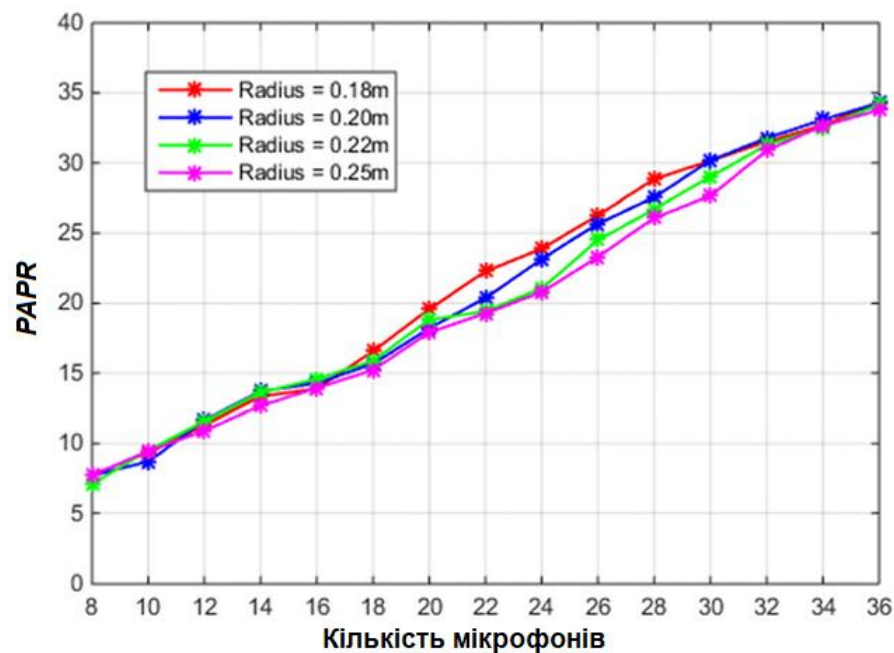


Рисунок 2.7 – Залежність відношення пікової потужності до середньої (Peak to Average Power Ratio – PAPR) від кількості мікрофонів при різних радіусах масиву

Очевидно, що $PAPR$ збільшується при збільшенні кількості мікрофонів і за рахунок зменшення радіуса масиву (сигнали в різних точках є більш корельованими). Тим не менш, від 8 до 20 мікрофонів забезпечують аналогічну величину $PAPR$ на різних радіусах (0,18 м, 0,2 м, 0,22 м і 0,25 м) кругового масиву, як показано на рис. 2.7.

Використання від 20 до 32 мікрофонів при різних радіусах (0,18 м, 0,2 м, 0,22 м і 0,25 м) для кругового масиву має помітний вплив на величину $PAPR$, масив з радіусом 0,18 м показує найбільшу величину $PAPR$.

При кількості мікрофонів більше 32 величина *PAPR* знову стає ідентичною для різного радіусу мікрофонного масиву. Отже, обираємо число мікрофонів 32 як доцільну кількість в нашому експерименті.

Враховуємо фонові перешкоди під час сканування двох джерел для перевірки впливу на точність результатів сканування. На рис.2.8 показана кольорова карта результату сканування, жовті області вказують на розташування джерел звуку – БПЛА.

Також розглянемо сценарій з однією ціллю (БПЛА) і одним джерелом перешкод (птах), результати сканування для цього випадку наведено на рис. 2.9, на якому жовті області визначають розташування цілі та перешкоди.

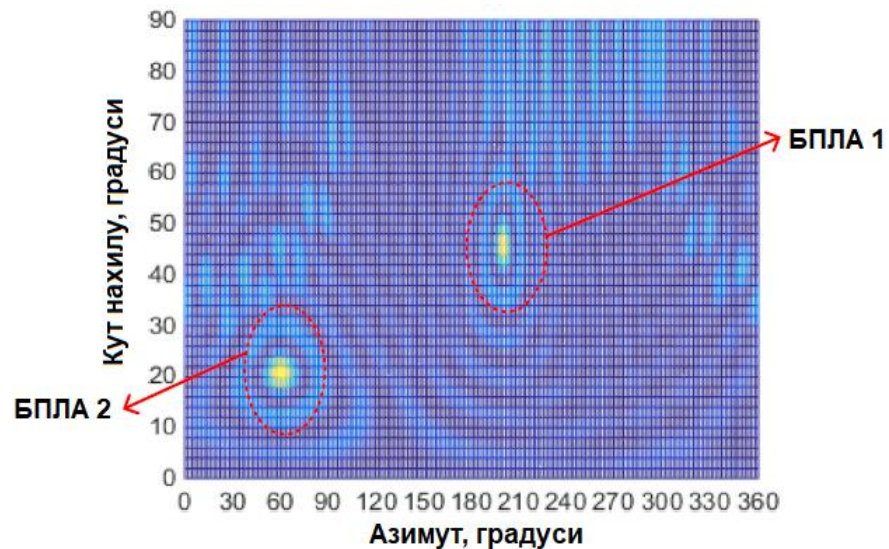


Рисунок 2.8 – Карта сканування при наявності двох БПЛА

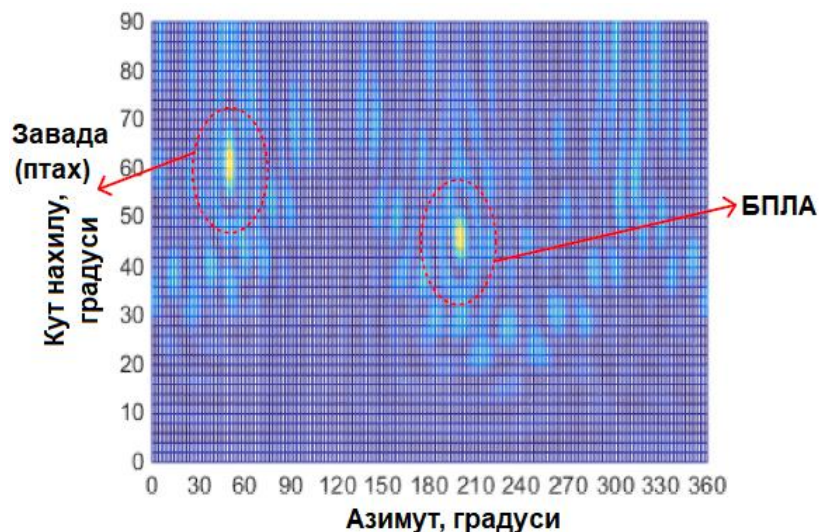


Рисунок 2.9 – Карта сканування при наявності БПЛА і завади

Точність результатів сканування досить висока і є задовільною, навіть у середовищах із кількома джерелами звуку і перешкод. Похибка визначення куту приходу хвиль складає менше 3° , що є прийнятною величиною.

2.6 Висновки по розділу 2

1. Обґрунтована конфігурація та загальний алгоритм виявлення БПЛА за допомогою акустичного сигналу. Архітектура запропонованої просторово-розподіленої системи складається зі станцій акустичного моніторингу, з'єднаних зі станцією контролю по LAN інтерфейсу.

2. Основою станції моніторингу є кільцева мікрофонна решітка радіусом 0,2 м з 32 мікрофонами. Така конфігурація дає рівномірну роздільну здатність по азимуту, а також дозволяє визначати кут нахилу на джерело звуку.

3. Для виявлення БПЛА спочатку виконується сканування джерел звуку в небі через алгоритм SBF – sound beam forming. В процесі сканування простору часові зсуви сигналів мікрофонів змінюються таким чином, щоби забезпечити максимум діаграми спрямованості в потрібному напрямку. Визначення напрямку на джерело звуку базується на критерії максимізації вихідної потужності решітки.

4. Потім настає етап класифікації джерела звуку за допомогою прихованої марківської моделі НММ. Модель має бути попередньо навчена по різним джерелам звуків, як БПЛА, так і перешкод.

5. Якщо класифікатор НММ визначає звук як БПЛА, то далі настає етап супроводу. На цьому етапі виконується адаптивний підбір вагових коефіцієнтів мікрофонів для подальшого підсилення сигналів. Для цього використовується рекурсивний метод найменших квадратів RLS. Також паралельно йде відстеження руху БПЛА за рахунок корекції часових зсувів сигналів мікрофонів.

6. В середовищі MATLAB реалізовано алгоритм сканування променя мікрофонної решітки. При цьому використані реальні записи звуку БПЛА і перешкоди (щебет птаха). Отримані сигнали на виході мікрофонної решітки при різних напрямках сканування. Максимальна амплітуда відповідає напряму на джерело звуку.

7. Отримані карти потужності сигналу на виході мікрофонної решітки для всього простору сканування при наявності одного джерела звуку. Експеримент проведено для кількості мікрофонів 12, 24 і 32. При кількості мікрофонів 12 і 24 спостерігається значний рівень бічних пелюстків. При числі мікрофонів 32 максимальний відносний рівень бічного пелюстка не перевищує 0,29.

8. Отримана залежність відношення пікової потужності до середньої по простору сканування від кількості мікрофонів при різних радіусах масиву. Результати дуже близькі, їх відмінність не перевищує 10%. Вирішальне значення має кількість мікрофонів в масиві.

9. Досліджена робота алгоритму з двома джерелами звуку. Точність результатів сканування досить висока і є задовільною, навіть у середовищах із кількома джерелами звуку і перешкод. Похибка визначення куту приходу хвиль складає менше 3° , що є прийнятною величиною.

3 РОЗРОБКА МЕТОДИКИ КЛАСИФІКАЦІЇ ТА СУПРОВОДУ ДЖЕРЕЛ ЗВУКОВИХ СИГНАЛІВ

3.1 Метод ідентифікації джерел звуку

Пропонується використовувати класифікатор на основі прихованої марківської моделі НММ. Для виділення ознак можна використати використовується алгоритм зі 36 мел-частотними кепстральними коефіцієнтами (36 MFCC) [20]. Розглянемо детально алгоритм виділення ознак досліджуваного звукового сигналу.

3.1.1 Алгоритм виділення ознак звуків БПЛА

Мел-частотні кепстральні коефіцієнти (Mel-frequency cepstral coefficients MFCC) – це широко використовуваний метод вилучення ознак звукового сигналу, який може вилучити особливості звуку в кепстральній області, через логарифм спектра сигналу.

Спочатку виконується короткочасне перетворення Фур'є (STFT). Воно використовується для перетворення сигналу з часової області в частотну область. Дана операція включає кадрування сигналу, віконну обробку кадру та швидке перетворення Фур'є (ШПФ).

На рис.3.1 показана спектрограма звуку БПЛА (а) і пташиного гомону (б).

Вихідний сигнал після STFT може бути представлено таким чином:

$$X_i^{fft}(f) = FFT(x_i(n) \cdot w_i(n)), \quad (3.1)$$

де $i = 1 \dots I$ – номер кадру,

$n = 1 \dots N$ – номер відліку в кадрі,

$x_i(n)$ – відліки звукового сигналу,

$w_i(n)$ – відліки віконної функції,

I – загальна кількість кадрів,

N – кількість відліків у кадрі.

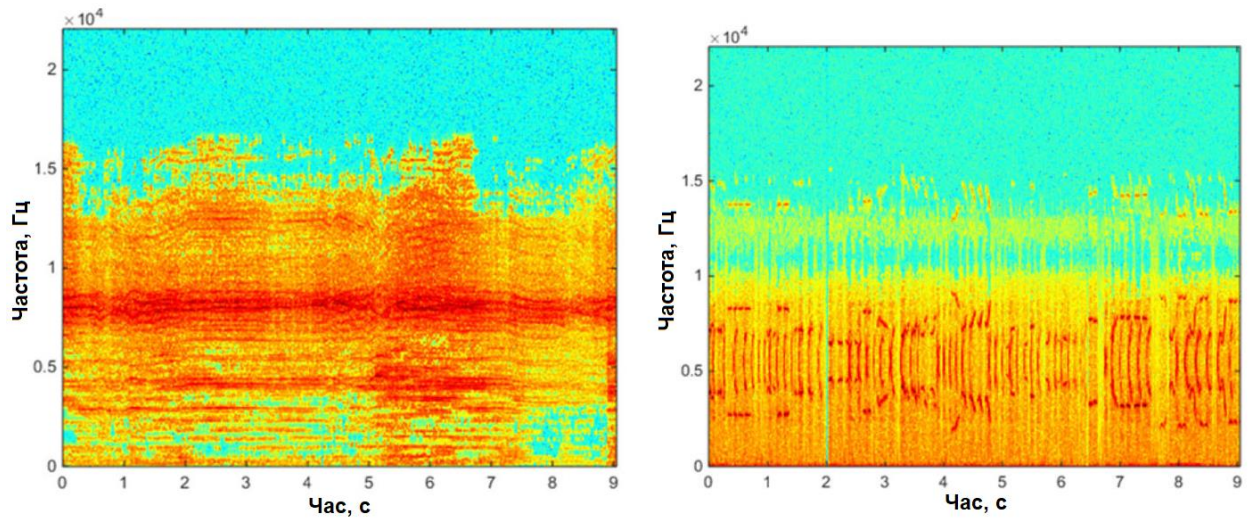


Рисунок 3.1 – Спектрограма звуку БПЛА (а) і пташиного гомону (б)

В роботі використана віконна функція Хеммінга, яка описується виразом

$$w(n) = \alpha - \beta \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right), \quad \alpha = 0,54, \quad \beta = 0,46, \quad n = 0..N-1. \quad (3.2)$$

Далі використовується банк фільтрів, який описується мел-шкалою у вигляді:

$$mel(f) = 1125 \ln(1 + f/700). \quad (3.3)$$

Реалізація m -го фільтра із банку фільтрів описується як:

$$H_m(k) = \begin{cases} 0, & k < f(m-1) \\ \frac{k - f(m-1)}{f(m) - f(m-1)}, & f(m-1) \leq k < f(m) \\ \frac{f(m+1) - k}{f(m+1) - f(m)}, & f(m) \leq k < f(m+1) \\ 0, & k > f(m+1) \end{cases}, \quad m = 1..M. \quad (3.4)$$

де $f(\cdot)$ і M – частота мел-шкали та загальна кількість фільтрів відповідно.

На рис.3.2 показані частотні характеристики трикутних мел-фільтрів.

Далі обчислюється логарифм мел-спектру по формулі (13):

$$s(m) = \ln \left(\sum_{k=0}^{N-1} \left| X_i^{fft}(k) \right|^2 H_m(k) \right), \quad m=1..M, \quad (3.5)$$

де N – довжина ШПФ.

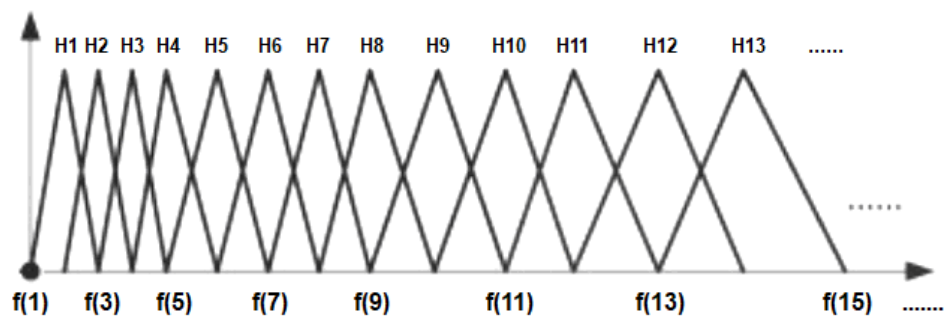


Рисунок 3.2 – Частотні характеристики трикутних мел-фільтрів

Потім застосовується дискретне косинусне перетворення (DCT), щоби отримати n -ті кепстральні коефіцієнти, по формулі:

$$c(n) = \sum_{m=0}^{M-1} s(m) \cos \left(\frac{\pi n(m-0,5)}{M} \right), \quad n=1..N. \quad (3.6)$$

В загальному випадку, рівняння (3.7) використовується для обчислення дельта-коефіцієнтів MFCC:

$$d(n) = \begin{cases} c(n+1) - c(n), & n \leq L \\ \frac{\sum_{\delta=1}^L n(c(n+\delta) - c(n-\delta))}{\sqrt{2 \sum_{\delta=1}^L \delta^2}}, & \text{інакше} \\ c(n) - c(n-1), & n > N - L \end{cases} \quad (3.7)$$

У даній роботі дельта-коефіцієнти представлені так, як пропонується в роботі [20]:

$$d(n) = \begin{cases} c(n+1) - c(n), & n \leq L \\ \frac{\sum_{\delta=1}^L (c(n+\delta) - c(n-\delta)) - 2Lc(n)}{2L}, & \text{інакше} \\ c(n) - c(n-1), & n > N - L \end{cases} \quad (3.8)$$

де δ – крок для обчислення різниці коефіцієнтів.

Загальний алгоритм процедури MFCC зображений на рис.3.3.

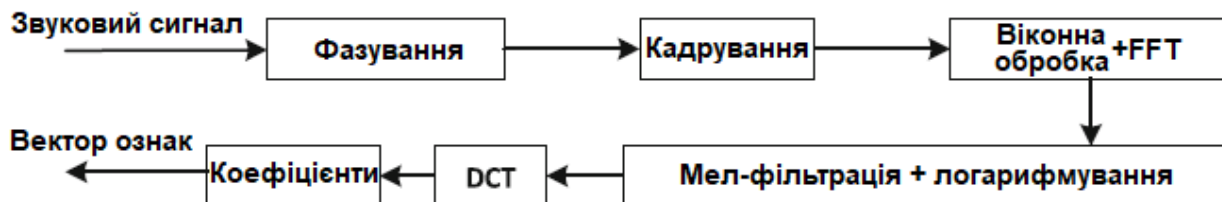


Рисунок 3.3 – Загальний алгоритм процедури MFCC

Отже, для вилучення ознак звукового сигналу використовуються 36 коефіцієнтів MFCC, включаючи стандартні MFCC і дельта MFCC [20].

3.1.2 Розпізнавання звуку дрона за допомогою метода НММ

НММ – це статистична модель для впорядкованої послідовності змінних, де стани та вхідні дані приховані та доступні для спостереження. Послідовність векторів ознак позначається як:

$$O = \{o_t\}, \quad t = 1..T. \quad (3.9)$$

де T – послідовність станів.

Як правило, модель НММ представляється як:

$$HMM = (N, M, A, B, \Pi), \quad (3.10)$$

де N – приховані стани,

M – окремі спостереження за станом,

A – матриця переходу стану,

B – розподіл ймовірності викидів на стан,

Π – ймовірність початкового розподілу стану:

$$\lambda = (A, B, \Pi). \quad (3.11)$$

Параметри моделі визначаються навчальними даними, а вхідними даними для моделі є виділені особливості навчальних даних. Навченій моделі представляють дані спостережень і тоді модель використовується для оцінки класу нових вхідних акустичних даних. Загальний алгоритм підходу для розпізнавання звуку БПЛА на основі НММ показано на рис.3.4.

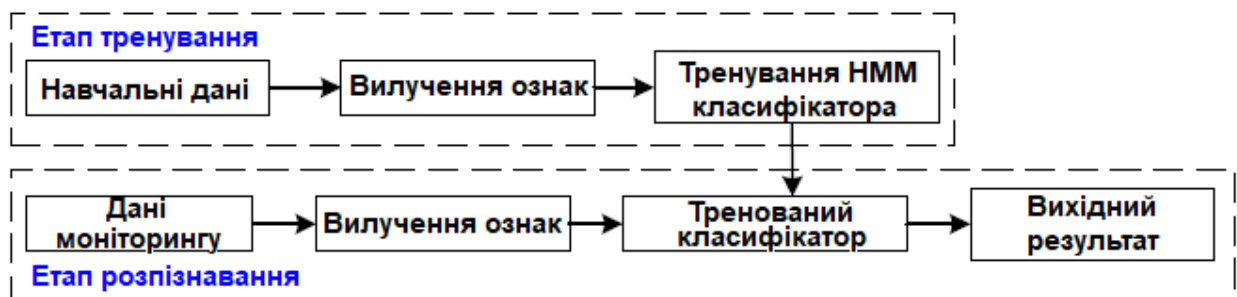


Рисунок 3.4 – Загальний алгоритм розпізнавання звуку БПЛА на основі НММ

На рис.3.5 показано схему алгоритму навчання моделі НММ, в якому задача навчання вирішується за алгоритмом Баума–Велча.

На етапі навчання класифікатор формує модель за наданими йому навчальними даними. В якості навчальних даних можна використовувати звукозаписи БПЛА різного типу, звуки літаків, гелікоптерів, дощу, гомону птахів, автомобілів тощо.

На етапі розпізнавання, коли модель навчена, застосовується алгоритм Вітербі. Він полягає в пошуку послідовності станів, яка максимізує ймовірність правильного розпізнавання, коли модель відома.

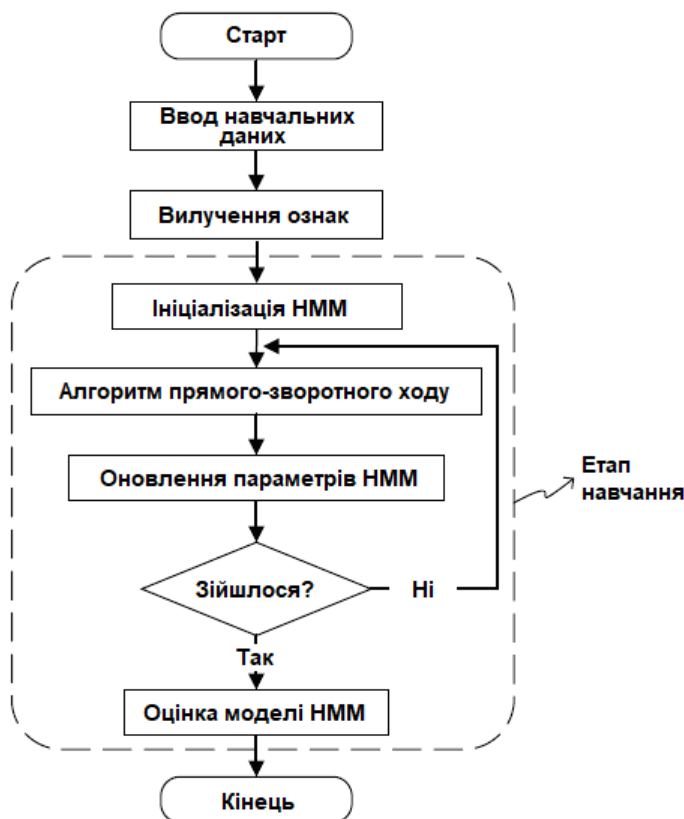


Рисунок 3.5 – Схему алгоритму навчання моделі НММ

Метою процесу розпізнавання при моніторингу є виділення з суміші вхідних звуків того звуку, який представлений послідовністю векторів ознак $O_{БПЛА}$. Процес полягає в тому, щоб виділити шуканий звуковий сигнал БПЛА за допомогою максимізації ймовірності

$$g^* = \arg\{\max_{\forall s \in S} P(\lambda_s | O_{БПЛА})\}. \quad (3.12)$$

І модель, яка дає максимальну ймовірність, є тією, до якої належать дані моніторингу (тобто дані моніторингу будуть класифіковані в кластері, який представлений обраною моделлю).

На рис. 3.6 показано схему алгоритму розпізнавання даних моніторингу з використанням навченої моделі НММ.

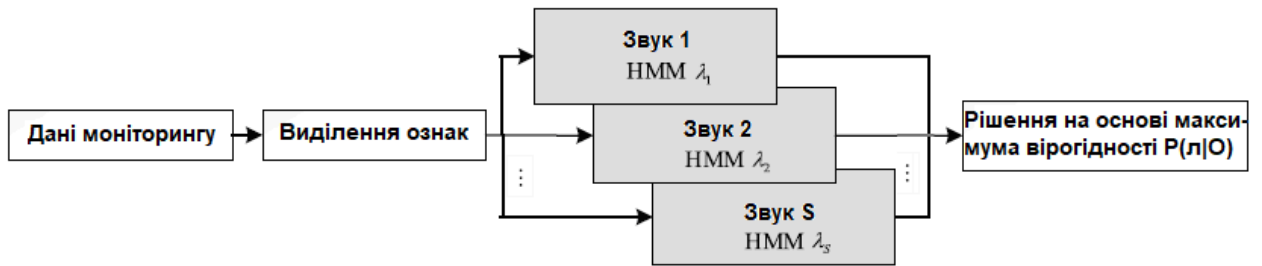


Рисунок 3.6 – Схема алгоритму розпізнавання даних моніторингу з використанням навченої моделі НММ

3.2 Алгоритм супроводу знайденого БПЛА за акустичним випромінюванням

3.2.1 Критерії оптимізації вагових коефіцієнтів

Оскільки місцезнаходження знайденого БПЛА змінюється з часом, вектор вагових коефіцієнтів повинен періодично оновлюватися.

На дані, які використовуються для оцінки вектора вагових коефіцієнтів, впливає шум, тому для пошуку наступного вектора вагових коефіцієнтів доцільно використовувати поточний вектор ваги.

Основне правило технології адаптивного формування променя базується на певних критеріях для налаштування вагових коефіцієнтів масиву в реальному часі, що дає найкращий вихідний сигнал. Загалом адаптивні алгоритми формування променя можна розділити на два типи [21]:

- несліпі алгоритми, в яких потрібен опорний сигнал;
- сліпі алгоритми, в яких опорний сигнал не потрібен.

У даній кваліфікаційній роботі пропонується використати адаптивне формування променя на основі несліпого алгоритму для супроводу БПЛА.

У літературі описано декілька критеріїв для оптимальних вагових коефіцієнтів, такі як:

- мінімізація середньоквадратичної помилки (Minimizing the mean square error – MMSE);

– максимальне відношення сигнал/перешкода (Maximizing the signal-to-interference ratio);

– мінімальна дисперсія.

Існує також багато адаптивних алгоритмів для оновлення вагових коефіцієнтів в реальному часі, таких як

– алгоритм найменших середніх квадратів (Least mean square error LMSE);

– пряма інверсія коваріаційної матриці вибірки;

– рекурсивний алгоритм найменших квадратів (Recursive Least Squares – RLS).

Добре відомо, що алгоритм RLS має кращу швидкість сходження. У кваліфікаційній роботі використано адаптивний алгоритм RLS на основі критерію мінімуму середньоквадратичної помилки MMSE для супроводу БПЛА [22, 23].

Вагові коефіцієнти для мінімізації середньоквадратичної помилки (MSE) між виходом формувача променя та опорним сигналом:

$$\varepsilon^2(t) = [d^*(t) - W^* x(t)]^2, \quad (3.13)$$

Застосуємо операцію математичного сподівання $E(\cdot)$ для обох сторін рівняння. Виконавши нескладні математичні перетворення, можемо записати наступне:

$$E\{\varepsilon^2(t)\} = E\{d^2(t)\} - 2W^* r + W^* R W, \quad (3.14)$$

де $r = E\{d^*(t)x(t)\}$ і $R = E\{x^*(t)x(t)\}$ – коваріаційні матриці.

Величина MSE визначається встановленням вектора градієнта попереднього рівняння (по відношенню до W) рівним нулю:

$$\nabla W(E\{\varepsilon^2(t)\}) = -2r + 2RW = 0, \quad (3.15)$$

З (3.15) випливає, що розв'язком є рівняння

$$W_{opt} = R^{-1}r, \quad (3.16)$$

яке називають рівнянням Вінера-Хопфа, або оптимальним розв'язком Вінера [24].

3.2.2 Застосування алгоритму RLS для оновлення вагового вектора

В алгоритмі RLS кореляційна матриця та вектор кореляції обчислюються рекурсивно [23]. Кореляційна матриця та вектор кореляції задаються як:

$$\tilde{R}(n) = \sum_{i=1}^N \gamma^{n-1} x(i)x^*(i), \quad (3.17)$$

$$\tilde{r}(n) = \sum_{i=1}^N \gamma^{n-1} d^*(i)x(i). \quad (3.18)$$

Розкладаючи доданки, що відповідають $i=n$, ми маємо наступну рекурсію для оновлення $\tilde{R}(n)$ і $\tilde{r}(n)$.

$$\tilde{R}(n) = \gamma\tilde{R}(n-1) + x(n)x^*(n), \quad (3.19)$$

$$\tilde{r}(n) = \gamma\tilde{r}(n-1) + x(n)d^*(n). \quad (3.20)$$

Використовуючи тотожність Вудбері, отримуємо таке рекурсивне рівняння для виведення оберненої коваріаційної матриці [23]:

$$R^{-1}(n) = \gamma^{-1} [R^{-1}(n-1) - q(n)x(n)x^*(n)R^{-1}(n-1)], \quad (3.21)$$

де вектор коефіцієнтів посилення

$$q(n) = \frac{r^{-1}R^{-1}(n-1)x(n)}{1 + \gamma^{-1}x^*(n)R^{-1}(n-1)x(n)}, \quad (3.22)$$

Оновлений вектор ваги виглядає наступним чином:

$$W(n) = W(n-1) + q(n) [d^*(n) - W^*(n-1)x(n)], \quad (3.23)$$

На рис.3.7 показано структурну схему адаптивного формування променя, в якій $x_m(n)$ представляє вихідний сигнал кожного мікрофону, а w_m є ваговим коефіцієнтом m -го елемента.

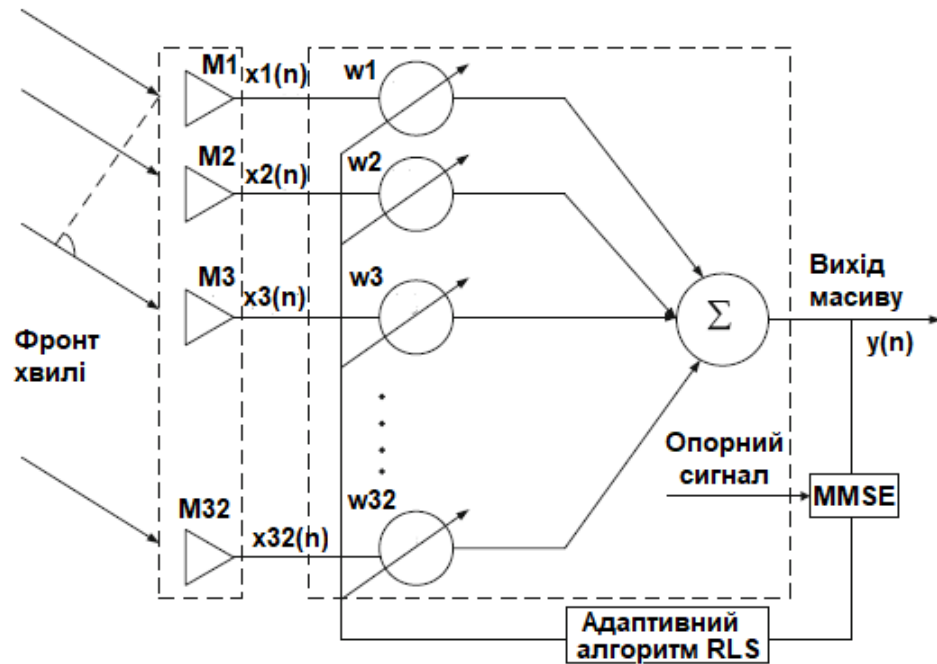


Рисунок 3.7 – Структурна схема адаптивного формування променя

Отримання опорного сигналу базується на процесах сканування та класифікації, описаних у попередньому розділі. Таким чином, опорні сигнали використовуються в адаптивному формуванні променя для відстеження БПЛА.

3.2.3 Результати моделювання трекінгу БПЛА

Основна ідея моделювання полягає в тому, щоби використовувати опорні сигнали при адаптивному формуванні променя під час оцінки і відстеження напрямку приходу сигналу БПЛА. Моделювання виконується як в ідеальних умовах (без фонового шуму та звуків перешкод), так і в неідеальних умовах (з фоновим шумом та звуками перешкод), щоб оцінити середньоквадратичну помилку MSE під час відстеження БПЛА.

Основні параметри моделювання наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Основні параметри моделювання трекінгу

Сигнали	Число вибірок	Частота дискретизації	Число мікрофонів	Радіус масиву
БПЛА, птах	1000	44,1 кГц	32	0,2 м

Помилка являє собою різницю між фактичним і оціненим напрямом. Таким чином, похибка куту нахилу, похибка азимута та середньоквадратична похибка обчислюються наступним чином:

$$e_{\theta} = \frac{1}{19} \sum_{i=1}^{19} (ae_i - ee_i),$$

$$e_{\phi} = \frac{1}{19} \sum_{i=1}^{19} (aa_i - ea_i), \quad (3.24)$$

$$MSE = \frac{1}{19} \sum_{i=1}^{19} \sqrt{(aa_i - ea_i)^2 + (ae_i - ee_i)^2}.$$

де ae_i – фактичний кут нахилу,

ee_i – оціночний кут нахилу,

aa_i – фактичний азимут,

ea_i – оціночний азимут.

Відстеження виконується 19 разів на різних позиціях (рис. 3.8).

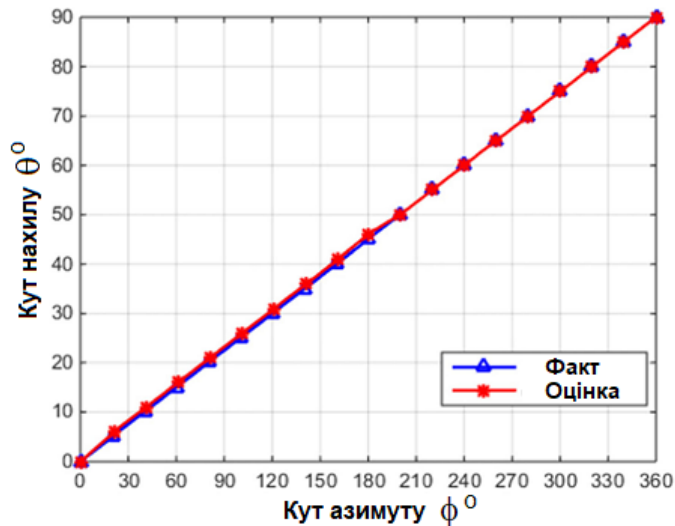


Рисунок 3.8 – Точність трекінгу в ідеальних умовах

В табл.3.2 надані результати відстеження на основі ідеального сигналу (без шуму та звуків перешкод). Фактичний кут нахилу та фактичний азимут відносяться до змодельованого напрямку руху БПЛА, тоді як оціночні кут нахилу та азимут описують результати роботи системи.

Таблиця 3.2 – Результати трекінгу БПЛА і ідеальних умовах

θ°	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
$\tilde{\theta}^\circ$	0	6	11	16	21	26	31	36	41	46	50	55	60	65	70	75	80	85	90
ϕ°	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360
$\tilde{\phi}^\circ$	0	21	41	61	81	101	121	141	161	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360

Результати обробки: $e_\theta = 0,48^\circ$; $e_\phi = 0,42^\circ$; $MSE = 0,65^\circ$.

На рис. 3.8 ми чітко бачимо, що відстеження положення БПЛА починається з кута нахилу 0° і кута азимута 0° і досягає кута нахилу 90° і азимута 360° .

Напрями оцінки майже співпадають з фактичним шляхом БПЛА. Це підтверджує, що алгоритм RLS є придатним для відстеження БПЛА завдяки високій точності оціненого шляху в ідеальному середовищі. Проте є певні

помилки у відстеженні траєкторії. Це може бути наслідком кількох факторів, таких як спектральний склад сигналу та помилки обчислення.

Щоби перевірити надійність процедури відстеження в практичному шумному середовищі, додамо до вхідного сигналу адитивний білий гаусівський шум (AWGN).

На рис.3.9 показана залежність величини помилки оцінки напрямку MSE від відношення сигнал-шум SNR.

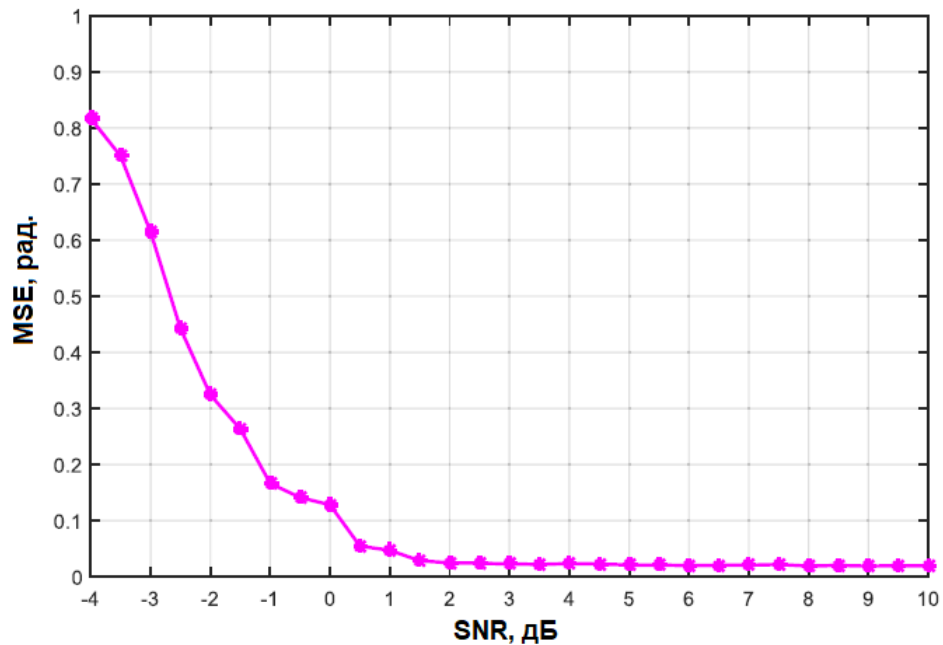


Рисунок 3.9 – Залежність помилки оцінки напрямку MSE від відношення сигнал-шум SNR

Крім того, алгоритм RLS отримує переважно точні оцінки напрямку при різних значеннях сигнал-шум. З рис. 3.9 видно, що зі збільшенням SNR середньоквадратична помилка оцінки напрямку MSE зменшується, і, таким чином, точність відстеження стає кращою.

При $SNR=2$ дБ помилка $MSE=0,01$ рад ($0,57^\circ$), точність відстеження майже подібна до точності відстеження в ідеальному випадку. При $SNR=0,5$ дБ помилка $MSE=0,05$ рад ($2,9^\circ$), що також можна вважати прийнятною величиною, оскільки точність системи стеження залишається достатньою навіть у шумному середовищі.

Подібним чином змодельюємо одну ціль (БПЛА) і одне джерело перешкод (птаха) у зоні спостереження, щоби оцінити вплив перешкод. На рис. 3.10 показано вплив звукового сигналу перешкоди на точність системи відстеження. Звуковий сигнал перешкоди погіршує продуктивність системи відстеження, коли він знаходиться поблизу цільового звукового сигналу.

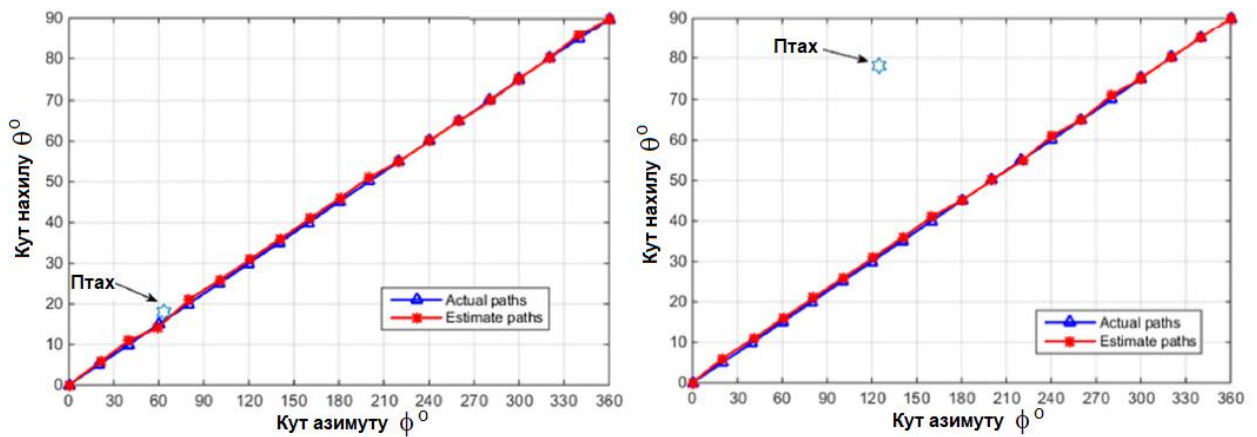


Рисунок 3.10 – Точність стеження при наявності завади:

а – перешкода на напрямі (18°, 63°), б – перешкода на напрямі (78°, 125°)

В табл. 3.3 показано значення помилки MSE оцінки напрямку при зміні положення перешкоди.

Таблиця 3.3 – Значення помилки MSE оцінки напрямку при зміні положення перешкоди

Напрямок перешкоди	Помилка по θ°	Помилка по ϕ°	MSE, $^\circ$
(18°, 63°)	0,58	0,48	0,83
(78°, 125°)	0,53	0,42	0,70

Це призводить до помилок у оцінці кута місця та кута азимута позиції цілі. Похибка по куту нахилу більша, ніж похибка в азимуті напрямку на ціль. Незважаючи на те, що БПЛА знаходиться в зоні перешкод, система стеження може постійно локалізувати ціль.

3.3 Висновки по розділу 3

1. Описано алгоритм виділення ознак звуків БПЛА на основі мел-частотних кепстральних коефіцієнтів. Він включає короточасне віконне перетворення Фур'є, застосування до спектру банку трикутних мел-фільтрів, обчислення логарифму mel-спектру, потім застосовується дискретне косинусне перетворення (DCT), щоби отримати кепстральні коефіцієнти. В нашому випадку для більш точного виділення ознак пропонується використати також дельта-коефіцієнти, що дорівнюють різниці поточного і попереднього mel-коефіцієнтів. Всього $18+19=36$ коефіцієнтів. Вони подаються на класифікатор.

2. Обґрунтовано процес розпізнавання ознак звуків БПЛА на основі прихованої марківської моделі. На етапі навчання класифікатор формує модель за наданими йому навчальними даними. В якості навчальних даних можна використовувати звукозаписи БПЛА різного типу, звуки літаків, гелікоптерів, дощу, гомону птахів, автомобілів тощо. На етапі розпізнавання, коли модель навчена, застосовується алгоритм Вітербі. Він полягає в пошуку послідовності ознак, яка максимізує ймовірність правильного розпізнавання. Розроблені алгоритми навчання моделі і розпізнавання при моніторингу.

3. Оскільки місцезнаходження знайденого БПЛА змінюється з часом, вектор вагових коефіцієнтів повинен періодично оновлюватися. В роботі досліджено адаптивне формування променя на основі несліпого рекурсивного алгоритму найменших квадратів (RLS) для супроводу БПЛА. Алгоритм використовує виділений сигнал БПЛА як опорний для підлаштування вектора вагових коефіцієнтів в реальному часі. Даний алгоритм обраний тому, що має швидку сходимість.

4. Адаптивний алгоритм RLS вже присутній в системі MATLAB, він був пристосований під умови нашого експерименту. Моделювання виконано як в ідеальних умовах (без фонового шуму та звуків перешкод), так і в неідеальних умовах (з фоновим шумом та звуками перешкод), щоби оцінити

середньоквадратичну помилку MSE під час відстеження БПЛА.

5. Відстеження виконувалося 19 разів на різних позиціях. Отримані результати трекінгу БПЛА і ідеальних умовах. Напрями оцінки майже співпадають з фактичним шляхом БПЛА. Середньоквадратична помилка складає $0,65^0$. Це може бути наслідком кількох факторів, наприклад, спектральний склад сигналу та помилки обчислення.

6. Щоби перевірити надійність процедури відстеження в практичному шумному середовищі, до вхідного сигналу додано адитивний білий гаусівський шум. Отримана залежність величини помилки оцінки напряму MSE від відношення сигнал-шум SNR.

7. При SNR=2 дБ помилка MSE=0,01 рад ($0,57^0$), точність відстеження майже подібна до точності відстеження в ідеальному випадку. При SNR=0,5 дБ помилка MSE=0,05 рад ($2,9^0$), що також можна вважати прийнятною величиною, оскільки точність системи стеження залишається достатньою навіть у шумному середовищі.

8. Подібним чином змодельовано одну ціль (БПЛА) і одне джерело перешкод (птаха) у зоні спостереження, щоби оцінити вплив перешкод. Отримано вплив звукового сигналу перешкоди на точність системи відстеження. Звуковий сигнал перешкоди погіршує продуктивність системи відстеження, коли він знаходиться поблизу цільового звукового сигналу. Похибка по куту нахилу більша, ніж похибка в азимуті напрямку на ціль. Незважаючи на те, що БПЛА знаходиться в зоні перешкод, система стеження може постійно локалізувати ціль.

ВИСНОВКИ

Сучасні системи акустичного моніторингу шумової обстановки призначені для забезпечення правопорядку та профілактики правопорушень на території муніципальних утворень. Такі системи служать для збору інформації про акустичну обстановку, для виявлення та аналізу ознак тривожних подій у звуковому потоці.

Повномасштабне вторгнення Росії в Україну в лютому 2022 року розширило потенційні задачі таких систем. Це перший військовий конфлікт, в якому масово застосовуються безпілотні літальні апарати. Вони виконують як задачі військової розвідки, так і задачі нанесення ударів.

Особливо небезпечне застосування ворогом ударних БПЛА на території великих міст. Такі БПЛА, як Шахед-136 або подібні, коштують відносно недорого в порівнянні з ракетами, але можуть нести на своєму борту близько 40 кг вибухівки. Тому дуже актуальною є задача їхнього своєчасного виявлення і знешкодження.

Пасивні акустичні системи містять декілька мікрофонів і систему обробки звукової інформації. Головним обмеженням системи є зовнішні акустичні шуми. В разі БПЛА з електродвигунами вони обмежують радіус дії системи до десятків метрів, а у разі БПЛА з двигунами внутрішнього згоряння – до сотень метрів. Тому використання просторово розподілених систем дасть можливість підвищити надійність роботи систем виявлення.

Метою даної роботи є розробка концепції просторово-розподіленої системи акустичного моніторингу, яка би могла виявляти, аналізувати ознаки присутності шуму БПЛА у звуковому потоці, і передавати дані про пеленг БПЛА на центральний пульти.

Пасивні акустичні системи з мікрофонними решітками можуть пеленгувати джерела звуку по різниці часу запізнення сигналів в мікрофонних каналах. Розрахунок часу запізнення можна проводити шляхом

обчислення функції взаємної кореляції сигналів в каналах і подальшого визначення часової координати її максимуму.

Обґрунтована конфігурація та загальний алгоритм виявлення БПЛА за допомогою акустичного сигналу. Архітектура запропонованої просторово-розподіленої системи складається зі станцій акустичного моніторингу, з'єднаних зі станцією контролю по LAN інтерфейсу.

Основою станції моніторингу є кільцева мікрофонна решітка радіусом 0,2 м з 32 мікрофонами. Така конфігурація дає рівномірну роздільну здатність по азимуту, а також дозволяє визначати кут нахилу на джерело звука.

Для виявлення БПЛА спочатку виконується сканування джерел звуку в небі через алгоритм SBF – sound beam forming. В процесі сканування простору часові зсуви сигналів мікрофонів змінюються таким чином, щоби забезпечити максимум діаграми спрямованості в потрібному напрямку. Визначення напрямку на джерело звуку базується на критерії максимізації вихідної потужності решітки.

Потім настає етап класифікації джерела звуку за допомогою прихованої марківської моделі НММ. Модель має бути попередньо навчена по різним джерелам звуків, як БПЛА, так і перешкод.

Якщо класифікатор НММ визначає звук як БПЛА, то далі настає етап супроводу. На цьому етапі виконується адаптивний підбір вагових коефіцієнтів мікрофонів для подальшого підсилення сигналів. Для цього використовується рекурсивний метод найменших квадратів RLS. Також паралельно йде відстеження руху БПЛА за рахунок корекції часових зсувів сигналів мікрофонів.

В середовищі MATLAB реалізовано алгоритм сканування променя мікрофонної решітки. При цьому використані реальні записи звуку БПЛА і перешкоди (щебет птаха). Отримані сигнали на виході мікрофонної решітки при різних напрямках сканування. Максимальна амплітуда відповідає напрямку на джерело звуку.

Отримані карти потужності сигналу на виході мікрофонної решітки для всього простору сканування при наявності одного джерела звуку. Експеримент проведено для кількості мікрофонів 12, 24 і 32. При кількості мікрофонів 12 і 24 спостерігається значний рівень бічних пелюстків. При числі мікрофонів 32 максимальний відносний рівень бічного пелюстка не перевищує 0,29.

Отримана залежність відношення пікової потужності до середньої по простору сканування від кількості мікрофонів при різних радіусах масиву. Результати дуже близькі, їх відмінність не перевищує 10%. Вирішальне значення має кількість мікрофонів в масиві.

Досліджена робота алгоритму з двома джерелами звуку. Точність результатів сканування досить висока і є задовільною, навіть у середовищах із кількома джерелами звуку і перешкод. Похибка визначення куту приходу хвиль складає менше 3° , що є прийнятною величиною.

Описано алгоритм виділення ознак звуків БПЛА на основі мел-частотних кепстральних коефіцієнтів. Він включає короткочасне віконне перетворення Фур'є, застосування до спектру банку трикутних мел-фільтрів, обчислення логарифму mel-спектру, потім застосовується дискретне косинусне перетворення (DCT), щоби отримати кепстральні коефіцієнти. В нашому випадку для більш точного виділення ознак пропонується використати також дельта-коефіцієнти, що дорівнюють різниці поточного і попереднього mel-коефіцієнтів. Всього $18+19=36$ коефіцієнтів. Вони подаються на класифікатор.

Обґрунтовано процес розпізнавання ознак звуків БПЛА на основі прихованої марківської моделі. На етапі навчання класифікатор формує модель за наданими йому навчальними даними. В якості навчальних даних можна використовувати звукозаписи БПЛА різного типу, звуки літаків, гелікоптерів, дощу, гомону птахів, автомобілів тощо. На етапі розпізнавання, коли модель навчена, застосовується алгоритм Вітербі. Він полягає в пошуку послідовності ознак, яка максимізує ймовірність правильного розпізнавання.

Розроблені алгоритми навчання моделі і розпізнавання при моніторингу.

Оскільки місцезнаходження знайденого БПЛА змінюється з часом, вектор вагових коефіцієнтів повинен періодично оновлюватися. В роботі досліджено адаптивне формування променя на основі несліпого рекурсивного алгоритму найменших квадратів (RLS) для супроводу БПЛА. Алгоритм використовує виділений сигнал БПЛА як опорний для підлаштування вектора вагових коефіцієнтів в реальному часі. Даний алгоритм обраний тому, що має швидку сходимість.

Адаптивний алгоритм RLS вже присутній в системі MATLAB, він був пристосований під умови нашого експерименту. Моделювання виконано як в ідеальних умовах (без фонового шуму та звуків перешкод), так і в неідеальних умовах (з фоновим шумом та звуками перешкод), щоби оцінити середньоквадратичну помилку MSE під час відстеження БПЛА.

Відстеження виконувалося 19 разів на різних позиціях. Отримані результати трекінгу БПЛА в ідеальних умовах. Напрями оцінки майже співпадають з фактичним шляхом БПЛА. Середньоквадратична помилка складає $0,65^{\circ}$. Це може бути наслідком кількох факторів, наприклад, спектральний склад сигналу та помилки обчислення.

Щоби перевірити надійність процедури відстеження в практичному шумному середовищі, до вхідного сигналу додано адитивний білий гаусівський шум. Отримана залежність величини помилки оцінки напряму MSE від відношення сигнал-шум SNR.

При SNR=2 дБ помилка MSE=0,01 рад ($0,57^{\circ}$), точність відстеження майже подібна до точності відстеження в ідеальному випадку. При SNR=0,5 дБ помилка MSE=0,05 рад ($2,9^{\circ}$), що також можна вважати прийнятною величиною, оскільки точність системи стеження залишається достатньою навіть у шумному середовищі.

Подібним чином змодельовано одну ціль (БПЛА) і одне джерело перешкод (птаха) у зоні спостереження, щоби оцінити вплив перешкод. Отримано вплив звукового сигналу перешкоди на точність системи відстеження. Звуковий

сигнал перешкоди погіршує продуктивність системи відстеження, коли він знаходиться поблизу цільового звукового сигналу. Похибка по куту нахилу більша, ніж похибка в азимуті напрямку на ціль. Незважаючи на те, що БПЛА знаходиться в зоні перешкод, система стеження може постійно локалізувати ціль.

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. Hartmann K., Giles K. UAV exploitation: A new domain for cyber power // 8th International Conference on Cyber Conflict (CyCon). – IEEE, 2016. – С. 205-221.
4. 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.
5. Грінченко В. Т., Вовк І. В., Маципура В. Т. «Основи акустики», Київ, Наукова думка, 2007, 640 с.
6. 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.
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. 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.
9. 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.

10. 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.

11. Kartashov V., Kolisnyk V., Tykhonov V., Pososhenko V., Kolisnyk K. Improvement of the Acoustic Method for Detection of Unmanned Aerial Vehicles // 2022 IEEE 9th International Conference on Problems of Infocommunications Science and Technology, PIC S and T 2022 – Proceedings, 2022, pp. 587–591.

12. 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.

13. 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.

14. Тихонов В. А., Карташов В. М., Олейников В. Н., Леонидов В. И., Тимошенко Л. П., Селезнев И. С., Рыбников Н. В. Обнаружение-распознавание беспилотных летательных аппаратов с использованием составной модели авторегрессии их акустического излучения // Visnyk NTUU KPI Serii a – Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia, 2020, Iss. 81, pp. 38–46.

15. 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.

16.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.

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

18. 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.

19. J. Litva, T.K. Lo, Digital beamforming in wireless communications. Artech House, Boston, 1996, pp. 13–27.

20. L. Shi, I. Ahmad, Y. He, K.H. Chang, Hidden Markov model-based drone sound recognition using MFCC technique in practical noisy environments. J. Commun. Netw, 20(5), 2018. – pp. 509–518.

21. Alan V. Oppenheim, Ronald W. Schaffer. Digital Signal Processing. Prentice-Hall, 1975. – 585 p.

22. R. Islam, F. Hafriz, and M. Norfauzi, Adaptive beamforming with 16 element linear array using MaxSIR and MMSE algorithms, in Proceeding of IEEE International Conference on Telecommunications and Malaysia International Conference on Communications, Penang, Malaysia, 2007. – pp.165-170.

23. B. Pattan, Robust modulation methods & smart antennas in wireless communications, electromagnetic Theory and antennas electromagnetic theory and antennas, 2000. – pp.1149.

24. S. Haykin, Adaptive Filter Theory. 4th ed. Englewood Cliffs, Prentice Hall, 2002.