

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)

Дослідження характеристик акустичних сигналів малорозмірних БПЛА.
(тема)

Виконав:
студент 2 курсу, групи МІМ-21-1
Чалий В.А.
(прізвище, ініціали)

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

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Медіаінженерія
(повна назва освітньої програми)

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

Допускається до захисту

Зав. кафедри Володимир КАРТАШОВ
(підпис)

2022 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет інформаційних радіотехнологій та технічного захисту інформації

Кафедра медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка
(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Медіаінженерія
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____

(підпис)

« ____ » _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Чалому Владиславу Андрійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження характеристик акустичних сигналів малорозмірних БПЛА.

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

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 07.12.2022 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 звукових сигналів з суміші з завадами.

2. Теоретичне обґрунтування просторової обробки звукових сигналів дрону у часовій області.

3. Моделювання системи просторової обробки звукових сигналів дронів.

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	01.09.22–13.09.22	
2	Теоретичне обґрунтування методу	14.09.22–27.09.22	
3	Програмна реалізація експерименту	28.09.22–11.10.22	
4	Визначення координат джерел	12.10.22–25.10.22	
5	Розрахунок вагових коефіцієнтів	26.10.22–10.11.22	
6	Графічна частина роботи	11.11.22–25.11.22	
7	Перевірка керівником	26.11.22–02.12.22	
8	Перевірка на академічний плагіат	03.12.22	
9	Перевірка завідувачем кафедри, рецензування	04.12.22–07.12.22	

Дата видачі завдання _____ 01.09.2022 р. _____

Студент _____ Владислав ЧАЛИЙ _____
(підпис)

Керівник роботи _____ Володимир ОЛЕЙНИКОВ _____
(підпис)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи: 64 сторінки, 27 рисунків, 5 таблиць, 29 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.

ABSTRACT

Explanatory note to the qualification work: 64 pages, 27 figures, 5 tables, 29 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
1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИДІЛЕННЯ ЗВУКОВИХ СИГНАЛІВ ІЗ СУМІШІ З ЗАВАДАМИ.....	11
1.1 Задача виділення звукового сигналу із суміші.....	11
1.2. Основи роботи мікрофонних решіток.....	16
1.3 Алгоритми оброблення звукових сигналів мікрофонних решіток.....	20
1.3.1 Метод затримки та підсумовування.....	20
1.3.2 Метод фільтрації та додавання.....	21
1.3.3 Метод обробки звукових сигналів у підрешітках.....	22
1.3.4 Методи мінімізації потужності шуму на виході.....	24
1.3.5 Методи, які ґрунтуються на мінімумі середньоквадратичної помилки.....	25
1.3.6 Методи, які базуються на критерії максимізації відношення сигнал-завада.....	27
1.4 Геометрія мікрофонних решіток.....	27
1.5 Висновки по розділу 1.....	30
2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОСТОРОВОЇ ОБРОБКИ ЗВУКОВИХ СИГНАЛІВ ДРОНУ У ЧАСОВІЙ ОБЛАСТІ.....	31
2.1. Алгоритм просторової фільтрації звукових сигналів дронів на фоні розподілених завад.....	31
2.2 Використання методів просторової обробки сигналів для зростання відношення сигнал-завада.....	35
2.2.1 Обчислення вагового вектора при оптимальній обробці звукового сигналу.....	35
2.2.2 Обчислення вагового вектора при адаптивній обробці.....	37

2.3 Структурна схема методу обробки звукових сигналів дронів у часовій області.....	38
2.4 Оцінка якості виділеного звукового сигналу.....	40
2.5 Висновки по розділу 2.....	40
3 МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ПРОСТОРОВОЇ ОБРОБКИ ЗВУКОВИХ СИГНАЛІВ ДРОНІВ.....	42
3.1 Визначення оптимальної конфігурації решітки мікрофонів для виділення сигналів дрону із завад.....	43
3.2. Визначення просторової роздільної здатності багатопозиційної системи акустичного виявлення.....	47
3.3 Оцінки оптимальних вагових коефіцієнтів.....	51
3.4 Дослідження ефективності виділення сигналу дрону на фоні інтенсивних просторово розподілених завад.....	52
3.5 Висновки по розділу 3.....	54
Висновки.....	56
Перелік посилань.....	61
ДОДАТКИ.....	65
Додаток А. Графічний матеріал.....	66
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.
 τ_{opt} – оптимальний час затримки;
 V_s – швидкість звуку;
 x', y' – координати точки фокусування системи;
 x_0, y_0 – фіксовані координати точкового джерела сигналу.

ВСТУП

Завдання розділення звукових джерел та виділення корисного сигналу із акустичної суміші вирішується не одно десятиліття [1-3]. Мозок людини показує феноменальний результат з обробки складної шумової звукової обстановки і здатний виділяти потрібні сигнали при великій кількості джерел завад. Але в галузі цифрової обробки сигналів це є складним завданням.

Техніка виділення звукового сигналу дрону (безпілотного літального апарату – БПЛА) із суміші багатьох звукових сигналів може знайти застосування як ц автономній системі акустичного виявлення та розпізнавання дронів [4-7], так і в комплексному її варіанті [8-13].

Практична реалізація даного рішення може бути виконана в рамках науково-дослідних робіт з оброблення оптичних, інфрачервоних, акустичних і радіолокаційних сигналів і їх комплексування для виявлення БПЛА, визначення їхніх координат та параметрів руху, які проводяться на кафедрі Медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем ХНУРЕ.

Сучасні рішення відносно виділення джерел звуку в змінній завадовій обстановці зв'язані із використанням мікрофонних решіток (МР) [14-15], які мають ряд переваг в порівнянні з одноканальними системами виявлення. У зв'язку з різними областями застосування мікрофонних решіток методи і засоби розділення звукових коливань, методи обробки та геометрія таких систем дуже різні.

Ефективність мікрофонних решіток у задачах виділення потрібного джерела звуку визначається можливістю здійснити просторову фільтрацію звукових сигналів. Більшість методів, описаних у науково-технічній літературі, функціонують у частотній області, засновані на застосуванні вузькосмугового наближення та виконують обробку широкосмугового звукового сигналу окремо у кожному частотному піддіапазоні. Введення оптимальних комплексних вагових коефіцієнтів у кожний сигнал відповідної

смуги частот дозволяє отримати максимум цільової функції просторової фільтрації, наприклад, відношення сигнал/завада для цільового сигналу.

Однак при даному способі просторової фільтрації кількість відліків сигналу у кожній смузі частот на тривалості аналізованого відрізка стає вкрай малим, це погіршує виконання наближення незалежності відліків та зменшує ефективність статистичних методів обробки [16].

З іншого боку, метод просторової фільтрації, відомий як «delay-and-sum», що реалізується у часовій області, позбавлений вказаних недоліків, простий у реалізації та майже не потребує витрат процесорного часу на обробку [16]. На підставі цього можна зробити висновок, що поширені в даний час алгоритми просторової обробки звукових сигналів у частотній області досягли потрібного рівня у якості виділення цільового джерела зі звукової суміші, тоді як потенційні можливості оптимальних методів, реалізованих у часовій області залишаються не до кінця дослідженими.

Реалізація методу просторової фільтрації звукового випромінення дрону на фоні просторово-розподілених джерел завад у часовій області, з використанням сигналу в повній смузі частот без розбиття в реальному часі, дозволить поєднувати усі переваги алгоритму delay-and-sum.

Мета кваліфікаційної роботи – реалізація і дослідження можливостей алгоритму обробки звукового сигналу мікрофонними решітками у часовій області для виділення звуку дрону з довільної точки простору спостереження з великим відношенням сигнал/завада, незалежно від взаємного розташування дрону та джерел акустичних завад.

1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИДІЛЕННЯ ЗВУКОВИХ СИГНАЛІВ ІЗ СУМІШІ З ЗАВАДАМИ

У даному розділі роботи розглядаються способи розділення звукових джерел і методи виділення сигналів корисного джерела зі звукової суміші. Наведено алгоритми з використанням одноканальних систем виявлення та багатопозиційних систем – мікрофонних решіток. Розглядаються види акустичних систем виявлення, які використовуються в даний час. Розглядаються методи обробки звукових сигналів у мікрофонних решітках.

1.1 Задача виділення звукового сигналу із суміші

Задача виділення звукового сигналу із суміші з іншими джерелами вперше була розглянута у роботах [1-3]. Її було визначено як психоакустичний феномен, що відноситься до здатності людини вибірково стежити і розпізнавати лише 1-не джерело звуку в зашумленому середовищі, де завади є мовними повідомленнями від інших акустичних джерел або джерел, сигнали яких є незалежними (рис.1.1).

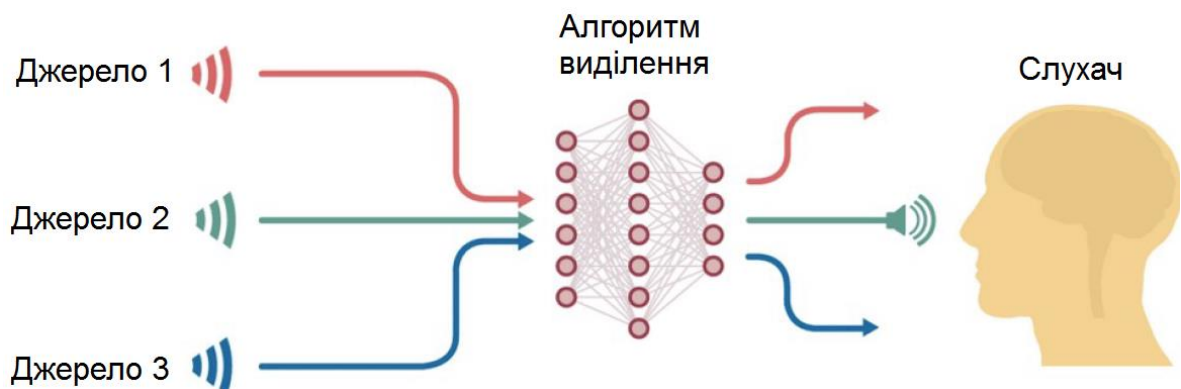


Рисунок 1.1 – Ілюстрація завдання виділення звукового сигналу із суміші

Пізніше фахівці в галузі обробки сигналів та інженери намагалися зрозуміти, чи можна розробити реальні пристрої, здатні вирішити поставлену задачу [3].

У 1983 році було опубліковано працю [17] з вивчення просторового слуху людини. У цій роботі докладно розглянуте питання механізму локалізації джерел звуку людиною. У [17] показано, що сигнали, які досягають обох вух людини різні по інтенсивності і за часом. Невеликих розбіжностей у даних сигналах достатні для визначення місця розташування і напрямку вхідних акустичних хвиль. Використовуючи дану невелику різницю, просторовий слух допомагає мозку робити подальшу складну обробку і виділяти мовні повідомлення в присутності декількох сторонніх джерел. Здатність локалізувати потрібне джерело при реєстрації інформації 2-ма вухами отримала назву бінауральний слух.

В 1990 році у роботі [18] введено поняття аналізу слухової сцени (ASA). Згідно даної моделі звук, який досягає вух, піддається слуховому аналізу сцени, який складається з двох етапів: сегментація – звукове розкладення вхідного сигналу на набір частотно-часових областей (сегментів) та угруповання – об'єднання сегментів одного джерела звуку в суцільну структуру, яка називається потоком.

В основі підходу ASA є закономірність, що складові частоти одного звуку мають правило починатися одночасно. Таке припущення дозволяє групувати частини звуку одного джерела і відокремлювати частини інших джерел у частотно-часовому уявленні.

Психофізичні характеристики звуків включають в основному три головні форми інформації: розташування у просторі, часова структура та спектральна характеристика. Сприйняття звуку однозначно визначається сукупністю даних 3-ї форм. Визначальним фактором для аналізу слухової сцени є то, що будь-яка відмінність у будь-якій із 3-х форм інформації вважається достатньою для виділення двох різних звукової джерел.

Подальші роботи з вирішення задачі виділення голосу із акустичної суміші пов'язані з обчислюванням слухової сцени (CASA) – обчислювальний підхід до аналізу слухової сцени. Метод CASA робить автоматичний аналіз

звукового середовища, інтерпретацію дискретних акустичних подій у ньому та моделювання акустичних компонентів.

Принципи обчислювального аналізу слухової сцени вирішують одну із двох задач:

- розробка системи, що буде здатна автоматично виділяти та відстежувати акустичний сигнал при активній акустичній суміші;
- розробка адаптивної системи слуху, яка автоматично обчислюватиме і реалізуватиме процес перцептивного угруповання, що відсутній у слуховій системі людини з порушеннями слуху, тим самим дозволяючи такій людині стежити за звуковими сигналами у присутності мовних завад.

Алгоритми CASA спрямовані на виділення сигналів звуку із суміші, ґрунтуючись на системі слуху людини. Тому при записі завади застосовують не більше двох мікрофонів.

У літературі розглянуті як моноауральні, так і бінауральні алгоритми [19]. Моноауральні алгоритми (з одним мікрофоном) систем CASA для виділення звуків засновані на гармонійності, початку та закінченні звуків, амплітудно-частотній модуляції [20]. Бінауральні системи (з двома мікрофонами) CASA засновані на локалізації звуків та локалізації на основі фізичного розташування [17].

Найважливішим бінауральним ефектом є ефект звукового маскуванню [26-27]. Даний ефект пов'язаний із взаємодією сигналів, що призводить до зміни чутливості слуху до сигналу, що маскується у присутності маскуючого. Змінюється сприйняття одного сигналу при наявності іншого: змінюється гучність, тембр або другий сигнал взагалі не чутний. Тобто більш сильніший сигнал маскує більш слабший.

Рішення у сфері обробки CASA засновані на ефекті звукового маскуванню або частотно-часового маскуванню (T-F masking). Сутність частотно-часового маскуванню полягає в приховуванні сигналів перешкод у частотно-часовій області. В роботі [21] сформульовано мету алгоритмів CASA: знайти ідеальну двійкову маску. Значення ідеальної маски приймають

значення 1, або 0: 1 – у тому випадку, якщо енергія корисного сигналу вище за енергію завад і 0 – у іншому випадку. На рис. 1.2 [21] наведено приклад виділення джерела звуку із суміші за допомогою ідеальної бінарної маски.

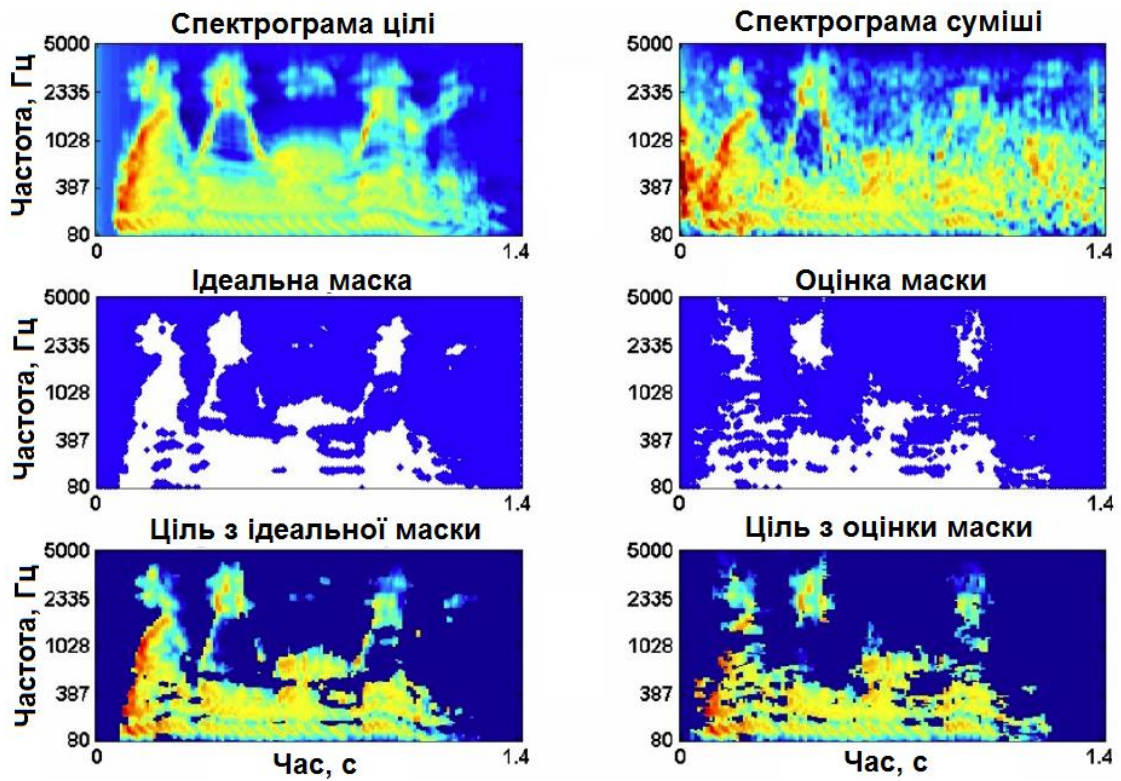


Рисунок 1.2 – Приклад виділення голосу із суміші голосів методом застосування ідеальної бінарної маски [21]

Сучасні рішення, засновані на використанні частотно-часового маскування, набули поширення в задачах, коли кількість одночасно діючих джерел звучання перевищує число мікрофонів.

Іншим підходом до задач виділення акустичних сигналів є «сліпе розділення сигналів» (BSS) [22]. Термін «сліпе» застосовується для позначення усіх методів ідентифікації, що базуються тільки на вихідних спостереженнях. Відмінною рисою описаного наряду була наявність у системи декількох входів та декількох виходів (MIMO-системи).

У 1987 році введено метод «аналізу незалежних компонентів» (ICA) для лінійної суміші, що відповідає загальній структурі вирішення задач BSS на основі статистичної незалежності невідомих джерел звуку та негаусових сигналів [22]. Метод ICA розкладає сигнали на підкомпоненти для

ідентифікації активності джерел різних сигналів. На рис.1.3 [22] наведено схему розділення сигналів звукових джерел методом ІСА.

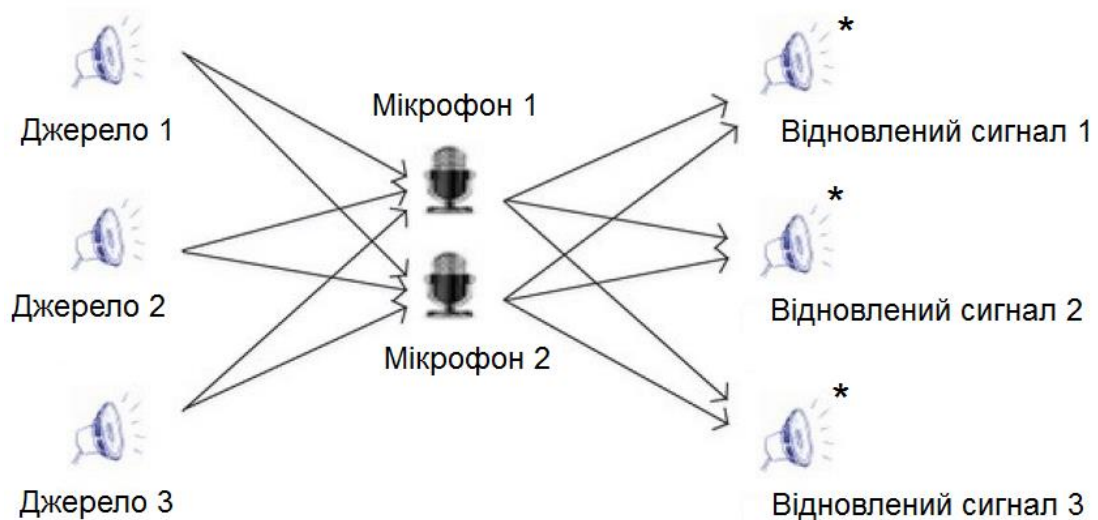


Рисунок 1.3 – Розділення звукових джерел методом ІСА

Аналітично алгоритм ІСА виглядає наступним чином [22]: на вхід системи мікрофонів приходять вектор вхідних сигналів \mathbf{X} , що являють собою звукові суміші вихідних сигналів \mathbf{S} . Матриця \mathbf{A} – є матрицею змішування сигналів, \mathbf{W} – матриця розділення сигналів, причому:

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

На виході системи обчислюється вектор вихідних спостережень \mathbf{Y} , який є оцінкою вихідних сигналів. Вектор вихідних спостережень \mathbf{Y} системи:

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

Методи ІСА полягають в обчисленні матриці змішування із використанням двох головних критеріїв:

- максимізувати негаусовість сигналів;
- мінімізувати взаємну інформацію для незалежних джерел.

Окрім методів обчислювального аналізу слухової сцени CASA та методів аналізу незалежних компонентів ICA для вирішення задачі виділення звуку із суміші в сучасних джерелах великого поширення набули методи просторової фільтрації із застосуванням мікрофонних решіток. Методи засновані на формуванні діаграми спрямованості в напрямку цільового джерела [14-16]. Актуальні дослідження зв'язані як із використанням мікрофонних решіток, де мікрофони розташовані близько один до одного, так і з масивами мікрофонів, розташованих у просторі випадково [40].

1.2. Основи роботи мікрофонних решіток

Мікрофонні решітки є масивом із декількох мікрофонів, поєднаних спільною цифровою обробкою сигналів. Рис. 1.4 [14-16] показує цифрову обробку сигналів із мікрофонними решітками.

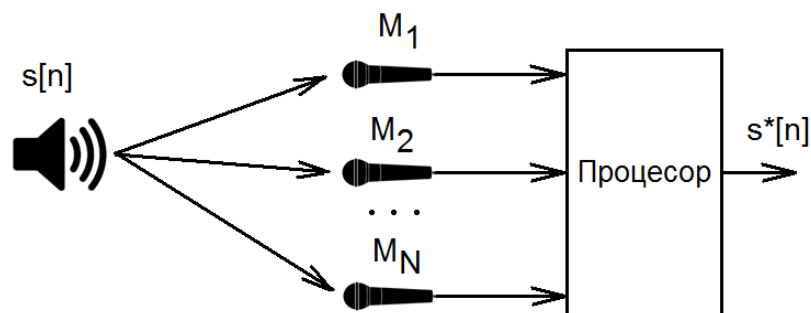


Рисунок 1.4 – Цифрова обробка сигналів із мікрофонними решітками

Мікрофонні решітки дають такі переваги у порівнянні з одноканальними системами [14]:

- спрямованість приймання звуку;
- подавлення шумів точкових джерел звуку;
- подавлення нестаціонарних шумів звукового оточення;
- часткове послаблення відбитих хвиль (у разі їх наявності);
- можливість локалізації звуку дрону у просторі;
- можливість супроводження рухомої цілі як точкового джерела.

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

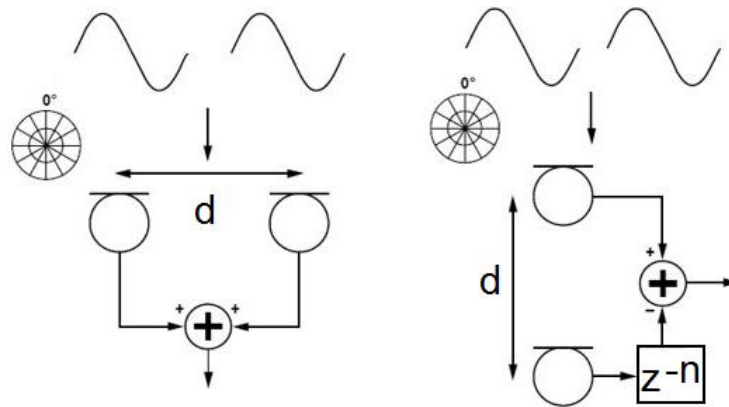


Рисунок 1.5 – Базові структури решіток мікрофонів
(а – Broadside, б – Endfire)

Показані структури застосовують всеспрямовані мікрофони (тобто ті, що незалежно від своєї орієнтації сприймають сигнал з будь-якого напрямку). Для 1-го мікрофона має виконуватися вимога інваріантності по частоті.

Структура Broadside є масивом ненаправлених мікрофонів, розташованим перпендикулярно до напрямку корисного звукового сигналу.

Подібні масиви мають вісь симетрії, відносно якої звуки виділяються без послаблення як «спереду», так і «ззаду» масиву. Такі структури мають широке застосування, коли звукові хвилі надходять на масив датчиків із одного боку.

Розглянемо схему Broadside, яка складається із 2-х мікрофонів, розташованих на відстані 7,5 см один від одного. Мінімальний відгук системи спостерігається при падінні звуку під кутом 90° або 270° (за 0° приймаємо кут між напрямом корисного сигналу та нормаллю до лінії розташування елементів). Але даний відгук суттєво залежить від частоти сигналу. Теоретично ця система повинна мати ідеальний нуль на частоті 2,3 кГц. Вище вказаної частоти в залежності від напрямку приходу хвиль є нулі під іншими кутами (рис.1.6).

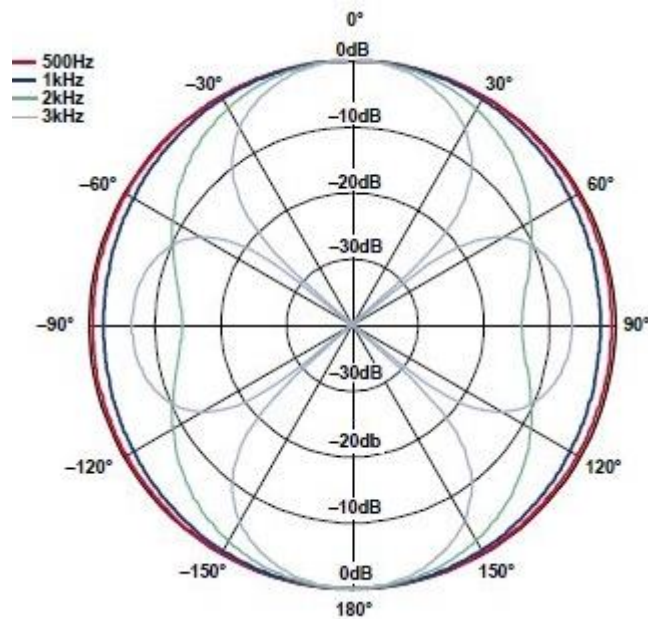


Рисунок 1.6 – Залежність приймання сигналів від напрямку схемою Broadside із 2-х неспрямованих мікрофонів на частотах 500 Гц, 1 кГц, 2 кГц і 3 кГц

Схема Endfire складається з декількох мікрофонів, розміщених по напрямку корисного звукового сигналу. Затриманий сигнал з першого мікрофона додається до сигналу наступного мікрофону. Такі структури застосовується для формування кардіоїдної, гіперкардіоїдної або суперкардіоїдної діаграми спрямованості і теоретично повністю виключають звуки, що падають на масив під кутом 180° .

Для формування кардіоїдної діаграми спрямованості сигнал від мікрофонів має затримуватися на час, який дорівнює поширенню акустичної хвилі між 2-ма елементами. Розробники подібних систем мають два ступені свободи для зміни вихідного сигналу системи акустичного виявлення: зміну дистанції між мікрофонами і зміну часу затримки сигналу [16].

На рис. 1.7 наведена залежність прийому сигналу від напрямку приходу сигналів різних частот схемою Endfire з 2-ма елементами і дистанцією між ними 2,1 см.

Відповідно до роботи [14] розглянуті структури мають певні переваги, але й недоліки (табл. 1.1).

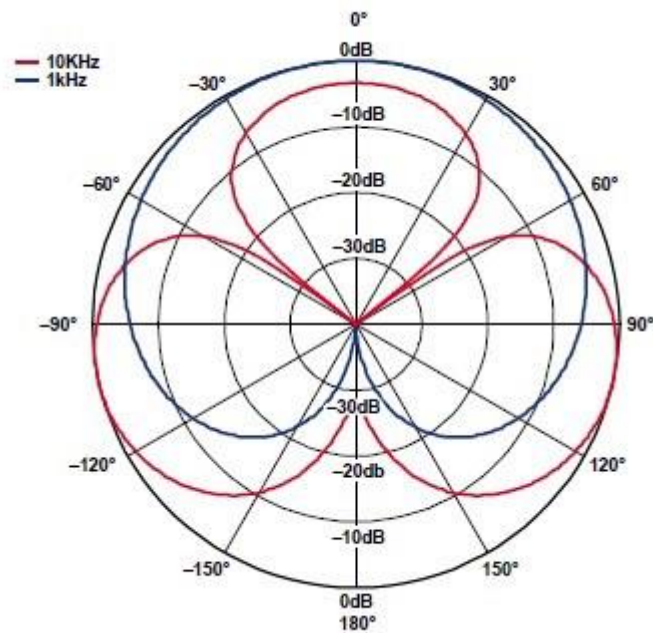


Рисунок 1.7 – Залежність приймання сигналу від напрямку структурою Endfire із двох неспрямованих мікрофонів для частот 1 кГц та 10 кГц

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

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

1.3 Алгоритми оброблення звукових сигналів мікрофонних решіток

Мікрофонні решітки застосовуються для вирішення широкого кола завдань. Вирішувані системами завдання різні, а, отже, різними є і алгоритми обробки звукових сигналів. Вибір того чи іншого алгоритму обробки ґрунтується на різних сценаріях звукової обстановки [14]:

- сценарій близького або далекого джерела звуку;
- сценарії стаціонарної або динамічної звукової обстановки;
- обробка у реальному часі або постобробка.

Обробка звукових сигналів мікрофонними решітками може використовуватися як у часовій, так і в частотній області [23]. В часовій області сигнали кожного окремого мікрофону проходять крізь КІХ-фільтр і далі сигнали з всіх мікрофонів поєднуються в єдиний вихідний сигнал системи. В частотній області широкосмуговий сигнал поділяється на вузькосмугові складові шляхом короткочасного перетворення Фур'є, що обробляються окремо.

Розглянемо методи обробки сигналів, які мають найбільше поширення:

- метод затримки та підсумовування;
- методи фільтрації та підсумовування;
- методи обробки сигналів у решітках;
- методи, які мінімізують потужність шуму на виході;
- методи, які ґрунтуються на критерії мінімуму середньоквадратичних помилок;
- методи, які ґрунтуються на критерії максимуму відношення сигнал-завада.

1.3.1 Метод затримки та підсумовування

Найпростішим методом формування діаграми спрямованості є метод затримки та підсумовування (показано на рис.1.8) [14-16].

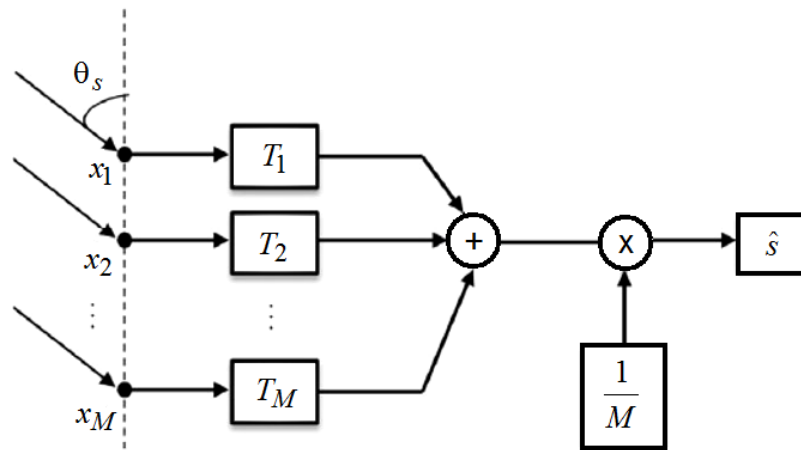


Рисунок 1.8 – Схема методу затримки та підсумовування [23]

У кожний із сигналів M мікрофонів вводять часову затримку T_m для подальшого додавання когерентних сигналів. Таке додавання дозволяє підсилити корисний сигнал та ослабити сигнали завад.

Сигнал дрону може бути розкладений на вузькосмугові складові частот, затримки можна апроксимувати фазовими зсувами для кожної смуги частот.

Амплітудний множник на виході є фактором усереднення: він є обернено пропорційним до кількості мікрофонів.

У області часу вихідний сигнал системи описується як:

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

1.3.2 Метод фільтрації та додавання

Це найбільш загальний клас методів. Застосовується для середовищ з реверберацією. Метод фільтрації та підсумовування відрізняється тим, що амплітуда і фаза є залежними від частоти параметрами [14, 15]. Сигнал кожного мікрофону проходить крізь нерекурсивний фільтр і потім піддається додаванню до сигналів сторонніх каналів. Загальна схема методу фільтрації

та додавання показана на рис.1.9, а вихідний сигнал системи у частотній області є результатом суми частотно-залежних компонент:

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

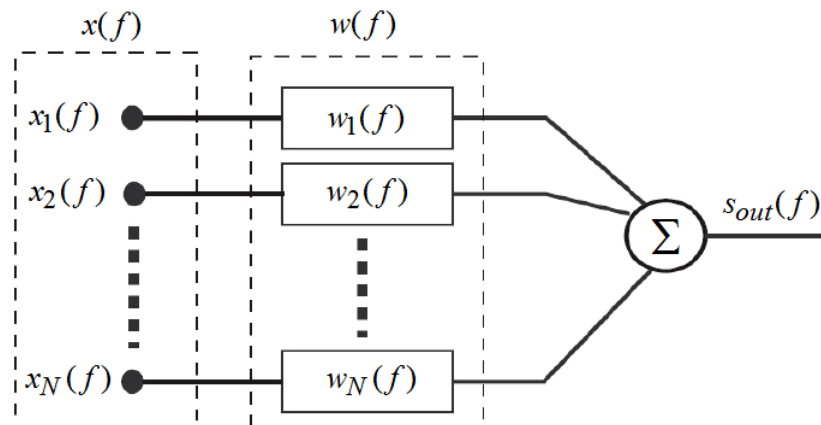


Рисунок 1.9 – Схема методу фільтрації та додавання [15]

1.3.3 Метод обробки звукових сигналів у підрешітках

Діаграма спрямованості решіток мікрофонів залежить від частоти звукового сигналу. При прийманні широкосмугових сигналів різних частот рівень бічних пелюсток завад різний, а також різна і ширина головного пелюстка діаграми спрямованості решітки. Щоби забезпечити приймання широкосмугового сигналу, створюють інваріантність діаграми спрямованості з частотою шляхом розбиття масиву елементів на окремі підрешітки.

Кожна окрема підрешітка є лінійним еквідистантним масивом приймачів, який приймає сигнал у деякій смузі частот. Для того щоби рівень бічних пелюстків залишався незмінним, у окремій підрешітці застосовують фіксовану кількість елементів. Число елементів мікрофонних решіток може бути скороченим шляхом використання одного і того ж приймача у різних підрешітках. Для розрахунку вихідного сигналу мікрофонної решітки

спочатку обчислюються S вихідних сигналів підрешіток різних частотних піддіапазонів, що піддаються операції додавання [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 показано приклад мікрофонної решітки з 9-ти елементів, розділених на 4-ри підрешітки, що обробляє широкосмуговий сигнал відповідно в 4-х різних діапазонах частот.

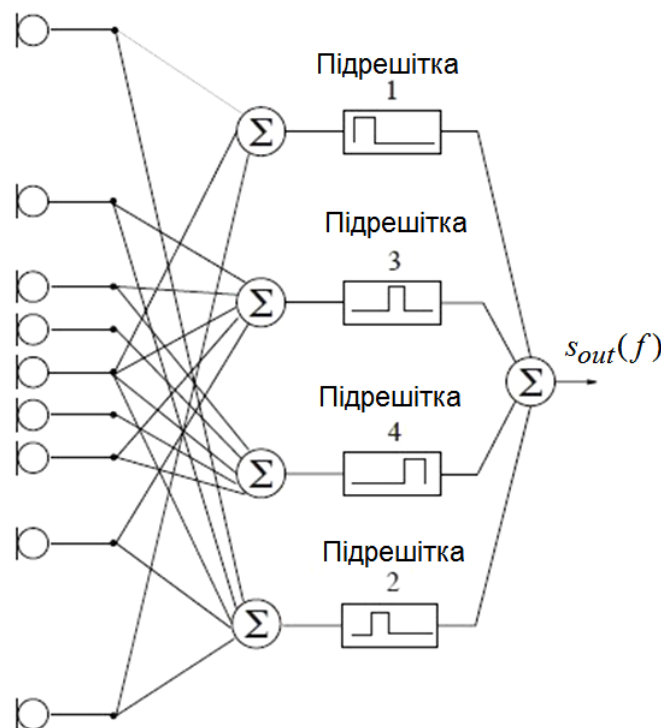


Рисунок 1.10 – Схема оброблення широкосмугового сигналу мікрофонними решітками з 9-ти елементів у 4-х діапазонах частот

Дана технічна реалізація дозволяє підтримати постійну ширину головного пелюстка діаграми спрямованості на усьому аналізованому діапазоні частот.

Розглянуті методи спрямовані на реалізацію бажаного відгуку системи в заданому напрямку. Наприклад, треба отримати сигнал, який надходить із заданого напрямку, і в даному випадку бажаний відгук буде прийнято за

одиницю цього напрямку. Або, до прикладу, доступна інформація про діючу на деякій частоті заваду і про напрям з якого вона приходить, в такому випадку бажаний відгук на даних частоті та напрямку дорівнює нулю.

Подальші методи, що будуть розглянуті, ґрунтуються на статистичних характеристиках шуканих та інтерференційних сигналів. Дані методи оптимізують певну функцію шляхом адаптивної фільтрації вхідних сигналів, виділяючи корисний сигнал і фільтруючи перешкоди, що приходять з інших напрямків. Оптимізація відбувається шляхом застосування різних критеріїв, таких як максимізація відношення сигнал-завада (MSNR), мінімізація середньоквадратичної помилки (MMSE), мінімізація дисперсії шуму (MVDR) та ін.

1.3.4 Методи мінімізації потужності шуму на виході

Більшість адаптивних методів спрямовані на мінімізацію середньоквадратичної помилки між опорним та вихідним сигналами. На жаль, метод мінімізації середньоквадратичного відхилення (СКВ) може погіршити цільовий сигнал, оскільки його спрямовано на мінімізацію середньоквадратичної похибки і не висуває вимог до порогу спотворень цільового сигналу. Адаптивний метод, що враховує даний недолік, називається методом Фроста [23] (рис.1.11).

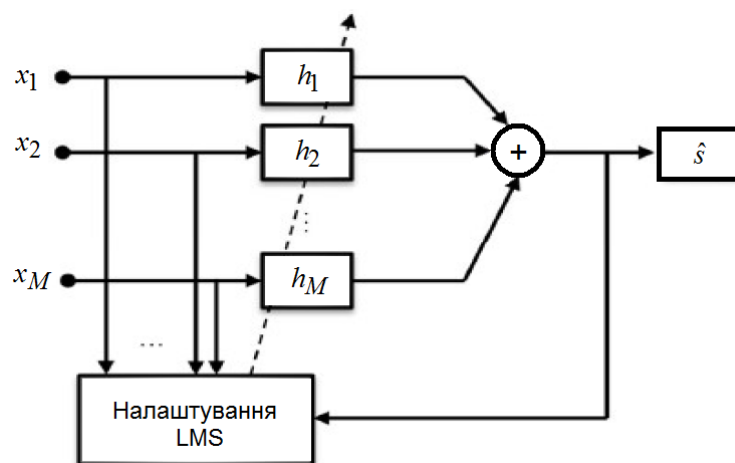


Рисунок 1.11 – Схема метода Фроста

У даній схемі коефіцієнти фільтра адаптуються шляхом використання алгоритму найменшого СКВ. Алгоритм використовується для мінімізації потужності шуму на виході при збереженні постійного коефіцієнта посилення та лінійної фази відгуку системи у напрямку цільового джерела.

1.3.5 Методи, які ґрунтуються на мінімумі середньоквадратичної помилки

Вказані алгоритми застосовуються при наявності достатньої інформації про корисний сигнал. Якщо дана умова виконується, то є можливість обчислити опорний сигнал $q(t)$. Сигнал помилки $f(t)$ показує різницю між бажаною реакцією решітки мікрофонів та вихідним сигналом решітки [14]. Методи, засновані на мінімізації середньоквадратичної помилки мають виключити цю різницю.

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

де \mathbf{W} – вектор вагових коефіцієнтів;

\mathbf{S} – вектор корисного сигналу;

\mathbf{X} – вектор коефіцієнтів інтерференції.

На рис.1.12 наведена схема реалізації методу з мінімізацією СКВ.

Мінімальне середньоквадратичне відхилення при такій постановці задачі:

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

а формула для оптимальних коефіцієнтів ваги за критерієм мінімізації середньоквадратичної помилки можна отримати з умови:

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

де \mathbf{R} – вектор кореляції

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

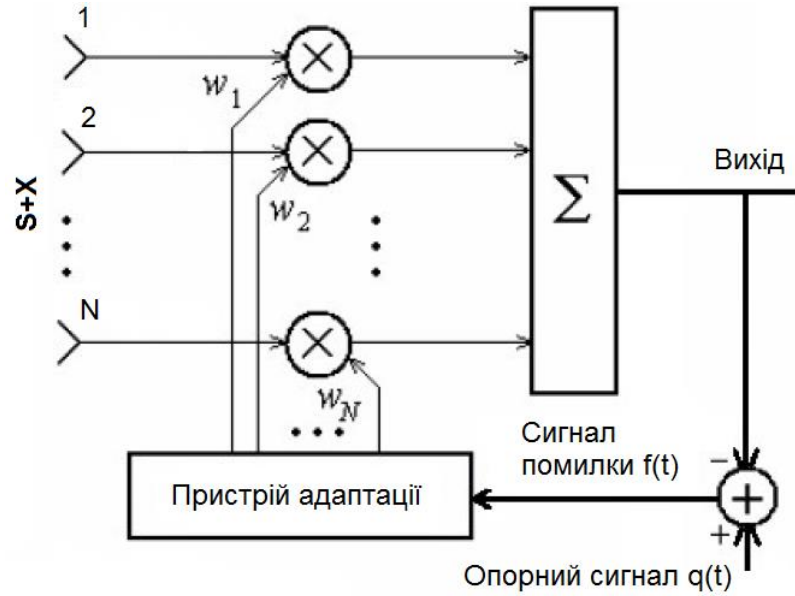


Рисунок 1.12 – Схема алгоритму мінімізації СКВ

За наведеним критерієм працюють методи постфільтрації [16, 23]: метод фільтрації та підсумовування із додаванням фільтрації на виході системи (рис.1.13).

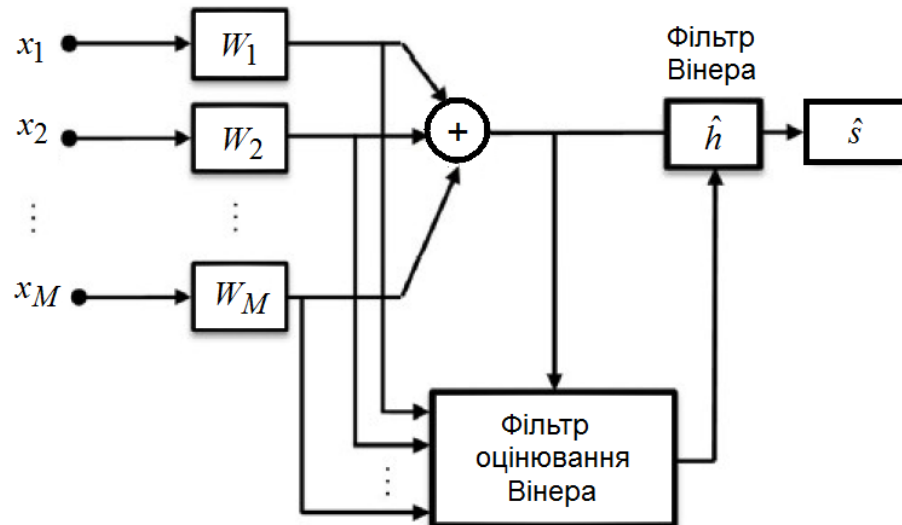


Рисунок 1.13 – Схема методу постфільтрації Вінера

1.3.6 Методи, які базуються на критерії максимізації відношення сигнал-завада

За відношення сигнал-завада на виході решіток приймається відношення середнього значення потужності корисного сигналу до середньої потужності завади (власного шуму мікрофонних каналів та зовнішніх джерел завад).

Відношення сигнал-завада на виході мікрофонних решіток можна описати у 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} – матриця кореляції завад,

\mathbf{M}_s – матриця кореляції корисного сигналу.

Оптимальний вектор вагових коефіцієнтів, який забезпечує максимум відношення (1.10), можна знайти із умови:

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

При цьому максимум значення відношення сигнал-завада дорівнює:

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

де ζ – відношення потужності корисного сигналу до потужності власних шумів в заданому елементі решітки.

1.4 Геометрія мікрофонних решіток

Для вирішення конкретних задач за допомогою решіток мікрофонів важливо врахувати її геометрію [14-16]. При цьому застосовуються різні критерії оптимізації: сталість ширини основного пелюстка діаграми

спрямованості в широкому частотному діапазоні, зменшення загальної кількості мікрофонів у решітці, зниження рівня бічних пелюстків, максимізація коефіцієнту спрямованості та ін. Наприклад, для вирішення задач з локалізації джерела звуку потрібно мати апріорну інформацію про геометрію решітки [24]. І навпаки, за використання методів мінімізації дисперсії шуму, геометрія решіток майже не вразовується [25]. Полегшують задачу оцінювання параметрів сигналів мікрофонні решітки з еквідистантним розташуванням мікрофонів: лінійні і кругові решітки мікрофонів [14].

В роботі [26] розглядаються конфігурації решіток зі 128 мікрофонів, що можуть забезпечити перевагу у прийманні картини акустичного поля у порівнянні зі звичайними круговими решітками (рис.1.14).

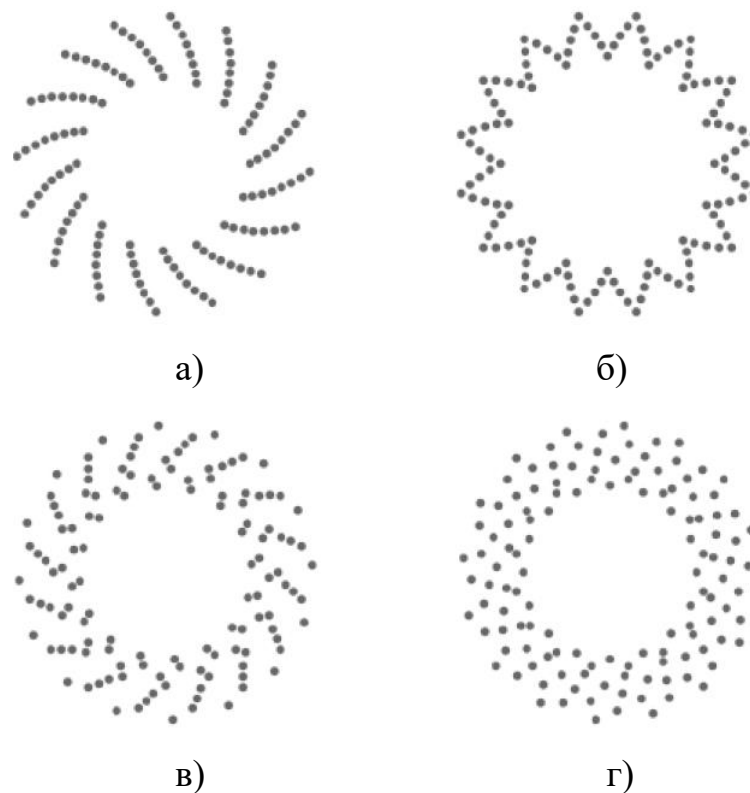


Рисунок 1.14 – Конфігурації решіток із 128 мікрофонів:

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

В роботі [15] наведено приклади решіток з неоднорідним розташуванням мікрофонів. Мікрофони поміщені на концентричних колах. Чим більше є апертура системи, тим більше мікрофонів розміщується у решітках.

По мірі віддалення джерела звуку від масиву мікрофонів точність його локалізації буде зменшуватися за рахунок затухання звукових хвиль. Ефективність локалізації джерела звуку, а також ефективність виділення сигналу дрону, може бути підвищена шляхом застосування одночасно кількох мікрофонних решіток, рознесених у просторі. В літературі такі розподілені системи мають назву "мережі акустичних датчиків" (acoustic sensor network).

Ефективність застосування подібних систем пов'язана з тим, що суттєво збільшується вірогідність того, що один із мікрофонів (або масивів мікрофонів) перебуватиме ближче до цільового джерела. Найбільш поширеними такі системи стали при використанні на великих просторах, коли треба мати інформацію з будь-якої точки простору спостереження. Задачі, які вирішуються такими системами, різноманітні: локалізація джерел, виділення голосу певної людини, розділення джерел звуку, визначення траєкторії переміщення джерел звуку, визначення спрямованості джерела звуку та ін.

Так, у роботі [25] показано, що можна мати надійну систему локалізації джерела, що використовує декілька мікрофонних масивів. Експериментальні дані з використанням цього підходу показали скорочення середньої помилки локалізації джерела звуку до 8 см. Геометрія решітки показана на рис.1.15.

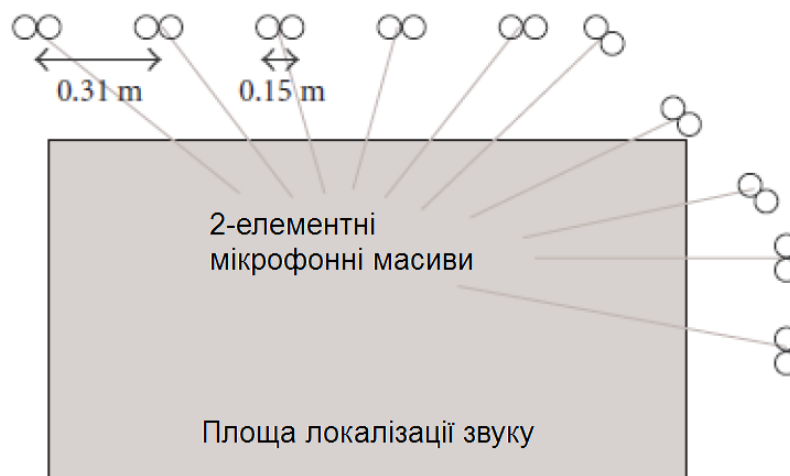


Рисунок 1.15 – Розміщення 10-ти 2-елементних масивів для визначення координат джерела звуку

Геометрія мікрофонних решіток дуже різна через різноманітні задачі, які стоять перед дослідниками. Тому в рамках кваліфікаційної роботи немає можливості перелічити усі можливі варіанти, що застосовуються у реальних дослідженнях.

1.5 Висновки по розділу 1

У даному розділі розглянуті головні підходи для виділення джерел звуку: алгоритми частотно-часового маскування або T-F masking, алгоритм аналізу незалежних компонентів або ICA, алгоритми формування діаграми спрямованості або Beamforming, алгоритми виділення джерела звуку з використанням мікрофонних масивів, розподілених у просторі.

У даний час для виділення джерел звуку розроблено значну кількість методів, що обумовлено високим ступенем складності даної задачі. Складність виділення залежить від числа джерел, кількості мікрофонів та конфігурації їх розташування, рівня завад, методу змішування сигналів, а також від апріорної інформації про джерела, мікрофони та методи і параметри змішування.

В основному, набули поширення методи, реалізовані в частотній області. Вони розвиваються активно у плані комплексування різних методів оброблення, але, як і раніше, не дають задовільних результатів скрізь в усьому різноманітті вихідних умов та обмежень.

Отже, актуальною реалізація та дослідження характеристик і можливостей методу оптимальної просторової фільтрації звукових сигналів дронів на фоні просторово-розподілених джерел завад у часовій області, з використанням повної частотної смуги без розбиття, у масштабі реального часу, що дозволяє виділяти дрон з будь-якої точки простору спостереження з максимальним відношенням сигнал-завада незалежно від взаємного розташування дрону та завад.

2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОСТОРОВОЇ ОБРОБКИ ЗВУКОВИХ СИГНАЛІВ ДРОНУ У ЧАСОВІЙ ОБЛАСТІ

У даному розділі обґрунтовується метод обробки звукових сигналів дрону мікрофонним масивом у часовій області, оснований на початковому введенні затримок у часі, які залежать від просторових координат, і подальшому зростанні відношення сигнал-завада на виході масиву за рахунок обчислення оптимальних на інтервалах стаціонарності вагових коефіцієнтів мікрофонних каналів.

2.1. Алгоритм просторової фільтрації звукових сигналів дронів на фоні розподілених завад

Система виявлення має N мікрофонів, рознесених у просторі. Кожен мікрофон приймає суму всіх k звукових сигналів, один із яких визначаємо як корисний звуковий сигнал дрону $S(t)$, інші – завади – $G_f(t)$, $f = 1, \dots, k$ – номер завади. При різних дистанціях r_i від джерела сигналу до приймального мікрофону за номером i , $i = 1, \dots, N$ потрібний час, щоби досягти мікрофона. Мікрофонні решітки оброблюють оцифрований сигнал, тому ν -й відлік сигналу, прийнятого i -м мікрофоном, можна записати наступним виразом

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

де V_s – швидкість поширення звуку;

F_s – частота дискретизації;

A і A_{f_i} – множники масштабу;

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

r_{fi} – дистанція від f -го джерела завади до i -го мікрофону.

Для виділення цільового сигналу із суміші сигналу дрону і сторонніх завод у кожний реєстрований i -м мікрофоном сигнал вводяться часові затримки, які залежать від просторових координат:

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

де r_{ij} – дистанція від довільно обраної точки простору спостереження $j = 1, \dots, p$ (точки фокусування системи із N мікрофонів) до i -го мікрофону.

Оптимальна затримка τ_{opt} для усіх мікрофонів незмінна і дорівнює відношенню найбільшого шляху розповсюдження звуку в досліджуваному просторі без врахування можливих відбиттів (для прямокутної конфігурації зони огляду – діагональ) до швидкості поширення звуку:

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

де a і b – лінійні розміри прямокутної зони огляду.

Третім лінійним розміром можна знехтувати лише тоді, коли джерела звукових сигналів і мікрофони розміщені в одній площині.

Затримка у часі τ_{ij} для кожної точки зони спостереження та кожного мікрофона є індивідуальною. Знання координат N мікрофонів дозволяє розрахувати матрицю затримок часу T для кожної точки досліджуваної зони 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 зони спостереження.

Після введення часових затримок запишемо сигнал i -го мікрофона:

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

Введення затримок часу τ_{ij} призводить до синхронного приймання сигналу дрону усіма мікрофонами. При співпадінні координат джерела звуку із координатами точки фокусування системи:

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

а сигнал i -го мікрофона можна записати 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 із N мікрофонів для заданої точки зони спостереження є суперпозицією сигналів усіх 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 даній просторовій фільтрації потужність корисного звукового сигналу зростає в N^2 разів за рахунок синхронного приймання, а потужність

завад за рахунок взаємного накладання – у N разів. Отже, відношення сигнал-завада збільшиться у N разів.

Такий підхід можна застосовувати для паралельної схеми звукового спостереження за великим числом сторонніх джерел, розташованих на множині p точок зони спостереження.

Кількість точок зони спостереження p доцільно вибирати з умови:

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

де D – площа досліджуваної зони спостереження,

Δx – роздільна здатність багатопозиційної системи виявлення.

Роздільна здатність Δx багатопозиційної системи акустичного виявлення можна визначати як діаметр поперечного перерізу на рівні половини максимуму просторової функції кореляції $R_j(x', y')$ системи сигналів від N мікрофонів для кожної точки зони 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 фокусу системи виявлення;

x_0, y_0 – координати точкового джерела звукового сигналу;

M – число відліків дискретизованого у часі сигналу.

За рахунок когерентного додавання потужність корисного сигналу збільшується, тому, в точках зони спостереження з координатами звукового джерела знаходитимуться максимуми просторової функції кореляції. Тому, розрахунок просторової функції кореляції дозволяє розраховувати координати джерел звукових сигналів.

2.2 Використання методів просторової обробки сигналів для зростання відношення сигнал-завада

Метод введення просторово-залежних затримок у часі дає гарні результати виділення сигналів із завад, але при великому числі сторонніх джерел відношення сигнал-завада для звуку дронів різко знижується. Підвищення відношення сигнал-завада стає можливим, якщо застосовувати методи просторової обробки сигналів, засновані на обчисленні оцінки кореляційної матриці завади [27]. Задача зводиться до обчислення вектора вагових коефіцієнтів мікрофонів, яка максимізує відношення сигнал-завада сигналу дрону після виділення сигналу за допомогою алгоритму введення затримок.

2.2.1 Обчислення вагового вектора при оптимальній обробці звукового сигналу

Методи оптимальної обробки використовуються, якщо [27]:

- точно відома матриця кореляції завади (відома форма сигналів завад та відомі просторові координати звукових джерел);
- є попередня інформація про корисне джерело звуку.

Використовуючи припущення про некорельованість сигналів від k завад, матрицю кореляції завад можна записати у вигляді:

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

\mathbf{M}_n –матриця кореляції власного шуму,

\mathbf{M}_f –матриця кореляції f -ї завади:

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

де додавання ведеться за відліками часу з інтервалу спостереження $v = 1, \dots, L$;

Δ_i – величина затримки:

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

Метод введення затримок за рахунок синхронного приймання корисного сигналу формує на виході 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, який досягає максимуму відношення сигнал-завада, з точністю до постійного множника можна обчислити з умови

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

де α – довільний множник,

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

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

2.2.2 Обчислення вагового вектора при адаптивній обробці

Методи адаптивної обробки використовуються при відсутності попередньої інформації про вхідні сигнали. У даному випадку для обчислення вагового вектора треба використовувати оцінку матриці кореляції завади. Оцінювальна матриця кореляції відрізняється тим, що в ній міститься інформація не тільки про завади, але і про корисний сигнал. Оцінка матриці кореляції по Z статистично незалежним вибіркам вхідного процесу R можна виразити у вигляді:

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

За великої кількості статистично незалежних вибірок по відношенню до кількості мікрофонів N :

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

Метод введення затримок дозволяє виділити звуковий сигнал дрону з будь-якої точки зони спостереження. Обчислення функції кореляції вихідних сигналів системи акустичного виявлення дозволяє визначити координати усіх звукових джерел. Тому для обчислення оцінки кореляційної матриці завади можуть бути застосовані сигнали уявних джерел – виділені за допомогою методу введення затримок сигнали дронів G'_f , що містять суміш корисного сигналу і самих завад.

Оцінку матриці кореляції завади знайдемо із формули:

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

\mathbf{M}_f – оцінка матриці кореляції f -ої завади (2.12).

Ваговий вектор, який розраховується за формулою (2.18) є набором вагових коефіцієнтів кожного з N приймальних каналів, які залежать від часу $w_i = w_i(t)$. Даний набір є індивідуальним для кожної j -ї точки зони спостереження:

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

Для вагового вектора використовується нормування:

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

У кожний момент часу звукова обстановка змінюється, тому під час вирішення задач виділення сигналу дрону пропонується розбивати сигнал на часові ділянки аналізу T_a , у межах яких будуть виконані оптимальні оцінки параметрів методу обробки.

У Кожні T_a секунд перераховується кореляційна функція: виконується перевірка координат звукових джерел для індикації переміщення та перераховується оптимальний ваговий вектор.

2.3 Структурна схема методу обробки звукових сигналів дронів у часовій області

У кваліфікаційній роботі магістра для виділення звукових сигналів дронів досліджується метод обробки з мікрофонними решітками у часовій області, структура якого показана на рис.2.1. Особливість методу полягає у введенні точних затримок у часі, що залежать від просторових координат розташування джерела сигналу, а також адаптивним обчисленням оптимальних на інтервалах стаціонарності вагових коефіцієнтів мікрофонних каналів.

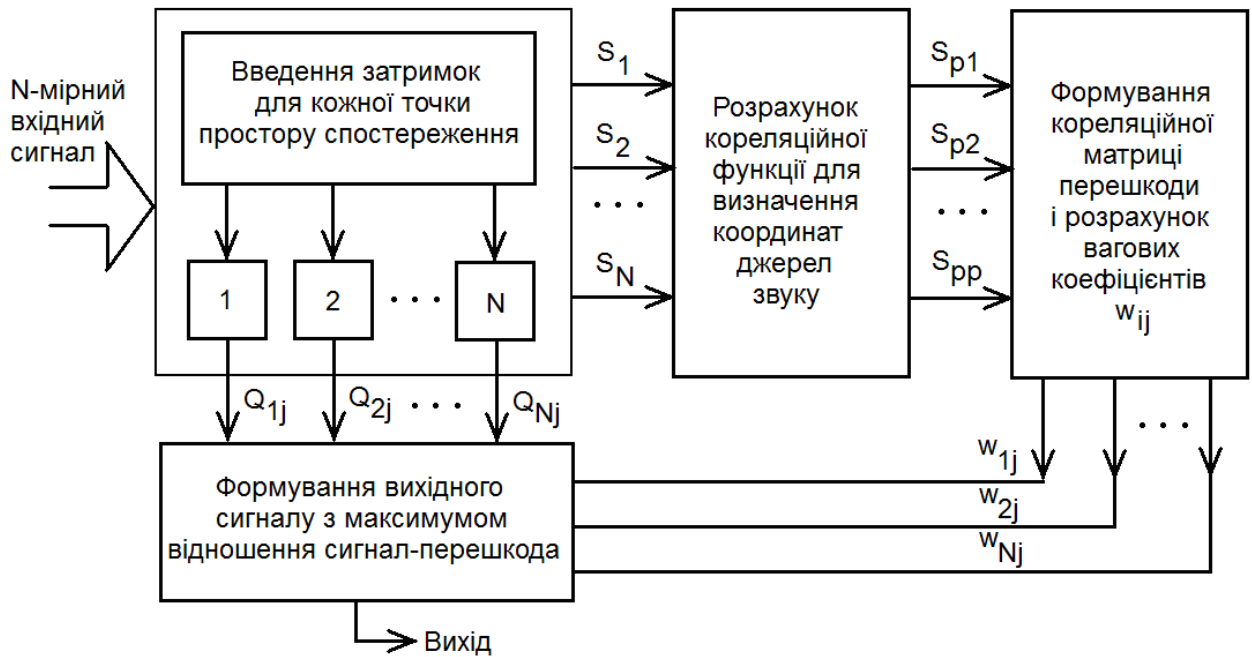


Рисунок 2.1 – Структурна схема методу обробки сигналів дронів мікрофону решіткою у часовій області

Метод заснований на відомих координатах розміщення мікрофонів. Знання цих координат дозволяє обчислити заздалегідь матрицю часових затримок для кожної точки зони спостереження до проведення обчислень.

У блоці затримок кожен сигнал мікрофону каналу для кожної точки зони спостереження накладається раніше обчислена часова затримка і формуються J вихідних сигналів для всіх точок досліджуваної зони. Блок розрахунку функції кореляції із J сигналів відбирає P сигналів найбільшої потужності. По координатах максимумів функції кореляції відбувається обчислення координат всіх джерел, які діють одночасно. У блоці формування кореляційної матриці завади один із P сигналів обирається корисним і подальша обробка спрямована на збільшення відношення сигнал-завада обраного джерела.

Для обчислення кореляційної матриці завад застосовуються сигнали уявних джерел – виділені шляхом введення затримок звукові сигнали завад. За рахунок прямого обернення сформованої матриці завади проводиться обчислення оптимального вагового вектора та обчислені вагові коефіцієнти

надаються на вхід блоку формування вихідного сигналу з найбільшим відношенням сигнал-завада.

Найбільше відношення сигнал-завада виділеного сигналу дрону досягається спільним застосуванням методу введення затримок та адаптивного обчислення оптимальних на інтервалах стаціонарності T вагових коефіцієнтів кожного мікрофонного каналу. Кожні T секунд обчислення оновлюються.

2.4 Оцінка якості виділеного звукового сигналу

Для контролю ефективності виділення звукового сигналу дрону з завад від сторонніх джерел у кваліфікаційній роботі застосовано об'єктивний критерій – відношення сигнал-завада.

Відносно постановки задачі відношенням сигнал-завада в даній роботі будемо називати відношення енергії виділеного сигналу дрону до енергії завад від сторонніх джерел:

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

Для оцінки відношення сигнал-завада виділеного сигналу дрону лише за допомогою методу введення затримок вагові коефіцієнти приймемо рівними $w_i = 1$.

2.5 Висновки по розділу 2

У другому розділі обґрунтовано теорію методу просторової обробки звукових сигналів дронів мікрофонною решіткою з N мікрофонів,

заснований на просторово-залежних часових затримках у кожний сигнал мікрофона. Такий підхід дозволяє посилити відношення сигнал-завада у N разів.

Розроблено метод обробки сигналів у області часу, який максимізує відношення сигнал-завада на виході решітки для будь-якої точки зони спостереження. Збільшення відношення сигнал-завада досягається шляхом застосування оптимальних на інтервалах стаціонарності коефіцієнтів ваги мікрофонної решітки. Описано об'єктивний критерій, який використовується для оцінки ефективності фільтрації звукових сигналів дронів, а саме – відношення сигнал-завада.

3 МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ПРОСТОРОВОЇ ОБРОБКИ ЗВУКОВИХ СИГНАЛІВ ДРОНІВ

Даний розділ присвячено моделюванню системи просторової обробки звукових сигналів дронів.

Моделювання було виконано на персональному комп'ютері і реалізовано за таких умов і обмежень.

1. Для моделювання була обрана умовний прямокутний простір спостереження площею 9600 м^2 (розміром $120 \text{ м} \times 80 \text{ м}$).

2. Вважалося, що система виявлення складалася з неспрямованих мікрофонів і розміщувалися в тій самій площині, що і всі джерела звукових сигналів. Дані допущення дозволяють при моделюванні не враховувати третій вимір зони спостереження.

3. Джерела звукового сигналу і завад вважаються точковими, неспрямованими, звуковий тиск зменшується зворотно пропорційно відстані від джерела.

4. У якості корисного сигналу застосовується звукозапис квадрокоптера DJI Phantom 3 у режимі зависання. В якості джерел завад застосовані звукозаписи звуку двигуна вантажівки, гомону птахів, голосів людей. Частота дискретизації звукових сигналів $F_s = 44,1 \text{ кГц}$. Тривалість кожної реалізації складає 5 с .

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

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

7. Джерела сигналів є стаціонарними у просторі. Під час процесу обробки сигналів всякі переміщення відсутні.

3.1 Визначення оптимальної конфігурації решітки мікрофонів для виділення сигналів дрону із завад

При даній постановці задачі треба встановити оптимальну для досліджуваного методу конфігурацію мікрофонної решітки для виділення сигналів дрону. Так як висота розташування мікрофонів зафіксована, порівняльному дослідженню підлягали 3 конфігурації масиву мікрофонів з 10-ти ненаправлених мікрофонів: розміщення по одній стороні зони спостереження, розміщення мікрофонів по куту, розміщення по периметру зони спостереження (рис.3.1).

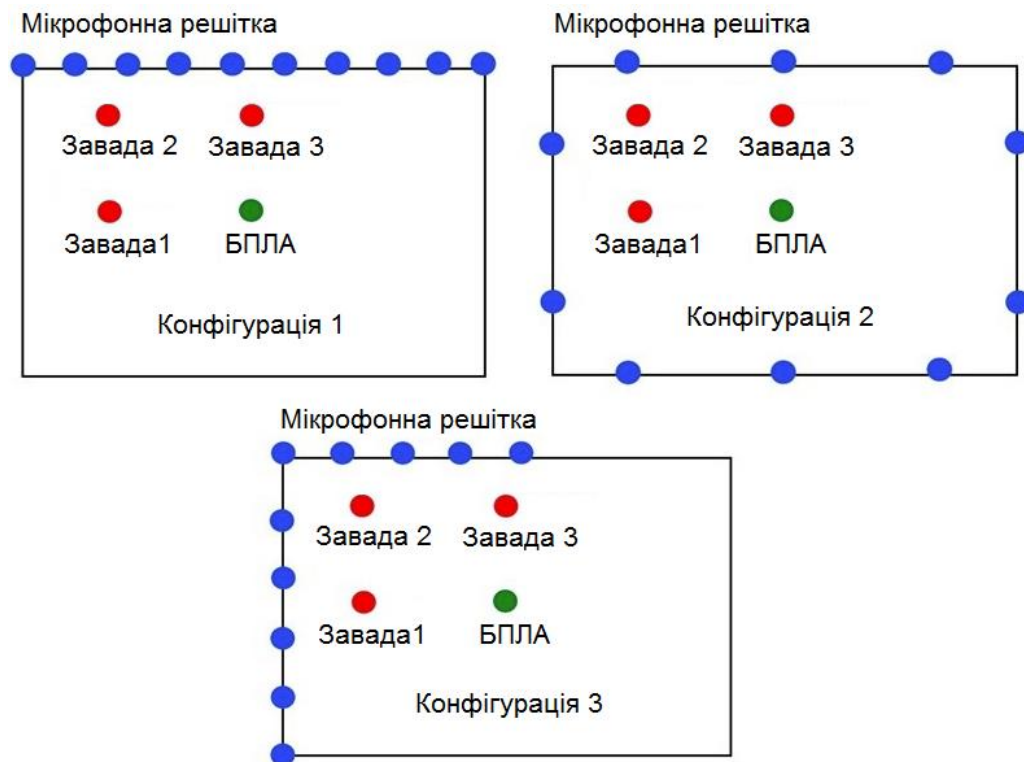


Рисунок 3.1 – Конфігурації решіток мікрофонів, що досліджуються (корисний сигнал дрону у центрі зони спостереження)

При проведенні моделювання для визначення оптимальної конфігурації решітки вважалося, що у зоні спостереження звучать одночасно чотири джерела, одне джерело корисне (дрон), інші джерела – завади.

Для 1-ї конфігурації уявна дистанція між мікрофонами складає 13,3 м; для 2-ї конфігурації – 16 м і для 3-ї конфігурації – 40 м. Просторові координати джерел звуку відомі, координати розташування мікрофонів – також.

Для визначення оптимальної конфігурації решітки було проведено обчислення відношення сигнал-завада. Виділення звукового сигналу дрону було зроблено за допомогою методу введення затримок в кожний канал. Усі вагові коефіцієнти мікрофонних каналів дорівнюють 1.

Розрахунок проведено для двох різних взаємних розташувань джерел корисного сигналу і джерел завади: корисне джерело розташоване у центрі зони спостереження (рис.3.1) і корисний сигнал зміщено відносно центру зони спостереження (рис.3.2).

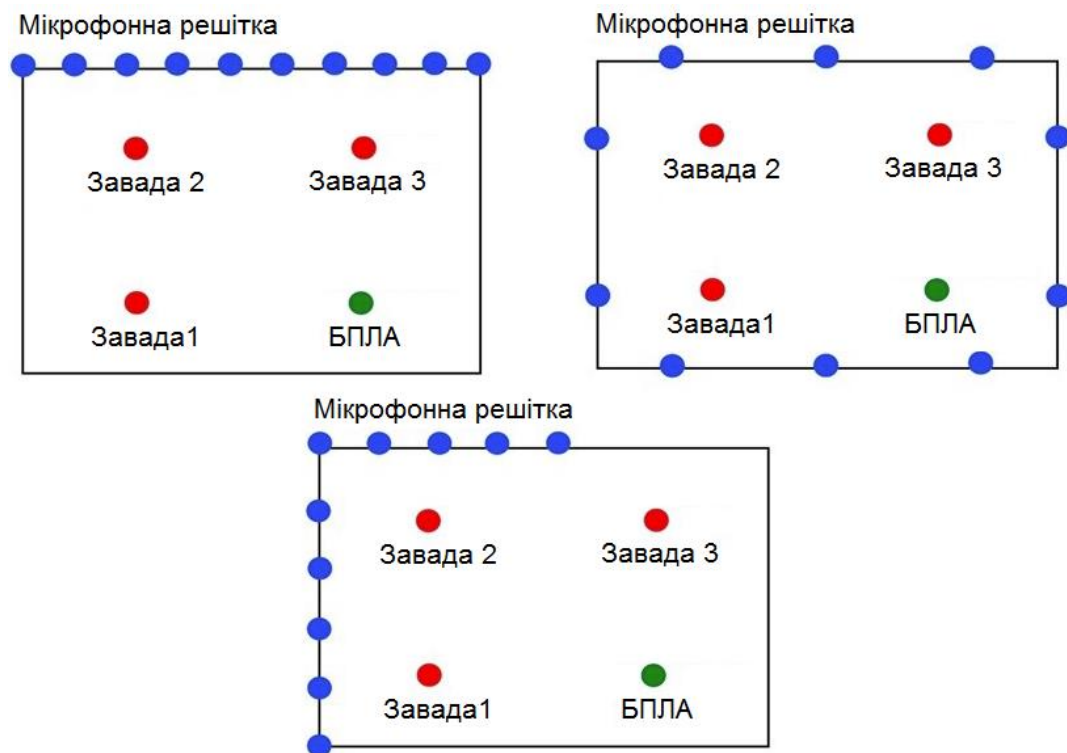


Рисунок 3.2 – Конфігурації решіток мікрофонів, що досліджуються (корисний сигнал зміщено від центру зони спостереження)

У табл. 3.1 надані результати обчислення відношення сигнал-завада сигналів дрону, виділених за допомогою часових затримок для 3-х аналізованих конфігурацій та 2-х різних координат корисного джерела звуку.

Таблиця 3.1 – Обчислення відношення сигнал-завада сигналів дрону, виділених за допомогою затримок часу для 3-х аналізованих конфігурацій для 2-х різних координат корисного джерела звуку

№	Конфігурація багатопозиційної системи	Відношення сигнал/перешкода виділеного сигналу БПЛА, λ , 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

Обчислення відношення сигнал-завада 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 дрону на фоні завад;

S_0 – первинний сигнал дрону;

t – номер відліків сигналу;

T – тривалість реалізації сигналу у числі вибірок.

На рис. 3.3 показано порівняльну діаграму отриманих відношень сигнал-завада для 3-х конфігурацій мікрофонної решітки, вказаних у табл. 3.1.

При виділенні звукового сигналу дрону у 3-й конфігурації для 2-х різних положень джерела корисного сигналу досягається найбільше відношення сигнал-завада.

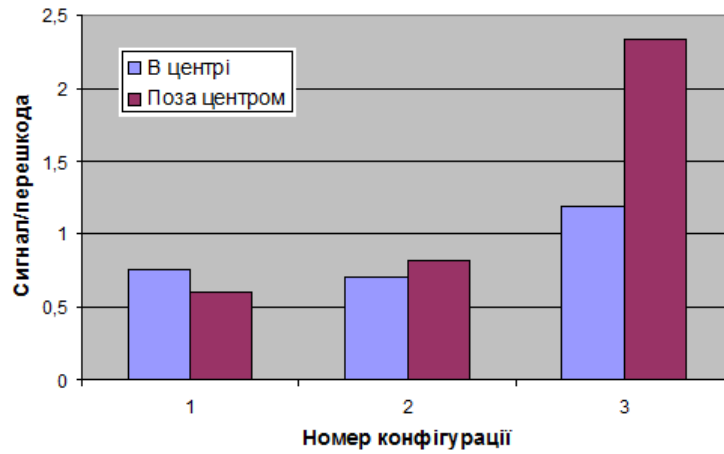


Рисунок 3.3 – Порівняльна діаграма обчислених відношень сигнал-завада для 3-х конфігурацій мікрофонної решітки

На рис. 3.4 наведені реалізації корисного сигналу: оригінального неспотвореного сигналу дрону (рис. 3.4, а) і виділеної з завад з найбільшим відношенням сигнал-завада (рис. 3.4, б).

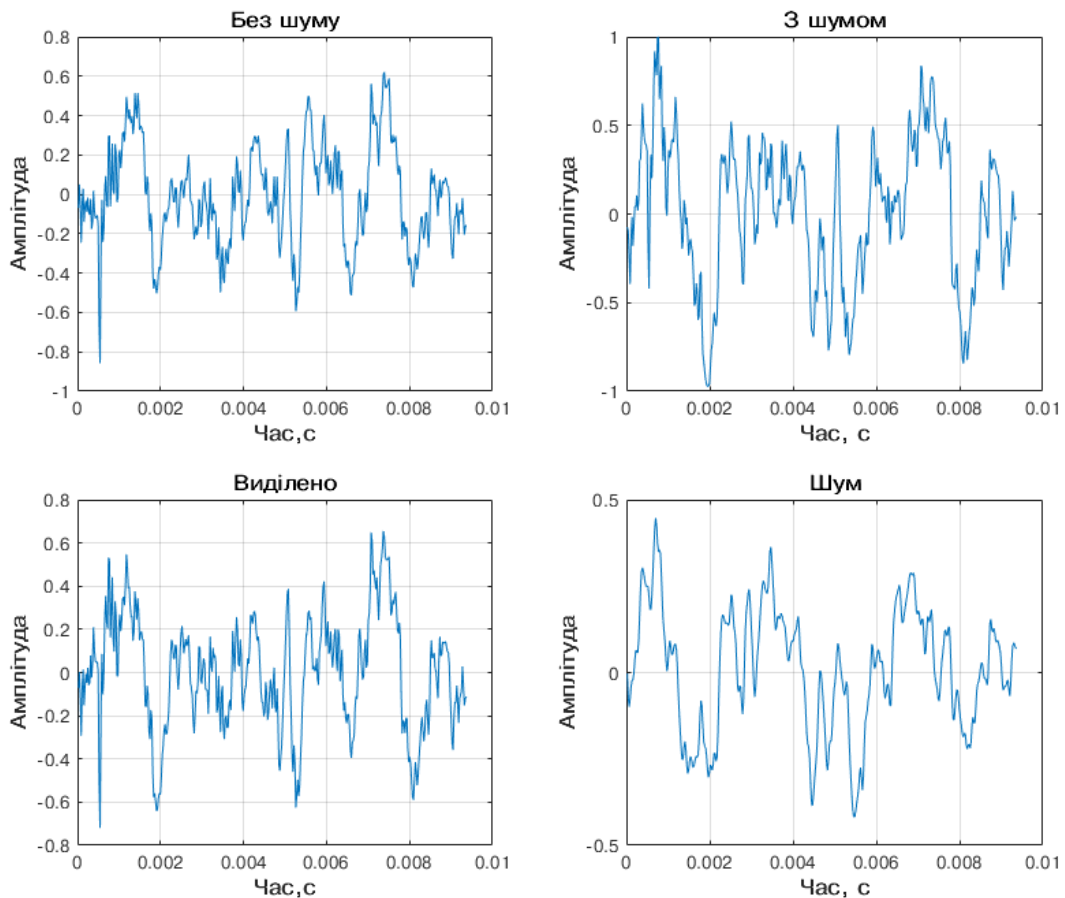


Рисунок 3.4 – Реалізації сигналу дрону без завади, виділеного сигналу і завади 3-ю конфігурацією при положенні дрону поза центром

На рис. 3.5 показано графік коефіцієнту взаємної кореляції для оригінального корисного та виділеного із завад сигналу дрону, що доводить ефективність фільтрації корисного сигналу із завад.

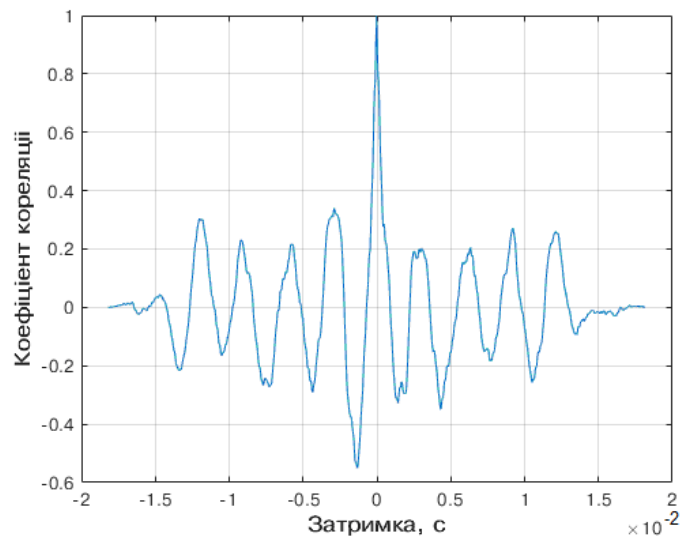


Рисунок 3.5 – Коефіцієнт кореляції оригінального корисного сигналу дрону та сигналу, виділеного із завад 3-ю конфігурацією

При різному взаємному положенні корисного сигналу і завад 3-я конфігурація забезпечує найкращі показники відношення сигнал-завада. Отже, конфігурація із розміщенням мікрофонів по периметру зони спостереження є оптимальною для дослідженого методу обробки.

3.2. Визначення просторової роздільної здатності багатопозиційної системи акустичного виявлення

Для оцінювання просторової роздільної здатності системи акустичного виявлення в моделі по периметру зони спостереження було розташовано 20 мікрофонів. У центрі зони спостереження є одне джерело корисного сигналу дрону, сторонні джерела завад відсутні.

Для кожної точки простору вводяться обчислені часові затримки, пропорційні відстані від даної точки до певного мікрофону та розраховується просторова кореляційна функція. Результати розрахунків просторової кореляційної функції показано на рис. 3.6.

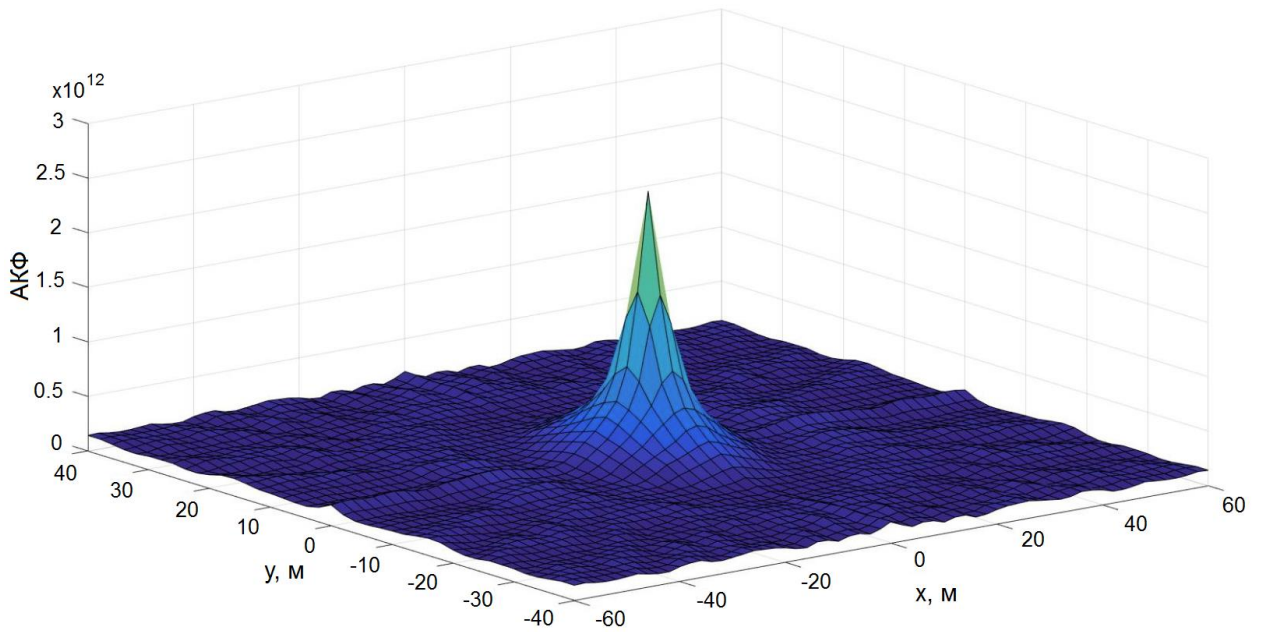


Рисунок 3.6 – Ненормована просторова функція кореляції для звукового сигналу дрону без завад (в смузі до 7 кГц)

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

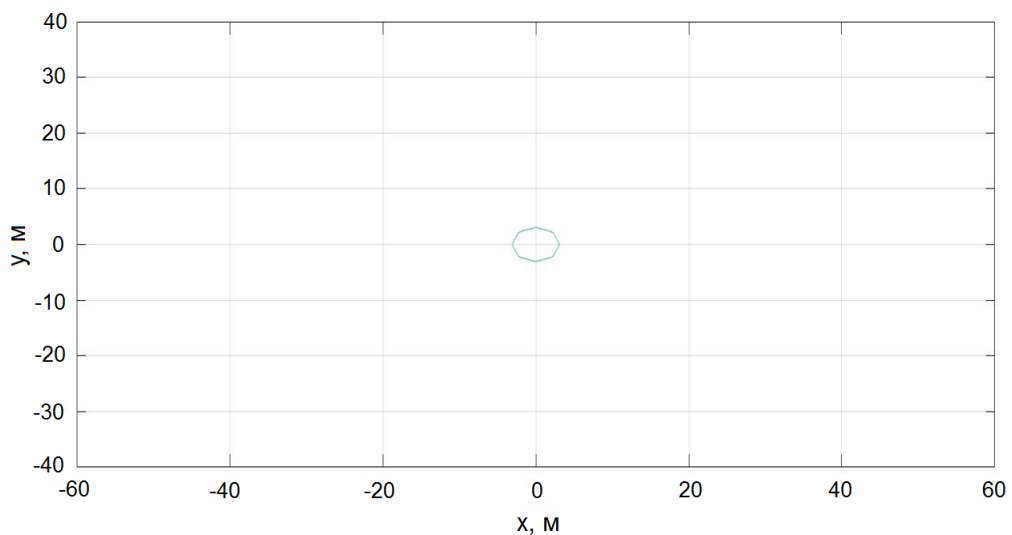


Рисунок 3.7 – Перетин функції кореляції за рівнем 0,707 (-3 дБ)

Просторова роздільна здатність системи акустичного виявлення в смузі частот до 7 кГц склала 5,6 м.

На рис.3.8 наведено графік спектру сигналу дрону без завад. Можна відмітити його лінійчастий характер і швидке спадіння спектральних ліній вище частоти 4 кГц.

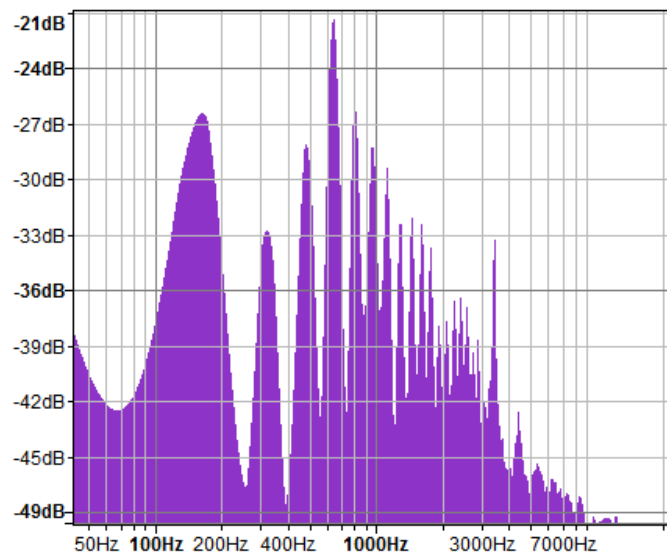


Рисунок 3.8 – Графік спектру сигналу дрону без завад

При обмеженні діапазону частот системи до 4 кГц просторова роздільна здатність системи виявлення покращується. В описаному експерименті вона склала 4,8 м. Відповідна функція кореляції наведена на рис. 3.9.

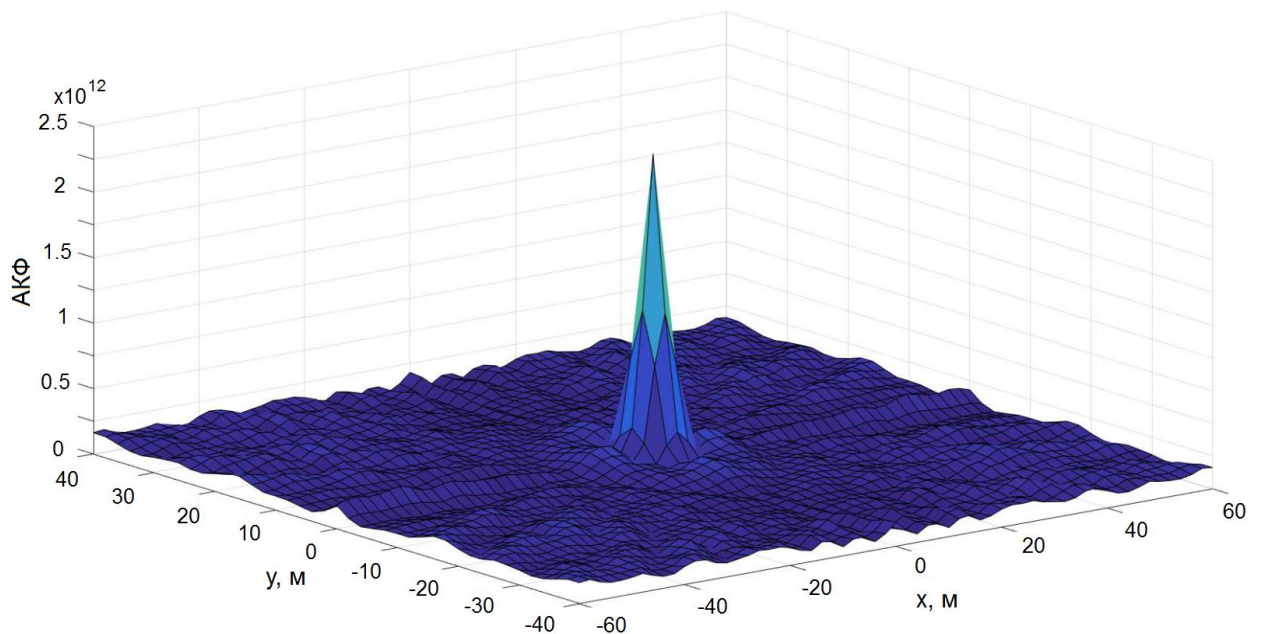


Рисунок 3.9 – Ненормована просторова функція кореляції для звукового сигналу дрону без завад (у смузі до 4 кГц)

Слід очікувати, що подібне обмеження смуги також позитивно проявиться на відношенні сигнал-завада.

Розрахунок просторової функції кореляції дозволяє визначати координати акустичних джерел. Це підтверджується числовим експериментом з визначення координат 8-ми одночасно працюючих звукових джерел. Діапазон частот системи до 7 кГц.

Координати джерел невідомі заздалегідь, відомі лише координати розташування мікрофонів. Після призначення часових затримок, що залежать від просторових координат мікрофонів, виконується обчислення просторової функції кореляції у кожній точці зони огляду. Результати обчислення наведені на рис.3.10.

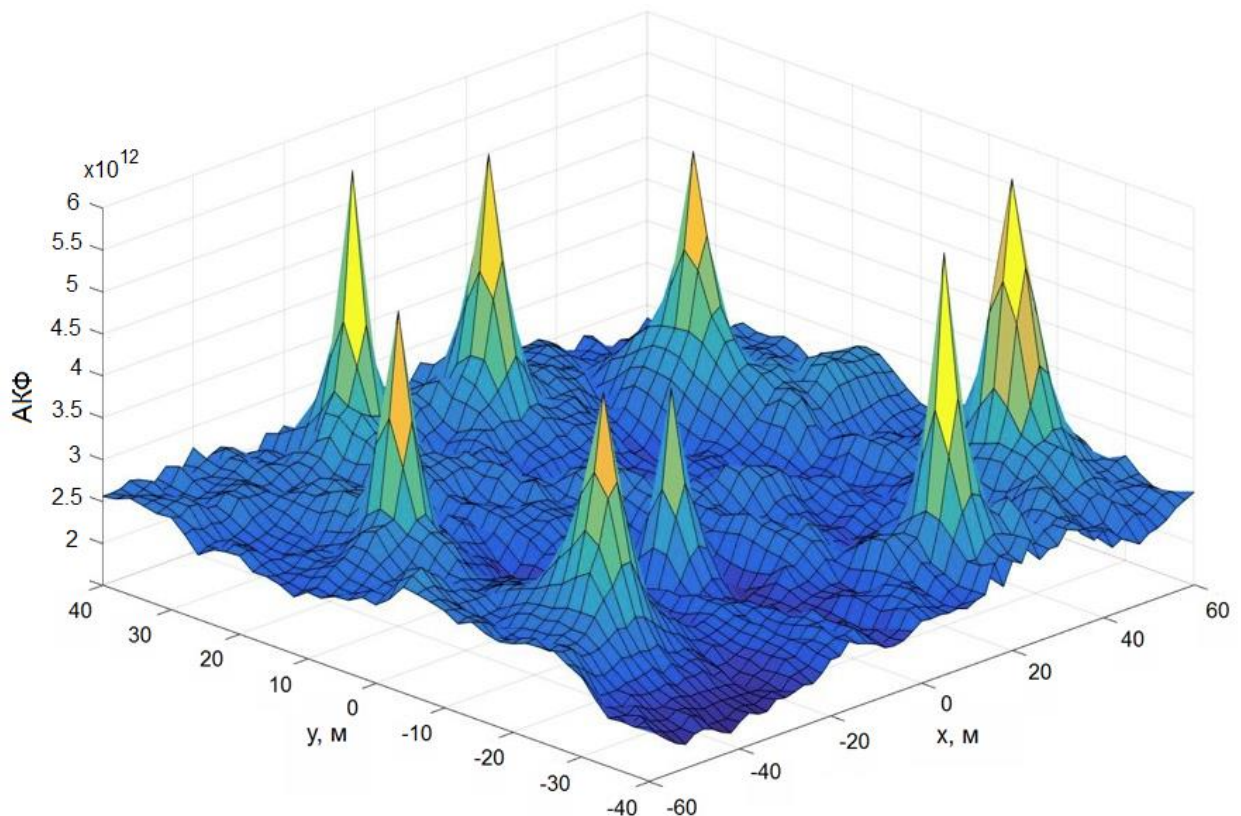


Рисунок 3.10 – Обчислення ненормованої просторової функції кореляції для 8-ми звукових джерел (ширина смуги до 7 кГц)

З рис. 3.10 випливає, що наявність 8-ми максимумів просторової функції кореляції відповідає 8-ми звуковим джерелам. Координати максимумів суворо відповідають координатам джерел.

За положенням максимумів функції кореляції можна обчислити координати 8-ми джерел (табл.3.2).

Таблиця 3.2 – Координати 8-ми звукових джерел

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

Отже, розрахунок просторової функції кореляції дозволяє визначити координати усіх акустичних джерел. Роздільна здатність системи акустичного виявлення для сигналів в діапазоні до 7 кГц склала 5,6 м. Для дослідження зони спостереження обробляти точки простору без втрати звукових джерел слід з відповідним кроком.

3.3 Оцінки оптимальних вагових коефіцієнтів

У п.п. 3.2 показано, що система акустичного виявлення із 20-ти мікрофонів може визначити просторові координати 8-ми звукових джерел. Таким чином, після введення затримок, відповідних координатам джерел звуку, може бути виділено 8-ми сигналів S_{p1}, \dots, S_{p8} . На рис. 3.11 наведено взаємне розташування мікрофонів решітки і звукових джерел.

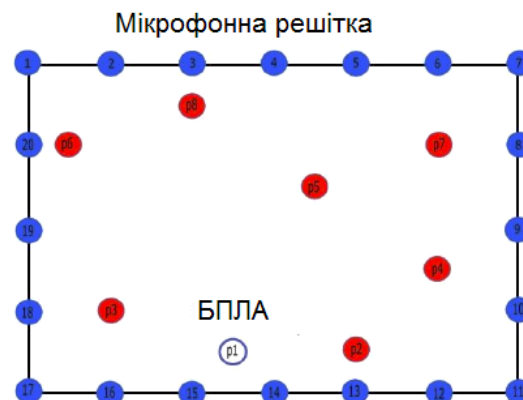


Рисунок 3.11 – Взаємне розташування 8-ми звукових джерел і решітки із 20-ти мікрофонів

Для обчислення вагових коефіцієнтів мікрофонів необхідно сигнал дрону призначити корисним S_{p1} , а решту S_{p2}, \dots, S_{p8} джерел – вважати уявними джерелами сторонніх завад. Після виділення цих сигналів метод обробки формує матрицю кореляції кожної завади відповідно до виразу (2.12), матрицю кореляції корисного сигналу відповідно виразу (2.14), оптимальні коефіцієнти ваги обчислимо за виразом (2.15).

В табл. 3.3 наведені результати обчислення вагових коефіцієнтів багатопозиційної системи акустичного виявлення з 20-ти мікрофонів.

Таблиця 3.3 – Результати обчислення вагових коефіцієнтів багатопозиційної системи акустичного виявлення з 20-ти 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 обчислення вагових коефіцієнтів, показаних у табл. 3.3 і на рис. 3.11. Найбільші значення коефіцієнтів є у мікрофонів №14 та №15, це найближчі за розташуванням мікрофони до корисного джерела сигналу (дрону). Оптимальні коефіцієнти ваги спрямовані на посилення корисних сигналів та ослаблення сигналів сторонніх завад. Саме тому максимальне та мінімальне значення коефіцієнтів ваги у даному конкретному випадку відрізняється в 17 тис. разів.

3.4 Дослідження ефективності виділення сигналу дрону на фоні інтенсивних просторово розподілених завад

Ефективність виділення корисного сигналу визначається по відношенню сигнал-завада для сигналу дрону.

Взаємне розташування решіток мікрофонів та джерел звукових сигналів відповідає конфігурації на рис. 3.11.

На першому етапі реалізований метод обробки виділяє із застосуванням методу просторової фільтрації, заснованого на введенні затримок, які залежать від просторових координат точок, всі джерела звукових сигналів. Після розпізнавання виділеного із завад сигналу дрону інші 7 джерел необхідні для формування матриці кореляції завад.

Ефективність виділення сигналу дрону збільшується за допомогою подальшого обчислення на оптимальних інтервалах стаціонарності вагових коефіцієнтів мікрофонів. Оптимальний вектор вагів решітки визначається через матрицю кореляції завади (п.3.3).

Отже, досліджений метод дозволяє збільшити ефективність виділення звукового сигналу дрону: шляхом введення часових затримок виділяється корисний сигнал, відношення сигнал-завада якого збільшується потім за рахунок застосування коефіцієнтів ваги.

У табл.3.4 показано результати оцінювання в модельному експерименті відношення сигнал-завада.

Таблиця 3.4 – Результати оцінювання в модельному експерименті відношення сигнал-завада

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

При виділенні звукового сигналу дрону алгоритмом просторової фільтрації без коефіцієнтів ваги досягається виграш (для нашого випадку) 11,2 дБ по відношенню до запису акустичної обстановки 1-м мікрофоном (табл.3.4). Результат добре узгоджується з теоретичними оцінками (п.2.1), згідно яким при застосуванні 20-ти мікрофонів метод просторової фільтрації без вагових коефіцієнтів забезпечує виграш у відношенні сигнал-завада не більше ніж у 20 разів, тобто на 13 дБ. Подальше введення вагових коефіцієнтів збільшує виграш у відношенні сигнал-завада з 11,2 дБ до 16,5 дБ.

Отже, ефективність дослідженого в роботі методу залежить від числа мікрофонів у решітці, числа одночасно працюючих джерел завад та їх взаємного розміщення у просторі.

3.5 Висновки по розділу 3

Чим ближче розташоване джерело корисного до одного з мікрофонів решітки, тим ефективнішою є робота методу. При винесенні мікрофонів із площини розташування джерел дистанція від джерела корисного сигналу до найближчого мікрофона збільшується, а різниця дистанцій до всіх мікрофонів решітки зменшується, це приводить до зменшення ефективності дослідженого методу.

Отже, для дослідженого методу визначено оптимальну конфігурацію мікрофонних решіток для виділення звукового сигналу дрону на фоні завад: мікрофонні решітки з розташуванням мікрофонів по периметру зони спостереження, що дозволяє виділяти сигнал дрону із найбільшим відношенням сигнал-завада.

Досліджено просторову роздільну здатність системи акустичного виявлення. Для досліджуваної смуги частот до 7 кГц роздільна здатність склала 5,6 м. При значній зміні значень верхньої граничної частоти смуги роздільна здатність системи акустичного виявлення змінюється мало.

Проведені дослідження відносно застосування дослідженого методу обробки для виділення сигналу дрону із завад для певної точки зони спостереження свідчать про можливе досягнення виграшу у відношенні сигнал-завада більше ніж у N разів, де N – кількість мікрофонів у решітці.

ВИСНОВКИ

Широке використання малих дронів крім позитивних сторін породило багато проблем. Вони пов'язані з неадекватною поведінкою окремих власників дронів, несанкціонованим моніторингом об'єктів і територій особливого значення, збільшенням числа випадків вторгнення в особистий простір. В даній ситуації актуальною стає завдання виявлення і визначення координат дронів у повітрі.

Дана задача може бути виконана способами радіолокації, радіомоніторингу, акустичної локації, відео-, інфрачервоного і теплового спостереження. На практиці часто застосовується комплексування вказаних методів.

Одним із напрямків у виявленні дронів є акустичний метод, що полягає в прийомі звукового випромінення БПЛА. Основним недоліком акустичного метода є його вразливість до сторонніх акустичних шумів і завад. Даний фактор суттєво знижує максимальну відстань виявлення, вірогідність правильного розпізнавання і точність визначення координат дрону.

Мета кваліфікаційної роботи – реалізація і дослідження можливостей алгоритмів обробки акустичного сигналу дрону мікрофонною решіткою у часовій області, які дозволяють виділяти звук дрону з будь-якої точки зони спостереження зі збільшенням відношення сигнал/шум, незалежно від взаємного розташування дрону та джерел акустичних завад.

Сьогодні для виділення сигналів акустичних джерел розроблено значну кількість алгоритмів, це обумовлено високим ступенем складності даного завдання. Складність виділення залежить від числа джерел, кількості мікрофонів та їхнього розташування, рівня акустичного шуму і завад, способу додавання сигналів мікрофонів, а також від апріорно інформації про джерела, мікрофони і параметри додавання.

Попередній огляд літературних джерел показав, що для поставленої задачі задовільний результат може дати метод оптимальної просторової фільтрації акустичних сигналів дронів на фоні просторово-розподілених джерел перешкод у часовій області із використанням повної смуги частот без розбиття на окремі піддіапазони. Він дає мінімальну затримку і має працювати в масштабі реального часу. Відомі приклади успішного використання даного методу для виділення звукових мовних джерел.

Проведено теоретичний аналіз алгоритму обробки звукових сигналів дрону масивом мікрофонів, заснований на початковому введенні часових затримок, які залежать від просторових координат розташування мікрофонів. Розрахунок просторової функції кореляції дозволяє визначити координати акустичних джерел. За рахунок когерентного додавання потужність корисного сигналу збільшується. Тобто в точці з координатами акустичного джерела знаходяться максимуми кореляційної функції.

Після виявлення і розпізнавання сигналу дрону із всіх виділених джерел сигналу за допомогою алгоритму затримок, подальше збільшення відношення сигнал/завада можливе після розрахунку оптимальних (на інтервалах стаціонарності) вагових коефіцієнтів сигналів мікрофонів. Такий підхід заснований на застосуванні оцінки кореляційної матриці перешкод. В результаті отримаємо ваговий вектор сигналів, який враховує відстань дрону до кожного з них.

У відповідності з теоретичним аналізом розроблена структурна схема алгоритму обробки сигналів мікрофонної решітки у часовій області. Алгоритм заснований на заздалегідь відомих координатах розміщення мікрофонів. Це дозволяє побудувати часову матрицю затримок для кожної точки простору охорони до початку проведення обчислень. У блоці формування матриці кореляції перешкоди один з сигналів P визнається корисним, і подальша обробка спрямовується на підвищення відношення сигнал/завада для вибраного джерела.

В системі MATLAB проведено математичне моделювання системи просторової обробки акустичних сигналів дронів. Моделювання реалізовано за певних умов та обмежень.

Для моделювання умовно обрано прямокутну зону спостереження 120 x 80 м. Вважалося, що вимірювальна система складається з ненаправлених мікрофонів і розміщена в тій же самій площині, що і всі джерела звукових сигналів. Це допущення спростило задачу і дозволило не враховувати третій вимір.

Джерела корисного звукового сигналу і завад вважаються точковими, всеспрямованими, звуковий тиск зменшується обернено пропорційно відстані від акустичного джерела.

У якості корисного сигналу використано звукозапис квадрокоптера DJI Phantom 3 у режимі зависання. У якості джерел шуму використано звукозаписи двигуна голосу людини, вантажівки, гомін птахів. Частота дискретизації 44,1 кГц, тривалість кожної з реалізацій – 5 с.

Можливі відбиття звуку від перешкод і поверхні землі не враховуються. Енергія кожного звукового фрагмента однакова, що досягається методом нормування. Джерела сигналу є стаціонарними у просторі. Під час обробки вважається, що ніяких переміщень немає.

На першому етапі встановлено найкращу з точки зору відношення сигнал-завада конфігурація мікрофонної решітки. Розглянуто 3 варіанти розміщення – лінійне, кутове, по периметру зони огляду; а також 2 варіанти розміщення дрону – у центрі і поза центром. При однаковому числі мікрофонів найкращим виявився варіант з розташуванням по периметру зони огляду. Це розташування єдине дало відношення сигнал-завада більше 1. Таке невелике значення пов'язане з одночасною роботою в зоні огляду 3-х завад з такою ж інтенсивністю, що і звук дрону. В інших конфігураціях відношення сигнал-завада менше 1.

Отримані сигнали дрону до і після фільтрації, а також графік коефіцієнту взаємної кореляції для корисного та виділеного із завад сигналу дрону, що доводить ефективність фільтрації на фоні завад.

Для оцінки просторової роздільної здатності системи акустичного виявлення в моделі по периметру оглядової зони було розташовано 20 мікрофонів. У центрі площі спостереження є в наявності одне джерело корисного сигналу дрону, сторонні джерела звуку відсутні.

Для кожної точки простору вводяться часові затримки, пропорційні відстані від даної точки до відповідного мікрофона та проводиться розрахунок просторової функції кореляції. Для оцінки роздільної здатності системи виявлення було отримано переріз функції кореляції за рівнем 0,707. Просторова роздільна здатність системи акустичного виявлення в смузі частот до 7 кГц склала 5,6 м.

Так як спектр тестового сигналу дрону має швидкий спад спектральних ліній після частот 4 кГц, може бути доцільним скоротити смугу частот системи. Дослідження показали, що при обмеженні смуги частот до 4 кГц просторова роздільна здатність системи виявлення покращується, але не значно. В даному експерименті вона дорівнювала 4,8 м.

Проведено експеримент із визначення координат 8-ми одночасно працюючих акустичних джерел. Наявність 8-ми максимумів просторової функції кореляції відповідає цим звуковим джерелам. Координати максимумів відповідають координатам джерел звуку.

Після визначення, яке саме з виявлених джерел є дроном, алгоритм приступає до оцінки оптимальних вагових коефіцієнтів сигналів мікрофонів для даного джерела. Інші вважаються завадами. Отримані вагові коефіцієнти багатопозиційної акустичної системи із 20-ти мікрофонів. Найбільші величини коефіцієнтів у мікрофонів з номерами 14 і 15, це найближчі мікрофони до дрону.

Проведена оцінка ефективності фільтрації корисного сигналу по відношенню сигнал/завада відносно запису одним мікрофоном без просторової фільтрації. Виграш після введення затримок в канали для дослідженого випадку становить 11,2 дБ по відношенню до запису звукової

обстановки одним мікрофоном. Подальше введення вагових коефіцієнтів збільшує виграш до 16,5 дБ.

Отже, ефективність дослідженого в кваліфікаційній роботі алгоритму залежить від числа мікрофонів в решітці, кількості одночасно працюючих джерел перешкод та їхнього взаємного положення в просторі. Проведені дослідження говорять про можливе досягнення виграшу у відношенні сигнал/завада приблизно у N разів, де N – кількість мікрофонів в решітці.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ 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 (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. 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.