

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 методів виявлення і розпізнавання сигналів
акустичного випромінювання малорозмірних безпілотних літальних апаратів
(тема)

Виконав:
студент 2 курсу, групи МІМ-20-1
Таруга В.І.
(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 _____ Карташов В.М.
(підпис) (прізвище, ініціали)

2021р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інформаційних радіотехнологій та технічного захисту інформації
Кафедра Медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка
(код і повна назва)

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

Освітня програма " Медіаінженерія "

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

« ____ » _____ 2021 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Студентові Таруті Владиславу Ігоровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи

Дослідження методів виявлення і розпізнавання сигналів акустичного випромінювання малорозмірних безпілотних літальних апаратів.

Затверджено наказом по університету від "08" 11 2021р. № 1676 Ст _____

2. Термін подання студентом роботи _____ 08.12.2021 _____

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Метою магістерської кваліфікаційної роботи є дослідження методів отримання векторів ознак акустичного портрету безпілотних літальних апаратів, розробка методів розпізнавання акустичних сигналів БПЛА. Експериментальні дослідження алгоритму розпізнавання акустичних сигналів БПЛА на основі даних натурних експериментів.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

Вступ

1. Аналітичний огляд літературних джерел, присвячених дослідженню методів розпізнавання акустичних сигналів малорозмірних безпілотних літальних апаратів.

2. Аналіз алгоритмів розпізнавання акустичних сигналів малорозмірних БПЛА.

3. Розробка програми на ПЕОМ для розпізнавання акустичних сигналів малорозмірних БПЛА.

4. Експериментальні дослідження ефективності алгоритмів розпізнавання акустичних сигналів малорозмірних БПЛА.

5. Аналіз одержаних результатів

Висновки

Перелік посилань

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

1. Постановка задачі (1 лист)
2. Періодограми акустичних сигналів (1 лист)
3. Типовий спектр акустичного випромінювання роботи силової установки БПЛА (1 лист)
4. Банки мел фільтрів (1 лист)
5. Спектри сигналу (1 лист)
6. Мел спектр тестового сигналу (1 лист)
7. Кепстральне представлення тестового сигналу (1 лист)
8. Зміна коефіцієнта подібності для векторів ознак тестового сигналу та еталонного вектору ознак АВ БПЛА (1 лист)
9. Залежності ймовірності правильного виявлення та розпізнавання від відстані до квадрокоптера (1 лист)
10. Алгоритм прийняття рішення про розпізнавання АВ БПЛА (1 лист)
11. Висновки (1 лист)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітичний огляд літератури	08.11.21 – 10.11.21	
2	Аналіз особливостей акустичних сигналів БПЛА та способи їх розпізнавання	11.11.21 – 16.11.21	
3	Дослідження в MATLAB ефективності алгоритмів ідентифікації малорозмірних БПЛА по акустичному випромінюванню	17.11.21 – 25.11.21	
4	Графічна частина роботи	26.11.21 – 01.12.21	
5	Перевірка керівником	02.12.21 – 04.12.21	
6	Перевірка на академічний плагіат	05.12.21	
	Перевірка нормоконтролем	06.12.21	
7	Перевірка завідувачем кафедри, рецензування	07.12.21 – 08.12.21	

Дата видачі завдання 08.11.2021

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи (проекту) _____ проф. Олейніков В.М.

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 73 сторінки, 25 рисунків, 25 джерел.

БПЛА, МЕЛ-КЕПСТРАЛЬНИЙ КОЕФІЦІЄНТ, ФРАКТАЛЬНА РОЗМІРНІСТЬ, ПОКАЗНИК ХЕРСТА, АКУСТИЧНИЙ СИГНАЛ, АКУСТИЧНІ ВИПРОМІНЮВАННЯ, ФАЗОВИЙ ПОРТРЕТ, ІДЕНТИФІКАЦІЯ, ВЕЙВЛЕТ-АНАЛІЗ, СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ.

Об'єкт дослідження – методи виявлення і розпізнавання сигналів акустичного випромінювання малорозмірних безпілотних літальних апаратів.

Предмет дослідження – малорозмірні БПЛА.

Мета магістерської роботи – дослідження і визначення особливостей методів виявлення і розпізнавання акустичних сигналів малорозмірних БПЛА. Розробка методів експериментального дослідження акустичних сигналів, аналіз методів ідентифікації малорозмірних БПЛА по акустичному випромінюванню.

Методи дослідження: для вирішення задачі використовується метод аналізу акустичних сигналів БПЛА на основі мел-кепстральних коефіцієнтів, фрактальної розмірності.

У роботі проведено теоретичні та експериментальні дослідження характеристик акустичних сигналів БПЛА.

Результати: науковий – подальший розвиток методів ідентифікації БПЛА; практичний – представлено алгоритм роботи виявлення акустичного сигналу БПЛА.

Галузь використання: охорона об'єктів, військова сфера.

РЕФЕРАТ

Объяснительная записка квалификационной работы: 73 страницы, 25 рисунков, 25 источников.

БПЛА, МЕЛ-КЕПСТРАЛЬНЫЙ КОЭФИЦИЕНТ, ФРАКТАЛЬНАЯ РАЗМЕРНОСТЬ, ПОКАЗАТЕЛЬ ХЕРСТА, АКУСТИЧЕСКИЙ СИГНАЛ, АКУСТИЧЕСКИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ, ФАЗОВЫЙ ПОРТРЕТ, ИДЕНТИФИКАЦИЯ, ИДЕНТИФИКАЦИЯ, ВНИМАНИЕ.

Объект исследования – методы обнаружения и распознавания сигналов акустического излучения малоразмерных беспилотных летательных аппаратов.

Предмет исследования – малоразмерные БПЛА.

Цель магистерской работы – исследование и определение особенностей методов обнаружения и распознавания акустических сигналов малоразмерных БПЛА. Разработка методов экспериментального исследования акустических сигналов, анализ методов идентификации малоразмерных БПЛА по акустическому излучению.

Методы исследования: для решения задачи используется метод анализа акустических сигналов БПЛА на основе мел-кепстральных коэффициентов, фрактальной размерности.

В работе проведены теоретические и экспериментальные исследования характеристик акустических сигналов БПЛА.

Результаты: научное – дальнейшее развитие методов идентификации БПЛА; практический – представлен алгоритм работы обнаружения акустического сигнала БПЛА.

Область использования: охрана объектов, военная сфера.

ABSTRACT

Explanatory note of qualifying work: 73 pages, 25 figures, 25 sources.

UAV, MEL-KEPSTRAL COEFFICIENT, FRACTAL DIMENSION, HERST INDICATOR, ACOUSTIC SIGNAL, ACOUSTIC RADIATION, PHASE FACTORY.

The object of research - methods of detection and recognition of acoustic radiation signals of small unmanned aerial vehicles.

The subject of research - small UAVs.

The purpose of the master's work is to study and determine the features of methods for detecting and recognizing acoustic signals of small UAVs.

Development of methods for experimental study of acoustic signals, analysis of methods for identification of small UAVs by acoustic radiation.

Research methods: to solve the problem the method of analysis of acoustic signals of UAVs on the basis of chalk-cepstral coefficients, fractal dimension is used.

Theoretical and experimental researches of characteristics of acoustic signals of UAV are carried out in the work.

Results: scientific - further development of UAV identification methods; practical - the algorithm of work of detection of an acoustic signal of the UAV is presented.

Scope: protection of objects, military sphere.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів.....	9
Вступ.....	10
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ПРИСВЯЧЕНИХ ДОСЛІДЖЕННЮ ХАРАКТЕРИСТИК АКУСТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ, АНАЛІЗУ МЕТОДІВ ЇХ ВИЯВЛЕННЯ ТА РОЗПІЗНАВАННЯ.....	12
1.1 Огляд методів ідентифікації акустичних сигналів.....	12
1.2 Перспективні засоби виявлення безпілотних літальних апаратів.....	13
1.3 Акустичні шуми природного та антропогенного походження.....	16
1.4 Особливості акустичного випромінювання безпілотних літальних апаратів.....	19
1.5 Інформаційні характеристики акустичних сигналів безпілотних літальних апаратів	25
1.6 Метод фрактальної розмірності для ідентифікації безпілотних літальних апаратів	29
1.7 Постановка задачі та дослідження фрактальності акустичних сигналів безпілотних літальних апаратів	31
1.8 Огляд існуючих методів виявлення малорозмірних безпілотних літальних апаратів.....	32
2 АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ АКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ МАЛОРОЗМІРНИХ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ, ВЕКТОР ОЗНАК, ФРАКТАЛЬНА РОЗМІРНІСТЬ.....	35
2.1 Модель комплексного застосування заходів для виявлення безпілотних літальних апаратів	35
2.2 Отримання вектора ознак на основі мел-кепстрального методу.....	38

2.3	Методи дослідження фрактальної розмірності сигналів безпілотних літальних апаратів на основі показників Херста і їх використання як елементи вектора ознак.....	45
2.4	Алгоритми і технологія розрахунку показника Херста.....	51
3	РОЗРОБКА МЕТОДУ ІДЕНТИФІКАЦІЇ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ПО ЇХ АКУСТИЧНОМУ ВИПРОМІНЮВАННЮ.....	55
3.1	Акустичний портрет мел-кепстрального методу виявлення безпілотних літальних апаратів	55
3.2	Ідентифікація кепстрів за коефіцієнтом кореляції.....	61
	Висновки.....	68
	Перелік посилань.....	70
	ДОДАТОК А. Графічний матеріал.....	74
	ДОДАТОК Б. Відомість кваліфікаційної роботи.....	86

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,
СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

БПЛА	–	безпілотний літальний апарат;
ЕМ	–	електро-магнітний;
РЛС	–	радіолокаційна станція;
ЕД	–	електричний двигун;
ДВЗ	–	двигун внутрішнього згорання;
ЕПР	–	ефективна площа розсіювання;
ІЧ	–	інфрачервоний;
ФР	–	фрактальна розмірність;
MFCC	–	Mel-Frequency Cepstral Coefficients;
СКВ	–	середньоквадратичне відхилення;
ШПФ	–	швидке перетворювання Фур'є;
АВ	–	акустичне випромінювання;
ТВД	–	турбогвинтовий двигун;
ПД	–	пропелерний двигун;
СУ	–	силова установка;
ТРД	–	турбореактивний двигун;
ТРДД	–	турбореактивний двоконтурний двигун;
ГТД	–	газотурбінний двигун;
ТС	–	тестовий сигнал.

ВСТУП

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) за останні роки з нешкідливих іграшок перетворилися на серйозні пристрої, здатні виконувати багато різних завдань. Бурхливий розвиток у провідних країнах світу інформаційних технологій неминуче призвело до переосмислення концепцій застосування безпілотних літальних апаратів, шляхів подальшого їх розвитку, удосконалення корисного навантаження та надання їм багатоцільового характеру. Найбільш поширені сфери застосування БПЛА: перевезення малогабаритного вантажу, геодезія та картографування місцевості, у тому числі аерофотозйомка та відеозйомка.

Для забезпечення безпеки повітряного простору від незаконного проникнення на територію, що охороняється, або приватне володіння існують різні засоби та методи для виявлення та ідентифікації, а також подальшого перехоплення та нейтралізації загрози.

Одним з таких методів є метод акустичного зондування повітряного простору території, що охороняється. Використання акустичного методу дозволяє аналізувати сигнал для ідентифікації БПЛА по ряду характерних ознак містяться в спектрі акустичного сигналу.

Найбільш поширені системи ідентифікації БПЛА по акустичних сигналах, як ознаки використовуються вектори кепстральних коефіцієнтів, такі як: метод кепстральних коефіцієнтів на шкалі мел (MFCC), метод кепстральних коефіцієнтів лінійного передбачення (LPCC), метод коефіцієнтів перцептивного лінійного передбачення (PLP). Метод кепстральних коефіцієнтів на шкалі мел MFCC не поступається методу PLP і LPCC за якістю розпізнавання сигналів, але при цьому є більш простим у реалізації.

При побудові системи виявлення БПЛА необхідне вивчення характеристик БПЛА, порядок їх застосування, визначити послідовність обробки отриманих даних, скласти класифікацію БПЛА.

Залежно від того, до якої групи належить БПЛА, він має різну потужність двигуна, кількість двигунів, тип двигуна, ті характеристики, які безпосередньо впливають на рівень акустичного сигналу, що випромінюється від БПЛА. Кожна група має різні особливості, що дозволяє скласти набір характерних ознак для кожної групи і використовувати їх для побудови системи розпізнавання та виявлення.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ПРИСВЯЧЕНИХ ДОСЛІДЖЕННЮ ХАРАКТЕРИСТИК АКУСТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ БПЛА, АНАЛІЗУ МЕТОДІВ ЇХ ВИЯВЛЕННЯ ТА РОЗПІЗНАВАННЯ

1.1 Огляд методів ідентифікації акустичних сигналів

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) є багатофункціональними пристроями, вони знайшли своє застосування, в цивільній авіації виконуючи різні завдання, такі як перевезення малогабаритного вантажу, геодезія та картографування місцевості, у тому числі аерофотозйомка та відеозйомка.

Незважаючи на корисність даних пристроїв, існують і негативні сторони масового поширення таких дешевих засобів, що дозволяють безкарно проникати на закриту територію, запровадити несанкціонований моніторинг об'єктів і територій державної ваги, внаслідок цього й збільшені кількості випадків вторгнення БПЛА в особисте життя.

Для забезпечення безпеки повітряного простору застосовують різні системи виявлення та ідентифікації БПЛА. Одним із напрямків у виявленні БПЛА є акустичне спостереження. Шум БПЛА створюваний гвинтами є істотною ознакою, що демаструє. Створення та вдосконалення методів виявлення, пеленгації та розпізнавання малих БПЛА шляхом прийому та обробки звукових сигналів є актуальним завданням.

Розпізнавання акустичних сигналів включає два основних етапи: попередню обробку сигналу і його класифікацію. На етапі попередньої обробки вихідний акустичний сигнал перетворюється на вектори ознак, на основі яких потім буде проведена класифікація [6].

Цей етап може включати наступні кроки:

- перетворення сигналу з аналогової форми на цифрову;
- застосування фільтрів для придушення шумів;

- виділення меж акустичного сигналу;
- виділення ознак сигналу.

Найбільш поширеними ознаками для систем ідентифікації акустичних сигналів є:

- частота основного тону;
- частота формант;
- кепстральні коефіцієнти.

Перші дві ознаки використовуються в основному в експертних та напівавтоматичних системах ідентифікації акустичних сигналів. У більшості автоматичних систем ідентифікації сигналів як ознаки використовуються вектори кепстральних коефіцієнтів:

- лінійно-частотних кепстральних коефіцієнтів (LFCC, Linear Frequency Cepstral Coefficients), одержуваних за спектром Фур'є;
- крейп-частотних коефіцієнтів (MFCC, Mel-Frequency Cepstral Coefficients), одержуваних за спектром Фур'є;
- коефіцієнтів лінійного передбачення (LPCC, Linear Prediction Cepstral Coefficients);
- коефіцієнтів перцептивного лінійного передбачення (PLP, Perceptual Linear Prediction) [6].

1.2 Перспективні засоби виявлення безпілотних літальних апаратів

Як і всякий матеріальний об'єкт, БПЛА несе в собі ознаки, що демаскують, які видають його в навколишньому просторі, роблячи помітним для спостереження. Ступінь помітності визначається величиною його сигнатур у радіочастотному, інфрачервоному та видимому спектрах, а також сигнатури акустичної. Сучасні легкі БПЛА мають сигнатури невеликої величини: БПЛА роблять із композитних матеріалів та пластику зі спеціальним забарвленням та з особливою комбінацією шарів, їх невеликі

бензинові та тим більше електричні двигуни мало випромінюють тепла та працюють майже безшумно. Тому для ефективного виконання завдання необхідне одночасне використання декількох способів виявлення [9].

Найбільшу вразливість БПЛА зумовлює наявність електромагнітного випромінювання у них. До ЕМ демаскуючих ознак відносяться:

- сигнали бортового відповідача;
- сигнали радіолокаційних станцій, відображені від корпусу та агрегатів БПЛА;
- сигнали телевізійних ретрансляторів, широкомовних станцій, базових станцій стільникового зв'язку, відображені від БПЛА;
- команди та «доповіді» каналу управління між наземним пунктом управління та БПЛА, а також між БПЛА та супутником-ретранслятором системи навігації;
- сигнали бортової РЛС бокового огляду;
- сигнали системи автоматичної посадки на аеродром;
- канали обміну розвідувальною інформацією.

Основними способами виявлення БПЛА в електромагнітному спектрі є:

- використання камер оптичного діапазону ЕМ хвиль;
- використання тепловізора інфрачервоного діапазону ЕМ хвиль;
- здійснення радіомоніторингу;
- використання радіолокаційних станцій.

Для виявлення об'єктів з температурою, що відрізняється від навколишнього середовища, використовуються інфрачервоні тепловізійні камери, що дозволяє вести спостереження за допомогою за БПЛА навіть в умовах обмеженої видимості і в темний час доби. Для отримання найбільш інформативних та стабільних результатів можливе точне поєднання тепловізійних знімків із видимим зображенням. Для цього застосовується тепловізор та фотокамера для одночасного ведення аерофотозйомки у видимому діапазоні. Отримані інфрачервоні зображення у відтінках сірого

можуть бути перетворені на псевдокольорові, де темним відтінкам відповідають низькі температури, а світлим – високі [9].

Для виявлення БПЛА в оптичному діапазоні ЕМ хвиль існує активні та пасивні методи. Активними методами вважається метод анагліфів та метод визначення координат БПЛА у просторі. Пасивні методи включають до свого складу метод візуального спостереження та метод комбінованого стереоефекту.

Основним засобом виявлення БПЛА є радіолокаційні станції. У ряді випадків БПЛА є складною метою для існуючих РЛС. Ці апарати мають малу ефективну площу розсіювання (ЕПР), через що їх виявлення стає досить складним завданням. Зокрема знижується максимальна дальність виявлення.

Враховуючи встановлення на них антирадарних покриттів, найбільшу ефективність дає застосування двочастинних імпульсних радіолокаторів. Перша група частот в дециметровому діапазоні, друга в сантиметровому виявлення БПЛА [9].

Радіомоніторинг є отримання інформації з використанням технічних засобів на ділянці її проходження лініями радіозв'язку. В основному, включає діяльність з вивчення радіообстановки, пошуку, виявлення і контролю різних каналів зв'язку, інших джерел радіовипромінювань. Завданнями радіомоніторингу є:

- панорамний спектральний аналіз у реальному часі;
- пошук випромінювань від БПЛА, вимірювання їх параметрів, порівняння з базою даних для визначення їх належності;
- запис радіосигналів зі службовими параметрами (частота, час, рівень сигналу, спектрограма тощо) та подальше їх відтворення;
- технічний аналіз радіосигналів у реальному часі та при відкладеній обробці;
- пеленгування БПЛА.

Відмінність від існуючих безпілотних та пілотованих літальних апаратів полягає в тому, що БПЛА мають більшу маневреність навіть у складних умовах рельєфу місцевості. Рух у просторі БПЛА можуть здійснювати на гранично малих висотах, у широкому діапазоні швидкостей (до 400 км/год), у щелинах та ярах, у тіні від місцевих височин та за горизонтом. Тому їх виявлення РЛС є скрутним чи неможливим [9].

Виявлення радіолокаційними методами затруднено, оскільки БПЛА мають низьку помітність, так само особливостями траєкторії польоту (можливість зависання та різким змінам траєкторії), незначними висотами та швидкостями. Візуальне спостереження також не є афективним, до того ж має ряд обмежень фізіологічного характеру спостерігачів. Таким чином, пошук нових підходів до виявлення літальних апаратів, у тому числі БПЛА, з подальшою ідентифікацією та знешкодженням є актуальним завданням.

Одним із таких напрямків є акустичний або інфразвуковий спостереження. Головною перевагою застосування акустичних засобів виявлення літальних апаратів, у тому числі БПЛА, є робота в пасивному режимі, що забезпечує скритність їх застосування, а тим самим безпеку обслуговуючого персоналу. Шум гвинта літального апарату утворюється, в основному, внаслідок силової взаємодії лопатей гвинта з навколишнім середовищем (повітрям) у процесі створення тяги. Генерація акустичних випромінювань також може відбуватися і при аеродинамічній взаємодії лопатей з турбулентними утвореннями в потоці, що набігає [9].

1.3 Акустичні шуми природного та антропогенного походження

Для проведення акустичних вимірювань та забезпечення необхідної якості отриманих результатів розглянемо акустичні шуми природного та антропогенного походження.

З розвитком обчислювальних систем, засобів накопичення, обробки і передачі інформації, стала можливою побудова систем моніторингу, заснованих на використанні вторинних електромагнітних і власних акустичних випромінювань об'єктів природного та штучного походження. Для вирішення даного завдання необхідно знати акустичні властивості атмосфери, шумові характеристики як природних процесів, так і шумів, пов'язаних з діяльністю людини, функціонуванням об'єктів техніки, промислових та інфраструктурних об'єктів. Особливий інтерес представляють широкосмугові акустичні імпульси. Акустичне поле будь-якого складного об'єкта техніки формується як суперпозиція акустичних полів окремих джерел випромінювання. При цьому можливе екранування випромінювання окремих джерел елементами самого об'єкта. Поширення шуму в атмосфері і поблизу поверхні землі супроводжується рядом ефектів, що призводять до зміни інтенсивності і спектрального складу випромінювання. Так основними джерелами шуму для літака є його рушії (повітряні гвинти - для літаків з турбогвинтовим двигуном (ТВД) і пропелерним двигуном (ПД), реактивні струмені силової установки (СУ) - для літаків з турбореактивним двигуном (ТРД) і турбореактивним двоконтурним двигуном (ТРДД), лопаткові машини (вентилятор, компресор, турбіна) газотурбінного двигуна (ГТД), елементи планера літака (шасі, механізація крила). Лопаткові машини ГТД генерують випромінювання з дискретними і безперервними по частоті спектрами. За інтенсивністю домінує випромінювання з дискретним спектром на гармоніках частоти обертання лопаток робочих коліс (частоти 1000...4000 Гц) і на гармоніках роторної частоти (надзвукові вентилятори, область частот 500...2000 Гц). Реактивний струмінь генерує безперервне за частотою випромінювання із максимальною спектральною щільністю потужності в області низьких частот ($f_{\text{макс}} = (S_h (U_0 / d)$, где $(S_h = 0.2-0.3$ – число Струхаля, $(U_0$ – швидкість витікання струменя, d – діаметр сопла реактивного струменя).

Планер літака є джерелом широкосмугового шуму з максимальною спектральною щільністю в області середніх частот. Такі міркування справедливі і для вертольотів. У колісної та гусеничної наземної техніки основними джерелами шуму є силова установка, елементи трансмісії, елементи ходової (для гусеничних машин), елементи вихлопної системи. Для різних компонентів акустичного поля наземної техніки характерні різні діаграми спрямованості. Поширення шуму силової установки, як правило, пов'язано з напрямком викиду вихлопної системи. Шуми ходової і трансмісійних систем мають кругову діаграму. Рівень зовнішнього шуму може досягати значень 90 дБ. Основна енергія акустичного сигналу знаходиться в смузі частот обертання колінчастого валу силової установки. Залп рушниці або гармати є широкосмуговим акустичним імпульсом, який представляє собою суперпозицію великої кількості гармонік. При моделюванні поширення такого сигналу в атмосфері необхідно враховувати енергетичні втрати [10].

Оскільки коефіцієнт поглинання звуку залежить від його частоти, то й амплітуда кожної зі складових широкосмугового сигналу гармонік буде змінюватися з відстанню за своїм законом. Таким чином, при поширенні широкосмугового акустичного імпульсу в атмосфері крім загального зменшення амплітуди буде відбуватися зміна його форми. Широкосмуговий акустичний імпульс можна розглядати як аперіодичну функцію звукового тиску від часу, що обертається в нуль на безкінечності і уявити у вигляді інтеграла Фур'є. Для спрощення розрахунків покладається, що звук поширюється в однорідному об'ємі повітря, в якому встановилися нормальні умови: температура - 293,15 К, тиск – 1013 мбар, вологість - 80%. В цьому випадку вертикальний градієнт коефіцієнта поглинання звуку являє собою лінійну залежність від відстані [10].

1.4 Особливості акустичного випромінювання безпілотних літальних апаратів

Шум гвинта літального апарату утворюється, в основному, в результаті силової взаємодії лопастей гвинта з оточуючим середовищем (повітрям) в процесі створення тяги і при витісненні повітря з фіксованого об'єму середовища лопастями. Генерація акустичного випромінювання може також відбуватися і при аеродинамічній взаємодії лопастей з турбулентними утвореннями в набігаючому потоці. У відповідності з цим шум малонавантаженого гвинта поділяють на шум обертання і широкосмуговий шум. До точки спостереження будуть доходити імпульси, викликані проходженням кожної лопасті, що збурює повітря [11].

Дані збурення відбуваються стільки разів, скільки лопастей має гвинт. Оскільки шум обертання має визначену частоту, то про шум гвинта можна говорити як про звук певного тембру, тобто в ньому будуть існувати гармоніки. Аналіз повітряного гвинта, що має N лопастей і обертається з кутовою швидкістю Ω , проводять з точки зору періодичних динамічних систем. Для однієї лопасті період складає $T = 2\pi/\Omega$. В безрозмірному часі, що вимірюється величиною азимуту ε , період дорівнює 2π . Для гвинта період складатиме $T = 2\pi/N\Omega$. Акустичний сигнал БПЛА представляє собою суму гармонік з частотами, кратними частоті обертання ротора або колінвала двигуна F . Амплітуди гармонік зменшуються зі збільшенням частоти [11].

Причому в режимі стаціонарного польоту (рівномірний прямолінійний рух, двигун працює в одному режимі) амплітуда кожної наступної гармоніки при збільшенні її частоти менша за амплітуду попередньої гармоніки. Під час зміни режиму роботи двигуна або під час виконання маневру відбувається зміна частоти акустичного випромінювання. В останньому випадку вона зумовлена ефектом Доплера. Також при виконанні маневру змінюється

орієнтація БПЛА відносно точки спостереження і через спрямованість акустичного випромінювання змінюється інтенсивність акустичного поля в точці прийому. При вищевказаних умовах амплітуди деяких вищих гармонік можуть перевищувати амплітуди низькочастотних гармонік (в переважній же більшості випадків перша гармоніка має найбільшу амплітуду). Тому в загальному випадку амплітуди гармонік представляють собою випадкові величини. Фази гармонік також є випадковими величинами, розподіленими за рівномірним законом. Оскільки основним джерелом акустичного шуму БПЛА з електричним двигуном (ЕД) є шум гвинта, то математична модель акустичного випромінювання БПЛА за відсутності шумів може бути представлена у наступному вигляді:

$$x_{\text{ЕД}}(t) = \sum_{m=1}^M A_m \cos(2\pi N F_m t + \varphi_m), \quad (1.1)$$

де M – кількість гармонік акустичного випромінювання; A_m – амплітуда m -тої гармоніки; N – кількість лопастей гвинта; φ_m – фаза m -тої гармоніки. Дана модель була створена на основі проведених вимірювань та аналізу акустичних сигналів БПЛА і подальшої статистичної обробки отриманих результатів [11].

Спектральний аналіз прийнятих реалізацій сигналів проводився за допомогою періодограми. На рис. 1.1 представлено періодограму акустичного сигналу БПЛА з ЕД і повітряним гвинтом з трьома лопастями. Частота дискретизації сигналу $f_s = 8$ кГц, довжина швидкого перетворення Фур'є складає $N = 512$.

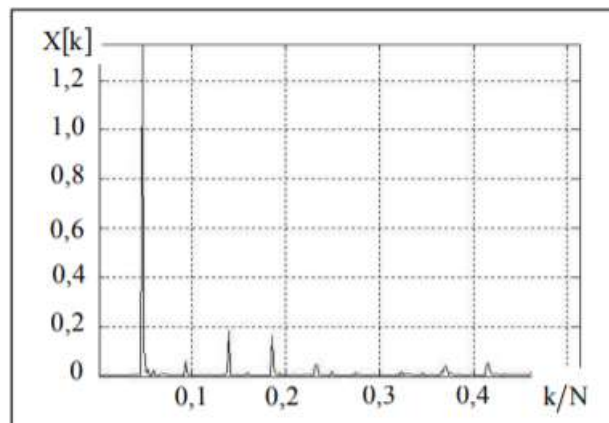


Рисунок 1.1 – Періодограма акустичного сигналу БПЛА з ЕД і повітряним гвинтом з трьома лопастями [11]

Основним джерелом шуму БПЛА з двигуном внутрішнього згорання (ДВЗ) є сам двигун. Другорядним джерелом шуму виступає повітряний гвинт. Модель його акустичного сигналу можна записати у вигляді:

$$x_{\text{ДВЗ}}(t) = x_{\text{ДВ}}(t) + x_{\text{ГВ}}(t), \text{ де } x_{\text{ДВ}}(t) = \sum_{k=1}^K A_k \cos(2\pi N F_k t + \varphi_k); \quad x_{\text{ГВ}}(t) = x_{\text{ЕД}}(t); \quad (1.2)$$

A_k – амплітуда k -ої гармоніки; K – кількість гармонік акустичного випромінювання ДВЗ; φ_k – фаза k -ої гармоніки. Для БПЛА, що має двотактний ДВЗ, гвинт з двома лопастями, гармоніки акустичного випромінювання, номери яких кратні двом (парні), матимуть амплітуду більшу, ніж сусідні гармоніки (непарні). Якщо ж БПЛА має чотиритактний ДВЗ, то гармоніки, номери яких кратні чотирьом, матимуть амплітуди, більші за амплітуди сусідніх гармонік. Це пояснюється додаванням потужностей гармонік акустичного випромінювання двигуна та повітряного гвинта. Виняток з даного правила становить перша гармоніка, яка зазвичай має найбільшу амплітуду [11].

Періодограма акустичного сигналу малорозмірного БПЛА з ДВЗ зображений на рис. 1.2.

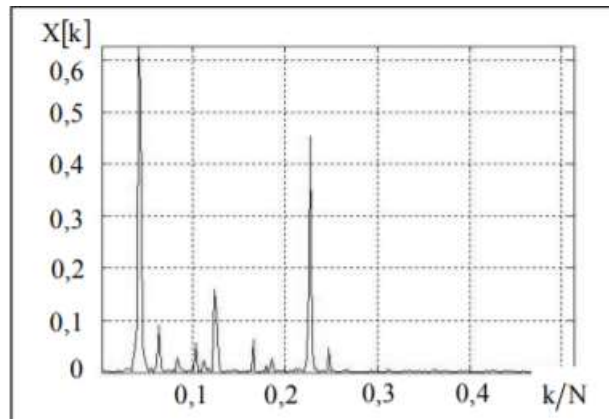


Рисунок 1.2 – Періодограма акустичного сигналу БПЛА з ДВЗ [11]

З підвищенням частоти гармоніки відбувається розширення спектральних ліній акустичного випромінювання двигунів обох типів, оскільки починають проявлятися шуми випадкового походження. Акустичне випромінювання БПЛА мультироторного типу від одного гвинта описується аналогічно БПЛА з ЕД (ДВЗ на БПЛА такого типу як правило не використовуються). Зазвичай частоти кожного з двигунів не співпадають, а відрізняються на деяку незначну величину, що залежить від динаміки руху БПЛА. Тоді математичну модель акустичного випромінювання такого БПЛА можна записати у вигляді:

$$x_{MP}(t) = \sum_{p=1}^P x_p(t), \text{ де } x_p(t) = x_{ED}(t); \quad (1.3)$$

P – кількість гвинтів.

Через різницю частот обертання гвинтів спектральні лінії акустичного випромінювання будуть розширеними в порівнянні зі спектральними лініями акустичного випромінювання БПЛА літакового типу (з одним гвинтом). На рис. 1.3 наведена періодограма акустичного випромінювання БПЛА мультироторного типу з чотирма гвинтами [11].

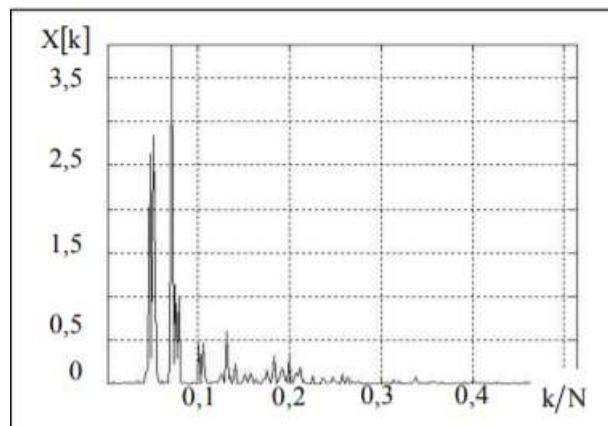


Рисунок 1.3 – Періодограма акустичного сигналу БПЛА мультироторного типу з чотирма гвинтами [11]

Оскільки управління БПЛА мультироторного типу здійснюється саме за рахунок несучих повітряних гвинтів, то саме цим і пояснюється розширення спектральних ліній в порівнянні з БПЛА літакового типу (з одним гвинтом). Зі збільшенням кількості повітряних гвинтів спектр акустичного сигналу такого БПЛА стає ще більше насиченим спектральними лініями (рис. 1.4). З отриманої спектральної оцінки дуже важко зробити висновок, що в зоні огляду акустичного пристрою спостереження знаходиться БПЛА. Для цього необхідно проводити подальшу обробку отриманої періодограми для виявлення кратних гармонічних складових [11].

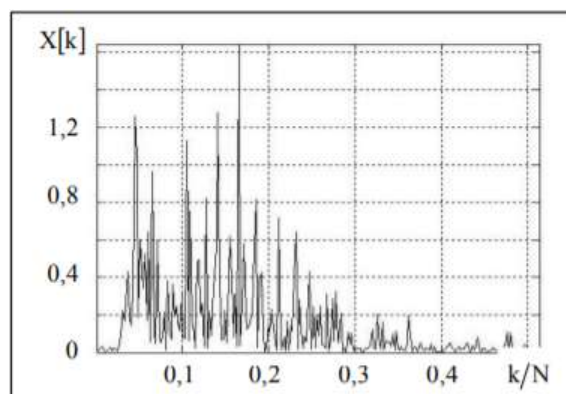


Рисунок 1.4 – Періодограма акустичного сигналу БПЛА мультироторного типу з шістьма гвинтами [11]

В загальному ж випадку сигнали акустичного випромінювання БПЛА є частотно-модульованими і їх моделі для ДВЗ та повітряного гвинта БПЛА літакового типу можна записати у наступному вигляді (без урахування випадкових фазових зсувів гармонік):

$$S_{\text{ДВ}}(t) = \sum_{i=1}^{MK} A_i \sin\{2\pi[F + A_{m_i} \sin(2\pi F_m t)] it\}; \quad (1.4)$$

$$S_{\text{ГВ}}(t) = \sum_{i=1}^K A_i \sin\{2\pi M[F + A_{m_i} \sin(2\pi F_m t)] it\}, \quad (1.5)$$

де A_{m_i} – індекс частотної модуляції акустичного сигналу, що виникає внаслідок зміни режиму роботи двигуна або виконання маневру; F_m – частота модуляції, викликана зазначеними ефектами. Як було зазначено вище, частотний склад акустичного випромінювання БПЛА безпосередньо пов'язаний з параметрами двигуна або повітряного гвинта (їх частотою обертання). Це також стосується і інших літальних апаратів. На рис. 1.5 та 1.6 зображені спектральні оцінки типових акустичних сигналів вертольота та гвинтомоторного літака відповідно. В них також можна простежити гармонічні складові, що пов'язані з частотами обертання їх повітряних гвинтів [11].

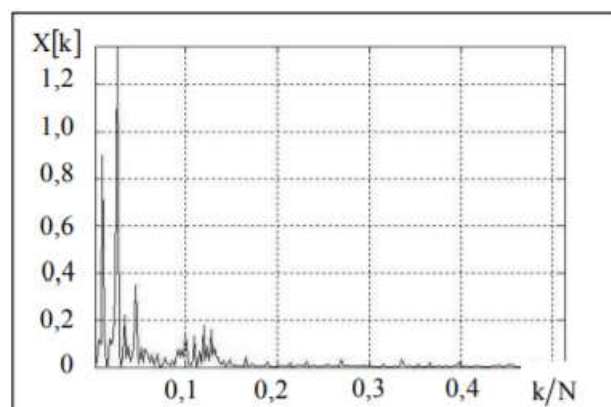


Рисунок 1.5 – Періододіаграма акустичного сигналу вертольота [11]

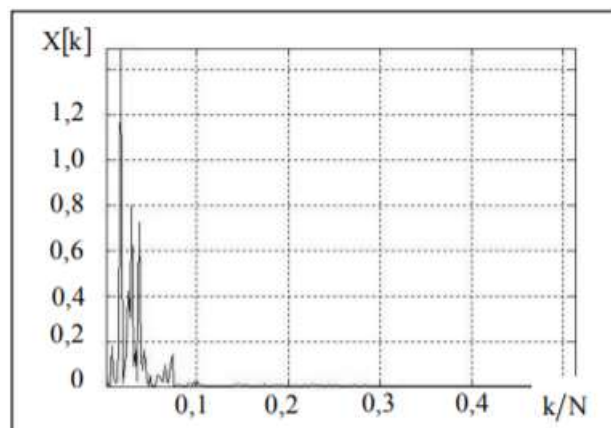


Рисунок 1.6 – Періодограма акустичного сигналу гвинтомоторного літака [11]

Проте основна частина енергії цих сигналів зосереджена в області низьких частот (400-500 Гц). Це в свою чергу дає потенційну змогу виділяти акустичні сигнали безпілотного літального апарату на фоні сигналів інших літальних апаратів шляхом застосування низькочастотної фільтрації [11].

1.5 Інформаційні характеристики акустичних сигналів безпілотних літальних апаратів

Основними джерелами шуму БПЛА є двигун, повітряний гвинт та планер. Оскільки швидкості польоту таких БПЛА дозвукові, то аеродинамічним шумом планера можна знехтувати через його невелику значимість. Джерелами шуму в поршневному двигуні є процеси впуску свіжого заряду (шум впускання), горіння, впуску відпрацьованих газів (шум впуску); механічне переміщення деталей, яке супроводжується ударами та тертям у зчленуваннях та стиках. Останні, разом із процесом горіння є джерелами корпусного шуму. Акустичний шум, зазвичай, збільшується зі збільшенням потужності двигуна.

Електричні двигуни мають нижчі шумові характеристики, проте їх використання обмежується БПЛА малим радіусом дії [12].

Двигуни більшості не реактивних БПЛА є досить невеликими для використання глушників та зниження таким чином акустичної помітності. Крім того, природний та антропогенний шум навколишнього середовища ускладнює виявлення БПЛА за їх акустичним портретом. Але оскільки безпілотники цього класу мають малі ІЧ та радіолокаційні сигнатури, порівняно з пілотованою авіацією, то використання акустичних каналів для їх виявлення стає дуже актуальним. Акустичні сенсори дозволяють наземним засобам здійснювати пошук і виявлення БПЛА в пасивному режимі, знижуючи таким чином можливість визначення супротивником власних позицій. Тому модифікація існуючих акустичних систем пошуку чи створення нових може забезпечити надійний метод виявлення БПЛА.

Для детального аналізу акустичних сигналів використовують ґрати мікрофонів, оскільки використання окремого мікрофона дасть лише грубу оцінку акустичного сигналу. Акустичні антенні решітки можуть ефективно використовуватися для виявлення та супроводу низько літаючих БПЛА на тактичних відстанях. У той самий час акустична решітка, крім просторового накопичення сигналів, дозволяє оцінювати час приходу фронту акустичної хвилі у різні точки простору, що, своєю чергою, сприяє оцінці кута поширення хвилі щодо решітки, тобто. можна обчислити пеленг джерело випромінювання. Для БПЛА середнього розміру з двигуном внутрішнього згоряння дальність виявлення в п'ять разів перевищує цей показник для безпілотника з електричним двигуном [12].

Характеристики спрямованості – одне з найважливіших характеристик джерел шуму авіації. Чинники спрямованості випромінювання різних джерел застосовують у класичних підходах авіаційної акустики до розрахунку очікуваних рівнів шуму літаків біля. Ці методи розрахунку також входять до методики прогнозу меж чутності та помітності малорозмірних безпілотних літальних апаратів з гвинтомоторною установкою.

При гармонійному виявленні аналізуються вузькі смуги частот на коротких часових інтервалах. Сигнал подають у вигляді суми гармонік з невідомими частотами та фазами. Якщо сигнали слабкі, то гармонійний детектор працює надійніше ніж енергетичний [12].

Сумарний спектр АВ тактичного БПЛА обумовлений широкосмуговими та гармонійними складовими. Він складається з гармонійних складових випромінювання від двигуна, випромінювання механічного походження, шуму обертання гвинта, а також низькочастотних і високочастотних складових шуму двигуна з безперервними спектрами по частоті. У шумі силової установки безпілотного літального апарату, що, за відсутності в його вихлопному тракті глушника, включає поршневий двигун повітряного охолодження, визначальним джерелом зовнішнього шуму є поршневий двигун.

Із частотами $f_i = f_0 \times i$, впливають дискретні складові, які кратні частоті запалювання f_0 , де $i = 1, 2, 3 \dots$ – номер відповідної гармонійної складової. На високих частотах значущість періодичних процесів у формуванні спектра АВ двигуна помітно послаблюється, оскільки важливу роль в сумарному акустичному випромінюванні починають грати процеси випадкового походження. Зокрема, вихрова складова може бути суттєвою для шуму вихлопу. Насправді вихлопний тракт двигуна формує в атмосфері послідовність імпульсів тиску, частотний спектр якого представлений на рис. 1.7.

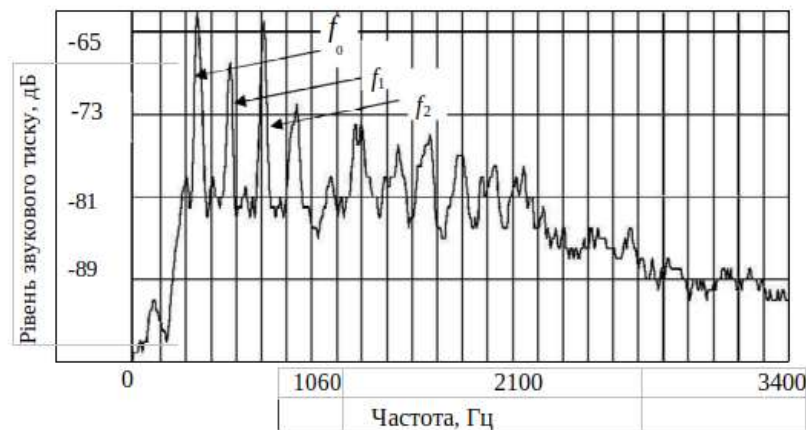


Рисунок 1.7 – Типовий спектр акустичного випромінювання роботи силової установки БПЛА [12]

Інший інформаційною характеристикою акустичних сигналів БПЛА, використовуваний їхнього розпізнавання, є фазовий портрет цих сигналів.

Геометричну дальність виявлення акустичних сигналів визначають зоною акустичної освітленості, отриманої в результаті побудови променевої картини, яка залежить від стратифікації атмосфери, рельєфу поверхні, що підстилає, висоти джерела звуку і характеристик його спрямованості [12].

Для побудови первинних ознак звукового образу БПЛА прийняті пасивним содаром звукові коливання БПЛА перетворюються на електричний сигнал, що представляє собою реалізацію випадкового процесу, опис якого може бути дано енергетичним спектром. Тому інформаційними ознаками звукового образу БПЛА можуть бути оцінки спектральних коефіцієнтів, обумовлені дискретної реалізації, що містить задану кількість відліків. Перехід до вторинних інформаційних ознак здійснюється шляхом побудови коварійної матриці спектральних коефіцієнтів та її діагоналізації.

Після проведених розрахунків набір ознак, що надійшов на вхід системи, відповідає деякому класу, якщо середнє значення коефіцієнта подібності по всіх парах векторів, що злічуються, більше певної порогової величини. Проведені теоретичні дослідження дозволяють розробити модуль формування

колекції звукових образів БПЛА та модуль, що реалізує правило прийняття рішень [12].

При проведенні акустичних досліджень великого шумового впливу завдає вітер. Енергія вітру яскраво виражена на частотах до 30 Гц і досягає 80-100 Гц, а починаючи з 2 кГц спектр стає близький до рівномірного.

Негативний вплив вітру можна зменшити низькочастотною фільтрацією (як правило, гармонійні складові вітру лежать у нижчих частотах, ніж БПЛА), але шуми вітру можуть його маскувати при слабкому сигналі БПЛА. В такому випадку необхідно розглянути взаємно-кореляційні властивості шуму вітру та сигналу у вікнах аналізу. Взаємно-кореляційні властивості також доречно застосувати при спостереженні акустичних сигналів БПЛА на фоні дощу. Оскільки дощ створює перешкоди в більш широкій смузі частот і в такому випадку низькочастотна фільтрація не ефективна.

Висновок на основі проведеного аналізу можна зробити такий, що при аналізі спектральних характеристик АВ безпілотного літального апарату необхідно застосувати смугову фільтрацію з верхньою частотою в межах 3,5 кГц та нижньою частотою зрізу близько 150 Гц [12].

1.6 Метод фрактальної розмірності для ідентифікації безпілотних літальних апаратів

Через те, що в ІЧ, оптичному та радіолокаційному діапазонах БПЛА є малопомітними, ми зацікавлені на їх виявленні за акустичним каналом. Робота БПЛА за аудіо каналом ускладнена широкою смугою частот та невеликим рівнем звукової потужності, а також невизначеність структури перешкод та акустичних сигналів.

Дослідження складних коливань, до яких відносяться і акустичні сигнали БПЛА, шляхом аналізу відповідних фазових портретів та ФР дає більше інформації, ніж спостереження часових реалізацій і спектрів. В

результаті очікується більше інформації, ніж при спектральному аналізі та спостереженні часових реалізацій.

Розроблення та дослідження алгоритмів виявлення акустичних сигналів БПЛА на основі аналізу ФР є актуальним завданням, вирішення якого дозволить проводити надійне виявлення БПЛА пасивними акустичними системами [13].

Фрактальний аналіз дозволяє оцінити інтегральні характеристики сигналів, які не залежать від моменту приходу і розраховується для всієї довжини сигналу. Для більшості часових рядів аналітичне знаходження ФР D є неможливим, тому її визначають чисельно, найчастіше через величини, пов'язані з нею простим співвідношенням. Одним із основних методів визначення ФР числових рядів на сьогоднішній день є обчислення показника Херста. Даний спосіб дослідження фрактальних часових рядів називається RS-аналізом та ґрунтується на аналізі відношення розмаху параметра R (різниці між його найбільшим і найменшим значеннями на відрізку) до його середньоквадратичного відхилення (СКВ) S показника Херста H , який широко застосовують завдяки своїй стійкості. Цей показник має мінімальні припущення про сигнал і може класифікувати часові ряди, відрізняючи випадковий ряд від не випадкового, навіть якщо значення відліків випадкового ряду розподілені не за нормальним законом. Для гаусових сигналів показник Херста пов'язаний з ФР D співвідношенням $D = 2 - H$. Для отримання надійної чисельної оцінки ФР необхідною є значна кількість даних (порядку 10^3 10^4 значень), тому отримані результати дають уяву лише про загальні властивості ряду на великих масштабах, всередині яких часовий ряд може кілька разів змінити характер своєї поведінки. ФР, як правило, є додатнім числом і відображає складність форми сигналу. При двомірному представленні прийнятого сигналу, величина фрактальної розмірності зберігається в межах $1 \leq D \leq 2$ [13].

1.7 Постановка задачі та дослідження фрактальності акустичних сигналів безпілотних літальних апаратів

Задачею дослідження представленої атестаційної роботи є дослідження методів виявлення та розпізнавання сигналів акустичного випромінювання малорозмірних БПЛА. Проаналізувавши існуючі методи, було визначено їх переваги та недоліки. Для виконання даної задачі вирішено провести детальніші дослідження методів статистичних характеристик ФР акустичних сигналів БПЛА, шуму навколишнього середовища та сторонніх акустичних сигналів, які можуть зустрічатися в процесі спостережень за БПЛА та спричиняти перешкоди для виявлення БПЛА. Провести аналіз та виділити ознаки БПЛА, привести варіанти можливості розпізнавання БПЛА на фоні різноманітних шумів та завад. Також, в рамках вирішення поставленої задачі необхідно провести аналіз можливості ідентифікації методами фрактальної розмірності для використання фазових портретів БПЛА [13].

Для ідентифікації БПЛА існує досить багато методів, таких як аналіз фазових портретів, метод мел-частотних кепстральних коефіцієнтів (рис 1.8), аналіз спектральної щільності потужності, аналіз фазових портретів.

Для дослідження ефективності аналізу акустичних характеристик БПЛА необхідно сформувати фонотеку тестових акустичних сигналів з різними режимами та умовами польоту БПЛА в умовах студії та міста, провести дослідження польоту БПЛА на різних висотах та дистанціях. Зробити записи різноманітних акустичних завад: шум вітру, дощу, розмовної мови, залізничного транспорту, міського транспорту [13].

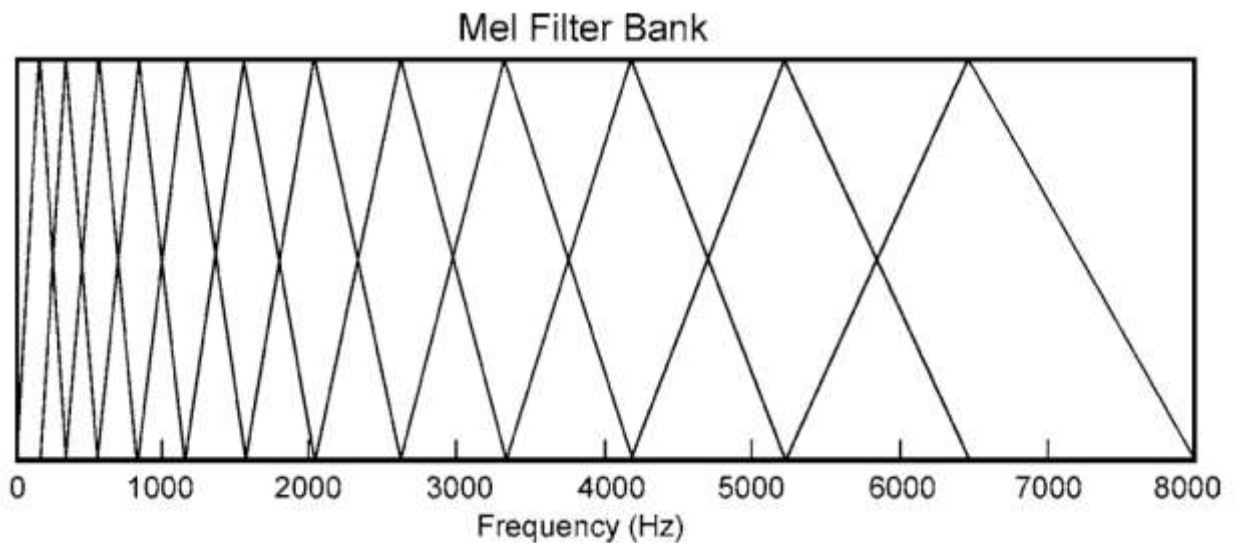


Рисунок 1.8 – Банки мел фільтрів [13]

Банки фільтрів мел повинні являти собою серію трикутників, які стають ширшими, а їхні вершини знаходяться в тому самому місці.

За допомогою досліджень математичних розрахунків ФР досліджуваних акустичних сигналів, реалізованих на основі розпізнавання та ідентифікації БПЛА отримаємо результати поставленої задачі [13].

1.8 Огляд існуючих методів виявлення малорозмірних безпілотних літальних апаратів

Сучасні легкі безпілотники мають сигнатури невеликої величини: БПЛА роблять із композитних матеріалів та пластику зі спеціальним забарвленням і з особливою комбінацією шарів, їх невеликі бензинові і електричні двигуни мало випромінюють тепла і працюють майже безшумно. Тому, для ефективного виконання завдання необхідне одночасне використання кількох способів виявлення. Найбільшу вразливість БПЛА обумовлює наявність електромагнітного випромінювання. До ЕМ демаскуючим ознакам відносяться:

- сигнали радіолокаційних, акустичних станцій, відображені від корпусу та агрегатів БПЛА;
- сигнали бортового відповідача;
- команди та «доповіді» каналу управління між наземним пунктом управління та БПЛА, а також між БПЛА та супутником-ретранслятором системи навігації;
- сигнали телевізійних ретрансляторів, широкомовних станцій, базових станцій стільникового зв'язку, відбиті від БПЛА;
- канали обміну розвідувальною інформацією;
- сигнали бортової РЛС бокового огляду;
- сигнали системи автоматичної посадки на аеродром.

Основними способами виявлення БПЛА в електромагнітному спектрі є:

- використання камер оптичного діапазону ЕМ хвиль;
- використання тепловізора інфрачервоного діапазону ЕМ хвиль;
- використання радіолокаційних, акустичних станцій;
- здійснення радіомоніторингу.

Для виявлення об'єктів з температурою, що відрізняється від навколишнього середовища, використовуються інфрачервоні тепловізійні камери, що дозволяє вести спостереження за допомогою за БПЛА навіть в умовах обмеженої видимості, та у темний час доби. Для отримання найбільш інформативних та стабільних результатів можливе точне поєднання тепловізійних знімків із видимим зображенням. Для цього застосовується тепловізор та фотокамера для одночасного ведення аерофотозйомки у видимому діапазоні. Отримані інфрачервоні зображення у відтінках сірого можуть бути перетворені у псевдокольорові, де темним відтінкам відповідають низькі температури, а світлим – високі [13].

Для виявлення БПЛА в оптичному діапазоні ЕМ хвиль існує активні та пасивні методи. Активними методами вважається метод анагліфів та метод визначення координат БПЛА у просторі. Пасивні методи включають до свого

складу метод візуального спостереження та метод комбінованого стереоефекту.

Основним засобом виявлення БПЛА є радіолокаційні, акустичні станції. У ряді випадків БПЛА є складною метою для існуючих РЛС. Ці апарати мають малу ефективну площу розсіювання (ЕПР), через чого їхнє виявлення стає досить складним завданням. Зокрема, знижується максимальна дальність виявлення. Розрахункові дальності виявлення БПЛА станціями радіолокації, при різних значеннях ЕПР БПЛА, складають:

- РЛС метрового діапазону – 8-14 км для БПЛА з ЕПР близько $0,1 \text{ м}^2$ та 0,1-1,5 км для БПЛА з ЕПР, що дорівнює $0,01 \text{ м}^2$;
- РЛС дециметрового діапазону – 9-16 км ($\text{ЕПР} = 0,1 \text{ м}^2$) та 0,8-2,0 км ($\text{ЕПР} = 0,01 \text{ м}^2$);
- РЛС сантиметрового діапазону – 12-25 км та 1,4-2,8 км.

Враховуючи встановлення на них антирадарних покриттів, найбільшу ефективність дає застосування двочастинних імпульсних радіолокаторів.

Перша група частот у дециметровому діапазоні, друга у сантиметровому для виявлення БПЛА. Радіомоніторинг є отримання інформації з використанням технічних засобів на ділянці її проходження лініями радіозв'язку. В основному, включає діяльність з вивчення радіообстановки, пошуку, виявлення і контролю різних каналів зв'язку, інших джерел радіовипромінювань. Завданнями радіомоніторингу ефіру є:

- панорамний спектральний аналіз у реальному часі;
- пошук випромінювань від БПЛА, вимір їх параметрів, порівняння з базою даних визначення їх приналежності;
- запис радіосигналів зі службовими параметрами (частота, час, рівень сигналу, спектрограма, тощо) і подальше їх відтворення;
- технічний аналіз радіосигналів у реальному часі та при відкладеній обробці [13].

2 АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ АКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ МАЛОРОЗМІРНИХ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ, ВЕКТОР ОЗНАК, ФРАКТАЛЬНА РОЗМІРНІСТЬ

2.1 Модель комплексного застосування заходів для виявлення безпілотних літальних апаратів

На ринку представлені як комплекси, що працюють на одному з методів виявлення, так і поєднуючі декілька методів, що є, врахуванням складності завдання виявлення БПЛА, найкращим рішенням. Найбільш ефективним рішенням є комбінування основних способів виявлення: використання радіолокаційних, акустичних засобів, обладнання радіомоніторингу, ІЧ та оптичних відеокамер. Даний варіант є дорогим, але кожен із методів доповнює інший, і, таким чином, зменшується кількість помилкових виявлень та збільшується загальна ефективність системи [1]. Акустичний канал більш обмежений в порівнянні з радіолокаційним, але має більшу інформативність за певними ознаками та може бути доповнений для ідентифікації. Алгоритм роботи наступний: радар виявляє БПЛА, паралельно з цим комплекс приймає сигнали, і шукає серед них підозрілі, далі відеокамери наводяться на передбачуваний об'єкт і приймається рішення про передачу команди на придушення, перехоплення чи знищення цілі.

Основна ідея даного комплексу технічних засобів полягає в децентралізованому розташуванні модулів, що безперервно обмінюються один з другом по зашифрованих та завадостійких каналах зв'язку службового інформацією, що сприяє підвищенню ефективності та складності виведення з ладу чи фізичного знищення даних модулів. Завдяки тому, що комплекс складається з блоків, можливе створення необхідної конфігурацій для специфіки виконання конкретної задачі. Також, комплекс має мати стійкість до сторонніх електромагнітних впливів і підсистему активної протидії

загрозам, що полягає в здатності до самостійного прийняття рішення про заходи у відповідь або передачу команд на забезпечення допомоги та підтримки. Для контролю над рішеннями, прийнятими комплексом виявлення БПЛА, і завдання необхідних параметрів бере участь оператор [1].

Завданням модуля радіолокаційних, акустичних засобів є безпомилкове виявлення БПЛА на максимально великій відстані в умовах зі складною обстановкою радіолокації і зібрати інформацію, необхідну для проведення аналізу, до якої відноситься швидкість БПЛА, дальність до нього, а також розпізнавання типу об'єкта. Загальна ефективність системи залежить від індивідуальних характеристик передавача, антени, приймача, злагодженої роботи з-поміж них, і від методу радіолокації. Враховуючи специфіку поставленого завдання, яке необхідно вирішити, необхідно знайти компроміс між потужністю передавача та діапазону хвиль, розмірами антени та діаграми її спрямованості, здібностях приймача обробити інформацію що надходить та вибору відповідного методу радіолокації, такого як частотний, фазовий та імпульсний [1]. Завдяки оптимальній комбінації матеріально-технічних ресурсів можливе виявлення БПЛА на великих дистанціях, а також можливість розпізнавати дрони зі слабовираженими розвідними ознаками (наступні автономно за польотним завданням або працюють на нетипових радіочастотах).

Модуль із засобами радіомоніторингу виконує завдання виявлення передавачів, встановлених на БПЛА, визначення їх типу, основних характеристик та збору інформації для здійснення перехоплення керування. Основними та визначальними факторами ефективності функціонування системи є характеристики радіоприймального, акустичного пристрою та антени, а також вибір методу радіомоніторингу – пошукового чи безпошукового. Пошуковий спосіб полягає у пошуку інформативного сигналу в заданій смузі частот, який поділяється на повільний пошук, середній та швидкий.

При безошуковому способі пошук ведеться на широкому діапазоні частот, що поділяється на інтерференційний, з використанням одноканальних та багатоканальних приймачів. Кожен із способів пошуку має свої переваги та недоліки, і вибір залежить від специфіки розв'язуваного завдання.

Радіоприймальний, акустичний пристрій має бути обладнаний декодерами, демодуляторами та засобами для проведення автоматичного та ручного технічного аналізу прийнятих сигналів. Однією з можливостей поліпшення системи є створення БПЛА-розвідника, з комплексом розвідувальних засобів ЕМ спектру, здатних, за потребою, підлетіти ближче до можливої (спірної) мети, та повідомити інформацію у головний вузол безпосередньо або через допоміжні вузли приймально-передаючих автономних антен [1].

Центральним вузлом функціонування інтегрованого комплексу, на який безперервно в автоматичному режимі приходять вся оброблена інформація від модулів, є комп'ютер у захищеному виконанні із встановленим на нього спеціальним програмним забезпеченням, здатним приймати рішення у автоматичному режимі. З рішень це можуть бути такі варіанти:

- передача команди про залучення засобів ІЧ та оптичних камер для підтвердження виявлення мети;
- передача команди на уточнення інформації, що надійшла іншому комплексу, що працює у складі системи виявлення БПЛА;
- передача команди БПЛА, що входить до комплексу системи виявлення БПЛА, для підльоту до передбачуваного місця знаходження для ухвалення рішення про факт виявлення;
- передача команди на придушення, перехоплення чи знищення мети засобам, що входять до складу системи придушення та знищення БПЛА;
- інформування оператора комплексу протидії БПЛА про факт виявлення БПЛА або хибну тривогу [1].

Однією з можливостей до покращення системи є рознесення невеликих приймаючих та передавальних автономних антен на великій площі. Передаючи інформацію на центральний пункт обробки інформації, та зіставляючи з даними головного вузла, приймається рішення про подальші дії. При необхідності дані антени можуть передавати інформацію на декілька центральних пунктів обробки, створюючи таким чином мережу виявлення БПЛА, площа дії якої може досягати сотень або тисяч квадратних кілометрів [1].

2.2 Отримання вектора ознак на основі мел-кепстрального методу

В системах автоматичного розпізнавання АВ безпілотних літальних апаратів виділяють три основних етапи: навчання, розпізнавання та виділення інформаційних ознак. На першому етапі виділяють вектор ознак з вихідного акустичного сигналу, який є компактним описом акустичних характеристик сигналу, що достатньо для розпізнавання. Навчання передбачає отримання набору еталонних векторів ознак АВ для ряду моделей БПЛА при типових режимах роботи гвинтокрилої групи, характеру місцевості і умовах польоту. Порівняння поточного вектора ознак зі збереженими в системі еталонними векторами ознак проводиться на етапі розпізнавання по одному з правил прийняття рішення [3].

Серед існуючих методів ідентифікації безпілотних літальних апаратів розглянемо метод мел-частотних кепстральних коефіцієнтів (MFCC). Цей метод вільно використовується в області діагностики технічних систем та системах розпізнавання мови. До переваг цього методу можна віднести його відносно малий розмір, незалежність отриманого вектору від довжини початкового фрагменту аналізованого сигналу та урахування розкиду характеристик випромінювання об'єкта [2].

Мел-кепстральні коефіцієнти характеризують сигнал за його спектром та амплітудою. Використання MFCC дозволяє стиснути сигнал, таким чином зменшити кількість даних, що потрібні для представлення сигналу. Мел – одиниця висоти звуку, заснована на сприйнятті цього звуку нашими органами слуху. Висота звуку логарифмічно залежить від частоти звуку. Найбільш ефективним є використання мел-шкали для чистого тону, при змішуванні сигналу з шумом спадає ефективність методу. Кепстр є енергетичним спектром функції – це результат зворотного перетворення Фур'є над логарифмом оцінки сигналу [3].

Алгоритм обчислення мел-кепстральних коефіцієнтів складається з наступних кроків: перехід до представлення сигналу в частотній області за допомогою дискретного перетворення Фур'є та обчислення спектру сигналу, розбиття вихідного сигналу на відрізки, логарифмування отриманих коефіцієнтів, отримання мел-частотних спектральних коефіцієнтів, застосування дискретно-косинусного перетворення.

При обробці отриманих аудіо сигналів, для зменшення зовнішніх антропогенних шумів, сигнал треба обробити за допомогою ФВЧ. Потім, провести кадрування сигналу, тобто розділити сигнал на фрагменти певної довжини, а їх спектри залишатимуться відносно незмінними на деякому інтервалі і будуть меншими за час спостереження АВ БПЛА. Після цього проводиться нормалізація сигналу в межах отриманих сегментів. Це необхідно, оскільки на рівень акустичного сигналу впливають режим роботи двигунів, їх кількість, погодні умови, дистанція до мікрофона. Нормалізація дозволяє зменшити діапазон рівнів акустичного сигналу при різних умовах польоту БПЛА. Після нормалізації початковий сегмент розбивається на субсегменти з перекриттям на 75% в межах сегменту (для боротьби зі спотвореннями, що визивають розташовані поруч кадри) [3].

Для зменшення спотворень при спектральному аналізі кожен субсегмент помножується на вагову функцію і обчислюється дискретне перетворення

Фур'є (2.1). В якості вагової функції обрано вікно Хемінга, але можна використовувати і інші види вікон. Застосування вагових функцій дозволяє послабити розтікання структури на межах субсегментів.

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{\frac{-2\pi i}{N} kn}, \quad k \in 0, 1..N-1. \quad (2.1)$$

Індекси k відповідають частоті $f = \frac{F_s}{N}$, де F_s – частота дискретизації сигналу. Для підвищення відношення сигнал / шум здійснюється накопичення спектрів в межах сегмента[3].

Сигнал, представлений в частотній області пропускається через смуговий фільтр з трикутною апроксимацією частотних характеристик. Межі частотної характеристики фільтрів обчислюються в шкалі мел.

Віконна функція для реалізації смугових фільтрів, описується виразом:

$$H_m[k] = \begin{cases} 0 & k < f[m-1] \\ \frac{(k-f[m-1])}{(f[m]-f[m-1])} & f[m-1] \leq k < f[m] \\ \frac{(f[m+1]-k)}{(f[m+1]-f[m])} & f[m] \leq k \leq f[m+1] \\ 0 & k > f[m+1] \end{cases}, \quad (2.2)$$

де m – номер фільтра, $m \in 1..N_F$, N_F - кількість смугових фільтрів.

За формулою (2.3) розраховується енергія сигналу кожної смуги трикутного вікна в логарифмічному представленні:

$$S[m] = \ln(\sum_{k=0}^{N-1} |X[k]|^2 H_m[k]), \quad m \in 1..N_F, \quad (2.3)$$

де k - номер відліку спектра.

Наступним кроком є застосування дискретно-косинусного перетворення для декореляції компонентів і зменшення вихідних параметрів. В результаті

перетворення отримуємо вектор C (вектор ознак), який містить набір мел-частотних кепстральних коефіцієнтів

$$C[n] = \sum_{m=0}^{N_F-1} S[m] \cos\left(\frac{\pi n(m+\frac{1}{2})}{N_F}\right), n \in 1..N_{kk}, \quad (2.4)$$

де N_{kk} - кількість розрахованих мел-частотних кепстральних коефіцієнтів.

Результатом виконання цього алгоритму є заміна значної кількості відліків АВ на набір мел-частотних кепстральних коефіцієнтів.

На порівнянні вектора ознак акустичного випромінювання з вектором ознак, який був сформовано на етапі навчання базується правило прийняття рішень [2]. На методах кореляційного аналізу базується прийняття рішення про приналежність вхідних звукових параметрів, які представлено вектором ознак. Коефіцієнт кореляції між координатами точок простору параметрів акустичних характеристик є мірою ступеню близькості векторів параметрів акустичних сигналів вихідного сигналу C та еталонним вектором ознак CE :

$$R_{C,CE} = \frac{cov(C,CE)}{\sqrt{s_C^2 s_{CE}^2}}, \quad (2.5)$$

де $cov(C, CE)$ – коваріація випадкових величин C і CE , s_C^2, s_{CE}^2 вибіркові дисперсії випадкових величин C і CE .

Метод розпізнання безпілотних літальних апаратів на основі мел-частотних кепстральних коефіцієнтів виявляється не сильно чутливим до шумів навколишньої середовища.

Схема системи ідентифікації особистості на основі голосових даних реалізується за допомогою наступних етапів:

1. Рівень обробки сигналу. Виділення ознак, суттєвих для завдання розпізнавання та формування так званого вектора ознак.

2. Рівень моделі. Дозволяє шляхом побудови математичної моделі проводити зіставлення векторів ознак один з одним та обчислювати ступеня подібності між зареєстрованими ознаками та збереженою моделлю.

3. Рівень ухвалення рішень. Проводить прийняття кінцевих рішень на основі отриманих ступенів подібності, якщо необхідно, заданих порогових значень [2].

На цей час у галузі склався типовий алгоритм попередньої обробки акустичного сигналу після його запису. Оцифрований сигнал розбивається на блоки тривалістю 25-30 мс (позначимо відліки в одному з них x_0, \dots, x_{N-1}). До кожного подібного блоку застосовується вагова функція, а потім дискретне перетворення Фур'є. Прикладом ваговою функцією може служити вікно Хеммінга:

$$w_n = 0,54 - 0,46 \cos\left(2\pi \frac{n}{N-1}\right), \quad n = 0, \dots, N-1, \quad (2.6)$$

де N — Довжина вікна, виражена у відліках.

Вагова функція використовується для зменшення спотворень у Фур'є аналізі, викликаних кінцівкою вибірки. Тоді дискретне перетворення Фур'є зваженого сигналу можна записати у вигляді:

$$x_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n w_n \exp\left(-\frac{2\pi i}{N} kn\right). \quad (2.7)$$

Значення індексів k відповідають частотам:

$$f_k = \frac{F_s}{N} k, \quad (2.8)$$

де F_s — Частота дискретизації сигналу.

Отримане уявлення сигналу в частотній області розбивають на діапазони за допомогою банку трикутних фільтрів (рис 1.8). Межі фільтрів розраховують у шкалі мел. Переклад у мел-частотну область здійснюється за формулою:

$$B(f) = 1127 \ln \left(1 + \frac{f}{700} \right). \quad (2.9)$$

Нехай N_{FB} - кількість фільтрів (зазвичай використовують близько 24 фільтрів); (f_{low}, f_{high}) - Досліджуваний діапазон частот. Тоді цей діапазон переводять у шкалу мел, розбивають на N_{FB} поступово розподілених діапазону, що перекриваються, і обчислюють відповідні межі в області лінійних частот. Позначимо через $H_{m,k}$ – вагові коефіцієнти одержаних фільтрів. Фільтри застосовуються до квадратів модулів коефіцієнтів перетворення Фур'є. Отримані значення логарифмуються:

$$e_m = \ln(\sum_{k=0}^N |x_k|^2 H_{m,k}), \quad m=0, \dots, N_{FB}-1. \quad (2.10)$$

Заключним етапом у обчисленні коефіцієнтів MFCC є дискретне косинусне перетворення

$$c_i = \sum_{m=0}^{N_{FB}-1} e_m \cos\left(\frac{\pi i(m+0,5)}{N_{FB}}\right), \quad i=1, \dots, N_{MFCC}. \quad (2.11)$$

Коефіцієнт c_0 не використовується, оскільки становить енергію сигналу. Кількість коефіцієнтів N_{MFCC} практично вибирають від 12 до 30. На рис. 2.1 наведено приклад графіка мел-кепстральних коефіцієнтів [3].

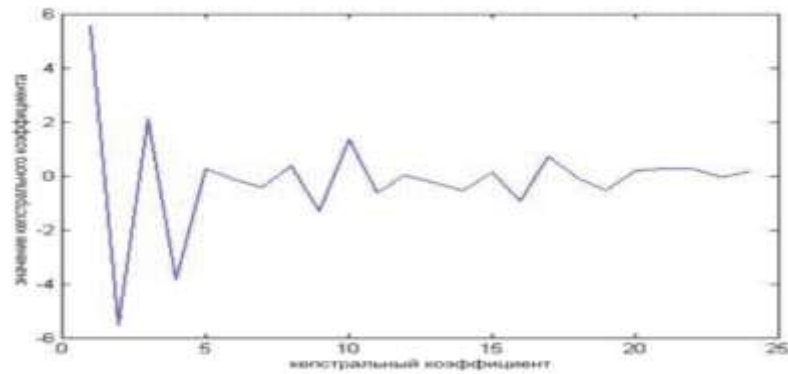


Рисунок 2.1 - Приклад мел-кепстральних коефіцієнтів для фрази «один, два, три» [3]

Для типових акустичних сигналів, що застосовуються під час ідентифікації (коротких парольних фраз типу «один, два, три»), кількість блоків розбиття, для яких ми підраховуємо коефіцієнти MFCC, є плаваючою величиною, що залежить від тривалості вимовлення фрази [2]. Відповідні вектора ознак мають також різну довжину і містять близько кількох тисяч кепстральних коефіцієнтів. У деяких випадках до цих даних можуть додаватися ще й розраховані на основі MFCC значення перших і других похідних часу, що ще більше збільшує довжини векторів.

Існує кілька підходів до фіксації та зменшення довжини результуючого вектора ознак:

- розмір вікна для розбиття сигналу брати не фіксовану довжину для всіх зразків, а розбивати їх на фіксовану кількість вікон, довжини, що розраховується для кожного зразка;

- не розбивати сигнал на вікна, а отримувати вектор ознак значень мел-частотних кепстральних коефіцієнтів для всього сигналу [3]. Для всіх зразків довжина вектора ознак дорівнюватиме заданій кількості кепстральних коефіцієнтів. Опис сигналу стає вкрай грубим;

- наводити всі зразки на етапі передобробки до однієї довжини. Цей метод є неприйнятним у задачі розпізнавання диктора, оскільки вносить спотворення вихідний сигнал.

У цій роботі було запропоновано новий спосіб формування вектора ознак для зразка мовного сигналу на основі частотного розподілу значень, отриманих при застосуванні алгоритму мел-частотних кепстральних коефіцієнтів. Працюватимемо з набором векторів кепстральних коефіцієнтів, розміром $M_x N_{MFCC}$, де M - кількість блоків, на які розбивається сигнал, а N_{MFCC} - кількість розраховуваних мел-частотних кепстральних коефіцієнтів для кожного блоку, що формуються на виході описаного вище за алгоритм. Встановимо кількість інтервалів, у яких необхідно згрупувати значення коефіцієнтів, і навіть встановимо межі цих інтервалів. Потім підраховуємо кількість влучень значень мел-кепстральних коефіцієнтів у кожний інтервал за всіма блоками. Замість набору векторів кепстральних коефіцієнтів отримуємо один вектор, з єдиною для всіх зразків розмірністю, яка значно менша розмірність матриці векторів. Розмірність даного вектор можна змінювати виходячи з необхідної точності частотного розподілу (числа інтервалів кишень при розрахунку частот), а також кількості використовуваних кепстральних коефіцієнтів [2, 3].

2.3 Методи дослідження фрактальної розмірності сигналів безпілотних літальних апаратів на основі показників Херста і їх використання як елементи вектора ознак

Науковою задачею представленої атестаційної роботи є дослідження методів виявлення і розпізнавання сигналів акустичного випромінювання малорозмірних БПЛА. В рамках огляду і аналізу існуючих методів ідентифікації були розглянуті декілька методів (фрактальні методи, методи мел-кепстральних коефіцієнтів, спектрального аналізу).

Для вивчення основних структурних компонентів числових рядів нелінійних динамічних систем широко застосовуються методи спектрального аналізу, методи нормованого розмаху (метод Херста), вейвлет перетворення, обчислення фрактальної розмірності.

Фрактальний аналіз. Останнім часом отримали розвиток методи дослідження часових рядів, згідно яких часові послідовності змінювання досліджуваних сигналів розглядаються як сукупність хаотичних та періодичних процесів. Хаотична компонента в таких сигналах міститься як в змінюванні частот, так і в динаміці форми запису сигналу [17].

Дослідження даного методу становить інтерес зіставленням періодичних та хаотичних компонентів сигналу з однієї сторони та дослідження динаміки хаотичних компонентів з іншої.

Фрактали – це множини, що мають властивість самоподібності, об'єкт, який точно або приблизно збігається з частиною себе самого, тобто ціле має ту ж форму, що й одна або більше частин.

Метод вивчення детермінованих неперіодичних процесів, для яких неможливий довгостроковий прогноз є одним із підходів дослідження хаотичної компоненти, який використовує алгоритм реконструкції дивних аттракторів. Дивні аттрактори можуть бути описані фрактальною розмірністю. Методи визначення фрактальної розмірності досліджуються при наявності у досліджуваної системи аттракторів. Оскільки рішення більшості нелінійних задач являють собою фрактали, фрактальні множини займають важливе місце в теорії динамічних систем [17]. Їх фрактальна розмірність вказує на близькість таких множин до регулярних об'єктів і дозволяє визначити число незалежних змінних, що описують їх.

Метод Херста часто застосовують для порівняння фрактальних властивостей різноманітних процесів. В цьому методі для аналізу часових рядів використовується безрозмірний показник, який визначається відношенням розмаху R накопиченого відхилення від середнього до

середньоквадратичного відхилення S (R/S). Якщо побудувати залежність параметрів (R та S) в подвійному логарифмічному масштабі, можна отримати досліджуваний процес у вигляді фрактальної функції. Визначаємо кутовий коефіцієнт H , який називають показником Херста, апроксимуючи визначену фрактальну функцію прямою лінією.

Показник Херста використовується для визначення основного фрактального параметру процесу – розмірності Хаусдорфа - Безиковича:

$$D = 2 - H.$$

В залежності від значення показника Херста, розглянуті процеси можна поділити на 3 типи:

- антиперсистентні ($0 < H < 0.5$) – для них характерна знакозмінна тенденція в сукупності з відносно високим шумовим рівнем;
- персистентні ($0.5 < H < 1$) – для них характеристик збереження стійкості тенденції у сукупності з відносно низьким шумовим рівнем;
- процеси з відсутністю тренду та ступеню зашумленості яку неможливо врахувати в методі Херста ($H = 0.5$). Такі процеси властиві сигналу білого шуму.

Стаціонарні випадкові сигнали (наприклад, шум з нормальним розподіленням) є максимально зашумленими, а зі збільшенням показника Херста H , зашумленість фрактальних сигналів зменшується. Цей метод дозволяє класифікувати на одній фрактальній площині стаціонарні, нестаціонарні та квазіперіодичні сигнали [17].

Застосування показника Херста для енергетичних та частотних спектрів аналізованих динамічних процесів являє собою гарний приклад комбінованої методики застосування теорії фракталів та вейвлет аналізу для виявлення особливостей часових рядів. При цьому аналізуються множини, що характеризують енергії частотних складових і частотний спектр.

Фазовий портрет. На основі теоретичних даних системи з нелінійною поведінкою, які обумовлені хаотичними компонентами, представляють собою

так звані аттрактори. Тому з метою дослідження акустичних сигналів безпілотних літальних апаратів на предмет хаотичної поведінки потрібно побудувати двомірні проекції систем. Такі дослідження також мають сенс для визначення діаметру аттрактора при обчисленні показника Ляпунова.

При описанні акустичного сигналу кінцевим набором параметрів (n), динаміку сигналу зручно розглядати в деякому абстрактному просторі, осі якого утворені змінними x_1, \dots, x_n . Цей n -мірний простір називають фазовим портретом. Кожному стану динамічної системи відповідають точки в цьому просторі і кожній точці із цього простору відповідає єдиний стан системи. Рух точки в фазовому просторі відповідає зміні стану системи, а траєкторія цієї точки називається фазовою траєкторією [17].

Фазові діаграми являють собою потужні засоби для дослідження хаотичних процесів, тому що відображають поведінку досліджуваних систем чи процесів в геометричній формі. Аттрактори можуть бути періодичними (лімітований цикл), статичними (фіксована точка), квазіперіодичними (тор) та хаотичними. Хаотичні аттрактори також називають «дивними», вони утворюються, коли керуючий параметр перевищує критичні значення.

Вейвлет-аналіз. Термін «вейвлет» з'явився в обігу відносно нещодавно, вейвлет в 1980-х роках запропонували О. Гроссман та Ж. Морле, та застосовується для аналізу властивостей сейсмічних та акустичних сигналів і перекладається як «маленька хвиля». Вейвлет-аналіз застосовується для обробки не стаціонарних сигналів при описі особливостей цих сигналів, стисненні, фільтрації завад [17].

З появою вейвлетів основою представлення складних функцій стала розробка принципово нового базису і класу функцій, які використовують для декомпозиції та реконструкції сигналів і функцій. Вейвлет-спектрограми більш інформативні ніж Фур'є-спектрограми, а можливості вейвлетів для вирішення широкого спектру задач достатньо великі.

Щоб описати функцію $x(t)$ з локальними особливостями розглядається перетворення типу:

$$x(t) = \sum_k c_k \psi_k(t), \quad (2.12)$$

де c_k – коефіцієнт розкладення; $\psi_k(t)$ – базисна функція, спектр якої локалізовано в частотній області.

Якщо прийняти $\psi_k(t) = \exp(-j\omega_k t)$ отримаємо перетворення Фур'є з граничною локалізацією в частотній області у вигляді дельта-функції $\delta(t)$. При $\psi_k(t) = \delta(t)$ отримаємо локалізацію елементів ряду в часовій області, в якій відсутня інформація про локальні властивості частот сигналу [17].

Якщо до функції (2.12) застосувати віконне перетворення Фур'є, в якому вікно $\psi(t-b)$ зсувається вздовж часової осі для розрахунку прямого перетворення Фур'є з центром в точці b , тоді перетворення Фур'є буде залежним від часу, і в результаті отримаємо частотно-часове представлення сигналу. Для забезпечення частотної локалізації необхідно ввести аргумент a – масштабний коефіцієнт, що є аналогом частоти. Тоді функція буде мати вигляд:

$$\psi(t) \rightarrow \psi\left(\frac{t-b}{a}\right). \quad (2.13)$$

В виразі (2.13) параметр b вказує на зсув функції вздовж осі часу і визначає її часову локалізацію, а масштабний параметр a забезпечує частотну локалізацію, яка визначається стисненням або розтягуванням базисної функції. Великі значення a відповідають низьким частотам, малі – високим. Параметр a масштабує не тільки параметр t , а й змінну зсуву b так, що при стисненні або розтягуванні функції зберігається відношення $b/a = \text{const}$ [17].

В сучасній літературі описано достатня кількість вейвлетів, багато з яких входять до типових пакетів прикладних програм. Для опису локальних властивостей сигналу застосовують сукупність вейвлетів, які утворюються єдиною початковою базисною функцією, а також:

- мають можливість зсуву за часовою віссю;
- мають вигляд коротких, локалізованих за часом хвиль;
- частотний спектр обмежений;
- здатні до масштабування [17].

В результаті вейвлет-перетворення скалярної функції отримуємо двомірний масив значень коефіцієнтів $C(a, b)$, в якому міститься комбінована інформація про аналізований сигнал. Розподілення значень коефіцієнтів в просторі «часовий масштаб – часова локалізація» представляє інформацію про внесок компонентів різного масштабу за часом і складає вейвлет-спектр. При цьому, деякі властивості перетворення не залежать від аналізованого вейвлету, тому вейвлет-аналіз дозволяє отримати об'єктивну інформацію про досліджуваний сигнал. До найбільш важливих властивостей вейвлет – перетворень сигналів можна віднести: інваріантність відносно зсуву, інваріантність відносно стиснення, лінійність, диференціювання [17].

Безперервне вейвлет-перетворення потребує великого об'єму розрахунків. Але технічна діагностика як правило виконується на кінцевому відрізку часу з обмеженою смугою частот, тому в практичних розрахунках часто виконується дискретне вейвлет-перетворення. Для цього параметри a та b представляють у вигляді:

$$a = a_0^j, b = ka_0^j, j, k \in Z, a_0 > 1. \quad (2.14)$$

В такому випадку вейвлет-функція може бути представлена у вигляді:

$$\psi_{j,k}(t) = a_0^{-\frac{j}{2}} \psi(a_0^{-j} t - k). \quad (2.15)$$

Вейвлет-аналіз ефективно застосовувати для вирішення задач, що пов'язані з фільтрацією сигналу від шуму, коли із сигналу з випадковою завадою треба виділити корисний сигнал, при цьому мінімізувавши спотворення, що вносить завада. В техніці цікаві результати застосування вейвлетів, що отримані при дослідженні сигналів, які згасають із часом або змінюють свою частоту. Ефективні результати можна отримати при застосуванні комбінованої методики сумісного використання ШПФ та вейвлет-перетворення, яка застосовується, наприклад, при комплексному аналізі сигналів акустичної емісії [17].

2.4 Алгоритми і технологія розрахунку показника Херста

Розглянемо алгоритм реалізації RS-аналізу для часових рядів досліджуваних акустичних сигналів. Візьмемо часовий ряд $x = \{x_1, \dots, x_n\}$ для представлення n послідовних значень. Середнє значення x_m часового ряду x визначається за формулою:

$$x_m = \frac{x_1 + \dots + x_n}{n}. \quad (2.16)$$

Стандартне відхилення s_n визначається як:

$$s_n = \frac{1}{n} * \sum_{k=1}^n (x_k - x_m)^2. \quad (2.17)$$

Нормований розмах розраховується шляхом зміни масштабу для «нормалізації» даних, за допомогою вибіркового середнього z_r :

$$z_r = x_r - x_m, r = 1, \dots, n. \quad (2.18)$$

В результаті отриманий ряд Z має середнє, що рівне нулю [18].

Наступним кроком буде створення кумулятивного часового ряду Y :

$$Y_i = Z_i + Z_r, r = 2, \dots, n. \quad (2.19)$$

Скорегований розмах R_n буде максимумом при відніманні мінімального значення Y_i :

$$R_n = \max(Y_1, \dots, Y_n) - \min(Y_1, \dots, Y_n). \quad (2.20)$$

Нижній індекс n для R_n вказує, що це скорегований розмах для x_1, \dots, x_n . Оскільки Y скореговане до середнього нулю, то максимальне значення Y завжди буде більше або дорівнюватиме нулю. Отже, скорегований розмах R_n завжди буде додатнім числом. Цей скорегований розмах R_n дорівнює відстані, на яку переміщується система за показник часу n [18].

Херст визначив наступну залежність:

$$R/S_n = c * n^H. \quad (2.21)$$

Нижній індекс n для R/S_n відноситься до значення R/S для x_1, \dots, x_n , де c – константа. Значення R/S називається нормованим розмахом, воно змінює масштаб у міру збільшення приросту часу n , згідно значенню степеної залежності, яка дорівнює H , який зазвичай називають показником Херста [18].

Показник Херста може бути наближений за допомогою креслення $\log c (R/S_n)$ навпроти $\log n$ і обчислення нахилу через просту регресію методом найменших квадратів за рівнянням:

$$\log(R/S_n) = \log c + H * \log n. \quad (2.22)$$

Алгоритм розрахунку показника Херста можна представити наступними кроками:

1. Період часового ряду N розділюється на A суміжних підперіодів довжиною n , так щоб $A * n = N$. Відмітимо кожен підперіод I_a з урахуванням того, що $a = 1, 2, \dots, A$. Кожний елемент в I_a позначимо N_k , при цьому $k = 1, 2, \dots, n$. Для кожного I_a довжини n середнє значення визначається як:

$$e_a = \frac{1}{n} * \sum_{k=1}^n N_{k,a}, \quad (2.23)$$

де e_a - середнє значення N_i , що міститься в підперіоді I_a довжини n .

2. Часовий ряд накопиченого відхилення $X_{k,a}$ від середнього значення для кожного підперіоду I_a визначається $N_{i,a}$ як:

$$X_{k,a} = \sum_{i=1}^k N_{i,a} - e_a, k = 1, 2, \dots, n. \quad (2.24)$$

3. Діапазон визначається як максимальне значення з відніманням мінімального значення $X_{k,a}$ в межах кожного підперіоду I_a :

$$R_{I_a} = \max(X_{k,a}) - \min(X_{k,a}), 1 \leq k \leq n. \quad (2.25)$$

4. Вибіркове стандартне відхилення, розраховується для кожного підперіоду I_a :

$$S_{I_a} = \frac{1}{n} * \sum_{k=1}^n (N_{k,a} - e_a)^2. \quad (2.26)$$

5. Для кожного діапазону R_{I_a} проводиться нормалізація шляхом ділення на відповідний S_{I_a} . Тому повторно нормований розмах на протязі кожного I_a підперіода дорівнює R_{I_a}/S_{I_a} . В пункті 1 були отримані суміжні підперіоди довжиною n . Отже, середнє значення R/S для довжини n визначається як:

$$(R/S)_n = \frac{1}{A} * \sum_{a=1}^A \frac{R_{I_a}}{S_{I_a}}. \quad (2.27)$$

6. Довжина n збільшується до наступного, більш високого значення, а N/n є цілим значенням. Використовуючи значення n , що включає в себе початкові і кінцеві точки часового ряду. Шаги 1-6 повторюються до $n = N/2$.

7. методом найменших квадратів виконується проста регресія на $\log n$ як незалежної змінної і $\log(R/S_n)$, як залежної змінної. Відрізок, що відмічається на координатній осі є оцінкою $\log c$ і є константою. Нахил рівняння є оцінкою показнику Херста [18].

3 РОЗРОБКА МЕТОДУ ІДЕНТИФІКАЦІЇ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ПО ЇХ АКУСТИЧНОМУ ВИПРОМІНЮВАННЮ

3.1 Акустичний портрет мел-кепстрального методу виявлення безпілотних літальних апаратів

Для тестування та перевірки працездатності був проведений натурний експеримент, що проводився у межах міста. Перші 199 секунд записувався шум навколишнього середовища, а з 200-ї до 600-ї секунди шум квадрокоптера, що злітає та віддаляється на дистанцію 100 метрів.

Розрахунок проводився в середовищі пакету програми MATLAB R2014b, в якості робочої програми використовувалась програма для формування матриці кепстру, яка реалізована на основі алгоритму, що дозволяє отримати акустичний портрет.

На основі цієї програми виходить мел спектр, тобто всі спектральні складові, які попадають в трикутне вікно та сумуються і замість великої кількості відліків вони є однією інтегральною оцінкою, сумою всіх спектральних складових ШПФ. В результаті отримуємо мел спектр, число спектральних складових якого дорівнює числу спектральних вікон мел фільтрів.

Після цього проводиться кепстральна обробка. В результаті отримуємо кепстральні коефіцієнти для кожної секунди, які записуються в підсумкову матрицю (35 перших коефіцієнтів кепстра). Вся реалізація акустичного сигналу поділяється на окремі фрагменти і для кожного фрагмента формується його акустичний портрет, в якості акустичного портрету обираються перші 35 коефіцієнтів на виході після кепстрального аналізу, що пройшли обробку за допомогою мел фільтра.

Мел фільтр потрібен для того, щоб зменшити число точок для спектрального аналізу.

Обрані характерні моменти з цього тесту, де першій секунді відповідає шум навколишнього середовища, 23 – шум зльоту квадрокоптера, 48 – шум квадрокоптера на відстані приблизно 100 метрів.

На рис. 3.1, 3.4, 3.7 зображений вихідний спектр шуму навколишнього середовища та взльоту квадокоптера для 1, 23 та 48 секунди відповідно. Мел спектр (рис. 3.2, 3.5, 3.8), який складається з 35 точок, замінює частину вихідного спектру. Потім, для того, щоб отримати інформацію в більш стиснутому вигляді, із мел спектра отримуємо кепстральне представлення сигналу (рис. 3.3, 3.6, 3.9), ці амплітуди є вектором ознак.

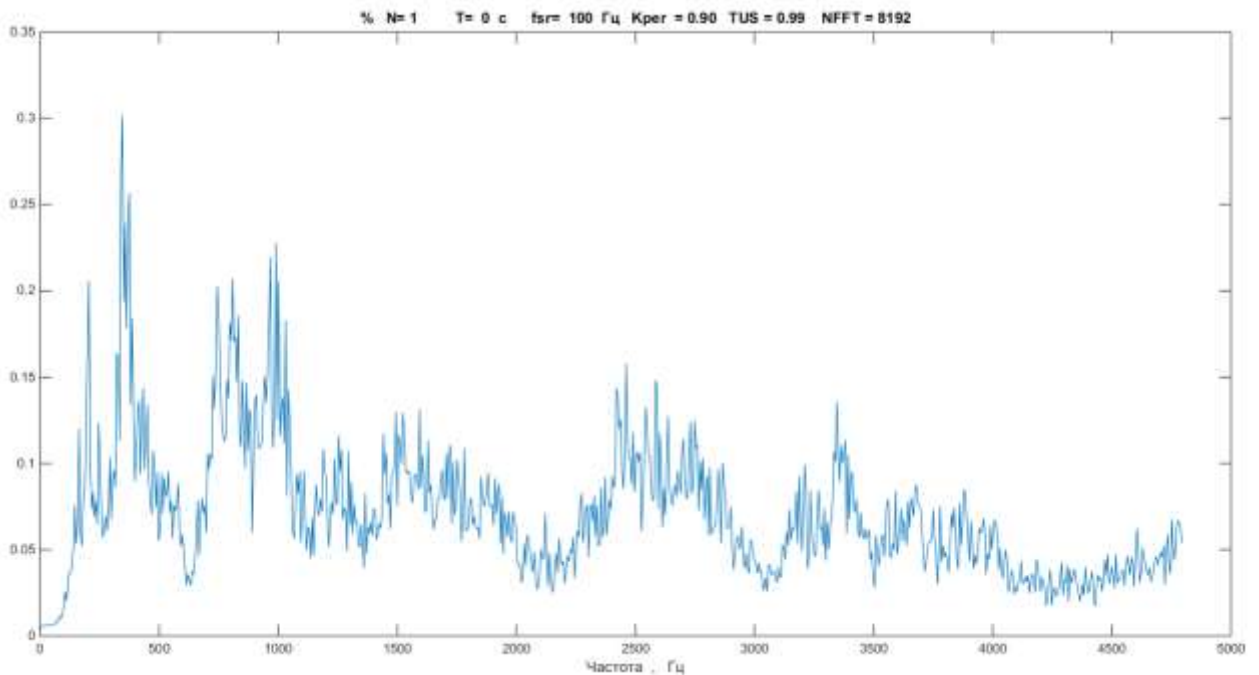


Рисунок 3.1 – Спектр сигналу навколишнього середовища на вході

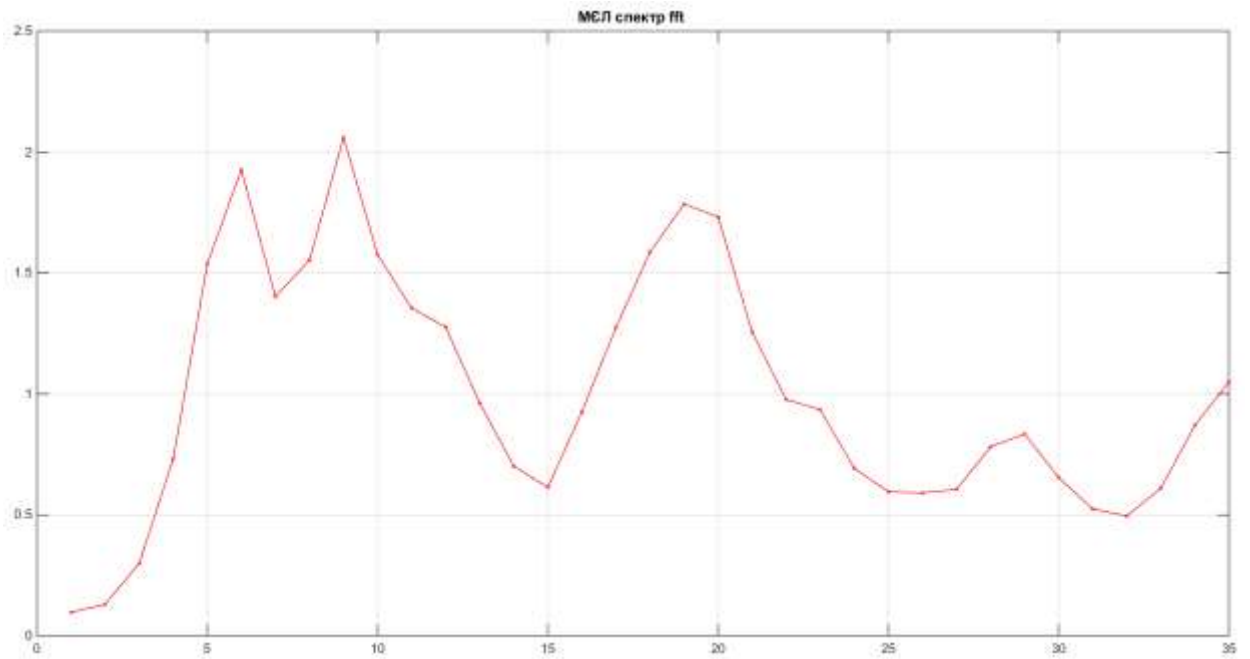


Рисунок 3.2 – Мел спектр тестового сигналу шуму навколишнього середовища

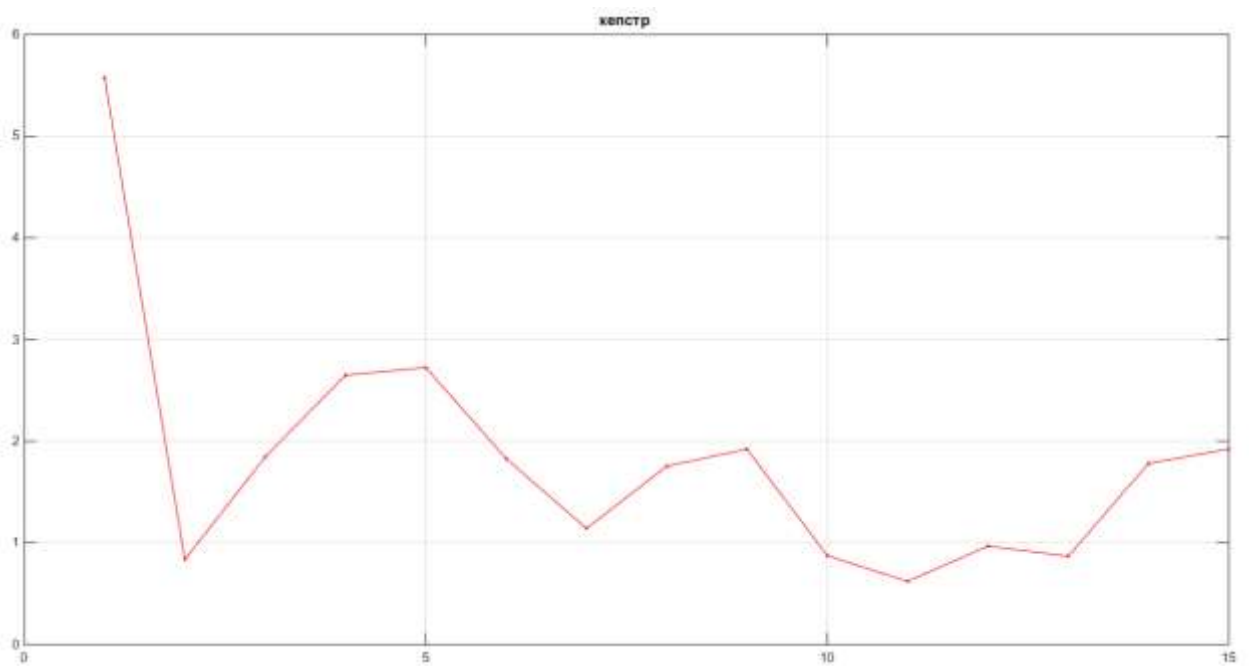


Рисунок 3.3 – Кепстральне представлення тестового сигналу шуму навколишнього середовища

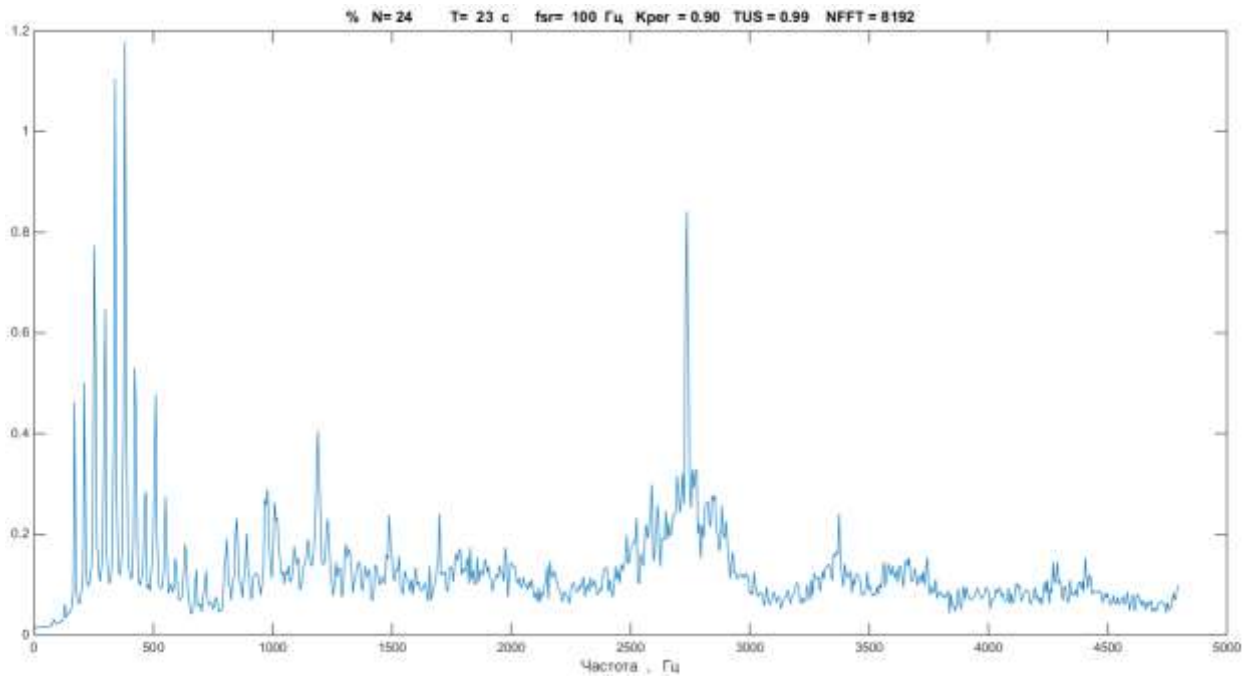


Рисунок 3.4 – Спектр сигналу шуму зльоту БПЛА на вході

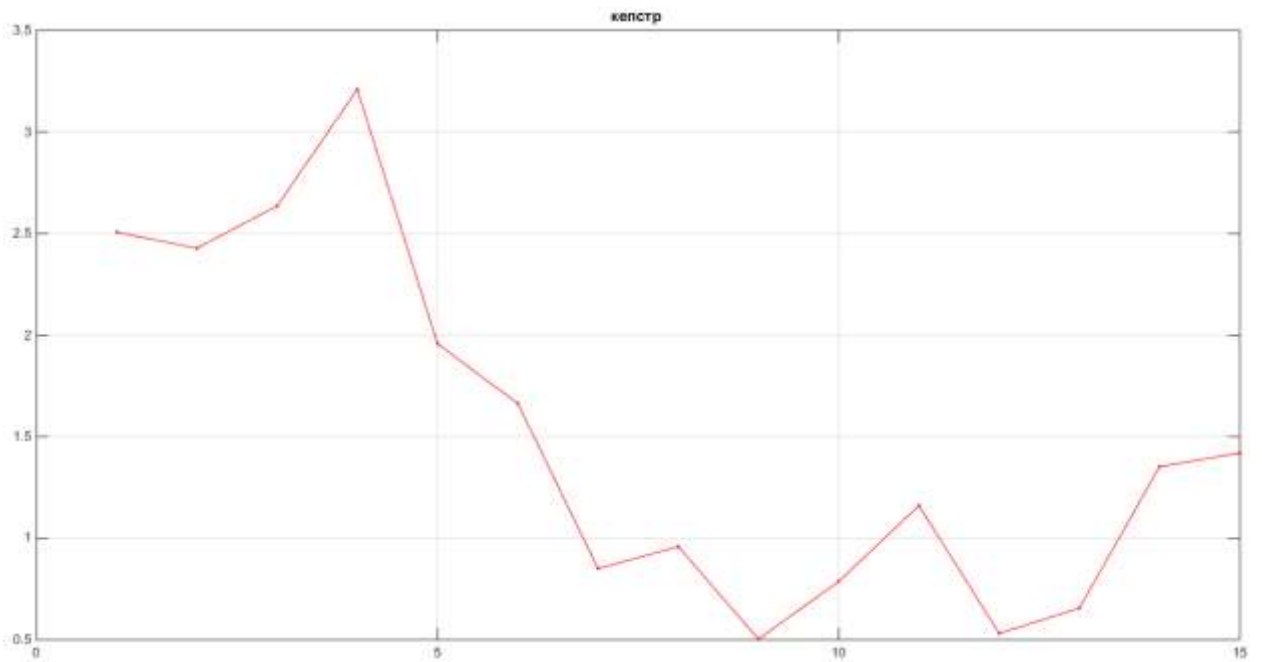


Рисунок 3.5 – Мел спектр тестового сигналу шуму зльоту БПЛА

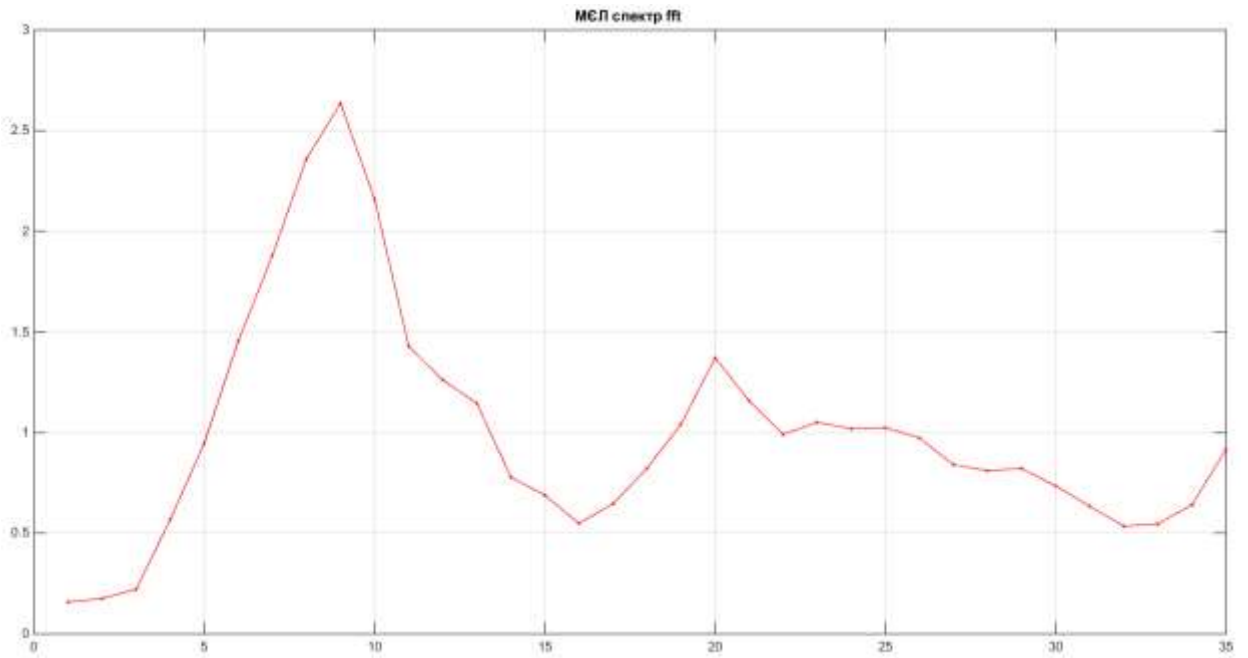


Рисунок 3.6 – Кепстральне представлення тестового сигналу шуму зльоту БПЛА

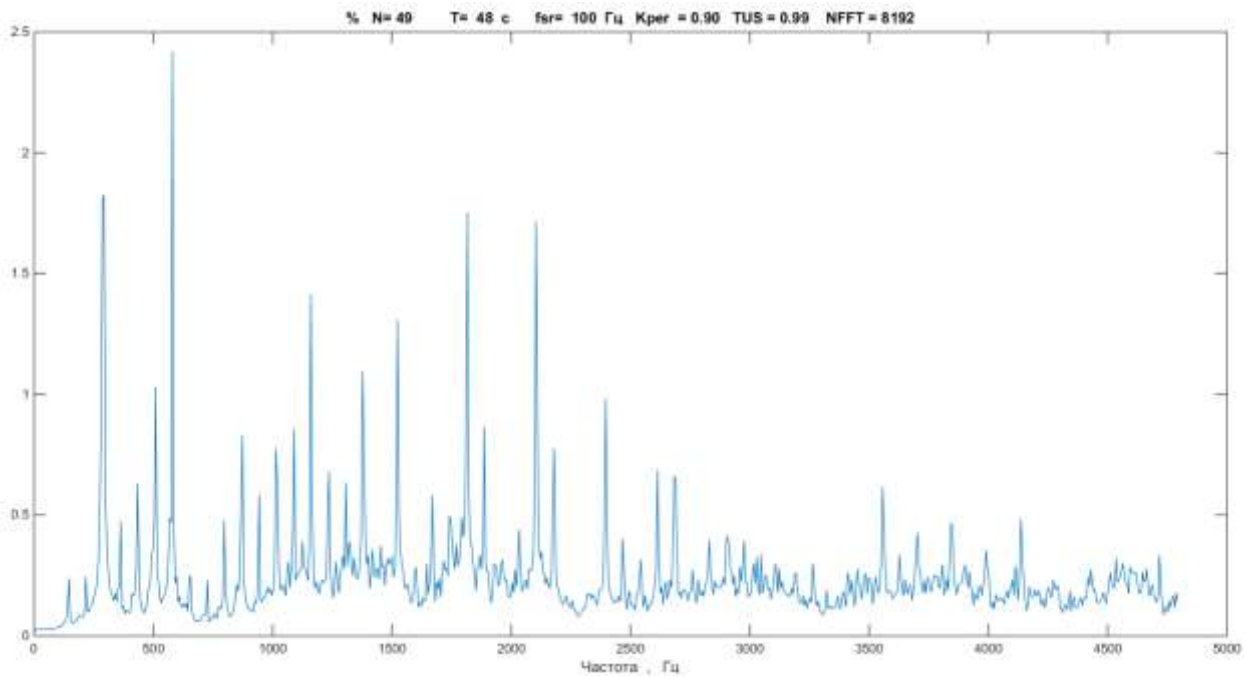


Рисунок 3.7 – Спектр сигналу шуму БПЛА на відстані 100 метрів

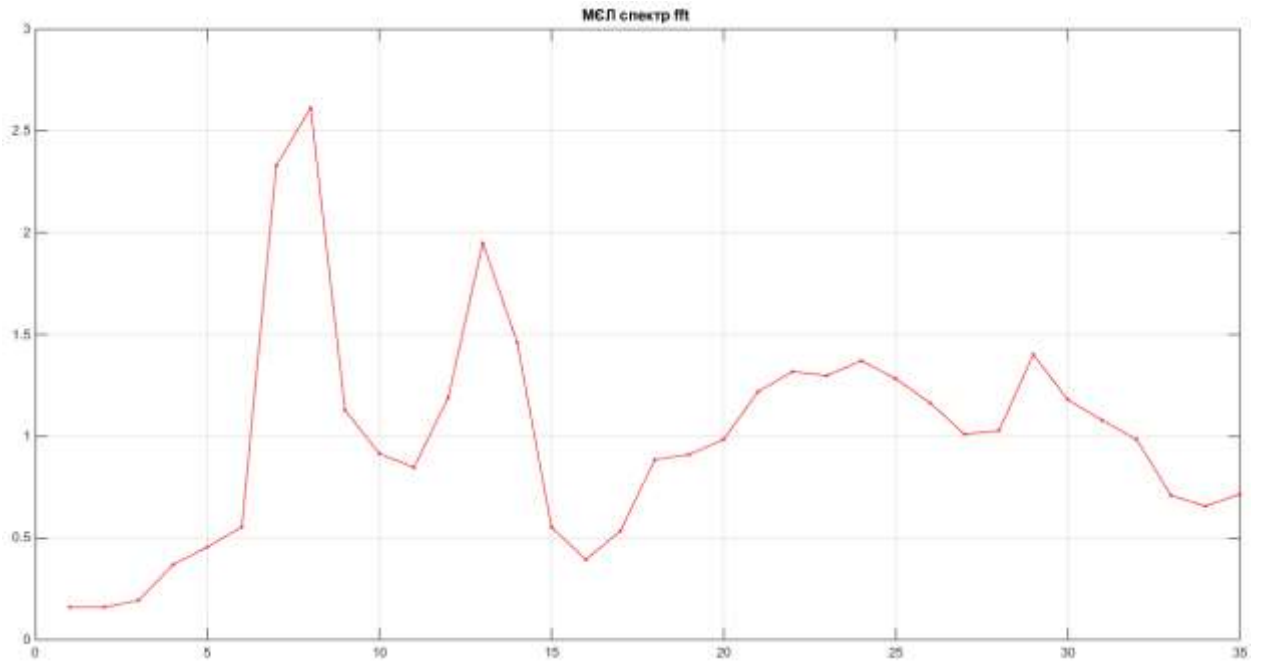


Рисунок 3.8 – Мел спектр тестового сигналу шуму БПЛА на відстані 100 метрів

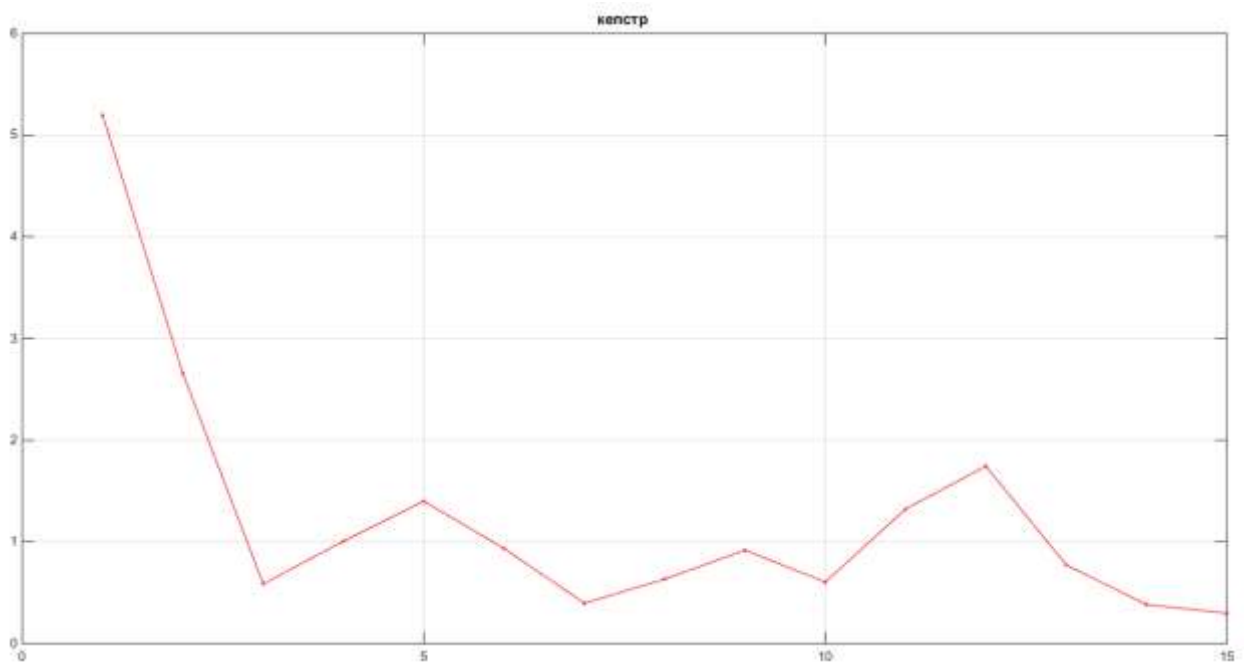


Рисунок 3.9 – Кепстральне представлення тестового сигналу шуму БПЛА на відстані 100 метрів

Використовуючи цей метод, отримали мел спектри, що є основою для побудови бази еталонних сигналів і масиву для опізнання, який використовується в подальшій програмі в пункті 3.2.

3.2 Ідентифікація джерела звуку, обробленого мел-кепстральним методом

Експеримент проведений з ціллю виявлення необхідної кількості елементів вектору ознак, щоб визначити вектори з найбільшим значенням та підібрати оптимальний поріг виявлення БПЛА.

Для ідентифікації використовується звукозапис польоту БПЛА на дистанцію 100 м, з попередньо записаним шумом навколишнього середовища з усіма змінами в умовах міста. Довжина цього файлу 600 с, з 199-ї секунди починає злітати квадрокоптер, це можна побачити за коефіцієнтом кореляції (рис. 3.10).

Акустичний запис з частотою дискретизації 48000 Гц та розрядністю 24 біта, попередньо було оброблено і розбито на сегменти. Для кожного сегменту було отримано вектор ознак, що складається з 35-ти точок. При реалізації алгоритму виявлення здійснюється фільтрація звукового сигналу з виходу мікрофона фільтром верхніх частот із частотою зрізу 89 Гц, далі проводиться сегментація послідовності відліків часової реалізації звукового сигналу з довжиною сегмента $N=16384$ відліків. Для зазначеної вище частоти дискретизації сегменти відповідають інтервалу 0,34 с.

При реалізації алгоритму мел-кепстральних коефіцієнтів використовується ділянка спектра АВ БПЛА в смузі 89...2600 Гц. Розмір сегмента обраний рівним 1, застосовано дискретне перетворення Фур'є з числом відліків $N=16384$. Число коефіцієнтів для формування вектора ознак обрано рівним 8, їх збільшення не забезпечує підвищення точності

розпізнавання, оскільки з підвищенням номера коефіцієнта його значущість зменшується.

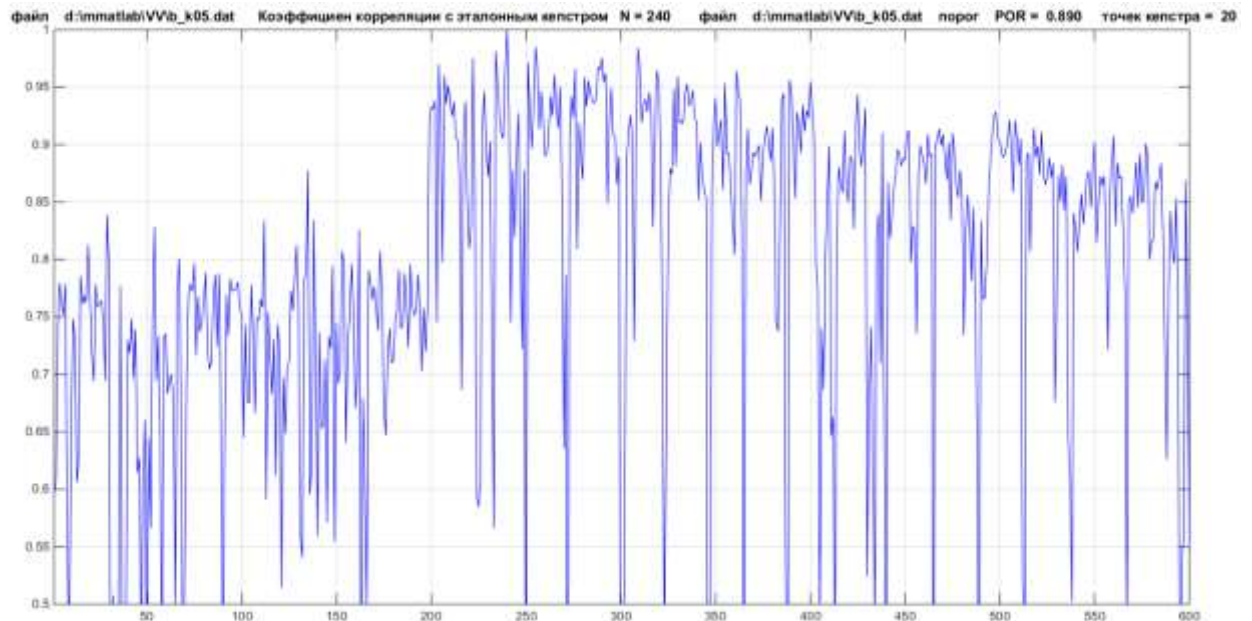


Рисунок 3.10 – Зміна коефіцієнта подібності для векторів ознак тестового сигналу та еталонного вектору ознак АВ квадрокоптера

Початковими даними для цієї програми є матриця, що була сформована програмою для формування матриці кепстру.

Кожний вектор ознак порівнюється з еталонним кепстром, що взятий на 240 секунд, де коефіцієнт кореляції дорівнює одиниці.

Якщо коефіцієнт кореляції вище порогу (в нашому випадку 0,89), ми приймаємо рішення, що цей сигнал відповідає сигналу квадрокоптеру. Ця подія відображена на рис. 3.11:

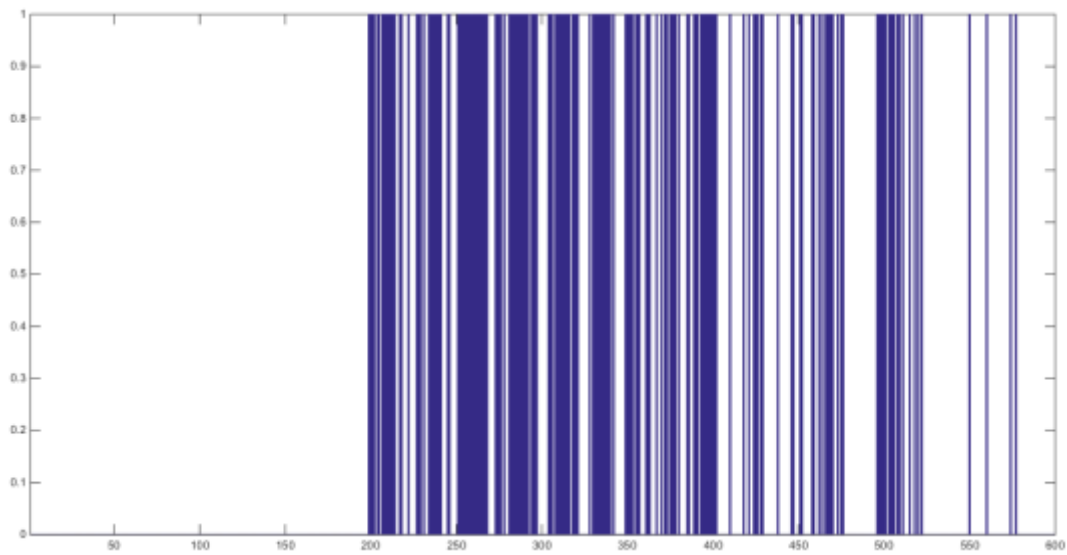


Рисунок 3.11 – Результат роботи алгоритму прийняття рішення про розпізнавання АВ БПЛА

Результат роботи алгоритму прийняття рішення про розпізнавання АВ БПЛА представлено на рис. 3.11 у вигляді діаграми, у якої при перевищенні порога відображається вертикальний стовпчик. На початковій ділянці запису тестового сигналу (0...199 с) присутні лише звуки довкілля і фрагменти мови. Це дозволяє при вибраному порозі прийняття рішення про розпізнавання (0,89) визначити ймовірність помилкового розпізнавання ($P_{\text{пр}} < 0,5\%$).

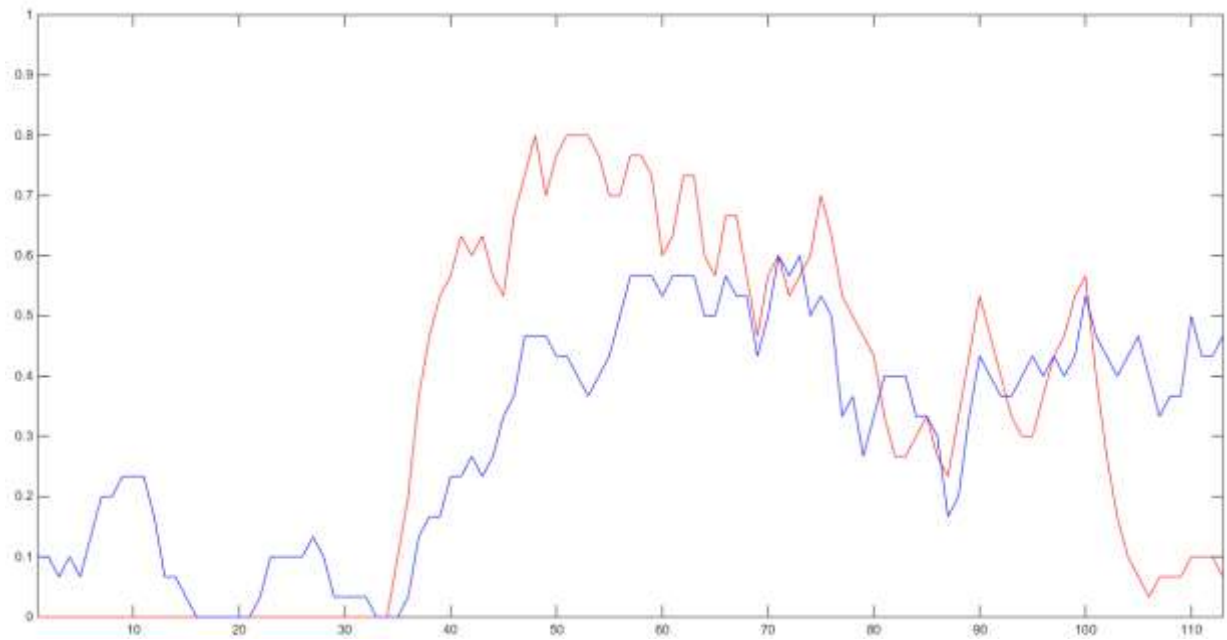


Рисунок 3.12 – Залежності ймовірності правильного виявлення та розпізнавання від відстані до квадрокоптера; червона лінія – ймовірність правильного розпізнавання БПЛА; синя лінія – залежність ймовірності правильного виявлення від відстані до джерела АВ

Ділянка запису тестового сигналу ТС1 (200 ... 600 с) використовувалася для побудови залежності ймовірності правильного розпізнавання $P_{\text{прр}}$ від відстані до БПЛА за умов міста (рис. 3.12). На цьому ж малюнку представлена аналогічна залежність для алгоритму виявлення як залежності вірогідності правильного виявлення $P_{\text{пв}}$ від відстані до джерела АВ.

Характер поведінки графіків обох залежностей, отриманих незалежними методами, дуже схожий, збігається навіть у деталях.

Змінивши поріг прийняття рішень, а саме, зменшивши його до 0,8, бачимо, як різко змінюється ймовірність правильного розпізнавання БПЛА в позитивний бік (рис. 3.13), але й з'являються помилкові тривоги напочатку, в моменти шуму навколишнього середовища (рис. 3.14).

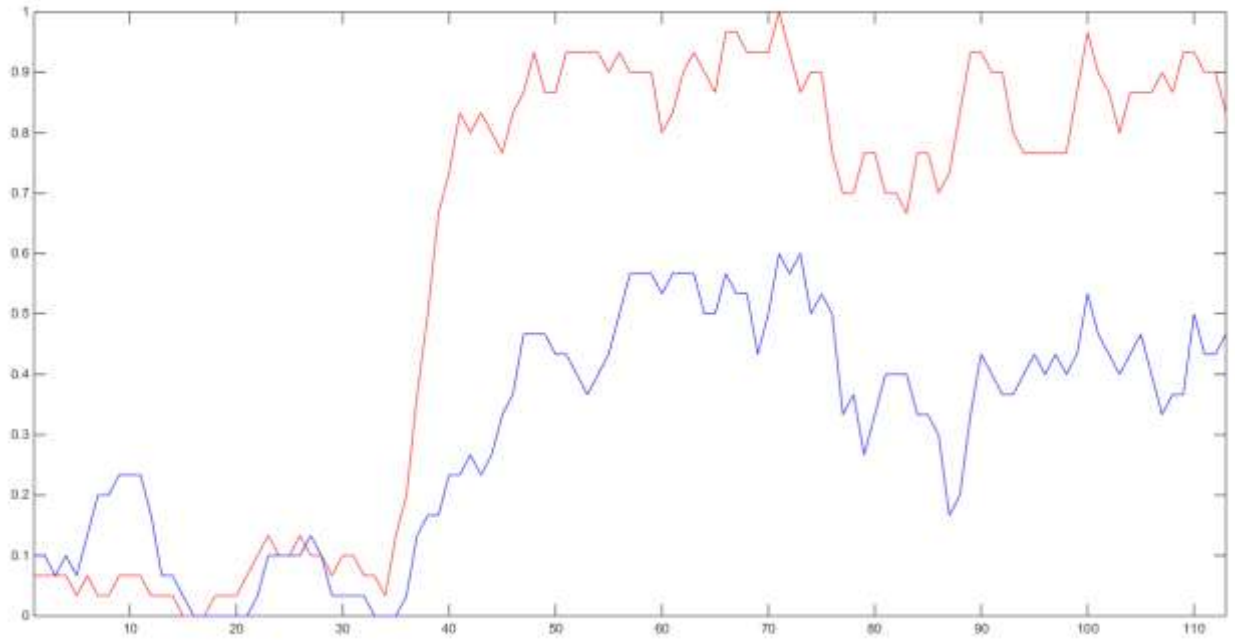


Рисунок 3.13 – Залежності ймовірності правильного виявлення та розпізнавання від відстані до квадрокоптера з порогом 0,8

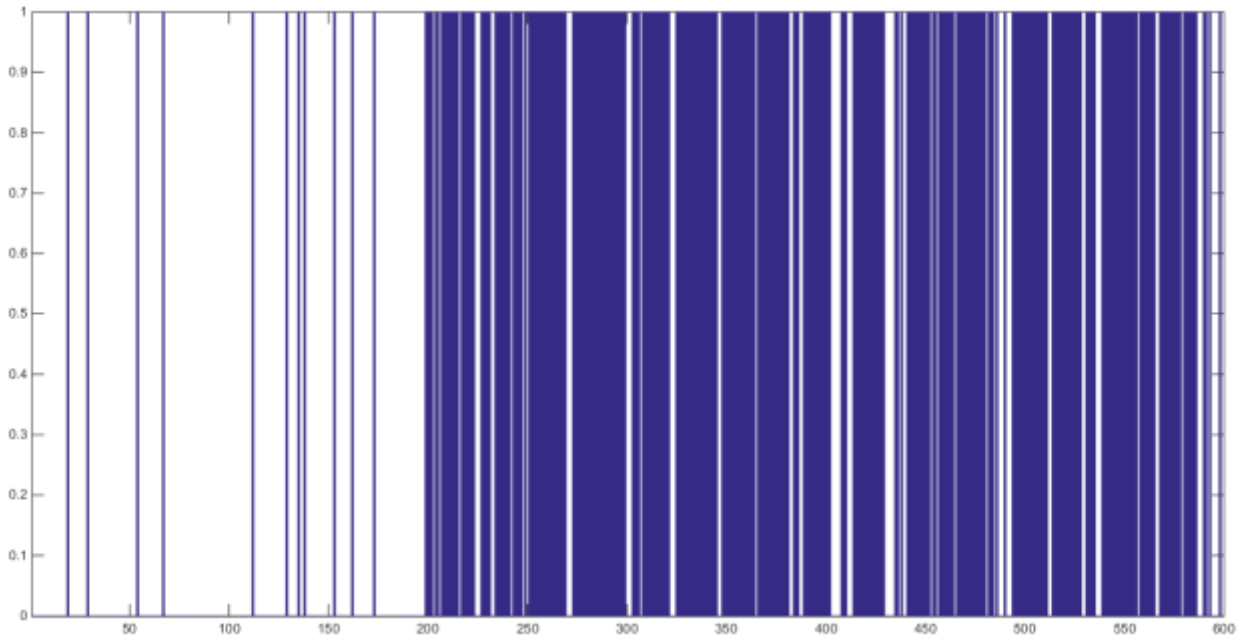


Рисунок 3.14 – Результат роботи алгоритму прийняття рішення про розпізнавання АВ БПЛА з порогом прийняття рішення 0,8

Якщо зменшити скорочення мел кепстру ззаду та спереду та обрати коефіцієнти з 3 по 25, побачимо, що при не змінному порозі виявлення БПЛА, коефіцієнт кореляції змінюється (рис. 3.15).

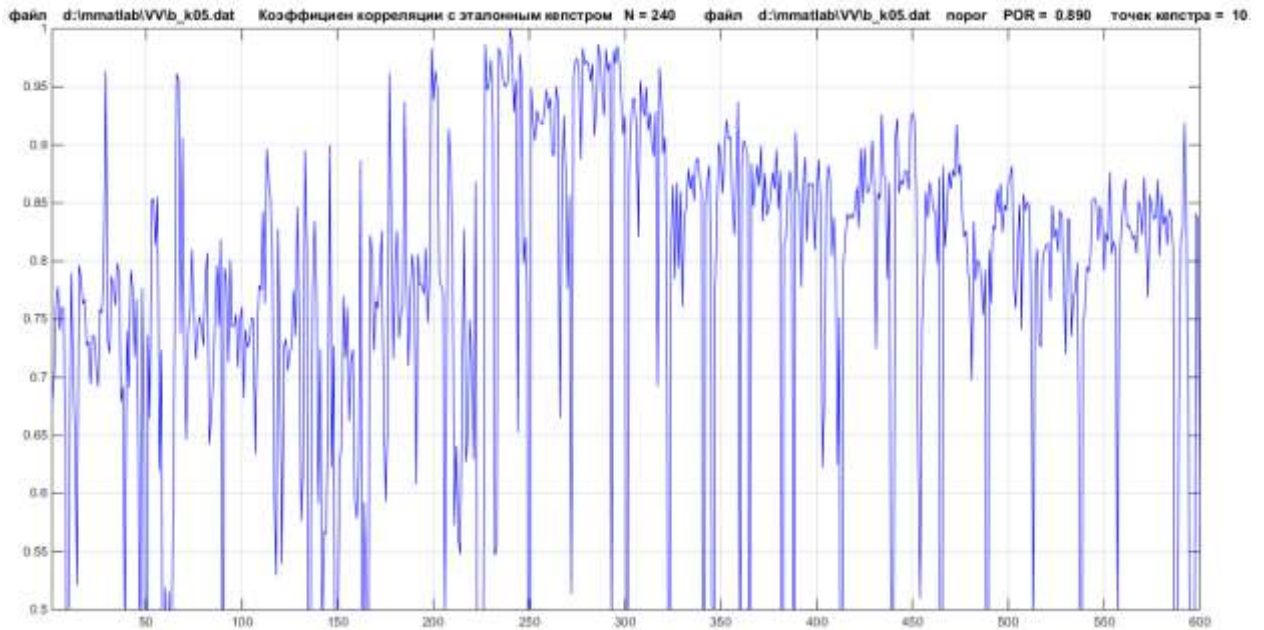


Рисунок 3.15 – Зміна коефіцієнта подібності для векторів ознак тестового сигналу та еталонного вектору ознак АВ квадрокоптера

Також, з'являються помилкові тривоги (рис. 3.16).

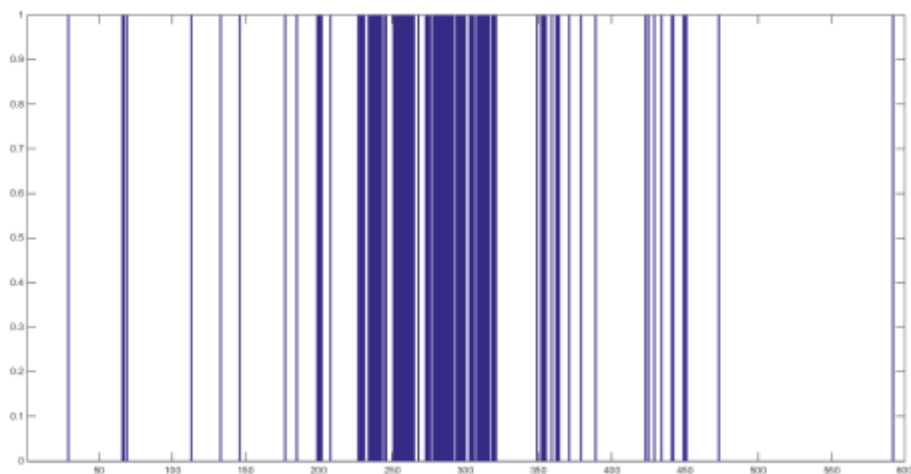


Рисунок 3.16 – Алгоритм прийняття рішення про розпізнавання АВ БПЛА з помилковими тривогами

Досить великі відмінності оцінок можливості правильного виявлення і розпізнавання пояснюються різними умовами польоту БПЛА, режимом роботи гвинтомоторної групи, загасанням сигналу АВ при віддаленні від мікрофона, наявністю перевідбиття від будівель.

Алгоритм виявлення найбільш чутливий до шумів автомобільної магістралі та рейкового електротранспорту. Метод розпізнавання на основі мел-кепстральних коефіцієнтів виявився менш чутливим до шумів навколишнього середовища.

ВИСНОВКИ

Дана кваліфікаційна робота виконана на тему «Дослідження методів виявлення і розпізнавання акустичного випромінювання малорозмірних безпілотних літальних апаратів» і складається з трьох розділів.

В першому розділі проведено аналітичний огляд методів ідентифікації акустичних сигналів БПЛА, розглянуто їх переваги, недоліки та сфери застосування, зокрема метод, що заснований на використанні мел-кепстральних коефіцієнтів.

В другому розділі проведено аналіз акустичних сигналів малорозмірних безпілотних літальних апаратів, розібрали отримання вектору ознак на основі мел-кепстрального методу та методи дослідження фрактальної розмірності сигналів БПЛА на основі показників Херста і їх використання як елементи вектора ознак.

В останньому розділі наведено описання проведеного натурального експерименту, що проводився у межах міста. Перші 199 секунд записувався шум навколишнього середовища, а з 200-ї до 600-ї секунди шум квадрокоптера, що злітає та віддаляється на дистанцію 100 метрів. На його основі отримали мел спектри, що є основою для побудови бази еталонних сигналів і масиву для опізнання, який використовується в подальшій програмі, з ціллю виявлення необхідної кількості елементів вектору ознак, щоб визначити вектори з найбільшим значенням та підібрати оптимальний поріг виявлення БПЛА.

Аналіз акустичних сигналів БПЛА літакового та мультироторного типу показали, що їх спектри мають гармонічну структуру з частотами, кратними частоті обертання ротора або колінвала двигуна. Більш чітко гармонічні складові спектру простежуються для БПЛА літакового типу. Для мультироторного ж типу спектральні лінії є більш широкими через неоднаковість частот обертання гвинтів. В подальшому доцільно провести

порівняння даних, отриманих експериментальним шляхом та модельних залежностей, та визначити акустичні портрети конкретних безпілотних літальних апаратів з метою їх виявлення.

У цій роботі було запропоновано засновану на отриманні розподілів мел-кепстральних коефіцієнтів методику отримання вектора ознак, що характеризують індивідуальні параметри голосу. Було реалізовано модуль голосової аутентифікації на основі вивченого методу отримання вектора ознак та методу опорних векторів.

Отримані результати досліджень дозволяють говорити про можливість використання розглянутих алгоритмів виявлення та розпізнавання акустичних сигналів БПЛА для оперативного контролю повітряного простору.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Соколовський В.В. Проблемні питання та перспективні напрямки боротьби з малорозмірними надлегкими БЛА у внутрішньому збройному конфлікті / В.В. Соколовський, Ю.В. Самсонов // Системи озброєння і військова техніка. – 2015. – № 4(44). – С. 32-35.

2. Даник Ю.Г. Проблеми застосування угруповань малих безпілотних літальних апаратів мультикоптерного типу для вирішення військових завдань / Ю.Г. Даник, І.В. Пулеко, П.П. Топольницький, С.В. Чуб // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. пр. – Житомир: ЖВІ НАУ, 2013. – Вип. 8. – С. 98-105.

3. Даник Ю.Г. Виявлення безпілотних літальних апаратів на основі аналізу акустичних та радіолокаційних сигналів / Ю.Г. Даник, І.В. Пулеко, М.В. Бугайов // Вісник ЖДТУ. Серія: Технічні науки. – Житомир: ЖДТУ, 2014. – № 71(4). – С. 71-80.

4. Massey K. Noise Measurements of Tactical UAVs / K. Massey, R. Gaeta // Georgia Inst. of Technology / GTRI / ATAS, Atlanta. 16th AIAA / CEAS Aeroacoustics Conference. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2010. – P. C. 1-16.

5. Самохин В.Ф. Экспериментальное исследование источников шумности беспилотного летательного аппарата с винто-кольцевым двигателем в толкающей компоновке / В.Ф. Самохин, С.П. Остроухов, П.А. Мошков // Электрон. журнал "Труды МАИ". – Вып. № 70. – С. 1-24.

6. Ерёмин Г. В., Гаврилов А. Д., Назарчук И. И. Малоразмерные беспилотники – новая проблема для ПВО // Армейский вестник. 2015.

7. Первушин Е.А. Обзор основных методов распознавания дикторов // Математические структуры и моделирование. – 2011. – Вып. 24.

8. Малинин П.В., Поляков В.В. Иерархический подход в задаче идентификации личности по голосу с помощью проекционных методов классификации многомерных данных // Доклады Томского гос. университета систем управления и радиоэлектроники. – 2010. – № 1/1.

9. Годунов А. И., Шишков С. В., Юрков Н. К. Комплекс обнаружения и борьбы с малогабаритными беспилотными летательными аппаратами // Надежность и качество сложных систем. 2014. № 2 (6). С. 62-70.

10. Рябов К. Как противодействовать беспилотнику // Военное обозрение.

11. Свинин Е. В. Рамочная антенна для системы радиомониторинга. Выпускная квалификационная работа специалиста. 2017. С. 102.

12. Сорокин В.Н., Вьюгин В.В., Тананыкин А.А. Распознавание личности по голосу: аналитический обзор // Информационные процессы. — 2012. – Т. 12, №1.

13. Исакович М.А. Общая акустика. М.: Наука. – 1973. – С. 496.

14. Руденко О.В., Собисевич Л.Е., Собисевич А.Л. Электромагнитное поле вращающегося воздушного винта // Доклады Академии наук. 1996. – Т. 351. № 2. С. 260-263.

15. Заславский Ю.М., Заславский В.Ю. Акустический шум низколетящего квадрокоптера // Noise Theory and Practice. – 2019. – № 3. С. 21-27.

16. Олейников В.Н., Шейко С.А., Бабкин С.И. Исследование характеристик акустического излучения малых беспилотных летательных аппаратов// Сборник научных трудов VI Международного радиоэлектронного форума “Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития (МРФ-2017)” Международная научная конференция “Радиолокация. Спутниковая навигация. Радиомониторинг”. 24-26 октября 2017 г. Харьков, Украина. – Изд. “Точка”. С. 11-107.

17. Kartashov, V., Oleynikov, V., Koryttsev, I., Zubkov, O., Babkin, S., Sheiko, S. Processing and recognition of small unmanned vehicles' sound signals. // 2018 International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T), Kharkiv, 2018, pp. 1-5.

18. Карташов В.М., Олейников В.Н., Шейко С.А., Бабкин С.И., Корытцев И.В., Зубков О.В., Анохин М.А. Информационные характеристики звуковых сигналов малых беспилотных летательных аппаратов// Радиотехника. Всеукр. Межвед. Науч.-техн. Сборник. Вып 191. - Харьков, 2017. С. 181-187.

19. Kartashov V.M., Oleynikov V.N, Sheyko S.A., Babkin S.I., Koryttsev I.V., Zubkov O.V., Anokhin M.A. Information characteristics of sound radiation of small unmanned aerial vehicles. Telecommunications and Radio Engineering (English translation of Elektrosvyaz and Radiotekhnika), V.77(10),2018, pp. 915-924.

20. Журавлев В. Анализ информационных параметров и характеристик сигналов маскирования речи на объектах информационной деятельности. Правове, нормативне та метрологічне забезпечення системи захисту інформації в Україні, вип. 1 (14), 2007 р. С. 170-176.

21. Останин С.А. Увеличение отношения сигнал шум методом последовательного вычисления автокорреляционной функции // Журнал радиоэлектроники. –№ 12. 2011, С. 17-26.

22. Заковряшин А.С., П.В. Малинин, Лепендин А.А. Применение распределений мел-частотных кепстральных коэффициентов для голосовой идентификации личности // Управление, вычислительная техника и информатика 5/2007. С. 156-160.

23. A.Bernardini, F. Mangiatordi, E.Pallotti, L. Capodiferro; F. Ugo Bordoni, "Drone detection by acoustic signature identification", [Electronic Imaging](#), Imaging and Multimedia Analytics in a Web and Mobile World 2017, pp. 60-64.

24. Цифровая обработка сигналов и MATLAB / А. И. Солонина, Д. М. Клионский, Т. В. Меркучева, С. Н. Петров. СПб.: БХВ-Петербург, 2013. С. 512.

25. 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. С. 68.