

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)

Просторова обробка акустичних сигналів безпілотних літальних апаратів  
на фоні розподілених завад  
(тема)

Виконав:

студент 2 курсу, групи МІм-20-1  
Сидоренко Е.В.  
(прізвище, ініціали)

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

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

Освітня програма Медіаінженерія  
(повна назва освітньої програми)

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

Допускається до захисту

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

Карташов В.М.  
(прізвище, ініціали)

2021 р.

# Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет інформаційних радіотехнологій та технічного захисту інформації

Кафедра медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка

(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Медіаінженерія

(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_

(підпис)

«\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Сидоренку Едуарду Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Просторова обробка акустичних сигналів безпілотних літальних апаратів на фоні розподілених завад.

затверджена наказом по університету від " 08 " 11 \_\_\_\_\_ 2021 р. № 1676 Ст \_\_\_\_\_

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 08.12.2021 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 методів виділення акустичних сигналів із суміші з перешкодами.

2. Теоретичне обґрунтування просторової обробки акустичних сигналів БПЛА у часовій області.

3. Комп'ютерне моделювання системи просторової обробки акустичних сигналів БПЛА.

Висновки

Перелік посилань

Додатки

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

1. Методи виявлення БПЛА.
2. Постановка задачі.
3. Алгоритми виділення джерел звуку.
4. Просторова обробка у часовій області.
5. Алгоритм обробки.
6. Умови модельного експерименту.
7. Конфігурація мікрофонних решіток.
8. Вибір кращої конфігурації.
9. Сигнали в системі обробки
10. Оцінка просторової роздільної здатності.
11. Визначення координат джерел.
12. Розрахунок оптимальних вагових коефіцієнтів.
13. Висновки.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітичний огляд літератури	02.11.21–10.11.21	
2	Теоретичне обґрунтування методу	11.11.21–17.11.21	
3	Програмна реалізація експерименту	18.11.21–24.11.21	
4	Визначення координат джерел	25.11.21–1.12.21	
5	Розрахунок вагових коефіцієнтів	02.12.21–05.12.21	
6	Обробка результатів досліджень	25.11.21–05.12.21	
7	Графічна частина роботи	25.11.21–05.12.21	
8	Перевірка керівником	05.12.21–06.12.21	
9	Перевірка на академічний плагіат	07.12.21	
10	Перевірка завідувачем кафедри, рецензування	07.12.21–08.12.21	

Дата видачі завдання \_\_\_\_\_ 08.11.2021 р. \_\_\_\_\_

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник роботи (проекту) \_\_\_\_\_ проф. Олейніков В.М.  
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи: 64 сторінки, 27 рисунків, 5 таблиць, 30 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 в мікрофонною решіткою.

Мета роботи полягає в реалізації і дослідженні можливостей алгоритму обробки акустичного сигналу мікрофонними решітками у часовій області для виділення звуку БПЛА з будь-якої точки зони спостереження на фоні джерел перешкод.

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.

## РЕФЕРАТ

Пояснительная записка к квалификационной работе: 64 страницы, 27 рисунков, 5 таблиц, 30 источников.

АКУСТИЧЕСКИЙ СИГНАЛ, БПЛА, ВЕКТОР СИГНАЛА, ОБНАРУЖЕНИЕ, МИКРОФОННАЯ РЕШЕТКА, КОРРЕЛЯЦИОННАЯ МАТРИЦА, МАТРИЦА ПОМЕХ, СИГНАЛ-ПОМЕХА

Объект исследования – процессы приема и обработки акустических сигналов БПЛА в микрофонной решетке.

Цель работы состоит в реализации и исследовании возможностей алгоритма обработки акустического сигнала микрофонными решетками во временной области для выделения звука БПЛА из любой точки зоны наблюдения на фоне источников помех.

Методы исследования – теоретический анализ, числовые расчеты, математическое моделирование, статистическая обработка данных.

В квалификационной работе проведен анализ методов выделения акустических сигналов, анализ алгоритмов обработки сигналов микрофонными решетками. Теоретически обоснован алгоритм обработки сигнала БПЛА микрофонными решетками во временной области, который максимизирует отношение сигнал/помеха на выходе. Проведен модельный эксперимент по выделению сигнала БПЛА из помех многопозиционной акустической системой микрофонов. Проведено исследование эффективности работы реализуемого алгоритма в условиях, приближенных к реальным.

## ABSTRACT

Explanatory note to the qualification work: 64 pages, 27 figures, 5 tables, 30 sources.

ACOUSTIC SIGNAL, UAV, SIGNAL VECTOR, DETECTION, MICROPHONE GRID, CORRELATION MATRIX, INTERFERENCE MATRIX, INTERFERENCE SIGNAL

Object of research – the processes of reception and processing of acoustic signals of UAVs in the microphone array.

The aim of the work is to implement and study the possibilities of the algorithm of acoustic signal processing by microphone arrays in the time domain for UAV sound extraction from any point of the observation zone against the background of interference sources.

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

In the qualification work the analysis of methods of allocation of acoustic signals, the analysis of algorithms of processing of signals by microphone lattices is carried out. The algorithm of UAV signal processing by microphone arrays in the time domain, which maximizes the signal / interference ratio at the output, is theoretically substantiated. A model experiment was performed to isolate the UAV signal from interference by a multi-position acoustic system of microphones. The research of efficiency of work of the realized algorithm under the conditions close to real is carried out.

## ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів.....	9
Вступ.....	10
<b>1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИДІЛЕННЯ АКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ ІЗ СУМІШІ З ПЕРЕШКОДАМИ.....</b>	<b>12</b>
1.1 Задача виділення акустичного сигналу із суміші.....	12
1.2. Основні відомості про мікрофонні решітки.....	17
1.3 Алгоритми обробки сигналів мікрофонних решіток.....	21
1.3.1 Алгоритм затримки та підсумовування.....	21
1.3.2 Алгоритм фільтрації та підсумовування.....	22
1.3.3 Алгоритм обробки сигналів у підрешітках.....	23
1.3.4 Алгоритми, що мінімізують потужність шуму на виході.....	25
1.3.5 Алгоритми, що ґрунтуються на критерії мінімуму середньоквадратичної помилки.....	26
1.3.6 Алгоритми, що базуються на критерії максимуму відношення сигнал/шум.....	28
1.4. Геометрія сучасних мікрофонних решіток.....	28
1.5 Висновки по розділу 1.....	31
<b>2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОСТОРОВОЇ ОБРОБКИ АКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ БПЛА У ЧАСОВІЙ ОБЛАСТІ.....</b>	<b>32</b>
2.1. Метод просторової фільтрації акустичних сигналів БПЛА на фоні розподілених перешкод.....	32
2.2 Застосування алгоритмів просторової обробки сигналів для збільшення відношення сигнал/перешкода.....	36
2.2.1 Знаходження вагового вектора при оптимальній обробці акустичного сигналу.....	36
2.2.2 Знаходження вагового вектора при адаптивній обробці.....	38

2.3. Структурна схема алгоритму обробки акустичних сигналів БПЛА у часовій області.....	39
2.4. Контроль якості виділеного акустичного сигналу.....	41
2.5 Висновки по розділу 2.....	42
<b>3 КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ПРОСТОРОВОЇ ОБРОБКИ АКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ БПЛА.....</b>	
3.1 Визначення оптимальної конфігурації мікрофонних решіток для виділення сигналів БПЛА з перешкод.....	44
3.2. Дослідження просторової роздільної здатності багатопозиційної акустичної системи.....	48
3.3 Розрахунок оптимальних вагових коефіцієнтів.....	52
3.4. Дослідження ефективності фільтрації сигналу БПЛА на фоні інтенсивних розподілених перешкод.....	53
3.5 Висновки по розділу 3.....	55
Висновки.....	57
Перелік посилань.....	61
Додаток А. Графічний матеріал.....	65
Додаток Б. Відомість кваліфікаційної роботи.....	79

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,  
СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

- БПЛА – безпілотний літальний апарат;  
 КІХ – кінцева імпульсна характеристика;  
 СКВ – середньоквадратичне відхилення;  
 Acoustic Sensor Network – мережа акустичних датчиків\$  
 ASA – аналіз слухової схеми;  
 BSS – сліпий поділ сигналів;  
 CASA – обчислювальний підхід до аналізу слухової сцени;  
 ICA – аналіз незалежних компонентів;  
 MIMO – система кількох входів та кількох виходів;  
 MSNR – максимальне відношення сигнал/шум;  
 MMSE – мінімальна середньоквадратична помилка;  
 MVDR – мінімальна дисперсія шуму;  
 T-F masking – частотно-часове маскування;  
 $A$  і  $A_{fi}$  – масштабні множники;  
 $F_s$  – частота дискретизації;  
 $\mathbf{M}_n$  – кореляційна матриця власного шуму,  
 $\mathbf{M}_f$  – кореляційна матриця  $f$ -ї перешкоди:  
 $\mathbf{M}^{-1}$  – зворотна до кореляційної матриця перешкоди,  
 $r_i$  – відстань від джерела корисного сигналу до  $i$ -ого приймача  
 $r_{fi}$  – відстань від  $f$ -ого джерела перешкоди до  $i$ -ого приймача.  
 $\mathbf{S}$  – вектор-стовпець корисного сигналу.  
 $\tau_{opt}$  – оптимальний час затримки;  
 $V_s$  – швидкість звуку;  
 $x', y'$  – координати точки фокусування системи;  
 $x_0, y_0$  – фіксовані координати точкового джерела сигналу.

## ВСТУП

Задача розділення акустичних джерел та виділення корисного сигналу з акустичної суміші вирішується багато десятиліть [1-3]. Людський мозок демонструє феноменальний результат з обробки складної шумової акустичної обстановки і здатний виділяти потрібний сигнал при великій кількості джерел, що заважають. Але в області цифрової обробки сигналів це складне завдання.

Техніка виділення акустичного сигналу безпілотного літального апарату (БПЛА) із суміші багатьох акустичних сигналів може знайти застосування як в автономній акустичній системі виявлення та розпізнавання БПЛА [4-7], так і в комплексованому її варіанті [8-13].

Практична реалізація такого рішення може бути здійснена в рамках науково-дослідних робіт з обробки оптичних, інфрачервоних, акустичних і радіолокаційних сигналів та їх комплексування для виявлення дронів, визначення їх координат та параметрів руху, що проводяться на кафедрі Медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем ХНУРЕ.

Сучасні рішення щодо виділення джерел звуку в мінливій заводській обстановці пов'язані із застосуванням мікрофонних решіток (МР) [14-15], які мають ряд переваг у порівнянні з одноканальними аудіосистемами. У зв'язку з різними сферами застосування мікрофонних решіток способи розділення акустичних коливань, алгоритми обробки та геометрія таких систем дуже різноманітні.

Ефективність мікрофонних решіток у завданнях виділення цільового джерела звуку визначається можливістю реалізувати просторову фільтрацію акустичних сигналів. Більшість алгоритмів, описаних у науково-технічній літературі, працюють у частотній області, засновані на використанні вузькосмугового наближення та здійснюють обробку широкосмугового акустичного сигналу окремо в кожному піддіпазоні частот. Введення оптимальних комплексних вагових коефіцієнтів в кожен сигнал відповідної

смуги частот дозволяє максимізувати цільову функцію просторової фільтрації, наприклад, відношення сигнал/перешкода для цільового сигналу.

Однак при такому способі просторової фільтрації число відліків сигналу в кожній смузі частот на тривалості інтервалу аналізу стає вкрай малим, що погіршує виконання наближення незалежності відліків та знижує ефективність статистичних методів обробки [16].

З іншого боку, алгоритм просторової фільтрації, відомий як «delay-and-sum» і реалізований у часовій області, позбавлений цих недоліків, простий у реалізації та практично не потребує витрат процесорного часу на обробку [16]. На підставі цього можна констатувати, що широко застосовувані в даний час алгоритми просторової обробки акустичних сигналів у частотній області досягли певної межі якості виділення цільового джерела з акустичної суміші, тоді як потенційні можливості оптимальних алгоритмів, реалізованих у часовій області залишаються не дослідженими.

Реалізація алгоритму просторової фільтрації акустичного випромінення БПЛА на фоні просторово-розподілених джерел перешкод у часовій області, з використанням повної смуги частот без розбиття в реальному масштабі часу, дозволить поєднувати переваги алгоритму delay-and-sum

Мета кваліфікаційної роботи полягає в реалізації і дослідженні можливостей алгоритму обробки акустичного сигналу мікрофонними решітками у часовій області для виділення звуку БПЛА з будь-якої точки простору спостереження з великим відношенням сигнал/перешкода, незалежно від взаємного розташування цілі та джерел акустичних перешкод.

# 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИДІЛЕННЯ АКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ ІЗ СУМІШІ З ПЕРЕШКОДАМИ

У даному розділі розглядаються способи розділення акустичних джерел і методи виділення сигналу корисного джерела з акустичної суміші. Наведено методи з використанням одноканальних систем та багатопозиційних систем – мікрофонних решіток. Розглянуто види акустичних систем, що використовуються нині. Розглянуто алгоритми обробки сигналів у мікрофонних решітках.

## 1.1 Задача виділення акустичного сигналу із суміші

Задача виділення акустичного сигналу із суміші з другими джерелами вперше була розглянута в роботах [1-3]. Вона була визначена як психоакустичний феномен, який відноситься до здатності людини вибірково стежити і розпізнавати одне джерело звуку в шумному середовищі, де перешкоди є мовними повідомленнями від інших джерел звуку або інших акустичних джерел, сигнали яких незалежні (рис.1.1).

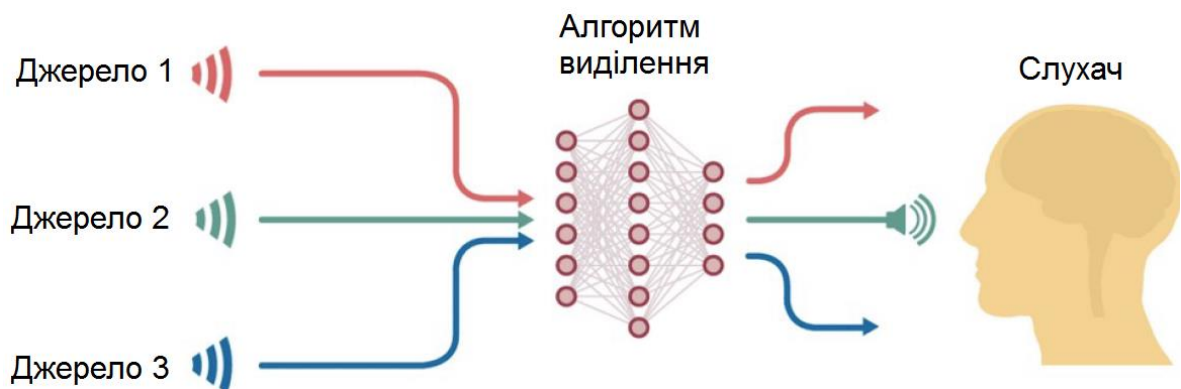


Рисунок 1.1 – Ілюстрація задачі виділення акустичного сигналу із суміші

Пізніше фахівці в галузі комп'ютерних наук та інженери намагалися зрозуміти, чи можливо розробити техніку, здатну вирішити поставлене завдання [3].

У 1983 році була опублікована робота [17] з вивчення просторового слуху. У цій роботі докладно висвітлено питання локалізації джерел звуку людиною. В [17] показано, що сигнали, які досягають двох вух людини різні за інтенсивністю та часом. Невеликі розбіжності у цих сигналах достатні для визначення місця розташування і напряму вхідних звукових хвиль. Використовуючи цю невелику різницю, просторовий слух допомагає мозку здійснювати подальшу складну обробку та виділяти мовні повідомлення у присутності кількох сторонніх джерел. Здатність локалізувати цільове джерело при реєстрації інформації двома вухами отримала назву бінауральний слух.

У 1990 в роботі [18] введено поняття аналізу слухової сцени (ASA). Згідно цієї моделі звук, що досягає вух, піддається слуховому аналізу сцени, що складається з двох етапів: сегментація – акустичне розкладання вхідного сигналу на набір частотно-часових областей (сегментів) та угруповання – об'єднання сегментів одного джерела в перцептивну структуру, яка називається потоком.

У основі підходу ASA лежить закономірність, що частотні складові одного звуку мають тенденцію починатися одночасно. Таке припущення дозволяє групувати компоненти звуку одного джерела і відокремлювати компоненти інших джерел у частотно-часовому представленні.

Психофізичні характеристики звуку в основному включають три основні форми інформації: просторове розташування, часову структуру та спектральну характеристику. Сприйняття звуку однозначно визначається сукупністю даних трьох форм. Визначальним для аналізу слухової сцени є те, що будь-яка відмінність у будь-якій із трьох форм інформації вважається достатньою для розділення двох різних джерел звуку.

Подальші роботи з вирішення завдання виділення голосу з акустичної суміші пов'язані з обчислювальним аналізом слухової сцени (CASA) – обчислювальний підхід до аналізу слухової сцени. CASA займається

автоматичним аналізом акустичного середовища, інтерпретацією дискретних звукових подій у ньому та моделюванням звукових компонентів.

Принципи обчислювального аналізу слухової сцени переслідують одну із двох цілей:

- розробка системи, здатної автоматично виділяти та відстежувати звуковий сигнал при активній звуковій суміші;
- розробка адаптивної слухової системи, яка автоматично обчислює процес перцептивного угруповання, що відсутня у слуховій системі людини з порушенням слуху, тим самим дозволяючи цій людині стежити за звуковим сигналом у присутності мовних перешкод.

Алгоритми CASA спрямовані на виділення звукових сигналів із суміші, ґрунтуючись на слуховій системі людини. Тому при записі перешкоди використовуються не більше двох мікрофонів.

У літературі розглянуті як моноауральні, і бінауральні алгоритми [19]. Алгоритми моноауральних (один мікрофон) систем CASA для виділення звуку засновані на гармонійності, початку та закінченні звуку, амплітудно-частотній модуляції [20]. Бінауральні (два мікрофони) системи CASA засновані на локалізації звуку та локалізації на основі розташування [17].

Найважливішим бінауральним ефектом є ефект слухового маскування [26-27]. Даний ефект пов'язаний з процесом взаємодії сигналів, що призводить до зміни слухової чутливості до сигналу, що маскується в присутності маскуючого. Змінюється сприйняття одного сигналу у присутності іншого: змінюється гучність, тембр або другий сигнал взагалі не почутий. Тобто сильніший сигнал маскує слабший.

Рішення у сфері застосування CASA засновані на ефекті слухового маскування або частотно-часового маскування (T-F masking). Частотно-часове маскування полягає у приховуванні сигналів перешкод у частотно-часовому поданні. У роботі [21] сформульована мета алгоритмів CASA: знайти ідеальну бінарну маску. Значення ідеальної маски приймає значення 1, або 0: 1 – у випадку, якщо енергія сигналу корисного джерела вище за

енергію перешкод і 0 – в іншому випадку. На рис. 1.2 [21] показано виділення джерела звуку з суміші за допомогою ідеальної бінарної маски.

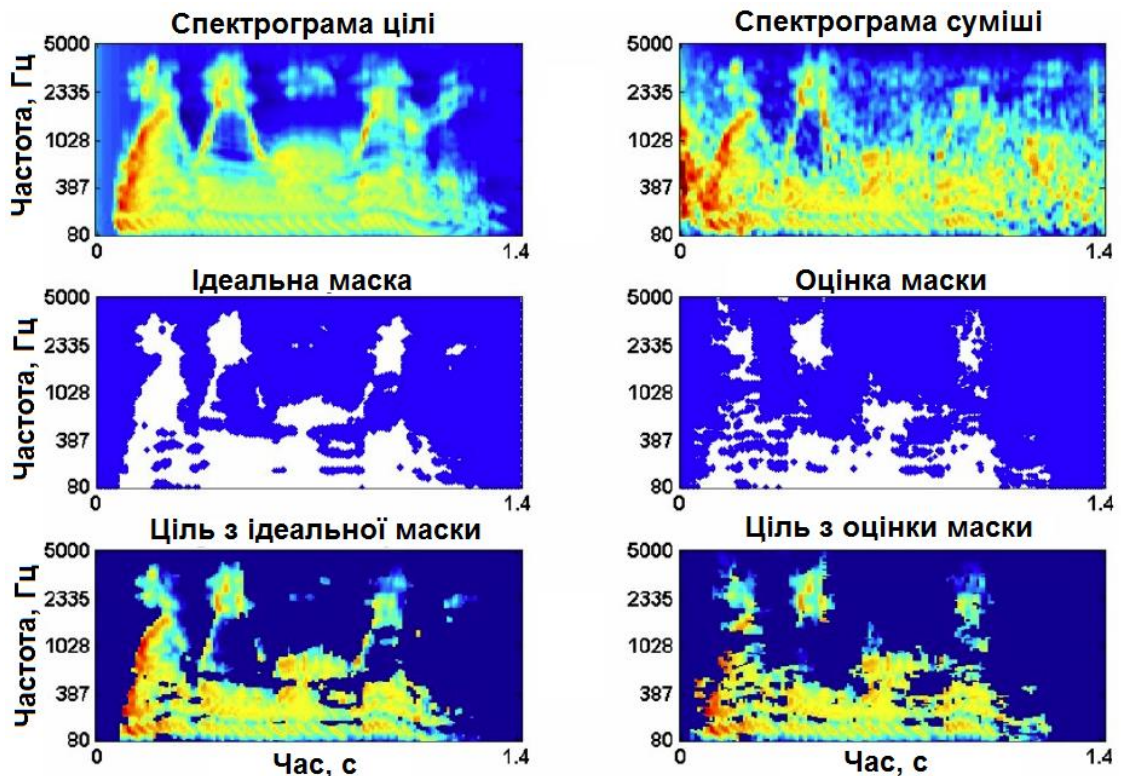


Рисунок 1.2 – Виділення голосу із суміші голосів методом ідеальної бінарної маски [21]

Сучасні рішення, засновані на застосуванні частотно-часового маскування, набули широкого поширення в завданнях, коли кількість одночасно діючих джерел звуку перевищує кількість мікрофонів.

Іншим підходом до завдань виділення акустичних сигналів є «сліпий поділ сигналів» (BSS) [22]. Термін «сліпе» використовується для позначення всіх методів ідентифікації, які базуються тільки на вихідних спостереженнях. Відмінною рисою даного напрямку була наявність у системи кількох входів та кількох виходів (MIMO-системи).

У 1987 році було введено «аналіз незалежних компонентів» (ICA) для лінійної суміші, який відповідає загальній структурі вирішення завдань BSS на основі статистичної незалежності невідомих джерел та негаусових сигналів [22]. ICA розкладає сигнали на підкомпоненти для ідентифікації

активності різних джерел сигналів. На рис.1.3 [22] показано схему розділення сигналів джерел звуку методом ІСА.

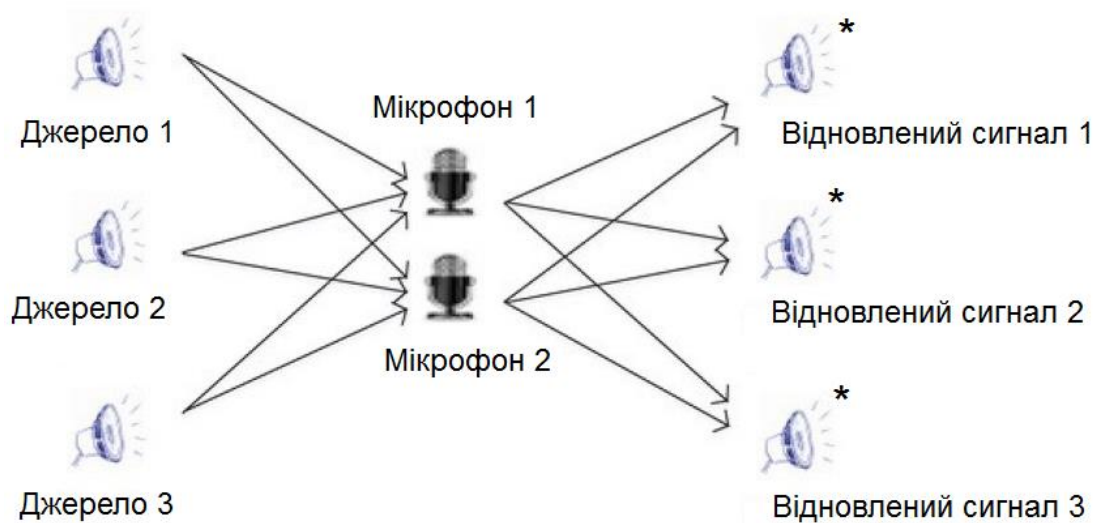


Рисунок 1.3 – Розв'язання задачі розділення джерел звуку методом ІСА

Аналітично задача ІСА виглядає наступним чином [22]: на вхід системи мікрофонів надходить вектор вхідних сигналів  $\mathbf{X}$ , які являють собою акустичні суміші вихідних сигналів  $\mathbf{S}$ . Матриця  $\mathbf{A}$  – матриця змішування сигналів,  $\mathbf{W}$  – матриця розділення, причому:

$$\mathbf{W} = \mathbf{A}^{-1} \quad (1.1)$$

На виході системи формується вектор вихідних спостережень  $\mathbf{Y}$ , що є оцінкою вихідних сигналів. Вектор вихідних спостережень системи:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{X} = \mathbf{W}\mathbf{X}. \quad (1.2)$$

Алгоритми ІСА полягають у визначенні матриці змішування з використанням двох основних критеріїв:

- максимальна негаусовість сигналів;
- мінімізація взаємної інформації для незалежності джерел.

Окрім алгоритмів обчислювального аналізу слухової сцени CASA та алгоритмів аналізу незалежних компонентів ІСА для вирішення завдання виділення звуку із суміші в сучасній літературі широкого поширення набули алгоритми просторової фільтрації з використанням мікрофонних решіток. Алгоритми засновані на формуванні діаграми спрямованості у напрямку корисного джерела [14-16]. Актуальні дослідження пов'язані як із застосуванням мікрофонних решіток, у яких мікрофони розташовані близько один до одного, так і з масивами мікрофонів, розподілених у просторі випадковим чином [40].

## 1.2. Основні відомості про мікрофонні решітки

Мікрофонні решітки є масивом з декількох мікрофонів, об'єднаних спільною цифровою обробкою сигналів. Рис. 1.4 [14-16] ілюструє цифрову обробку сигналів мікрофонними решітками.

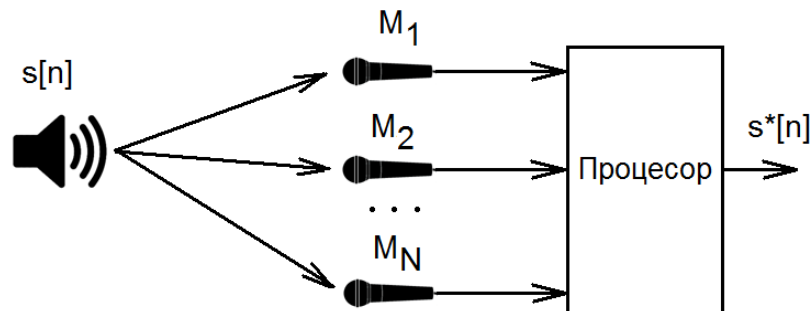


Рисунок 1.3 – Цифрова обробка сигналів мікрофонними решітками

Мікрофонні решітки забезпечують наступні переваги відносно одноканальних систем [14]:

- спрямованість прийому звуку;
- придушення шумів точкових джерел;
- придушення нестационарних шумів оточення;
- часткове ослаблення відбитих хвиль (в разі наявності);
- можливість просторової локалізації звуку цілі;
- можливість супроводу цілі, що рухається, як точкового джерела.

Базовими структурами мікрофонних решіток є так звані Broadside і Endfire (рис.1.5) [15].

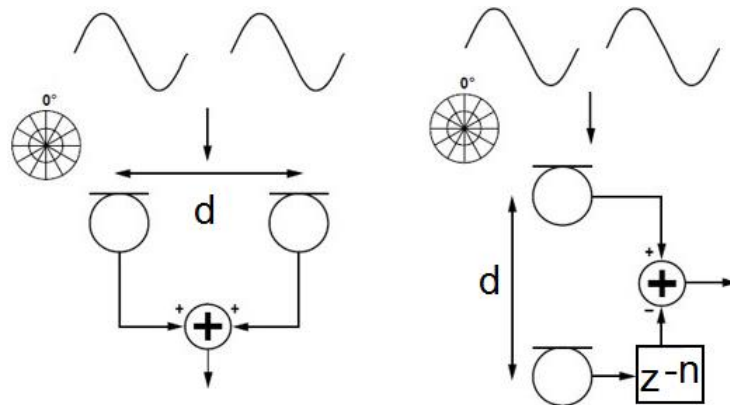


Рисунок 1.5 – Базові структури мікрофонних решіток  
(а – Broadside, б – Endfire)

Дані структури використовують всеспрямовані мікрофони (мікрофони, які незалежно від своєї орієнтації приймають сигнал із будь-яких напрямків). Для одного мікрофона повинна виконуватися вимога інваріантності до частоти.

Структура Broadside є масивом всенаправлених мікрофонів, розташованим перпендикулярно напрямку корисного сигналу.

Такі масиви мають вісь симетрії, відносно якої звук виділяється без ослаблення як «спереду» масиву, так і «ззаду». Такі структури набули широкого застосування, коли хвилі звукового тиску надходять на масив датчиків з одного боку.

Розглянемо структуру Broadside, що складається із двох мікрофонів, розташованих на відстані 7,5 см один від одного. Мінімальний відгук спостерігається при падінні сигналу під кутом  $90^\circ$  або  $270^\circ$  (за  $0^\circ$  приймається кут між напрямом корисного сигналу і нормаллю до лінії елементів). Але цей відгук сильно залежить від частоти сигналу. Теоретично така система має ідеальний нуль на частоті 2,3 кГц. Вище даної частоти в залежності від напрямку приходу є нулі під іншими кутами (рис.1.6).

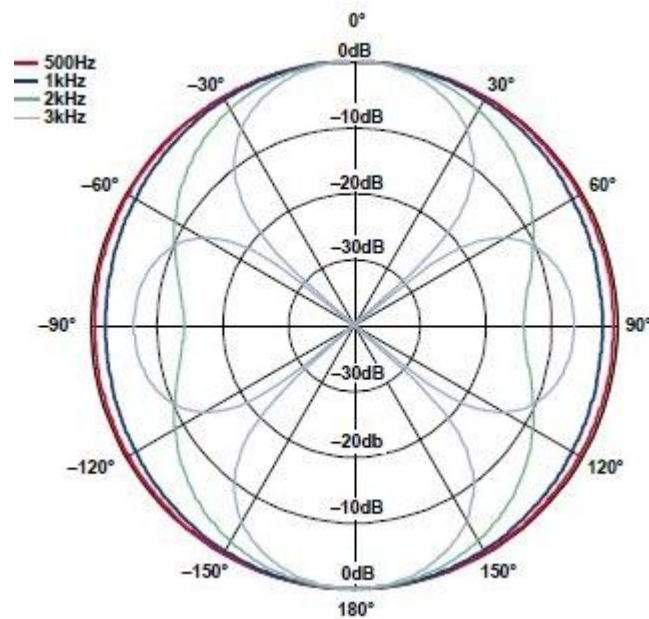


Рисунок 1.6 – Залежність прийому сигналу від напрямку структурою Broadside із двох всепрямованих мікрофонів для частот 500 Гц, 1 кГц, 2 кГц та 3 кГц

Структура Endfire складається з декількох мікрофонів, розташованих за напрямком корисного акустичного сигналу. Затриманий сигнал першого мікрофона сумується із сигналом наступного мікрофона. Такі структури використовуються для формування кардіоїдного, гіперкардіоїдного або суперкардіоїдного відгуку за напрямком і теоретично повністю виключають звук, що падає на масив під кутом  $180^\circ$ .

Для формування кардіоїдного відгуку по напрямку сигнал від мікрофонів повинен затримуватися на час, що дорівнює поширенню акустичної хвилі між двома елементами. Розробники таких систем мають два ступені свободи для зміни вихідного сигналу акустичної системи: зміну відстані між мікрофонами і зміну часу затримки [16].

На рис. 1.7 показана залежність прийому сигналу від напрямку різних частот структурою Endfire з двома елементами і відстанню між ними 2,1 см.

Відповідно до [14] розглянуті структури мають певні переваги і недоліки (табл. 1.1).

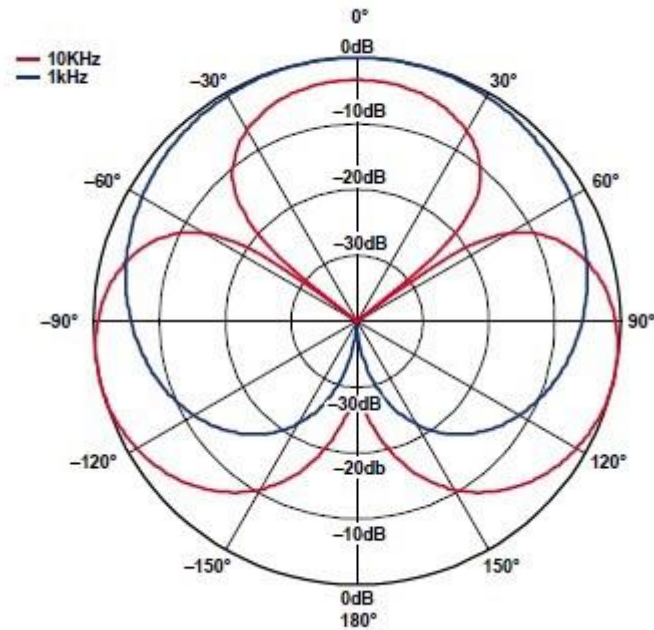


Рисунок 1.7 – Залежність прийому сигналу від напрямку структурою Endfire із двох всеспрямованих мікрофонів для частот 1 кГц та 10 кГц

Таблиця 1.1 – Переваги та недоліки Broadside та Endfire [16]

Структура МР	Переваги	Недоліки
Broadside	<ul style="list-style-type: none"> <li>- плоска геометрія;</li> <li>- проста реалізація обробки;</li> <li>- можливість управління напрямком променя;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- менше придушення поза осі МР;</li> <li>- мінімальна відстань між мікрофонами; та їх велика кількість необхідні, щоб запобігти просторовому витоку;</li> </ul>
Endfire	<ul style="list-style-type: none"> <li>- краще придушення поза осі;</li> <li>- менший загальний розмір;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- непласка (об'ємна) геометрія;</li> <li>- більш складна обробка;</li> <li>- придушення корисного сигналу в діапазоні низьких частот;</li> <li>- напрямок на джерело корисного сигналу має співпадати з віссю МР;</li> <li>- для двовимірних решіток формування променя можливе тільки в горизонтальному напрямку (площині решітки)</li> </ul>

### 1.3 Алгоритми обробки сигналів мікрофонних решіток

Мікрофонні решітки використовуються для вирішення широкого кола практичних завдань. Вирішувані завдання різні, а, отже, різні і алгоритми обробки сигналів. Вибір того чи іншого алгоритму обробки сигналів ґрунтується на сценаріях акустичної обстановки [14]:

- сценарії близького/віддаленого джерела сигналу;
- сценарії стаціонарної/динамічної акустичної обстановки;
- обробка в реальному часі/пост обробка.

Обробка акустичних сигналів мікрофонними решітками може відбуватися як у часовій, так і у частотній області [23]. У часовій області сигнали кожного мікрофону проходять через КІХ-фільтр і далі сигнали з усіх мікрофонів об'єднуються в один вихідний сигнал системи. У частотній області широкополосний сигнал розбивається на вузькосмугові складові за допомогою короткочасного перетворення Фур'є, які обробляються окремо.

Розглянемо алгоритми обробки сигналів, що набули найбільшого поширення:

- алгоритм затримки та підсумовування;
- алгоритми фільтрації та підсумовування;
- алгоритми обробки сигналів у решітках;
- алгоритми, які мінімізують потужність шуму на виході;
- алгоритми, що ґрунтуються на критерії мінімуму середньоквадратичної помилки;
- алгоритми, що ґрунтуються на критерії максимуму відношення сигнал/шум.

#### 1.3.1 Алгоритм затримки та підсумовування

Найпростішим алгоритмом формування діаграми спрямованості є алгоритм затримки та підсумовування (рис.1.8) [14-16].

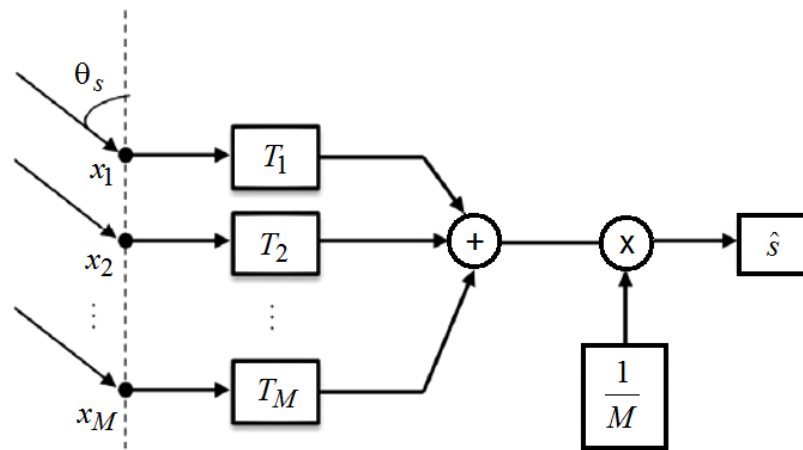


Рисунок 1.8 – Схема алгоритму затримки та підсумовування [23]

На кожен з  $M$  мікрофонів вводиться часова затримка  $T_m$  для подальшого підсумовування когерентних сигналів. Таке підсумовування дозволяє посилити корисний сигнал та послабити сигнали перешкод.

Сигнал цілі може бути розкладений на вузькосмугові частотні складові, затримки можуть бути апроксимовані фазовими зсувами кожної смуги частот.

Амплітудний множник на виході є елементом усереднення: він обернено пропорційний кількості мікрофонів.

У часовій області вихідний сигнал системи представляється як:

$$\hat{s}(t) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M x_m(t - T_m). \quad (1.3)$$

### 1.3.2 Алгоритм фільтрації та підсумовування

Це найбільш загальний клас алгоритмів. Застосовується для реверберуючих середовищ. Алгоритм фільтрації та підсумовування відрізняється тим, що амплітуда і фаза є частотно залежними параметрами [14, 15]. Сигнал на кожному мікрофоні проходить через нерекурсивний фільтр і потім піддається підсумовуванню з сигналами сторонніх каналів.

Загальна схема алгоритму фільтрації та підсумовування зображена на рис.1.9, а вихідний сигнал системи в частотній області є сумою частотно-залежних компонент:

$$s_{out}(f) = \sum_{n=1}^N w_n(f)x_n(f). \quad (1.4)$$

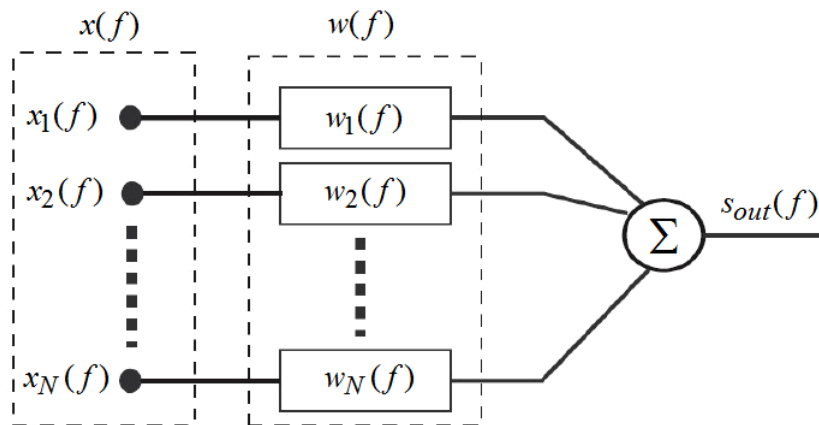


Рисунок 1.9 – Схема алгоритму фільтрації та підсумовування [15]

### 1.3.3 Алгоритм обробки сигналів у підрешітках

Діаграма спрямованості мікрофонних решіток залежить від частоти прийнятого сигналу. При прийомі широкосмугових сигналів на різних частотах рівень бічних пелюсток перешкод різний, а також різна і ширина основної пелюстки діаграми спрямованості решітки. Щоб забезпечити прийом широкосмугового сигналу, створюється інваріантність діаграми спрямованості по частоті шляхом розбиття масиву елементів на підрешітки.

Кожна підрешітка є лінійним еквідистантним масивом приймачів, що приймає сигнал у певній смузі частот. Для того щоб рівень бічних пелюсток залишався незмінним, у кожній підрешітці використовують фіксоване число елементів. Кількість елементів мікрофонних решіток може бути скорочено шляхом використання одного і того ж приймача в різних підрешітках. Для обчислення вихідного сигналу мікрофонної решітки спочатку формуються  $S$

вихідних сигналів підрешіток різних діапазонів частот, які піддаються операції підсумовування [15]:

$$s_{out}(f) = \sum_{s=1}^S \sum_{n=1}^N w_n(f) x_n(f). \quad (1.5)$$

На рис.1.10 наведено приклад мікрофонної решітки з дев'яти елементів, розділених на чотири підрешітки, яка обробляє широкосмуговий сигнал відповідно в чотирьох різних діапазонах частот.

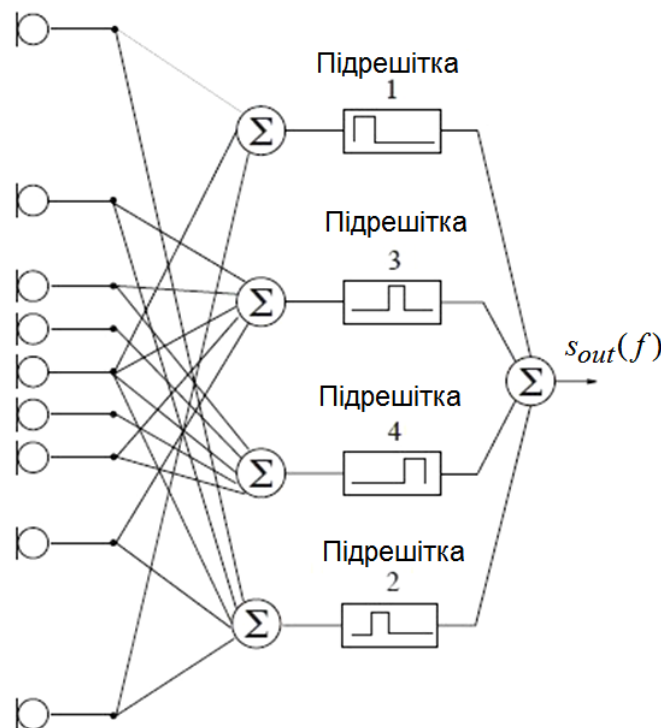


Рисунок 1.10 – Схема обробки широкосмугового сигналу мікрофонними решітками з дев'яти елементів у чотирьох діапазонах частот

Така технічна реалізація дозволяє підтримувати постійну ширину основної пелюстки діаграми спрямованості на всьому аналізованому частотному діапазоні.

Розглянуті алгоритми спрямовані на реалізацію бажаного відгуку системи у заданому напрямку. Наприклад, необхідно отримати сигнал, що надходить з певного напрямку, і в цьому випадку бажаний відгук буде

прийнятий за одиницю цього напрямку. Або, наприклад, доступна інформація про діючу на певній частоті перешкоду і про напрям з якого вона приходить, тоді бажаний відгук на цій частоті та напрямку дорівнює нулю.

Подальші алгоритми, які будуть розглянуті, ґрунтуються на статистичних властивостях шуканих та інтерференційних сигналів. Дані алгоритми оптимізують деяку функцію за рахунок адаптивної фільтрації вхідних сигналів, виділяючи корисний сигнал і відхиляючи перешкоди, що приходять з інших напрямків. Оптимізація полягає у застосуванні різних критеріїв, таких як максимальне відношення сигнал/шум (MSNR), мінімальна середньоквадратична помилка (MMSE), мінімальна дисперсія шуму (MVDR) та ін.

#### 1.3.4 Алгоритми, що мінімізують потужність шуму на виході

Більшість адаптивних методів покладаються на мінімізацію середньоквадратичної помилки між опорним сигналом та вихідним сигналом. На жаль, алгоритм найменшого середньоквадратичного відхилення (СКВ) може погіршити бажаний сигнал, оскільки він спрямований на мінімізацію середньоквадратичної помилки і не вимагає вимог до порога спотворень бажаного сигналу. Адаптивний алгоритм, який враховує цей недолік, називається алгоритмом Фроста [23] (рис.1.11).

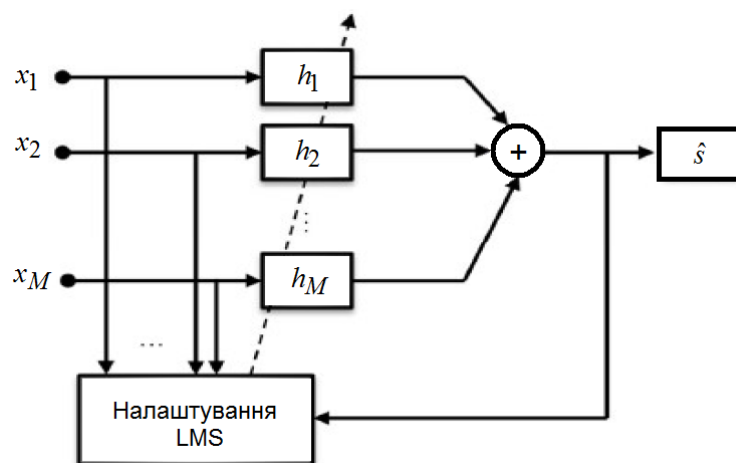


Рисунок 1.11 – Схема алгоритму Фроста

У цій схемі коефіцієнти фільтра адаптуються через використання алгоритму найменшого СКВ. Алгоритм використовується для мінімізації потужності шуму на виході при збереженні постійного коефіцієнта підсилення та лінійної фази на відгук системи у напрямку корисного джерела.

### 1.3.5 Алгоритми, що ґрунтуються на критерії мінімуму середньоквадратичної помилки

Дані алгоритми використовуються за наявності достатньої інформації про корисний сигнал. Якщо ця умова виконується, є можливість сформулювати опорний сигнал  $q(t)$ . Сигнал помилки  $f(t)$  відображає різницю між бажаною реакцією мікрофонної решітки та вихідним сигналом решітки [14]. Алгоритми, засновані на мінімізації середньоквадратичної помилки прагнуть виключити цю різницю.

$$f(t) = q(t) - \mathbf{W}^H (\mathbf{S} + \mathbf{X}(t)), \quad (1.6)$$

де  $\mathbf{W}$  – ваговий вектор;

$\mathbf{S}$  – вектор корисного сигналу;

$\mathbf{X}$  – вектор інтерференції.

На рис.1.12 показана схема реалізації алгоритму мінімізації СКВ.

Мінімальне середньоквадратичне відхилення за такої постановки завдання:

$$\langle |f|^2 \rangle = \langle |q|^2 \rangle - \mathbf{R}^H \mathbf{M}^{-1} \mathbf{R}, \quad (1.7)$$

а вираз для оптимальних вагових коефіцієнтів за критерієм мінімізації середньоквадратичної помилки можна знайти з умови:

$$\mathbf{W} = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{R}, \quad (1.8)$$

де  $\mathbf{R}$  – кореляційний вектор:

$$\mathbf{R} = \langle (\mathbf{S} + \mathbf{X}(t))q(t) \rangle. \quad (1.9)$$

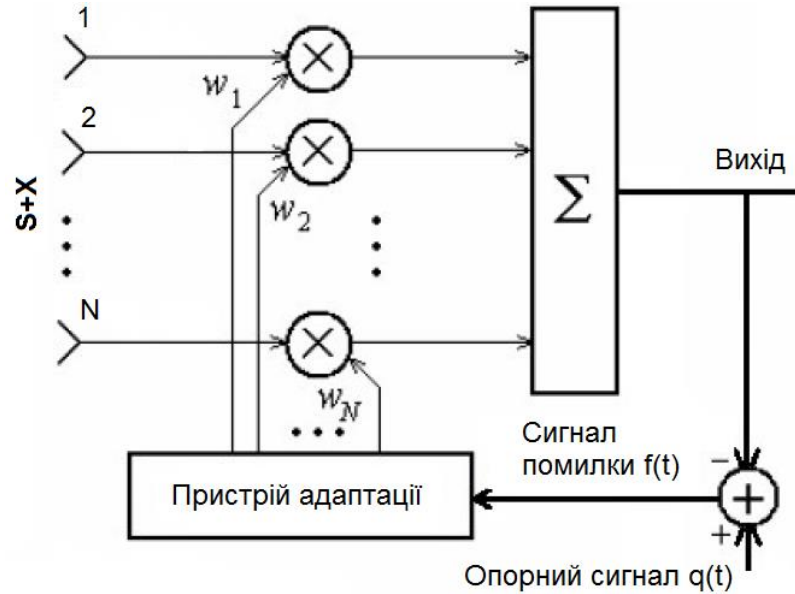


Рисунок 1.12 – Схема алгоритму мінімізації СКВ

За даним критерієм працюють алгоритми постфільтрації [16, 23]: алгоритм фільтрації та підсумовування з додаванням фільтра до виходу системи (рис.1.13).

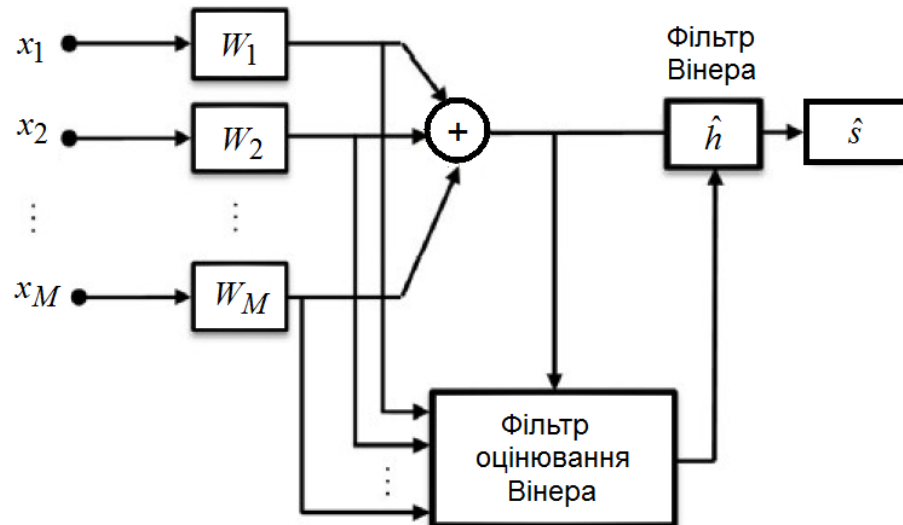


Рисунок 1.13 – Схема алгоритму постфільтрації Вінера

### 1.3.6 Алгоритми, що базуються на критерії максимуму відношення сигнал/шум

За відношення сигнал/шум на виході решіток приймається відношення середньої потужності корисного сигналу до середньої потужності перешкоди (власного шуму приймачів та зовнішніх джерел перешкод).

Відношення сигнал/шум на виході мікрофонних решіток можна записати в матричній формі [14]:

$$\Lambda = \frac{\mathbf{W}^H \mathbf{M}_s \mathbf{W}}{\mathbf{W}^H \mathbf{M} \mathbf{W}}, \quad (1.10)$$

де  $\mathbf{M}$  – кореляційна матриця перешкод,

$\mathbf{M}_s$  – кореляційна матриця корисного сигналу.

Оптимальний ваговий вектор, що забезпечує максимізацію цього відношення, можна знайти з умови:

$$\mathbf{W} = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{S}. \quad (1.11)$$

При цьому максимальне значення відношення сигнал/шум дорівнює:

$$\Lambda_{\max} = \zeta \mathbf{S}^H \mathbf{M}^{-1} \mathbf{S}, \quad (1.12)$$

де  $\zeta$  – відношення потужності корисного сигналу до потужності власного шуму в окремому елементі решітки.

### 1.4. Геометрія сучасних мікрофонних решіток

Для вирішення конкретних завдань за допомогою мікрофонних решіток важливо враховувати її геометрію [14-16]. При цьому враховуються різні критерії оптимізації: сталість ширини основної пелюстки діаграми спрямованості в широкому діапазоні частот, скорочення загальної кількості

мікрофонів у решітці, зменшення рівня бічних пелюсток, максимізація коефіцієнта спрямованої дії та ін. Наприклад, для вирішення завдань з локалізації акустичного джерела необхідно мати апріорну інформацію про геометрію решіток [24]. І навпаки, при використанні алгоритмів мінімізації дисперсії шуму, геометрія решіток практично не важлива [25]. Полегшують завдання оцінки параметрів сигналів мікрофонні решітки з еквідистантним розміщенням мікрофонів: лінійні та кругові мікрофонні решітки [14].

У роботі [26] розглядаються конфігурації мікрофонних решіток з 128 мікрофонів, які можуть забезпечити перевагу у вилученні картини акустичного поля в порівнянні зі звичайними круговими решітками (рис.1.14).

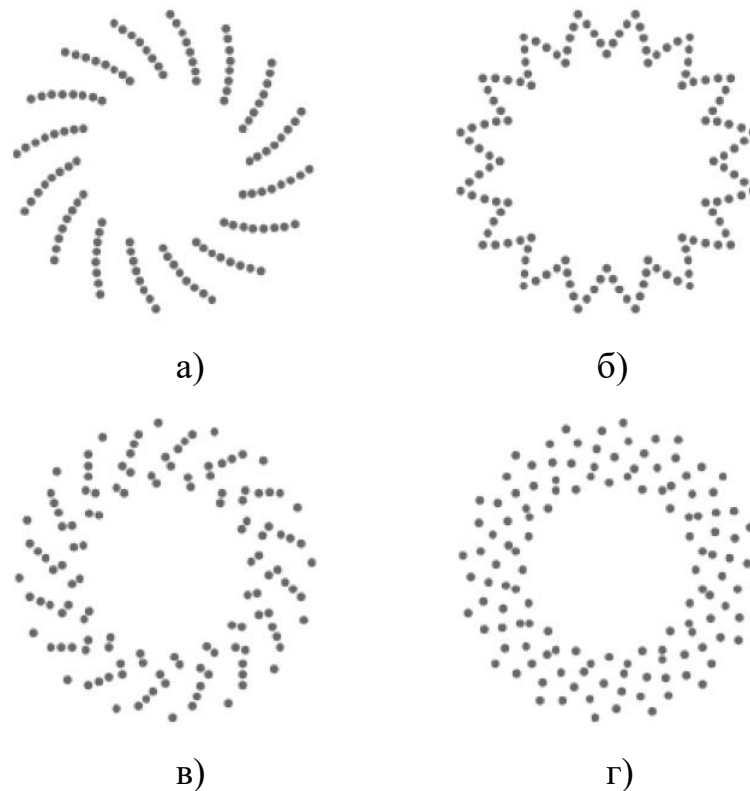


Рисунок 1.14 – Конфігурації мікрофонних масивів із 128 мікрофонів:

а) вихрова, б) «квітка», в) довільна 1; г) довільна 2

В огляді [15] наведено приклади решіток з нерівномірним розташуванням мікрофонів. Мікрофони розміщені на концентричних колах. Чим більша апертура системи, тим більше мікрофонів розміщено у решітках.

У міру видалення джерела звуку від мікрофонного масиву точність його локалізації буде спадати за рахунок згасання звукової хвилі. Ефективність локалізації джерела, а також ефективність виділення сигналу цілі, може бути підвищена за рахунок використання одночасно кількох мікрофонних решіток, розподілених у просторі. У літературі такі розподілені системи отримали назву "мережа акустичних датчиків" (acoustic sensor network).

Ефективність використання таких систем пов'язана з тим, що значно збільшується ймовірність того, що один із мікрофонів (масивів мікрофонів) перебуватиме ближче до корисного джерела. Найбільшого поширення такі системи набули при використанні на великих просторах, коли потрібно отримати інформацію з будь-якої точки простору спостереження. Завдання, що вирішуються такими системами, різні: локалізація джерела, виділення голосу певної людини, розділення акустичних джерел, визначення траєкторії переміщень джерел, визначення спрямованості акустичного джерела та ін.

Так, у дослідженні [25] показано, що можна отримати надійну систему локалізації звуку, яка використовує кілька мікрофонних масивів. Експериментальні результати з використанням цього підходу показали зменшення середньої помилки локалізації джерела до 8 см. Геометрія масиву наведена на рис.1.15.

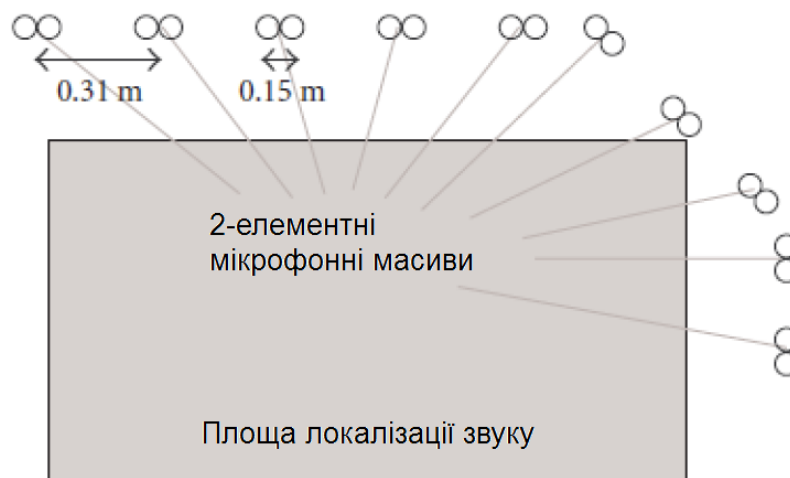


Рисунок 1.15 – Розміщення десяти 2-елементних масивів для локалізації джерела

Геометрія мікрофонних решіток дуже різноманітна через різні завдання, що стоять перед дослідниками. Тому в рамках даної роботи немає можливості перерахувати всі можливі варіанти, що використовуються у реальних дослідженнях.

### 1.5 Висновки по розділу 1

У цьому розділі розглянуто основні підходи для виділення звуку: методи частотно-часового маскування або T-F masking, аналіз незалежних компонентів або ICA, методи формування діаграми спрямованості або Beamforming, методи виділення джерела з використанням розподілених у просторі мікрофонних масивів.

В даний час для виділення сигналів джерел звуку розроблено велику кількість алгоритмів, що обумовлено високим ступенем складності цього завдання. Складність виділення залежить від кількості джерел, кількості мікрофонів та їх розташування, рівня шуму, способу змішування сигналів, а також від попередньої інформації про джерела, мікрофони та параметри змішування.

В основному, набули поширення алгоритми, реалізовані в частотній області. Вони активно розвиваються у напрямку комплексування різних методів обробки, але, як і раніше, не дають бездоганних результатів у всьому різноманітті зовнішніх умов та обмежень.

Таким чином, актуальна реалізація та дослідження властивостей алгоритму оптимальної просторової фільтрації акустичних сигналів БПЛА на фоні просторово-розподілених джерел перешкод у часовій області, з використанням повної смуги частот без розбиття, у реальному масштабі часу, що дозволяє виділяти ціль з будь-якої точки простору спостереження з максимальним відношенням сигнал/перешкода незалежно від взаємного розташування цілі та перешкод.

## 2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ПРОСТОРОВОЇ ОБРОБКИ АКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ БПЛА У ЧАСОВІЙ ОБЛАСТІ

У цьому розділі обґрунтовується алгоритм обробки акустичних сигналів БПЛА мікрофонним масивом у часовій області, заснований на початковому введенні часових затримок, що залежать від просторових координат, і подальше збільшення відношення сигнал/перешкода на виході масиву за рахунок розрахунку оптимальних на інтервалах стаціонарності вагових коефіцієнтів мікрофонів.

### 2.1. Метод просторової фільтрації акустичних сигналів БПЛА на фоні розподілених перешкод

Вимірювальна система має  $N$  рознесених у просторі мікрофонів. Кожен мікрофон реєструє суму всіх  $k$  акустичних сигналів, один із яких визначений як корисний акустичний сигнал БПЛА  $S(t)$ , інші – перешкоди –  $G_f(t)$ ,  $f = 1, \dots, k$  – номер перешкоди. При різних відстанях  $r_i$  від джерела до приймального пристрою з номером  $i$ ,  $i = 1, \dots, N$  сигналу потрібен час, щоб досягти мікрофона. Мікрофонні решітки працюють із цифровим сигналом, тому  $\nu$ -й відлік сигналу, реєстрованого  $i$ -м мікрофоном, можна представити наступним чином

$$Q_i(t_\nu) = \frac{A}{r_i} S\left(t_\nu - \frac{r_i}{V_s} F_s\right) + \sum_{f=1}^k \frac{A_{fi}}{r_{fi}} G_f\left(t_\nu - \frac{r_{fi}}{V_s} F_s\right), \quad (2.1)$$

де  $V_s$  – швидкість звуку;

$F_s$  – частота дискретизації;

$A$  і  $A_{fi}$  – масштабні множники;

$r_i$  – відстань від джерела корисного сигналу до  $i$ -ого приймача

$r_{fi}$  – відстань від  $f$ -ого джерела перешкоди до  $i$ -ого приймача.

Для виділення корисного сигналу із суміші сигналу БПЛА і сторонніх перешкод у кожен реєстрований  $i$ -м мікрофоном сигнал вводяться часові затримки, що залежать від просторових координат:

$$\tau_{ij} = \tau_{opt} - \frac{r_{ij}}{V_s}, \quad (2.2)$$

де  $r_{ij}$  – відстань від довільно вибраної точки простору спостереження  $j = 1, \dots, p$  (точки фокусування системи  $N$  мікрофонів) до  $i$ -ого мікрофона.

Оптимальна часова затримка  $\tau_{opt}$  для всіх мікрофонів стала і дорівнює відношенню найбільшого шляху поширення звуку в досліджуваному просторі без урахування можливих відбиттів (для прямокутного периметра зони огляду – діагональ) до швидкості звуку:

$$\tau_{opt} = \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{V_s}, \quad (2.3)$$

де  $a$  та  $b$  відповідно – лінійні розміри прямокутного периметра.

Третім лінійним розміром можна знехтувати лише в тому випадку, якщо джерела сигналів і мікрофони розташовані в одній площині.

Часова затримка  $\tau_{ij}$  для кожної точки простору спостереження та кожного мікрофона індивідуальна. Знання координат розміщення  $N$  мікрофонів дозволяє обчислити матрицю часових затримок  $T$  для кожної точки досліджуваного простору спостереження:

$$T = \begin{pmatrix} \tau_{11} & \tau_{21} & \dots & \tau_{p1} \\ \tau_{12} & \tau_{22} & \dots & \tau_{p2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \tau_{1N} & \tau_{2N} & \dots & \tau_{pN} \end{pmatrix}, \quad (2.4)$$

де  $p$  – загальна кількість точок простору спостереження.

Після введення затримок сигнал  $i$ -ого мікрофона можна записати:

$$Q_i(t_v) = \frac{A}{r_i} S \left( t_v - \left( \frac{r_i}{V_s} + \tau_{opt} - \frac{r_{ij}}{V_s} \right) F_s \right) + \sum_{f=1}^k \frac{A_{fi}}{r_{fi}} G_f \left( t_v - \left( \frac{r_{fi}}{V_s} + \tau_{opt} - \frac{r_{ij}}{V_s} \right) F_s \right). \quad (2.5)$$

Введення часових затримок  $\tau_{ij}$  призводить до синхронного прийому сигналу цілі всіма мікрофонами. При збігу координат джерела з координатами точки фокусування системи:

$$\frac{r_i}{V_s} = \frac{r_{ij}}{V_s}, \quad (2.6)$$

а сигнал  $i$ -ого мікрофона можна переписати у вигляді:

$$Q_i(t_v) = \frac{A}{r_i} S(t_v - \tau_{opt} F_s) + \sum_{f=1}^k \frac{A_{fi}}{r_{fi}} G_f \left( t_v - \left( \tau_{opt} + \frac{r_{fi}}{V_s} - \frac{r_{ij}}{V_s} \right) F_s \right). \quad (2.7)$$

Вихідний сигнал багатопозиційної системи з  $N$  мікрофонів для певної точки простору спостереження є суперпозицією сигналів всіх приймачів:

$$Q_{exj}(t_v) = \sum_{i=1}^N Q_i(t_v) = S(t_v - \tau_{opt} F_s) \sum_{i=1}^N \frac{A}{r_i} + \sum_{i=1}^N \sum_{f=1}^k \frac{A_{fi}}{r_{fi}} G_f \left( t_v - \left( \tau_{opt} + \frac{r_{fi}}{V_s} - \frac{r_{ij}}{V_s} \right) F_s \right). \quad (2.8)$$

При такій просторовій фільтрації потужність корисного акустичного сигналу зростає в  $N^2$  разів за рахунок синхронного прийому, а потужність

перешкод за рахунок взаємного накладання – у  $N$  разів. Таким чином, відношення сигнал/перешкода збільшується у  $N$  разів.

Такий підхід можна використовувати для паралельної схеми акустичного спостереження за великою кількістю сторонніх джерел, розташованих на множині  $p$  точок простору спостереження.

Кількість точок простору спостереження  $p$  доцільно вибирати з умов:

$$p = \frac{D}{\Delta x^2}, \quad (2.9)$$

де  $D$  – площа досліджуваного простору спостереження,

$\Delta x$  – роздільна здатність багатопозиційної системи.

Роздільна здатність  $\Delta x$  багатопозиційної акустичної системи можна визначити як діаметр поперечного перерізу на рівні половини максимального значення просторової кореляційної функції  $R_j(x', y')$  системи сигналів від  $N$  мікрофонів для кожної точки простору спостереження:

$$R_j(x', y') = \sum_{r=1}^M Q_{exj}^2(x', y', x_0, y_0), \quad (2.10)$$

$x', y'$  – координати точки фокусування системи;

$x_0, y_0$  – фіксовані координати точкового джерела сигналу;

$M$  – кількість відліків дискретизованого за часом сигналу.

За рахунок когерентного підсумовування потужність корисного сигналу зростає, отже, в точках простору спостереження з координатами акустичного джерела знаходяться максимуми просторової кореляційної функції. Отже, розрахунок просторової кореляційної функції дозволяє визначити координати джерел акустичних сигналів.

## 2.2 Застосування алгоритмів просторової обробки сигналів для збільшення відношення сигнал/перешкода

Метод введення просторово-залежних часових затримок дає хороші результати виділення сигналу з перешкод, але при великій кількості сторонніх джерел відношення сигнал/перешкода для звуку БПЛА різко знижується. Підвищення відношення сигнал/перешкода стає можливим, якщо використовувати алгоритми просторової обробки сигналів, засновані на використанні оцінки кореляційної матриці перешкоди [27]. Задача зводиться до знаходження вектора вагових коефіцієнтів мікрофонів, що максимізує відношення сигнал/перешкода сигналу цілі після виділення сигналу за допомогою алгоритму введення затримок.

### 2.2.1 Знаходження вагового вектора при оптимальній обробці акустичного сигналу

Алгоритми оптимальної обробки застосовуються, якщо [27]:

- точно відома кореляційна матриця перешкоди (відома форма сигналів перешкод та відомі просторові координати акустичних джерел);
- є апіорна інформація про корисне джерело.

Використовуючи припущення про некорельованість сигналів  $k$  перешкод, кореляційну матрицю перешкод можна записати як:

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_n + \sum_{f=1}^k \mathbf{M}_f, \quad (2.11)$$

$\mathbf{M}_n$  – кореляційна матриця власного шуму,

$\mathbf{M}_f$  – кореляційна матриця  $f$ -ї перешкоди:

$$\mathbf{M}_f = \begin{pmatrix} \left( \sum \frac{A_{f1}}{r_{f1}} G_f(t_v - \Delta_1) \right)^2 & \dots & \sum \frac{A_{fN}}{r_{fN}} G_f(t_v - \Delta_1) \sum \frac{A_{f1}}{r_{f1}} G_f(t_v - \Delta_1) \\ \dots & \dots & \dots \\ \sum \frac{A_{f1}}{r_{f1}} G_f(t_v - \Delta_1) \sum \frac{A_{fN}}{r_{fN}} G_f(t_v - \Delta_1) & \dots & \left( \sum \frac{A_{fN}}{r_{fN}} G_f(t_v - \Delta_N) \right)^2 \end{pmatrix}. \quad (2.12)$$

де підсумовування ведеться за часовими відліками інтервалу спостереження  $\nu = 1, \dots, L$ ;

$\Delta_i$  – затримка:

$$\Delta_i = \left( \tau_{opt} + \frac{r_{fi}}{V_s} - \frac{r_{ij}}{V_s} \right) F_s. \quad (2.13)$$

Алгоритм введення затримок за рахунок синхронного прийому корисного сигналу формує вектор-стовпець  $\mathbf{S}$ :

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} \frac{A}{r_1} \sum S(t_v - \tau_{opt} F_s) \\ \dots \\ \frac{A}{r_N} \sum S(t_v - \tau_{opt} F_s) \end{pmatrix}. \quad (2.14)$$

Оптимальний ваговий вектор, що максимізує відношення сигнал/перешкода, з точністю до постійного множника можна знайти з умови

$$\mathbf{W} = \alpha \mathbf{M}^{-1} \mathbf{S}, \quad (2.15)$$

де  $\alpha$  – довільний множник,

$\mathbf{M}^{-1}$  – зворотна до кореляційної матриця перешкоди,

$\mathbf{S}$  – вектор-стовпець корисного сигналу.

### 2.2.2 Знаходження вагового вектора при адаптивній обробці

Алгоритми адаптивної обробки застосовуються за відсутності апріорної інформації про вхідні сигнали. У такому випадку для знаходження вагового вектора необхідно використовувати оцінку кореляційної матриці перешкоди. Оцінювальна кореляційна матриця відрізняється тим, що в ній міститься інформація не лише про перешкоди, а й про корисний сигнал. Оцінка кореляційної матриці по  $Z$  статистично незалежним вибіркам вхідного процесу  $R$  можна виразити як:

$$\hat{\mathbf{M}} = \frac{1}{Z} \sum_{z=1}^Z \mathbf{R}(z) \mathbf{R}^H(z). \quad (2.16)$$

При великій кількості статистично незалежних вибірок по відношенню до мікрофонів  $N$ :

$$\hat{\mathbf{M}} \xrightarrow{Z \gg N} \mathbf{M}. \quad (2.17)$$

Алгоритм введення затримок дозволяє виділити звуковий сигнал БПЛА з будь-якої точки простору спостереження. Розрахунок кореляційної функції вихідних сигналів акустичної системи дозволяє визначити координати всіх акустичних джерел. Тому для знаходження оцінки кореляційної матриці перешкоди можуть бути використані сигнали уявних джерел – виділені за допомогою алгоритму введення затримок сигнали БПЛА  $G'_f$ , які містять суміш корисного сигналу і самих перешкод.

Оцінку кореляційної матриці перешкоди знайдемо із співвідношення:

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_n + \sum_{f=1}^{k-1} \mathbf{M}_f, \quad (2.18)$$

$\mathbf{M}_f$  – оцінка кореляційної матриці  $f$ -ої перешкоди (2.12).

Ваговий вектор, що розраховується за формулою (2.18) являє собою набір вагових коефіцієнтів кожного з  $N$  приймальних каналів, що залежать від часу  $w_i = w_i(t)$ . Цей набір індивідуальний для кожної  $j$ -ї точки простору спостереження:

$$W_j = (w_1, w_2, \dots, w_N)^T. \quad (2.18)$$

Для вагового вектора застосовується умова нормування:

$$\sum_i w_i^2 = 1. \quad (2.19)$$

У кожний момент часу акустична обстановка змінюється, тому під час вирішення завдань виділення сигналу БПЛА пропонується розбивати сигнал на інтервали аналізу  $T_a$ , у межах яких буде зроблено оптимальні оцінки параметрів алгоритму обробки.

Кожні  $T_a$  секунд відбувається перерахунок кореляційної функції: здійснюється перевірка координат діючих джерел для індикації переміщень та перевизначається оптимальний ваговий вектор.

### 2.3. Структурна схема алгоритму обробки акустичних сигналів БПЛА у часовій області

У кваліфікаційній роботі для виділення акустичних сигналів БПЛА досліджується алгоритм обробки з мікрофонними решітками у часовій області, структурна схема якого зображена на рис.2.1. Особливість алгоритму полягає у введенні точних часових затримок, що залежать від просторових координат знаходження джерела сигналу, а також адаптивним формуванням оптимальних на інтервалах стаціонарності вагових коефіцієнтів мікрофонів.

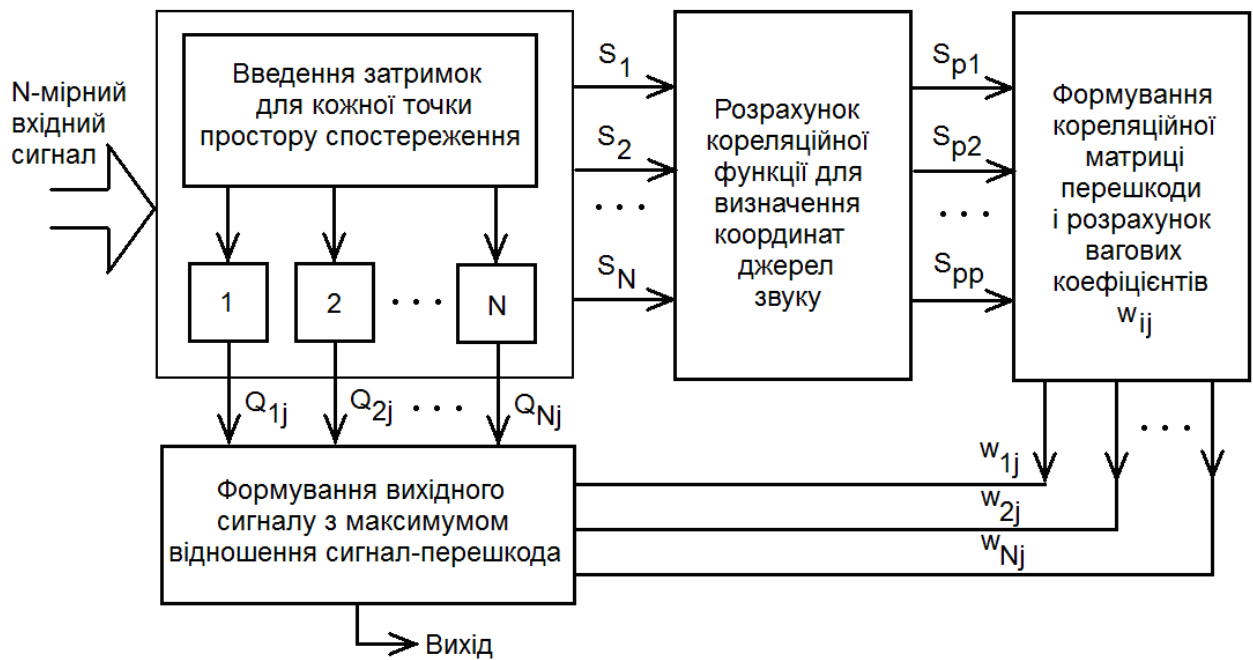


Рисунок 2.1 – Структурна схема алгоритму обробки сигналів БПЛА мікрофонної решітки у часовій області

Алгоритм заснований на знанні координат розміщення мікрофонів. Знання даних координат дозволяє побудувати матрицю часових затримок кожної точки простору спостереження на початок проведення обчислень.

У блоці введення затримок кожен сигнал мікрофона кожної точки простору спостереження накладається раніше обчислена певна часова затримка і формуються  $J$  вихідних сигналів для усіх точок досліджуваного простору. Блок розрахунку кореляційної функції із  $J$  сигналів відбирає  $P$  сигналів найбільшої потужності. За координатами максимумів кореляційної функції відбувається визначення координат всіх джерел, що звучать одночасно. У блоці формування кореляційної матриці перешкоди один з сигналів  $P$  призначається корисним і подальша обробка спрямована на підвищення відношення сигнал/перешкода вибраного джерела.

Для знаходження кореляційної матриці перешкоди використовуються сигнали уявних джерел – виділені за допомогою введення затримок акустичні сигнали перешкод. За рахунок прямого обернення сформованої матриці перешкоди проводиться розрахунок оптимального вагового вектора

та розраховані вагові коефіцієнти передаються на вхід блоку формування вихідного сигналу з найбільшим відношенням сигнал/перешкода.

Найбільше відношення сигнал/перешкода виділеного сигналу БПЛА досягається спільним застосуванням алгоритму введення затримок та адаптивного розрахунку оптимальних на інтервалах стаціонарності  $T$  вагових коефіцієнтів кожного прийомного каналу. Кожні  $T$  секунд розрахунки оновлюються.

#### 2.4. Контроль якості виділеного акустичного сигналу

Для оцінки ефективності виділення акустичного сигналу БПЛА з перешкод від сторонніх джерел у кваліфікаційній роботі використано об'єктивний критерій – відношення сигнал/перешкода.

Стосовно постановки задачі відношенням сигнал/перешкода в даній кваліфікаційній роботі будемо називати відношення енергії виділеного сигналу БПЛА до енергії перешкод від сторонніх джерел:

$$SNR = \frac{\sum \left( S(t_v - \tau_{opt} F_s) \sum_{i=1}^N \frac{A}{r_i} w_i \right)^2}{\sum \left( \sum_{i=1}^N \sum_{f=1}^k \frac{A_{fi}}{r_{fi}} w_i G_f \left( t_v - \left( \tau_{opt} + \frac{r_{fi}}{V_s} - \frac{r_{ij}}{V_s} \right) F_s \right) \right)^2} \cdot \quad (2.20)$$

Для контролю відношення сигнал/перешкода виділеного сигналу БПЛА лише за допомогою алгоритму введення затримок вагові коефіцієнти приймаються рівними  $w_i = 1$ .

## 2.5 Висновки по розділу 2

У другому розділі теоретично обґрунтовано метод просторової обробки акустичних сигналів БПЛА мікрофонною решіткою з  $N$  мікрофонів, заснований на введенні просторово-залежних часових затримок у кожен сигнал мікрофона. Такий підхід дозволяє підсилити відношення сигнал/перешкода у  $N$  разів.

Розроблено алгоритм обробки сигналів у часовій області, що максимізує відношення сигнал/перешкода на виході решітки для будь-якої точки простору спостереження. Збільшення відношення сигнал/перешкода досягається застосуванням оптимальних на інтервалах стаціонарності вагових коефіцієнтів решітки мікрофонів. Описано об'єктивний критерій, що застосовуються для оцінки ефективності фільтрації акустичних сигналів БПЛА, а саме – відношення сигнал/перешкода.

### 3 КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ПРОСТОРОВОЇ ОБРОБКИ АКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ БПЛА

Даний розділ присвячений комп'ютерному моделюванню системи просторової обробки акустичних сигналів БПЛА.

Комп'ютерне моделювання було реалізовано за таких умов та обмежень.

1. Для моделювання була умовно обрана прямокутна зона спостереження площею 9,6 тис. м<sup>2</sup> (лінійні розміри 120 м x 80 м).

2. Вважалося, що вимірювальна система з ненаправлених мікрофонів була розміщена в тій же площині, що і всі джерела акустичних сигналів. Це допущення дозволяє при моделюванні не враховувати третій вимір досліджуваного простору.

3. Джерела акустичного сигналу і перешкод вважаються точковими, всеспрямованими, звуковий тиск зменшується обернено пропорційно відстані від джерела звуку.

4. В якості корисного сигналу використовується аудіозапис квадрокоптера DJI Phantom 3 в режимі зависання. В якості джерел шуму використані аудіозаписи звуку двигуна вантажівки, голосу людини, спів птаха. Частота дискретизації аудіосигналів  $F_s = 44100$  Гц. Тривалість кожної реалізації становить 5 с.

5. При моделюванні досліджується можливість виділення сигналу БПЛА, тому вважаємо, що звуковий сигнал досягає мікрофонів найкоротшим шляхом – по прямий, відбиття від перешкод і землі не враховується.

6. Енергія кожного аудіофрагмента однакова, що досягається шляхом нормування.

7. Джерела сигналів стаціонарні у просторі. Під час процесу обробки переміщень немає.

### 3.1 Визначення оптимальної конфігурації мікрофонних решіток для виділення сигналів БПЛА з перешкод

При такій постановці задачі необхідно встановити оптимальну для досліджуваного алгоритму конфігурацію мікрофонних решіток для виділення сигналів БПЛА. Оскільки висота розміщення мікрофонів зафіксована, порівнянню підлягали три конфігурації мікрофонного масиву з десяти ненаправлених мікрофонів: розміщення по одній стороні площі спостереження, кутове розміщення, розміщення мікрофонів по периметру площі спостереження (рис.3.1).

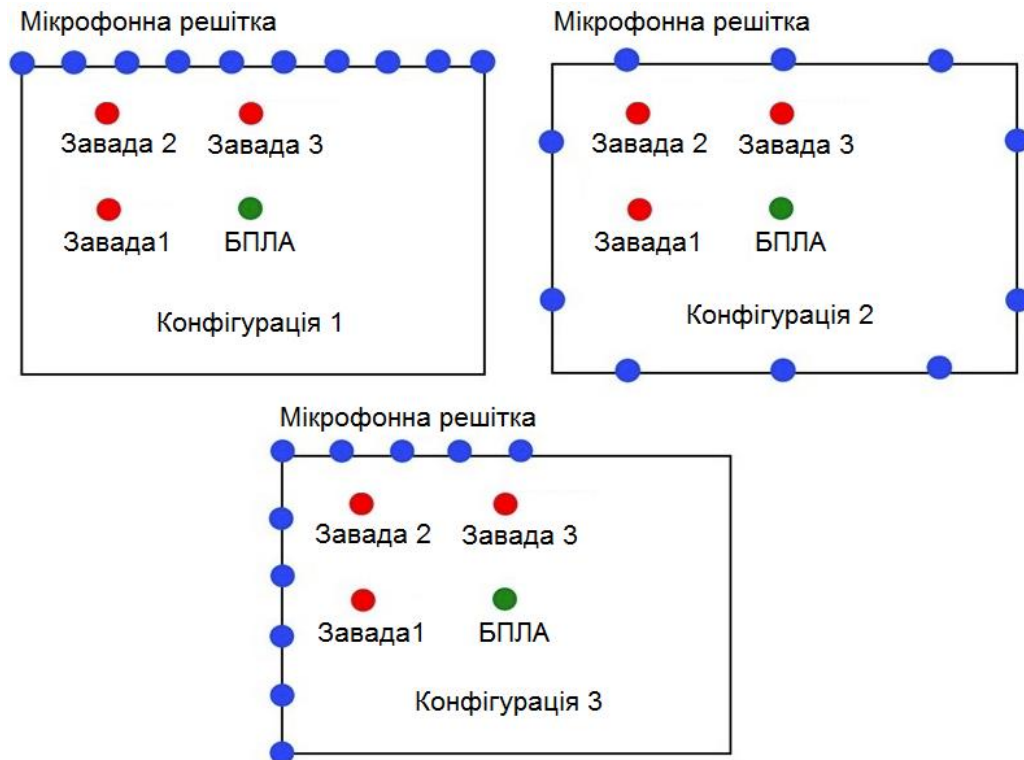


Рисунок 3.1 – Конфігурації мікрофонних решіток, що порівнюються (корисний сигнал у центрі площі спостереження)

При проведенні моделювання по визначенню оптимальної конфігурації вважалося, що на площі спостереження звучить одночасно 4 джерела, одне джерело корисне (БПЛА), інші джерела – перешкоди.

Для конфігурації 1 уявна відстань між мікрофонами дорівнює 13,3 м; для конфігурації 2 – 16 м і для конфігурації 3 – 40 м. Просторові координати джерел відомі, координати розміщення мікрофонів також відомі.

Для визначення оптимальної конфігурації було проведено розрахунок відношення сигнал/перешкода. Виділення акустичного сигналу БПЛА було зроблено за допомогою алгоритму введення затримок в кожний канал. Всі вагові коефіцієнти сигналів мікрофонів дорівнюють одиниці.

Розрахунок виконаний для двох різних взаємних розташувань джерел корисного сигналу і джерел перешкоди: корисне джерело знаходиться в центрі площі спостереження (рис.3.1) і корисний сигнал зміщений відносно центру площі спостереження (рис.3.2).

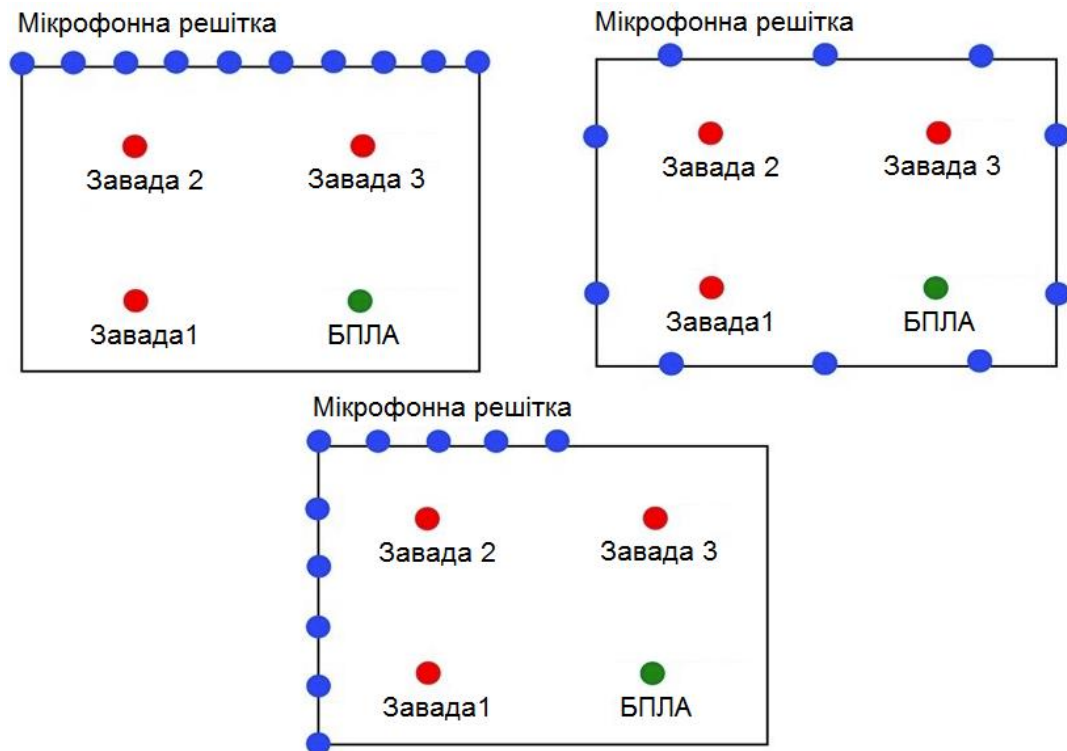


Рисунок 3.2 – Конфігурації мікрофонних решіток, що порівнюються (корисний сигнал зміщений від центру площі спостереження)

У табл. 3.1 представлені результати розрахунку відношення сигнал/перешкода сигналів БПЛА, виділених за допомогою часових затримок для трьох аналізованих конфігурацій та двох різних координат корисного джерела.

Таблиця 3.1 – Розрахунок відношення сигнал/перешкода сигналів БПЛА, виділених за допомогою часових затримок для трьох аналізованих конфігурацій для двох різних координат корисного джерела

№	Конфігурація багатопозиційної системи	Відношення сигнал/перешкода виділеного сигналу БПЛА, $\lambda$ , відн. од.	
		Рис. 3.1	Рис. 3.2
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

Розрахунок відношення сигнал/перешкода проводився за формулою

$$SNR = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^T S_0^2(t)}{\sum_{t=1}^T (S(t) - S_0(t))^2}}, \quad (3.1)$$

де  $S$  – відновлений сигнал БПЛА на фоні завад;

$S_0$  – первинний сигнал БПЛА;

$t$  – номер відліку сигналу;

$T$  – тривалість реалізації у кількості вибірок.

На рис.3.3 показана порівняльна діаграма отриманих відношень сигнал/перешкода для трьох конфігурацій мікрофонної решітки, зазначених у табл.3.1.

При виділенні акустичного сигналу БПЛА конфігурацією 3 для двох різних положень джерела корисного сигналу досягається найвище відношення сигнал/перешкода.

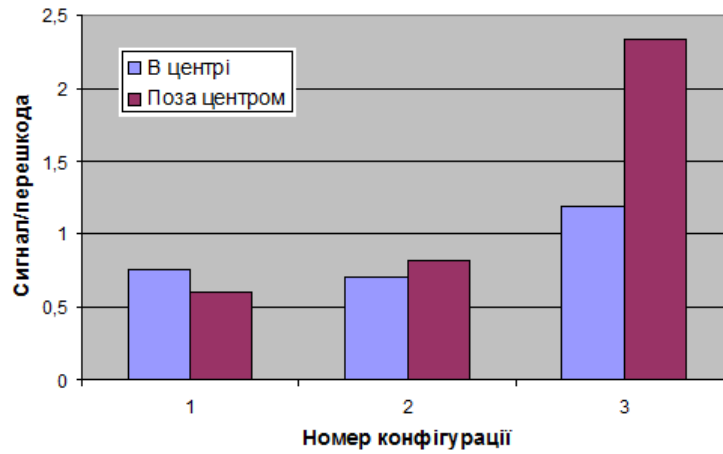


Рисунок 3.3 – Порівняльна діаграма отриманих відношень сигнал/перешкода для трьох конфігурацій мікрофонної решітки

На рис. 3.4 показані реалізації корисного сигналу: вихідного неспотвореного сигналу БПЛА (рис. 3.4, а) і виділеного з перешкод з найбільшим відношенням сигнал/перешкода (рис. 3.4, б).

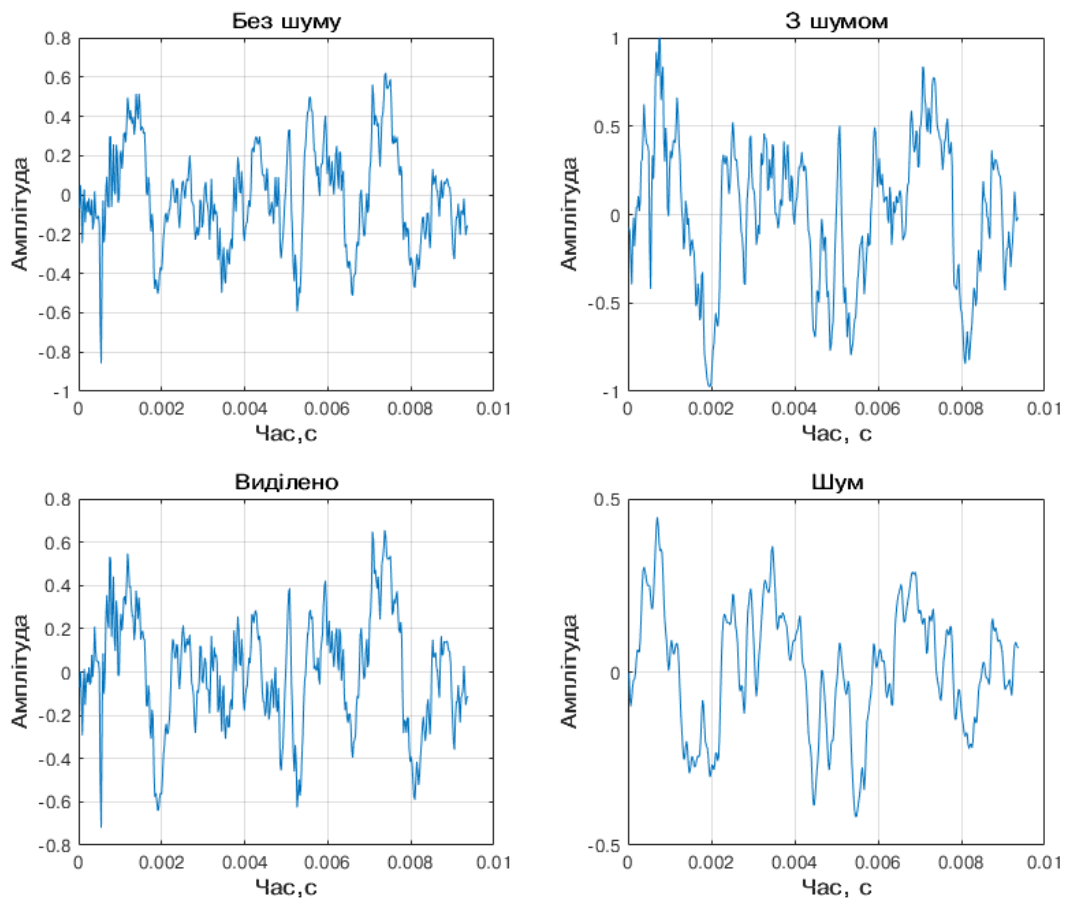


Рисунок 3.4 – Реалізації сигналу БПЛА без шуму, виділеного сигналу і шуму конфігурацією 3 при БПЛА поза центром

На рис. 3.5 показаний графік коефіцієнта взаємної кореляції для вихідного корисного та виділеного з перешкод сигналу БПЛА, який доводить ефективність фільтрації корисного сигналу з перешкод.

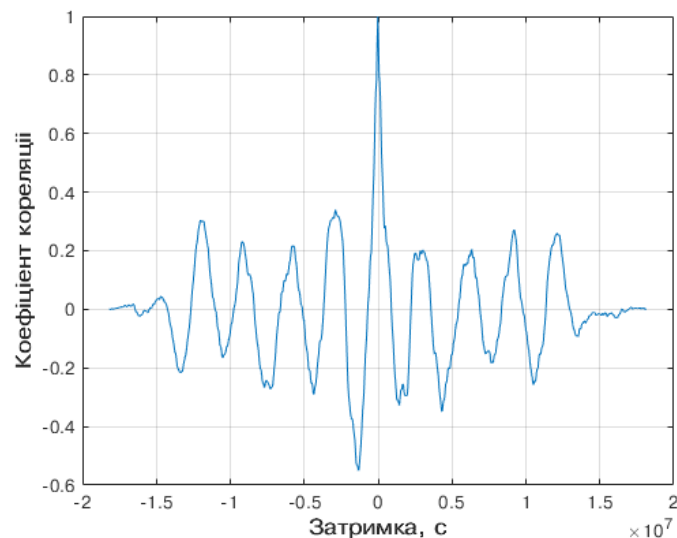


Рисунок 3.5 – Коефіцієнт кореляції вихідного корисного сигналу БПЛА та сигналу, виділеного із перешкод конфігурацією 3

При різному взаємному розташуванні корисного сигналу і перешкод конфігурація 3 забезпечує найкращі показники відношення сигнал/перешкода. Отже, конфігурація з розміщенням мікрофонів по периметру простору спостереження є оптимальною для дослідженого алгоритму.

### 3.2. Дослідження просторової роздільної здатності багатопозиційної акустичної системи

Для оцінки просторової роздільної здатності акустичної системи в моделі по периметру площі спостереження було розподілено двадцять мікрофонів. У центрі площі спостереження є одне джерело корисного сигналу БПЛА, сторонні джерела відсутні.

Для кожної точки простору вводяться певні часові затримки, пропорційні відстані від цієї точки до певного мікрофона та проводиться

розрахунок просторової кореляційної функції. Результати розрахунку кореляційної функції за просторовими координатами показані на рис. 3.6.

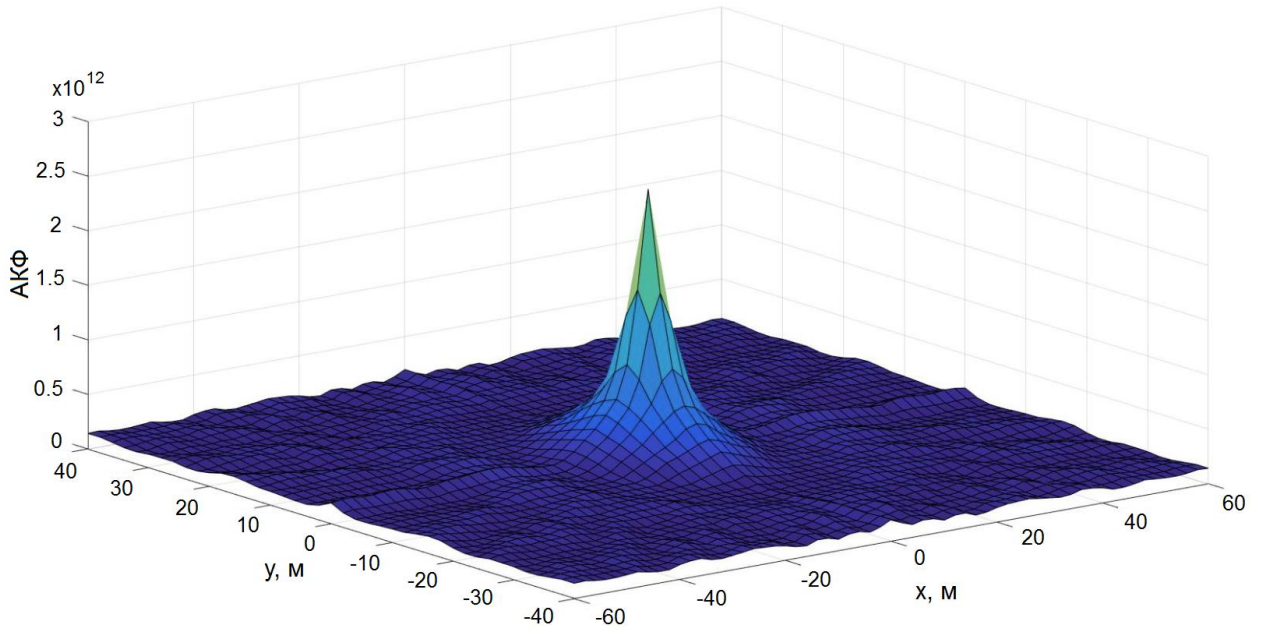


Рисунок 3.6 – Просторова кореляційна функція для акустичного сигналу БПЛА без перешкод (в діапазоні до 7 кГц)

Для визначення роздільної здатності системи було отримано переріз кореляційної функції за рівнем 0,707 (-3 дБ), рис.3.7.

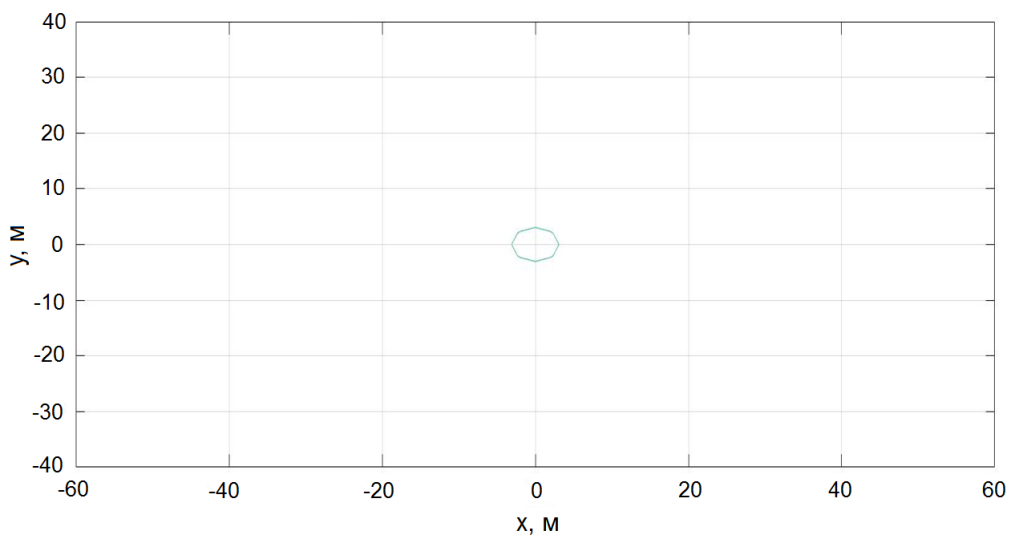


Рисунок 3.7 – Перетин кореляційної функції за рівнем 0,707 (-3 дБ)

Просторова роздільна здатність акустичної системи в полосі частот до 7 кГц склала 5,6 м.

На рис.3.8 показано графік спектру сигналу БПЛА без перешкод. Можна відмітити його лінійчастий характер і швидкий спад спектральних ліній після частоти 4 кГц.

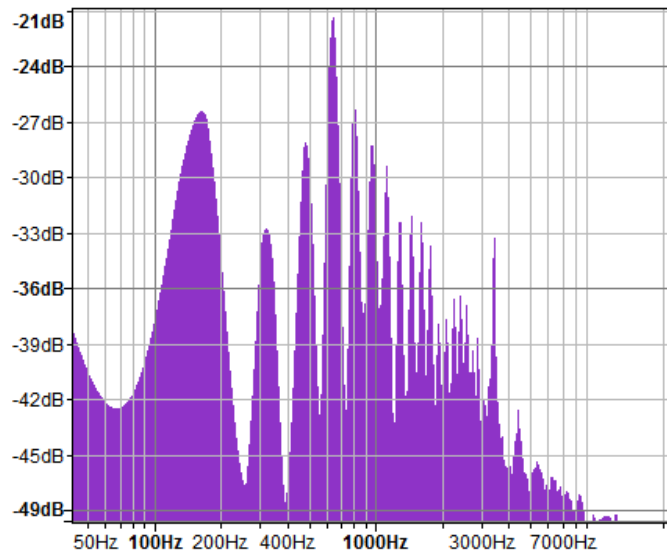


Рисунок 3.8 – Графік спектру сигналу БПЛА без перешкод

При обмеженні смуги частот системи до 4 кГц просторова роздільна здатність системи покращується. В нашому експерименті вона склала 4,8 м. Відповідна кореляційна функція показана на рис. 3.9.

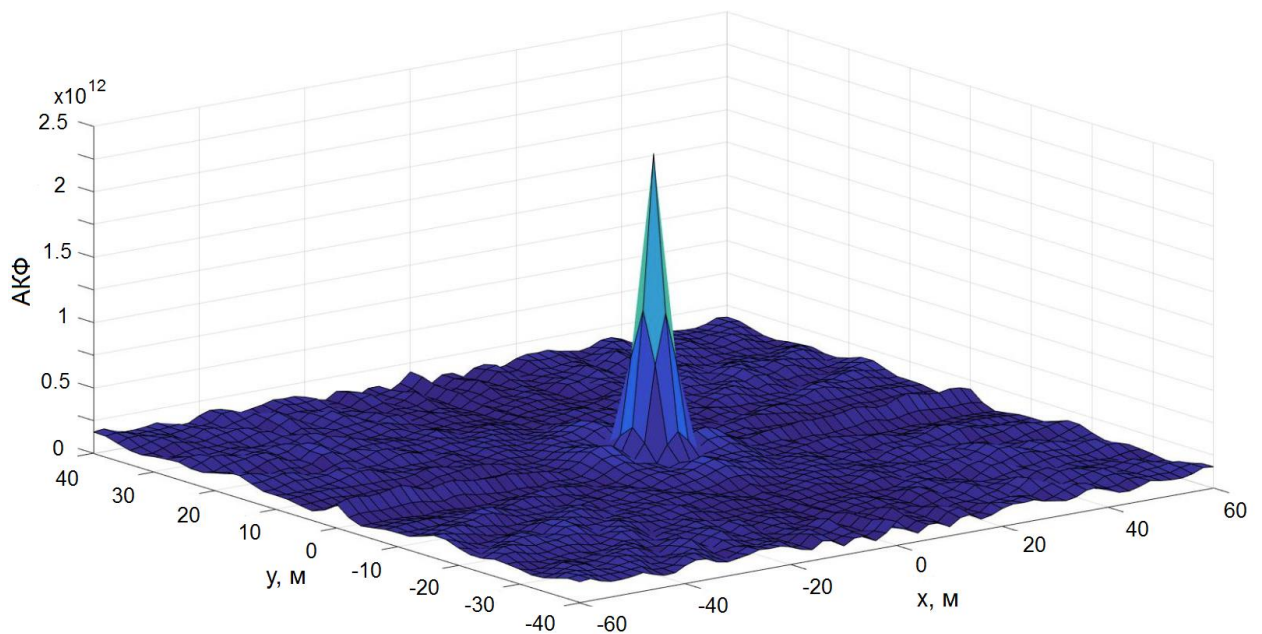


Рисунок 3.9 –Просторова кореляційна функція для акустичного сигналу БПЛА без перешкод (в діапазоні до 4 кГц)

Можна очікувати, що таке обмеження смуги також позитивно скажеться на відношенні сигнал-перешкода.

Розрахунок просторової кореляційної функції дозволяє визначати координати акустичних джерел. Це підтверджується чисельним експериментом визначення координат акустичних джерел восьми одночасно працюючих джерел звуку. Частотний діапазон акустичної системи до 7 кГц.

Координати джерел невідомі, відомі тільки координати розміщення мікрофонів. Після введення часових затримок, які залежать від просторових координат мікрофонів, проводиться розрахунок просторової кореляційної функції у кожній точці простору. Результати розрахунку наведено на рис.3.10.

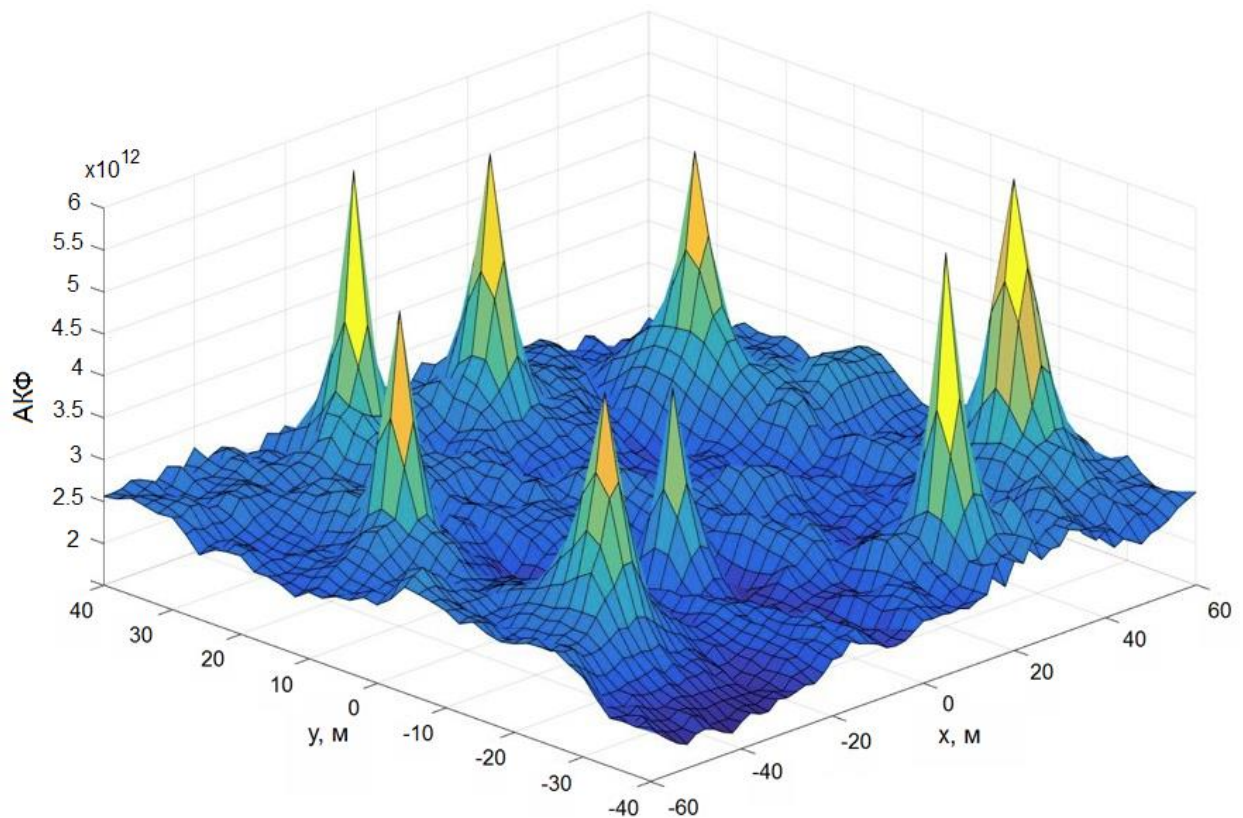


Рисунок 3.10 – Розрахунок просторової кореляційної функції для восьми акустичних джерел (смуга до 7 кГц)

З рис. 3.10 випливає, що наявність восьми максимумів просторової кореляційної функції відповідає восьми акустичним джерелам. Координати максимумів відповідають координатам джерел.

За положенням максимумів кореляційної функції можна визначити координати восьми джерел (табл.3.2).

Таблиця 3.2 – Координати восьми акустичних джерел

Номер джерела							
1	2	3	4	5	6	7	8
$x_1 = -10$	$x_2 = 20$	$x_3 = -40$	$x_4 = 40$	$x_5 = 10$	$x_6 = -50$	$x_7 = 40$	$x_8 = -20$
$y_1 = -30$	$y_2 = -30$	$y_3 = -20$	$y_4 = -10$	$y_5 = 10$	$y_6 = 20$	$y_7 = 20$	$y_8 = 30$

Таким чином розрахунок просторової кореляційної функції дозволяє визначити координати всіх акустичних джерел. Роздільна здатність акустичної системи для сигналів в смузі до 7 кГц склала 5,6 м. Для дослідження простору спостереження обробляти точки простору без втрати акустичних джерел слід з відповідним кроком.

### 3.3 Розрахунок оптимальних вагових коефіцієнтів

У п.3.2 було показано, що акустична система із двадцяти мікрофонів може визначити просторові координати восьми акустичних джерел. Отже, після запровадження затримок, відповідних координатам джерел, може бути виділено вісім сигналів  $S_{p1}, \dots, S_{p8}$ . На рис. 3.11 показано взаємне розташування мікрофонної решітки і акустичних джерел.

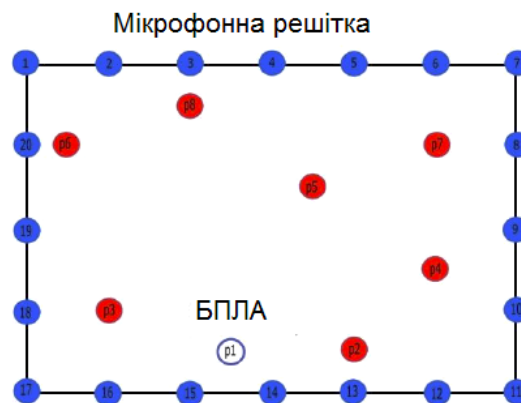


Рисунок 3.11 – Взаємне розташування восьми акустичних джерел і решітки з двадцяти мікрофонів

Для розрахунку вагових коефіцієнтів мікрофонів необхідно сигнал БПЛА призначити корисним  $S_{p1}$ , а решту  $S_{p2}, \dots, S_{p8}$  джерел – вважати уявними джерелами сторонніх перешкод. Після виділення даних сигналів алгоритм обробки формує кореляційну матрицю кожної перешкоди відповідно до формули (2.12), кореляційну матрицю корисного сигналу відповідно до формули (2.14), оптимальні вагові коефіцієнти розраховуємо за формулою (2.15).

В табл. 3.3 представлені результати розрахунку вагових коефіцієнтів багатопозиційної акустичної системи з двадцяти мікрофонів.

Таблиця 3.3 – Результати розрахунку вагових коефіцієнтів багатопозиційної системи із двадцяти мікрофонів

$w1$	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

Порівняємо результати розрахунку вагових коефіцієнтів, наведених у табл. 3.3 та рис. 3.11. Найбільші значення коефіцієнтів у мікрофонів №14 та №15 – найближчі мікрофони за розташуванням до корисного джерела сигналу БПЛА. Оптимальні вагові коефіцієнти спрямовані на підсилення корисного сигналу та ослаблення сигналів сторонніх джерел. Саме тому максимальне та мінімальне значення вагових коефіцієнтів у даному конкретному випадку відрізняється у 17 тис. разів.

#### 3.4. Дослідження ефективності фільтрації сигналу БПЛА на фоні інтенсивних розподілених перешкод

Ефективність фільтрації корисного сигналу визначається по відношенню сигнал/перешкода виділеного сигналу.

Взаємне розташування мікрофонних решіток та джерел акустичних сигналів відповідає рис. 3.11.

На першому етапі реалізований алгоритм обробки виділяє за допомогою методу просторової фільтрації, заснованого на введенні затримок, що залежать від просторових координат, всі джерела акустичних сигналів. Після розпізнавання виділеного з перешкод сигналу БПЛА інші сім джерел необхідні для формування кореляційної матриці перешкоди.

Ефективність виділення сигналу БПЛА зростає з допомогою подальшого розрахунку на оптимальних інтервалах стаціонарності вагових коефіцієнтів мікрофонів. Оптимальний ваговий вектор решітки визначається через кореляційну матрицю перешкоди (п.3.3).

Таким чином, досліджений алгоритм дозволяє збільшити ефективність виділення акустичного сигналу цілі: за допомогою введення часових затримок виділяється корисний сигнал, відношення сигнал/перешкода якого збільшується за рахунок застосування вагових коефіцієнтів.

У табл.3.4 наведено результати оцінки в модельному експерименті відношення сигнал/перешкода.

Таблиця 3.4 – Результати оцінки в модельному експерименті відношення сигнал/перешкода

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 акустичного сигналу БПЛА алгоритмом просторової фільтрації без вагових коефіцієнтів досягається вигреш (для дослідженого випадку) 11,2 дБ по відношенню до запису акустичної обстановки одним мікрофоном (табл.3.4). Результат узгоджується з теорією (п.2.1), згідно з якою при використанні двадцяти мікрофонів алгоритм просторової фільтрації без вагових коефіцієнтів забезпечує вигреш у відношенні сигнал/перешкода не більше ніж у 20 разів, тобто 13 дБ. Подальше застосування вагових коефіцієнтів збільшує вигреш у відношенні сигнал/перешкода з 11,2 дБ до 16,5 дБ.

Таким чином, ефективність дослідженого в роботі алгоритму залежить від кількості мікрофонів у решітці, кількості одночасно працюючих джерел завад та їх взаємного розташування у просторі.

### 3.5 Висновки по розділу 3

Чим ближче розташоване корисне джерело до одного з мікрофонів решітки, тим ефективніша робота алгоритму. При винесенні мікрофонів з площини розміщення джерел відстань від джерела корисного сигналу до найближчого мікрофона збільшується, а різниця відстаней до всіх мікрофонів решітки зменшується, що призводить до зниження ефективності дослідженого підходу.

Таким чином, для дослідженого алгоритму визначена оптимальна конфігурація мікрофонних решіток для виділення акустичного сигналу БПЛА на фоні перешкод: мікрофонні решітки з розміщенням мікрофонів по периметру площі спостереження, що дозволяє виділяти сигнал БПЛА з найбільшим відношенням сигнал/перешкода.

Досліджено просторову роздільну здатність акустичної системи. Для досліджуваного діапазону частот до 7 кГц роздільна здатність склала 5,6 м. При значній зміні значень верхньої граничної частоти діапазону роздільна здатність акустичної системи змінюється слабо.

Проведені дослідження щодо застосування дослідженого алгоритму обробки для виділення сигналу БПЛА з перешкод для певної точки простору спостереження свідчать про можливе досягнення виграшу у відношенні сигнал/перешкода більш ніж у  $N$  разів, де  $N$  – число мікрофонів в решітці.

## ВИСНОВКИ

Широке використання малих БПЛА крім позитивних сторін породило ряд проблем. Вони пов'язані з неадекватною поведінкою деяких власників БПЛА, несанкціонованим моніторингом об'єктів і територій державного значення, збільшенням випадків вторгнення в особисте життя. В цій ситуації актуальною стає задача виявлення і визначення координат БПЛА в повітрі.

Ця задача може бути виконана засобами радіолокації, радіомоніторингу, акустичної локації, відео- і теплового спостереження. На практиці часто використовується комплексування цих методів.

Одним з напрямків у виявленні БПЛА є акустичний метод, який полягає в прийманні звукового випромінення дрону. Головним недоліком акустичного метода є його чутливість до сторонніх акустичних шумів і завад. Цей фактор суттєво знижує дистанцію виявлення, вірогідність правильного розпізнавання та точність визначення координат.

Мета кваліфікаційної роботи полягає в реалізації і дослідженні можливостей алгоритму обробки акустичного сигналу БПЛА мікрофонною решіткою у часовій області, що дозволяє виділяти звук БПЛА з будь-якої точки простору спостереження зі збільшенням відношення сигнал/перешкода, незалежно від взаємного розташування цілі та джерел акустичних перешкод.

В даний час для виділення сигналів джерел звуку розроблено велику кількість алгоритмів, що обумовлено високим ступенем складності цього завдання. Складність виділення залежить від кількості джерел, кількості мікрофонів та їх розташування, рівня шуму, способу змішування сигналів, а також від попередньої інформації про джерела, мікрофони та параметри змішування.

Огляд літератури показав, що для поставленої задачі гарний результат може дати алгоритм оптимальної просторової фільтрації акустичних сигналів БПЛА на фоні просторово-розподілених джерел перешкод у часовій області з використанням повної смуги частот без розбиття на піддіапазони. Він дає

мінімальну затримку і може працювати в реальному масштабі часу. Відомі приклади його успішного використання для виділення акустичних мовних джерел.

Проведено теоретичний аналіз алгоритма обробки акустичних сигналів БПЛА мікрофонним масивом, заснований на початковому введенні часових затримок, що залежать від просторових координат мікрофонів. Розрахунок просторової кореляційної функції дозволяє визначити координати джерел акустичних сигналів. За рахунок когерентного підсумовування потужність корисного сигналу зростає. Тобто в точці з координатами джерела знаходяться максимуми кореляційної функції.

Після виявлення і розпізнавання сигналу БПЛА із всіх виділених джерел за допомогою алгоритму введення затримок, подальше збільшення відношення сигнал/перешкода можливе після розрахунку оптимальних на інтервалах стаціонарності вагових коефіцієнтів мікрофонів. Такий метод заснований на використанні оцінки кореляційної матриці перешкод. В результаті отримуємо ваговий вектор сигналів мікрофонів, який враховує близькість цілі до кожного з них.

У відповідності до теоретичного аналізу розроблена структурна схема алгоритму обробки сигналів решітки у часовій області. Алгоритм заснований на знанні координат розміщення мікрофонів. Це дозволяє побудувати матрицю часових затримок для кожної точки простору спостереження на початок проведення обчислень. У блоці формування кореляційної матриці перешкоди один з сигналів  $P$  призначається корисним і подальша обробка спрямована на підвищення відношення сигнал/перешкода вибраного джерела.

В системі MATLAB проведено комп'ютерне моделювання системи просторової обробки акустичних сигналів БПЛА. Моделювання реалізовано за деяких умов та обмежень.

Для моделювання була умовно обрана прямокутна зона спостереження 120 x 80 м. Вважалося, що вимірювальна система з ненаправлених мікрофонів розміщена

в тій же площині, що і всі джерела акустичних сигналів. Це допущення дозволило спростити задачу і не враховувати третій вимір.

Джерела акустичного сигналу і перешкод вважаються точковими, веспрямованими, звуковий тиск зменшується обернено пропорційно відстані від джерела звуку.

В якості корисного сигналу використовується аудіозапис квадрокоптера DJI Phantom 3 в режимі зависання. В якості джерел шуму використані аудіозаписи двигуна вантажівки, голосу людини, спів птаха. Частота дискретизації 44,1 кГц. Тривалість кожної реалізації 5 с.

Можливі відбиття від перешкод і землі не враховується. Енергія кожного аудіофрагмента однакова, що досягається шляхом нормування. Джерела сигналу стаціонарні у просторі. Під час обробки переміщень немає.

На першому етапі встановлена найкраща з точки зору відношення сигнал-перешкода конфігурація мікрофонних решіток. Розглядалися три варіанти розміщення – лінійний, кутовий і по периметру зони огляду; і два варіанти розміщення цілі – в центрі і поза центром. При однаковій кількості мікрофонів найкращим виявився варіант з розміщенням по периметру зони огляду. Він єдиний дав відношення сигнал-перешкода більше 1. Таке невисоке значення пов'язано з одночасною роботою в зоні огляду трьох перешкод з такою ж інтенсивністю, що і звук БПЛА. В інших конфігураціях сигнал-перешкода менше 1.

Отримані сигнали БПЛА до і після фільтрації, а також графік коефіцієнта взаємної кореляції для корисного та виділеного з перешкод сигналу БПЛА, який доводить ефективність фільтрації на фоні перешкод.

Для оцінки просторової роздільної здатності акустичної системи в моделі по периметру зони огляду було розподілено 20 мікрофонів. У центрі площі спостереження є одне джерело корисного сигналу БПЛА, сторонні джерела відсутні.

Для кожної точки простору вводяться певні часові затримки, пропорційні відстані від цієї точки до певного мікрофона та проводиться

розрахунок просторової кореляційної функції. Для визначення роздільної здатності системи було отримано переріз кореляційної функції за рівнем 0,707. Просторова роздільна здатність акустичної системи в полосі частот до 7 кГц склала 5,6 м.

Оскільки спектр тестового сигналу БПЛА має швидкий спад спектральних ліній після частоти 4 кГц, може бути доцільно скоротити смугу частот системи. Дослідження показало, що при обмеженні полоси частот системи до 4 кГц просторова роздільна здатність системи покращується, але незначно. В нашому експерименті вона склала 4,8 м.

Проведено експеримент з визначення координат 8-ми одночасно працюючих джерел звуку. Наявність восьми максимумів просторової кореляційної функції відповідає цим акустичним джерелам. Координати максимумів відповідають координатам джерел.

Після визначення, яке з цих джерел є дроном, алгоритм приступає до розрахунку оптимальних вагових коефіцієнтів мікрофонів для цього джерела. Інші вважаються перешкодами. Отримані вагові коефіцієнти багатопозиційної акустичної системи з двадцяти мікрофонів. Найбільші значення коефіцієнтів у мікрофонів 14 та 15, це найближчі мікрофони до БПЛА.

Оцінена ефективність фільтрації корисного сигналу по відношенню сигнал/перешкода відносно запису одним мікрофоном без просторової фільтрації. Виграш на етапі введення затримок в канали для дослідженого випадку склав 11,2 дБ по відношенню до запису акустичної обстановки одним мікрофоном. Подальше застосування вагових коефіцієнтів збільшує виграш до 16,5 дБ.

Таким чином, ефективність дослідженого в роботі алгоритму залежить від кількості мікрофонів у решітці, кількості одночасно працюючих джерел завад та їх взаємного розташування у просторі. Проведені дослідження свідчать про можливе досягнення виграшу у відношенні сигнал/перешкода приблизно в  $N$  разів, де  $N$  – число мікрофонів в решітці.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. C. Cherry. Some experiments on the recognition of speech, with one and with two ears / Journal of the Acoustical Society of America. – 1953. – V. 25. – № 5. – P. 975–979.
2. S. Haykin, Z. Chen. The cocktail party problem / Journals of Neural Computation. – 2005. – V. 17. – № 9. – P. 1875–1902.
3. J. H. McDermott. The cocktail party problem / Current Biology. – 2009. – V. 19. – № 22. – P. 1024–1027.
4. В.Н. Олейников, О.В. Зубков, В.М. Карташов, И.В. Корытцев, С.И. Бабкин, С.А. Шейко, И.С. Селезнев. Экспериментальная оценка эффективности алгоритмов пеленгования беспилотных летательных аппаратов по акустическому излучению. Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2019. – Вып. 199. – С. 29 – 37.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. В.М. Карташов, В.Н. Олейников, М.М. Колендовская, Л.П. Тимошенко, Н.В. Рыбников, А.И. Капуста. Комплексирование изображений

при обнаружении беспилотных летательных аппаратов // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2020. – Вып. 201. – С. 120 – 129.

9. V. Kartashov, V. Oleynikov, O. Zubkov, S. Sheiko. Optical detection of unmanned air vehicles on a video stream in a real-time // The Fourth International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo'2019), 9–13 September 2019, Odessa, Ukraine, 4 p.

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

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

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

13. О.В. Зубков, С.А. Шейко, В.Н. Олейников, В.М. Карташов, И.В. Корытцев, С.И. Бабкин. Исследование эффективности детектирования и распознавания изображений дронов по видеопотоку // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2020. – Вып. 202. – С. 136 – 146.

14. Microphone arrays: signal processing techniques and applications / M. Brandstein, D. Ward (Eds.). – Springer, 2001. – 398 p.

15. J. Benesty, J. Chen, Y. Huang. Microphone array signal processing. – Springer, 2008. – 245 p.

16. I. Tashev. Improving meetings with microphone array algorithms / Microsoft. – Режим доступа: <https://www.microsoft.com/en-us/research/wp->

content/uploads/2016/02/Tashev\_MeetingsMicrophoneArray\_NIPS\_03.pdf (дата звернення: 01.12.2021).

17. J. Blauert. Spatial hearing: the psychophysics of human sound localization. – Cambridge: MIT Press, 1983. – 427 p.

18. A. S. Bregman. Auditory scene analysis: the perceptual organization of sound. – Cambridge: MIT Press, 1990. – 854 p.

19. D. Wang. Computational auditory scene analysis and its potential application to hearing aids / Slideserve. – Режим доступа: <https://www.slideserve.com/aradia/computational-auditory-scene-analysis-and-its-potential-application-to-hearing-aids> (дата звернення: 01.12.2021).

20. G. Hu, D. Wang. Monaural speech segregation based on pitch tracking and amplitude modulation / IEEE Transactions on Neural Networks. – 2004. – V. 15. – № 5. – P. 1135–1150.

21. D. L. Wang. Time–Frequency masking for speech separation and its potential for hearing aid design / Trends in Amplification. – 2008. – V. 12. – № 4. – P. 332–353.

22. А. И. Топников. Введение в слепое разделение речевых сигналов: практикум для студентов, обучающихся по направлению Радиотехника. – Ярославль: ЯрГУ, 2015. – 44 с.

23. A. Hidri, S. Meddeb, H. Amiri. About multichannel speech signal extraction and separation techniques / Journal of Signal and Information Processing. – 2012. – V. 3. – №2. – P. 238–247.

24. Aarabi, P. The Fusion of Distributed Microphone Arrays for Sound Localization / P. Aarabi // EURASIP Journal on Applied Signal Processing. – 2003. – V.4. – P. 338–347.

25. I. McCowan. Microphone arrays: a tutorial / Режим доступа: [http://www.aplu.ch/home/download/microphone\\_array.pdf](http://www.aplu.ch/home/download/microphone_array.pdf) (дата звернення: 01.12.2021).

26. A. AlShehhi, M. L. Hammadih, M. S. Zitouni, S. AlKindi, N. Ali, L. Weruaga. Linear and Circular Microphone Array for Remote Surveillance:

Simulated Performance Analysis / Audio Engineering Society. – Режим доступа: <https://arxiv.org/pdf/1703.02318.pdf> (дата звернення: 01.12.2021).

27. В. Т. Ермолаев, А. Г. Флакман. Методы обработки сигналов в адаптивных антенных решетках и компенсаторах помехи: учебное пособие / – Нижегородский госуниверситет, 2015. – 194 с.

28. Монзинго, Р. А. Адаптивные антенные решетки: введение в теорию / Р. А. Монзинго, Т. У. Миллер; Пер. с англ. под ред. В. А. Лексаченко. – М.: Радио и связь, 1986. – 448 с.

29. Сидоренко Е.В. оцінка дальності дії тепловізійного каналу при виявленні БПЛА // 25-й Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь у ХХІ столітті». Зб. матеріалів форуму. Т. 3. – Харків: ХНУРЕ. 2021. – с. 43 – 44.

30. 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.