

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)

Акустична система виявлення безпілотних літальних апаратів.

(тема)

Виконала:

студентка 2 курсу, групи МІм-21-1
Кальна Т.О.
(прізвище, ініціали)

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

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Медіаінженерія
(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. Посошенко В.О.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____ Володимир КАРТАШОВ
(підпис)

2022 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет інформаційних радіотехнологій та технічного захисту інформації

Кафедра медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка
(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Медіаінженерія
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

« ____ » _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Кальній Тетяні Олександрівні
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Акустична система виявлення безпілотних літальних апаратів.

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

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 07.12.2022 р.

3. Вихідні дані до роботи 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

Додатки

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 БПЛА (1 лист)

11. Висновки (1 лист)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітичний огляд літератури	01.09.22–13.09.22	
2	Теоретичний аналіз сигналів	14.09.22–27.09.22	
3	Оцінка параметрів системи	28.09.22–11.10.22	
4	Експериментальна частина	12.10.22–25.10.22	
5	Обробка результатів	26.10.22–10.11.22	
6	Графічна частина роботи	11.11.22–25.11.22	
7	Перевірка керівником	26.11.22–02.12.22	
8	Перевірка на академічний плагіат	03.12.22	
9	Перевірка завідувачем кафедри, рецензування	04.12.22–07.12.22	

Дата видачі завдання _____ 01.09.2022 р. _____

Студент _____ Тетяна КАЛЬНА _____
(підпис)

Керівник роботи _____ Віталій ПОСОШЕНКО _____
(підпис)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 64 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.

ABSTRACT

Explanatory note of qualifying work: 64 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.....	8
Вступ.....	9
1 АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ХАРАКТЕРИСТИК ЗВУКОВОГО ВИПРОМІНЕННЯ ДРОНІВ, МЕТОДІВ ЇХ ВИЯВЛЕННЯ І РОЗПІЗНАВАННЯ.....	11
1.1 Аналіз методів ідентифікації звукових сигналів.....	11
1.2 Перспективні методи виявлення дронів.....	12
1.3 Звукові шуми природного та антропогенного походження.....	15
1.4 Особливості звукового випромінення дронів.....	17
1.5 Інформаційні характеристики звукових сигналів дронів.....	23
1.6 Метод фрактальної розмірності для ідентифікації дронів.....	27
1.7 Постановка задачі та дослідження звукових сигналів дронів.....	29
1.8 Огляд існуючих методів виявлення малорозмірних дронів.....	30
2 АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЗВУКОВИХ СИГНАЛІВ МАЛОРОЗМІРНИХ ДРОНІВ.....	31
2.1 Отримання вектора ознак на основі мел-кепстрального методу.....	31
2.2 Методи дослідження фрактальної розмірності сигналів дронів на основі показників Херста.....	38
2.3 Методика і технологія розрахунку показника Херста.....	43
3 РОЗРОБКА МЕТОДУ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ДРОНІВ ПО ЇХ З ВУКОВОМУ ВИПРОМІНЕННЮ.....	47
3.1 Звуковий портрет мел-кепстрального методу виявлення дронів.....	47
3.2 Ідентифікація джерела звуку по мел-кепстральним коефіцієнтам.....	53
Висновки.....	59
Перелік джерел посилань.....	61

ДОДАТКИ.....	65
Додаток А. Графічна частина.....	66
Додаток Б. Відомість кваліфікаційної роботи.....	76

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 (дрони, БПЛА) за останні роки з простих іграшок перетворилися на серйозні пристрої, що здатні виконувати багато різних задач. Бурхливий розвиток інформаційних технологій у провідних країнах світу неминуче призвів до переосмислення концепцій використання БПЛА, шляхів подальшого їх розвитку, вдосконалення корисного навантаження та надання їм багатоцільового характеру. Найпоширеніші сфери застосування БПЛА: переміщення малогабаритного вантажу, геодезія та картографування місцевості, в тому числі повітряна фото- та відеозйомка.

Для гарантування безпеки повітряного простору від незаконного проникнення на територію, що захищається, або приватний маєток існують різні способи та методи для виявлення та ідентифікації, а також подальшого перехоплення та нейтралізації загроз.

Одним із таких методів є метод акустичного зондування повітряного простору території, що захищається. Застосування акустичного методу дозволяє аналізувати сигнали для ідентифікації БПЛА по низці характерних ознак, що містяться в спектрі акустичного сигналу.

Найбільш поширені системи ідентифікації БПЛА по акустичним сигналам, використовують як ознаки вектори кепстральних коефіцієнтів, такі як: алгоритм кепстральних коефіцієнтів по шкалі мел (MFCC), алгоритм кепстральних коефіцієнтів лінійного передбачення (LPCC), алгоритм коефіцієнтів перцептивного лінійного передбачення (PLP). Алгоритм кепстральних коефіцієнтів на шкалі мел MFCC не гірше методу PLP і LPCC за якістю розпізнавання сигналів, але при цьому є простішим у реалізації.

При побудові систем виявлення БПЛА необхідно вивчити характеристики БПЛА, порядок їх застосування, визначити послідовність оброблення отриманих даних, створити класифікацію БПЛА.

Залежно від того, до якої з груп належить БПЛА, він має різну потужність двигуна, різну кількість двигунів, свій тип двигуна, ті

характеристики, що безпосередньо впливають на рівень акустичного сигналу, що випромінюється БПЛА. Кожна група має свої особливості, що дозволяє скласти набір характерних ознак для певної групи і застосовувати їх для побудови системи розпізнавання та виявлення.

1 АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ХАРАКТЕРИСТИК ЗВУКОВОГО ВИПРОМІНЕННЯ ДРОНІВ, МЕТОДІВ ЇХ ВИЯВЛЕННЯ І РОЗПІЗНАВАННЯ

1.1 Аналіз методів ідентифікації звукових сигналів

Безпілотні літальні апарати (дрони, БПЛА) є багатофункціональними пристроями, вони знайшли своє використання, в цивільній авіації виконуючи різні задачі, такі як переміщення малогабаритного вантажу, геодезія та картографування місцевості, у тому числі фото- та відеозйомка.

Незважаючи на корисність даних апаратів, існують і негативні нюанси масового поширення таких дешевих засобів, які дозволяють безкарно проникати на закриту територію, здійснювати несанкціонований моніторинг об'єктів і територій державного значення, внаслідок цього і більш частими є випадки вторгнення дронів в особисте життя.

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

Розпізнавання звукових сигналів включає 2 основні етапи: попередню обробку сигналу і його класифікацію. На етапі попередньої обробки прийнятий звуковий сигнал перетворюється на вектори ознак, на основі яких потім буде виконана класифікація [6].

Цей етап може включати такі кроки:

- перетворення сигналів з аналогової форми у цифрову;
- використання фільтрів для подавлення шумів;
- виділення границь звукового сигналу;
- виділення характерних ознак сигналу.

Найбільш поширені ознаки для систем ідентифікації сигналів:

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

Перші дві ознаки застосовуються в основному в експертних та напівавтоматичних системах виявлення та ідентифікації звукових сигналів. У більшості автоматичних систем ідентифікації звукових сигналів в якості ознак застосовуються вектори кепстральних коефіцієнтів:

- лінійно-частотних кепстральних коефіцієнтів (LFCC, Linear Frequency Cepstral Coefficients), отриманих по спектру Фур'є;
- мел-частотних коефіцієнтів (MFCC, Mel-Frequency Cepstral Coefficients), отриманих по спектру Фур'є;
- коефіцієнтів лінійного прогнозування (LPCC, Linear Prediction Cepstral Coefficients);
- коефіцієнтів перцептивного лінійного прогнозування (PLP, Perceptual Linear Prediction) [6].

1.2 Перспективні методи виявлення дронів

Як і усякий матеріальний об'єкт, дрон несе в собі ознаки, які демаскують і видають його в навколишньому просторі, роблячи помітним для виявлення. Ступінь помітності визначається рівнем його сигнатур у радіочастотному, видимому та інфрачервоному діапазонах, а також у звуковому діапазоні. Сучасні легкі дрони мають сигнатури незначної величини: дрони виконують із композитних матеріалів та пластику зі спеціальним забарвленням та із особливою комбінацією шарів, їх невеликі бензинові та тим паче електричні двигуни випромінюють мало тепла та майже безшумно працюють. Тому для ефективного виконання поставленої задачі необхідне одночасне застосування декількох способів виявлення [9].

Найбільшу вразливість дронів зумовлює наявність електромагнітного випромінення. До електромагнітних демаскуючих ознак відносяться:

- сигнали бортового відповідача;
- сигнали радіолокаційних станцій (РЛС), відбиті від корпусу та агрегатів дронів;
- сигнали ТВ передавачів і ретрансляторів, ширококомовних станцій, базових станцій мобільного зв'язку, відбиті від дронів;
- команди та відповіді каналу управління між наземним пунктом управління та дроном, а також між дроном та супутником – ретранслятором навігаційної системи;
- сигнали бортових РЛС бокового огляду;
- сигнали системи автоматичної посадки дрону;
- канали обміну розвідувальною відеоінформацією.

Основні способи виявлення дронів в електромагнітному спектрі:

- використання камер оптичного діапазону хвиль;
- використання тепловізорів інфрачервоного (ІЧ) діапазону хвиль;
- виконання радіомоніторингу;
- використання РЛС.

Для виявлення об'єктів з температурою, яка відрізняється від температури навколишнього середовища, застосовуються ІЧ тепловізійні камери, що дозволяє вести спостереження за дронами навіть в умовах обмеженої видимості або у темний час доби. Для досягнення найбільш інформативних та стабільних результатів можливе поєднання тепловізійних знімків із видимими зображеннями. Для цього використовується тепловізор та відеокамера для одночасного ведення відеозйомки у видимому діапазоні. Отримані ІЧ зображення у відтінках сірого можуть бути перетворені на псевдокольорові, де холодним відтінкам відповідають низькі температури, а теплим – високі [9].

Для виявлення дронів в оптичному діапазоні хвиль існують активні та пасивні методи. Активними методами вважаються метод анагліфу та метод

визначення координат дронів у просторі. Пасивні методи включають метод візуального спостереження та метод комбінованого стереоефекту.

Дієвим засобом виявлення дронів є радіолокаційні станції (РЛС). У ряді випадків дронів є складною ціллю для існуючих РЛС. Ці апарати мають дуже невелику ефективну площу розсіювання (ЕПР), через що їх виявлення стає досить складною задачею. Зокрема сильно зменшується максимальна дальність виявлення.

Враховуючи встановлення на дрони антирадарних покриттів, найбільшу ефективність дає використання двочастотних імпульсних РЛС. Перша група частот знаходиться в дециметровому діапазоні, друга в сантиметровому діапазоні [9].

Радіомоніторинг є отриманням інформації з застосуванням технічних засобів на ділянці її проходження по лініях радіозв'язку. В основному, включає діяльність із вивчення радіо обстановки, пошуку, виявлення і контролю різних каналів радіозв'язку, інших джерел радіовипромінень. Задачами радіомоніторингу ефіру є:

- панорамний спектральний аналіз в реальному масштабі часу;
- пошук випромінень від дронів, вимірювання параметрів цих сигналів, порівняння із базою даних для визначення їх приналежності;
- запис радіосигналів зі службовими параметрами (час, частота, спектрограма, рівень) та подальше їх відтворення;
- технічний аналіз радіосигналів у реальному масштабі часу та при відкладеній обробці;
- пеленгування дронів.

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

Виявлення радіолокаційними методами ускладнено, оскільки дрони мають малу помітність, а також особливостями траєкторії польоту (можливість зависання та різких змін траєкторії), малими висотами та швидкостями. Візуальне спостереження також не є ефективним, до того ж має низку обмежень фізіологічного характеру спостерігача. Отже, пошук нових підходів до виявлення та ідентифікацією літальних апаратів, у тому числі дронів, з подальшим знешкодженням є актуальною задачею.

Одним із таких напрямків є звуковий або інфразвуковий метод спостереження. Головною перевагою застосування звукових засобів виявлення літальних апаратів, у тому числі дронів, є робота у пасивному режимі, що забезпечує їх скритність, а тим самим безпеку обслуговуючого персоналу. Шум гвинту літального апарату утворюється, головним чином, внаслідок силової взаємодії лопатей гвинта з навколишнім повітрям у процесі створення тяги. Генерація звукового випромінень також може відбуватися і при аеродинамічній взаємодії лопатей з турбулентними утвореннями в потоці, що набігає [9].

1.3 Звукові шуми природного та антропогенного походження

Для проведення звукових вимірювань та забезпечення необхідної якості отриманих результатів розглянемо звукові 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 звукових випромінень об'єктів природного та штучного походження. Для вирішення цієї задачі необхідно знати звукові властивості атмосфери, шумові властивості як природних процесів, так і шумів, пов'язаних із діяльністю людини, функціонуванням технічних об'єктів, промислових та інфраструктурних об'єктів. Головний інтерес представляють широкосмугові

звукові імпульси. Звукове поле будь-якого складного технічного об'єкта формується як сума звукових полів окремих джерел випромінення. При цьому можливим є екранування випромінення окремих джерел елементами самого об'єкту. Поширення шумів в атмосфері і поблизу поверхні землі супроводжується низкою ефектів, що призводять до змін інтенсивності і спектру випромінення. Так основними джерелами шуму літака є його рушії (повітряні гвинти літаків з турбогвинтовим (ТВД) і пропелерним двигуном (ПД), реактивні струмені силової установки (СУ) літаків з турбореактивним (ТРД) і турбореактивним двоконтурним двигуном (ТРДД), лопаткові машини (вентилятор, компресор, турбіна) газотурбінного двигуна (ГТД), елементи планеру літака (шасі, механізація крила). Лопаткові машини ГТД генерують випромінення із дискретними і безперервними по частоті спектрами. За інтенсивністю домінує випромінення з дискретним спектром на гармоніках частоти обертання лопаток робочих коліс (частоти 1...4 кГц) і на гармоніках частоти ротора (надзвукові вентилятори, область частот 0,5...2 кГц). Реактивний струмінь генерує безперервне за частотою випромінення із максимальною спектральною щільністю потужності в області НЧ

$$f_{\max} = \frac{S_h U_0}{d},$$

де $S_h = 0,2 \dots 0,3$ – число Струхаля,

U_0 – швидкість витікання струменів,

d – діаметр сопла реактивних струменів.

Планер літака є джерелом широкосмугового шуму із максимальною спектральною щільністю в області СЧ. Такі думки справедливі і для гелікоптерів. У колісної та гусеничної наземної техніки головними джерелами шуму є двигун, елементи трансмісії, ходової (для гусеничних машин), елементи системи вихлопу. Для різних компонентів звукового поля наземної техніки характерні різні діаграми спрямованості. Розповсюдження

шумів двигуна, як правило, пов'язано з напрямком викиду системи вихлопу. Шуми ходової і трансмісії мають кругову діаграму. Рівень зовнішнього шуму може досягати значення до 90 дБ. Основна енергія звукового сигналу знаходиться в смузі частот обертання колінчастого валу силової установки. Залп рушниць або гармати є широкосмуговим звуковим імпульсом, який представляє собою суму великої кількості гармонік. При моделюванні розповсюдження такого сигналу в атмосфері необхідно враховувати енергетичні втрати [10].

Так як коефіцієнт поглинання звуку залежить від частоти, то і амплітуда кожної гармоніки широкосмугового сигналу буде змінюватися з відстанню до джерела за своїм законом. Отже, при поширенні широкосмугового звукового імпульсу в атмосфері крім загального зменшення амплітуди буде відбуватися зміна його форми. Широкосмуговий звуковий імпульс можна розглядати як аперіодичну функцію звукового тиску від часу, яка обертається в нуль на нескінченності і представити у вигляді інтегралу Фур'є. Для спрощення розрахунків вважається, що звук поширюється в однорідному об'ємі повітря, де встановилися нормальні умови: температура – 293,15 К, тиск – 1013 мбар, вологість – 80%. У цьому випадку вертикальний градієнт коефіцієнта поглинання звуку має лінійну залежність від відстані [10].

1.4 Особливості звукового випромінення дронів

Шум гвинта літального апарату утворюється, в основному, в результаті силової взаємодії лопатей гвинта з оточуючим повітрям в процесі створення тяги і при витісненні повітря з фіксованого об'єму середовища лопатями. Генерація звукового випромінення може також відбуватися і при аеродинамічній взаємодії лопатей з турбулентними утвореннями в набігаючому потоці. У відповідності з цим шум малонавантаженого гвинта діляють на шум обертання і широкосмуговий шум. В точку спостереження

будуть приходити імпульси, викликані проходженням кожної лопаті, що збурює повітря [11].

Дані збурення виконуються стільки разів, скільки лопатей має гвинт. Оскільки шум обертання має певну частоту, то про шум гвинта можна судити як про звук певного тембру, тобто в ньому мають існувати гармоніки. Аналіз повітряного гвинта, що має N лопатей і обертається із кутовою швидкістю Ω , виконують з точки зору періодичних динамічних систем. Для 1-ї лопаті період складає $T = 2\pi/\Omega$. В безрозмірному часі період дорівнює 2π . Для гвинта період складає $T = 2\pi/N\Omega$. Звуковий сигнал дронів представляє собою суму гармонік з частотами, кратними частоті обертання ротору або колінчатого валу двигуна F . Амплітуди гармонік зменшуються зі зростанням частоти [11].

Причому в режимі стаціонарного польоту (прямолінійний рівномірний рух, двигун працює в незмінному режимі) амплітуда кожної наступної гармоніки при збільшенні частоти є менше амплітуди попередньої гармоніки. Під час зміни режиму двигуна або при виконанні маневру відбувається зміна частоти звукового випромінення. В останньому випадку вона зумовлена ефектом Доплера. Також при виконанні маневру змінюється орієнтація дрону відносно точки спостереження і по причині спрямованості звукового випромінення змінюється інтенсивність звукового поля в точці прийому. При зазначених вище умовах амплітуди певних ВЧ гармонік можуть перевищувати амплітуди НЧ гармонік (в переважній же більшості випадків 1 гармоніка має найбільшу амплітуду). Тому в загальному випадку амплітуди гармонік є випадковими величинами. Фази гармонік також є випадковими величинами, розподіленими по рівномірному закону. Оскільки головним джерелом звукового шуму дронів з електричним двигуном (ЕД) є шум гвинта, то математична модель звукового випромінення дронів за відсутності шумів може бути представлена у такому 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 – число гармонік звукового випромінення;

A_m – амплітуда m -тої гармоніки;

N – число лопатей гвинта;

φ_m – фаза m -тої гармоніки.

Дана модель була створена на основі проведених вимірювань та аналізу звукових сигналів дронів і подальшої статистичної обробки отриманих результатів [11]. Спектральний аналіз записаних реалізацій сигналів проводився за допомогою періодограми.

На рис. 1.1 показано періодограму звукового сигналу дрону з електродвигуном і повітряним гвинтом з 3-ма лопатями. Частота дискретизації сигналу $f_s = 8$ кГц, тривалість швидкого перетворення Фур'є складає $N=512$.

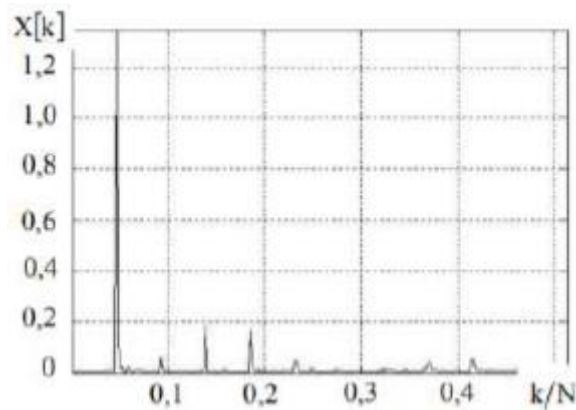


Рисунок 1.1 – Періодограма звукового сигналу дрону з електродвигуном і повітряним гвинтом з 3-ма лопатями [11]

Головним джерелом шуму дронів з двигуном внутрішнього згорання (ДВЗ) є сам двигун. Другорядним джерелом шумів є повітряний гвинт. Модель його звукового сигналу можна записати у такому вигляді:

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

A_k – амплітуда k -ої гармоніки;

K – число гармонік звукового випромінення ДВЗ;

φ_k – фаза k -ої гармоніки.

Для дрону з 2-тактним ДВЗ, гвинт з 2-ма лопатями, гармоніки звукового випромінення, номери яких кратні двом (парні), матимуть амплітуду більше, ніж сусідні непарні гармоніки. Якщо ж дрон має 4-тактний ДВЗ, то гармоніки, номери яких кратні чотирьом, матимуть амплітуди, більше за амплітуди сусідніх гармонік. Це пояснюється додаванням потужностей гармонік звукового випромінення двигуна та повітряного гвинта. Виняток з вказаного правила становить перша гармоніка, яка звичайно має найбільшу амплітуду [11].

Періодограма звукового сигналу малорозмірного дрону з ДВЗ зображена на рис. 1.2.

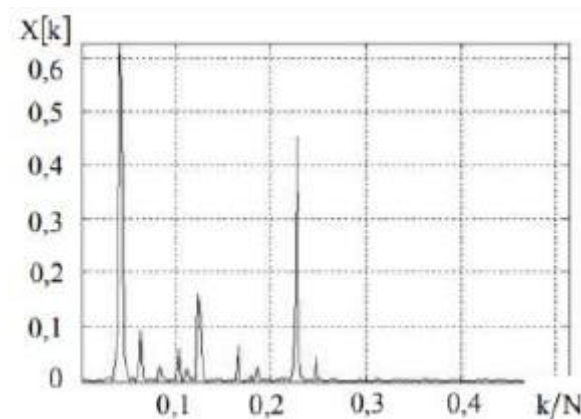


Рисунок 1.2 – Періодограма звукового сигналу дрону з ДВЗ [11]

З підвищенням частоти гармонік відбувається розширення спектральних ліній звукового випромінення двигунів обох типів, оскільки починають проявлятися шуми випадкової природи. Акустичне випромінення дронів мультироторного типу від одного гвинта описується аналогічно дронам з ЕД (ДВЗ на дронах такого типу як правило не застосовується).

Зазвичай частоти кожного з двигунів не співпадають, а відмінні на певну незначну величину, що залежить від динаміки руху дрону. Тоді математичну модель звукового випромінення такого дрону 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 у частотах обертання гвинтів спектральні лінії звукового випромінення будуть розширеними в порівнянні зі спектральними лініями звукового випромінення дронів літакового типу (з одним гвинтом). На рис. 1.3 наведена періодограма звукового випромінення дронів мультироторного типу з чотирма гвинтами [11].

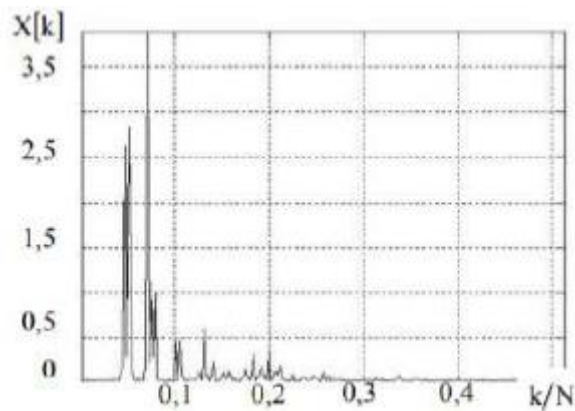


Рисунок 1.3 – Періодограма звукового сигналу дрону мультироторного типу з чотирма гвинтами [11]

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

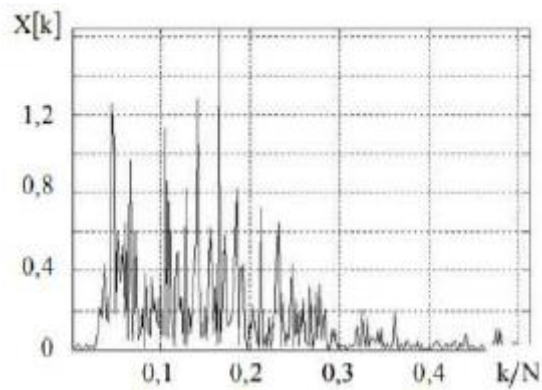


Рисунок 1.4 – Періодограма звукового сигналу дрону мультироторного типу з шістьма гвинтами [11]

В загальному випадку сигнали звукового випромінення дронів є частотно-модульованими і їх моделі для ДВЗ та повітряного гвинта дронів 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 звукового сигналу, що виникає внаслідок зміни режиму роботи двигуна або виконання маневру;

F_m – частота модуляції, викликана зазначеними ефектами.

Як було зазначено вище, частотний склад звукового випромінення дронів 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 показані спектральні оцінки типових звукових сигналів вертольота та гвинтомоторного літака відповідно. В них також можна простежити гармонійні складові, що пов'язані з частотами обертання їх повітряних гвинтів [11].

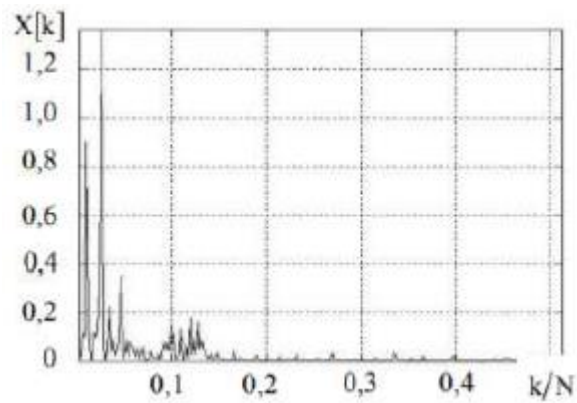


Рисунок 1.5 – Періодограма звукового сигналу вертольота [11]

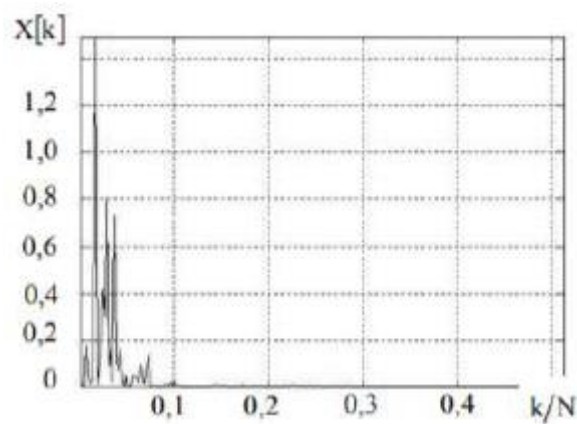


Рисунок 1.6 – Періодограма звукового сигналу гвинтомоторного літака [11]

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

1.5 Інформаційні характеристики звукових сигналів дронів

Основними джерелами шуму дронів є двигун, повітряний гвинт та планер. Оскільки швидкості польоту таких дронів дозвукові, то аеродинамічним шумом планера можна знехтувати через його невелику значущість. Джерелами шумів в поршневому двигуні є процеси впуску свіжого заряду (шум впускання), горіння, впуску відпрацьованих газів (шум

випуску); механічне переміщення деталей, що супроводжується ударами та тертям на стиках. Останні, разом з процесом горіння є джерелами корпусного шуму. Звуковий шум, зазвичай, збільшується зі збільшенням потужності двигуна.

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

Двигуни більшості нереактивних дронів є досить малими для використання глушників та зниження таким чином звукової помітності. Крім того, природний та антропогенний шум навколишнього середовища ускладнює виявлення дронів за їх акустичним портретом. Але оскільки дрони цього класу мають малі ІЧ та радіолокаційні сигнатури, порівняно з пілотованою авіацією, то використання звукових каналів для їх виявлення стає дуже актуальним. Звукові сенсори дозволяють наземним засобам здійснювати пошук і виявлення дронів в пасивному режимі, знижуючи таким чином можливість виявлення супротивником власних позицій. Тому модифікація існуючих звукових систем пошуку або створення нових може забезпечити надійний метод виявлення дронів.

Для детального аналізу звукових сигналів використовують решітки мікрофонів, оскільки використання окремого мікрофону дасть лише грубу оцінку звукового сигналу. Звукові антенні решітки можуть ефективно застосовуватися для виявлення та супроводу низьколітаючих дронів на тактичних відстанях. У той самий час звукова решітка, крім просторового накопичення сигналів, дозволяє оцінювати час приходу фронту звукової хвилі у різні точки простору, що, своєю чергою, сприяє оцінці кута поширення хвилі щодо решітки, тобто. можна обчислити пеленг джерело випромінення. Для дронів середнього розміру з двигуном внутрішнього згорання дальність виявлення в п'ять разів перевищує цей показник для безпілотної з електричним двигуном [12].

Характеристики спрямованості – одні з найважливіших характеристик джерел шуму авіації. Чинники спрямованості випромінення різних джерел

застосовують у класичних підходах авіаційної акустики до розрахунку очікуваних рівнів шуму літаків. Ці методи розрахунку також входять до методики прогнозування меж чутності та помітності малорозмірних дронів з гвинтомоторною установкою.

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

Сумарний спектр звукового випромінення тактичного дрону обумовлений широкосмуговими та гармонійними складовими. Він складається з гармонійних складових випромінення від двигуна, випромінення механічного походження, шуму обертання гвинта, а також НЧ і ВЧ складових шуму двигуна з безперервними спектрами по частоті. У шумі силової установки дрону, що, за відсутності в його вихлопному тракті глушника, включає поршневий двигун повітряного охолодження, визначальним джерелом зовнішнього шуму є поршневий двигун.

Із частотами $f_i = f_0 \cdot i$ слідує дискретні складові, які кратні частоті запалювання f_0 , де $i = 1, 2, 3, \dots$ – номер відповідної гармоніки. На ВЧ значущість періодичних процесів у формуванні спектра звукового випромінення двигуна помітно ослаблюється, оскільки важливу роль в сумарному звуковому випроміненні починають грати процеси випадкової природи. Зокрема, вихрова складова може бути суттєвою для шуму вихлопу.

Насправді вихлопний тракт двигуна формує в атмосфері послідовність імпульсів звукового тиску, частотний спектр якого показаний на рис. 1.7.

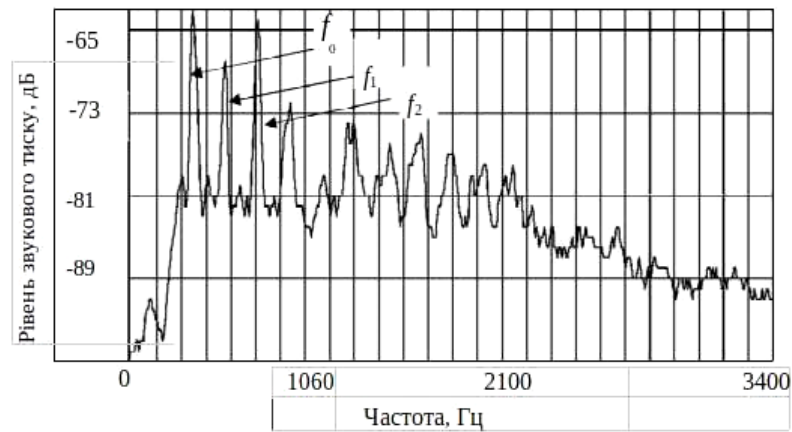


Рисунок 1.7 – Типовий спектр звукового випромінення роботи силової установки дрону [12]

Інший інформаційною характеристикою звукових сигналів дронів, використовуваний їхнього розпізнавання, є фазовий портрет цих сигналів.

Геометричну дальність виявлення звукових сигналів визначають зоною звукової 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 дрону прийняті пасивним содаром звукові коливання дрону перетворюються на електричний сигнал, що представляє собою реалізацію випадкового процесу, опис якого може бути дано енергетичним спектром. Тому інформаційними ознаками звукового образу дрону 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 дронів та модуль, що реалізує правило прийняття рішень [12].

При виконанні звукових 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 у дронів), але шуми вітру можуть його маскувати при слабкому сигналі дрону. В такому випадку необхідно розглянути взаємно-кореляційні властивості шуму вітру та сигналу у вікнах аналізу. Взаємно-кореляційні властивості також доречно застосувати при спостереженні звукових сигналів дронів 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 звукового випромінення безпілотною 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 дронів

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

Дослідження складних коливань, до яких відносяться і звукові сигнали дронів, 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 звукових сигналів дронів на основі аналізу ФР є актуальним завданням, вирішення якого

дозволить проводити надійне виявлення дронів 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 відріжку) 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 необхідно є значна кількість даних (порядку $10^3 \dots 10^4$ 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 звукових сигналів дронів

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

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

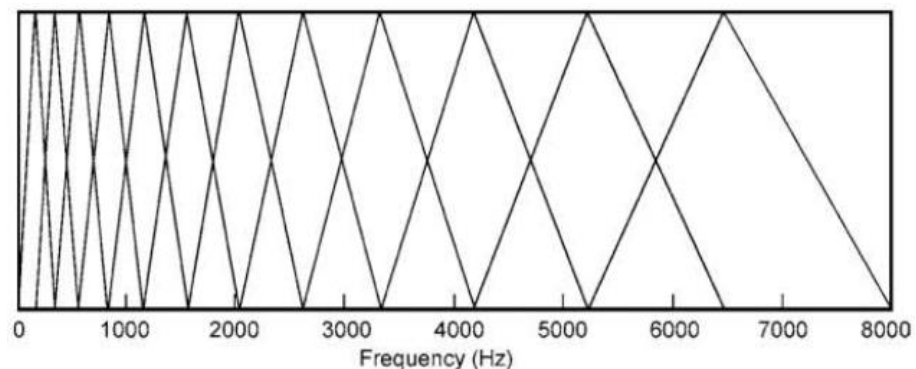


Рисунок 1.8 – Банки мел фільтрів [13]

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

1.8 Огляд існуючих методів виявлення малорозмірних дронів

Сучасні легкі дрони мають сигнатури невеликої величини: дрони 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 дронів обумовлює наявність електромагнітного випромінення. До електромагнітних демаскуючих ознак відносяться:

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

Основні способи виявлення дронів в електромагнітному спектрі:

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

2 АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЗВУКОВИХ СИГНАЛІВ МАЛОРОЗМІРНИХ ДРОНІВ

2.1 Отримання вектора ознак на основі мел-кепстрального методу

В системах автоматичного розпізнавання звукового випромінення дронів виділяють 3 основних етапи: навчання, розпізнавання та виділення інформаційних ознак. На 1-му етапі виділяють вектор ознак з прийнятого звукового сигналу, який є компактним описом звукових характеристик сигналу, що є достатнім для розпізнавання. Навчання передбачає отримання набору еталонних векторів ознак звукового випромінення для ряду моделей дронів 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 дронів 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 випромінення об'єкту [2].

Мел-кепстральні коефіцієнти характеризують сигнал по його спектру та амплітуді. Використання MFCC дозволяє стиснути сигнал, а отже, зменшити кількість даних, що потрібні для представлення сигналів. Мел – одиниця висоти звуку, заснована на сприйнятті цього звуку органами слуху людини. Висота тону логарифмічно залежить від частоти звуку. Найбільш ефективним є застосування мел-шкали для чистого тону, при суміші сигналу з шумом спадає ефективність методу. Кепстр є енергетичним спектром

функції – це результат зворотного перетворення Фур'є від логарифму оцінки сигналу [3].

Алгоритм розрахунку мел-кепстральних коефіцієнтів складається з таких кроків: перехід до представлення сигналу в частотній області шляхом дискретного перетворення Фур'є та розрахунок спектру сигналу, розбиття вихідного сигналу на окремі відрізки, логарифмування розрахованих коефіцієнтів, отримання мел-частотних спектральних коефіцієнтів, використання дискретно-косинусного перетворення.

При обробці отриманих звукових сигналів, для зменшення зовнішніх техногенних шумів, сигнал потрібно обробити за допомогою ФВЧ. Потім, виконати кадрування сигналу, тобто розділити сигнал на фрагменти певної довжини, а їхні спектри залишатимуться відносно незмінними на певному інтервалі і будуть меншими за час спостереження звукового випромінення дрону. Після цього проводиться нормалізація сигналів в межах отриманих сегментів. Це потрібно, оскільки на рівень звукового сигналу впливає режим роботи двигунів, їх кількість, погодні умови, відстань до мікрофона. Нормалізація дозволяє зменшити діапазон рівнів звукового сигналу у різних умовах польоту дрону. Після нормалізації початковий сегмент розбивається на субсегменти з перекриттям на 75% у межах сегменту (для усунення спотворень, що викликають розташовані поруч кадри) [3].

Для зменшення спотворень спектрального аналізу кожен субсегмент помножується на вагову функцію і розраховується дискретне перетворення Фур'є (2.1). В якості вагової функції обираємо вікно Хемінга, але можна застосувати і інші види вікон. Застосування вагових функцій дозволяє зменшити розтікання структури на границях 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 $f = F_s / N$, де F_s – частота дискретизації сигналів.

Для збільшення відношення сигнал / шум здійснюється накопичення спектрів в межах сегмента [3].

Сигнал, представлений в частотній області проходить через смуговий фільтр з трикутною апроксимацією частотної характеристики. Границі частотної характеристики фільтрів розраховуються в шкалі мел.

Віконна функція для реалізації фільтрів описується як:

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

де m – номер фільтра,

$m \in 1..N_F$, N_F – число смугових фільтрів.

За виразом (2.3) обчислюється енергія сигналу кожної смуги трикутного вікна в логарифмічному вигляді:

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

де k – номер відліку спектру.

Наступним етапом є застосування дискретно-косинусного перетворення для декореляції компонентів і зменшення кількості вихідних параметрів. В результаті перетворення отримуємо вектор C (вектор ознак), що містить набір мел-частотних кепстральних коефіцієнтів

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

де N_{kk} – число розрахованих коефіцієнтів.

Результатом виконання описаного алгоритму є заміна значної кількості відліків звукового випромінення на набір мел-частотних кепстральних коефіцієнтів.

Правило прийняття рішень базується на порівнянні вектора ознак звукового випромінення з вектором ознак, який був сформований на етапі навчання [2]. Прийняття рішення про приналежність вхідних звукових параметрів, які представлено вектором ознак, базується на методах кореляційного аналізу. Коефіцієнт кореляції між координатами точок простору параметрів звукових характеристик є мірою ступенем близькості векторів параметрів 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 дронів на основі мел-частотних кепстральних коефіцієнтів є не сильно чутливим до шумів навколишньої середовища.

Алгоритм системи ідентифікації особистості на підставі голосових даних реалізується за допомогою наступних кроків.

1. Етап обробки сигналу. Виділення ознак, суттєвих для задачі розпізнавання та формування вектора ознак.
2. Етап моделі. Дозволяє шляхом формування математичної моделі проводити зіставлення векторів ознак один з одним та розраховувати ступень подібності між зареєстрованими ознаками та збереженою моделлю.
3. Етап ухвалення рішень. Проводить винесення кінцевих рішень на основі отриманих ступенів подібності і, якщо необхідно, заданих порогових значень [2].

На цей час у галузі склався типова методика попередньої обробки звукового 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 вагової функції може служити вікно Хемінга:

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

де N – тривалість вікна у відліках.

Вагова функція застосовується для зменшення спотворень у аналізі Фур'є, викликаних скінченністю вибірки. Тоді дискретне перетворення Фур'є зваженого сигналу можна записати як:

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

Значення індексів k відповідають таким частотам:

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

де F_s – частота дискретизації сигналу.

Отримане представлення сигналу в частотній області розбивають на діапазони банком фільтрів з трикутною АЧХ (рис 1.8). Границі фільтрів розраховують по шкалі мел. Перехід у мел-частотну область здійснюється за виразом:

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

Нехай N_{FB} – число фільтрів (звичайно використовують близько 24 фільтрів); (f_{low}, f_{high}) – діапазон досліджуваних частот. Потім цей діапазон переводять у шкалу мел, розбивають на N_{FB} послідовно розподілених діапазонів, які перекриваються, і розраховують відповідні межі в області лінійних частот. Позначимо як $H_{m,k}$ – вагові коефіцієнти одержаних фільтрів. Фільтри застосовуються до квадратів модулів коефіцієнтів перетворення Фур'є. Отримані значення логарифмуються за виразом:

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

Заключним етапом у розрахунку коефіцієнтів MFCC є дискретне косинусне перетворення

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

Коефіцієнт c_0 не застосовується, оскільки виражає енергію сигналу. Кількість коефіцієнтів N_{MFCC} на практиці вибирають від 12 до 30. На рис. 2.1 показано приклад графіка мел-кепстральних коефіцієнтів [3].

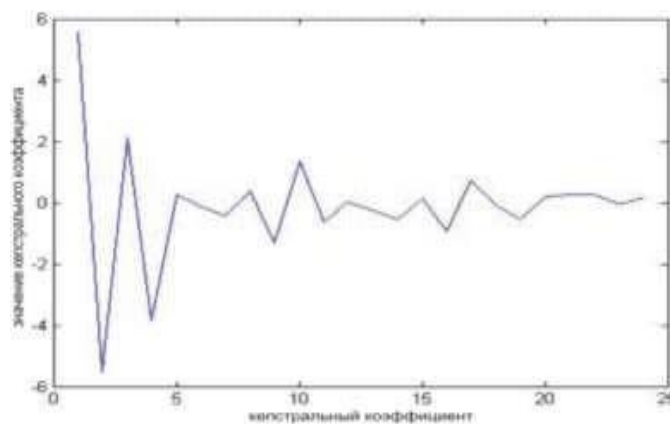


Рисунок 2.1 – Приклад набору мел-кепстральних коефіцієнтів для фрази «один, два, три» [3]

Для типових звукових сигналів, що застосовуються під час ідентифікації людини (коротких фраз типу «один, два, три»), кількість блоків розбиття, для яких підраховуємо коефіцієнти MFCC, є плаваючою величиною, яка залежить від тривалості звучання фрази [2]. Відповідні вектори ознак також мають різну довжину і містять близько кількох тисяч кепстральних коефіцієнтів. У певних випадках до цих даних можуть додаватися ще й обчислені на основі MFCC значення перших і других похідних по часу, що теж збільшує розміри векторів.

Існує декілька підходів до фіксації та зменшення розміру результуючого вектора ознак:

- для розбиття сигналу брати не фіксований розмір вікна для всіх зразків, а розбивати їх на фіксоване число вікон, з розміром, що розраховується для кожного зразка;

- не розбивати сигнал на вікна, а отримувати вектор ознак значень мел-частотних кепстральних коефіцієнтів для всього сигналу [3]. Для усіх зразків розмір вектору ознак дорівнюватиме заданому числу кепстральних коефіцієнтів. Опис сигналу стає вкрай грубим;

- наводити усі зразки на етапі попередньої обробки до однієї довжини. Даний метод є неприйнятним у задачі розпізнавання диктора, оскільки вносить спотворення у вихідний сигнал.

У даній роботі було запропоновано новий метод формування вектора ознак для зразка сигналу дрону на основі частотного розподілу значень, отриманих при застосуванні алгоритму мел-частотних кепстральних коефіцієнтів. Будемо працювати з набором векторів кепстральних коефіцієнтів, розміром $M_x N_{MFCC}$, де M – число блоків, на які розбивається сигнал, а N_{MFCC} – число обчислених мел-частотних кепстральних коефіцієнтів для кожного блоку, що формуються на виході описаного вище алгоритму. Встановимо кількість інтервалів, у яких потрібно згрупувати значення коефіцієнтів, і потім встановимо межі цих інтервалів. Далі підраховуємо кількість потраплянь значень мел-кепстральних коефіцієнтів у

кожний інтервал за усіма блоками. Замість набору векторів кепстральних коефіцієнтів отримуємо один вектор, з єдиною для усіх зразків розмірністю, яка значно менша за розмірність матриці векторів. Розмірність даного вектора можна змінювати, виходячи з необхідної точності частотного розподілення (кількості інтервалів кишень при розрахунку частот), а також числа застосованих кепстральних коефіцієнтів [2, 3].

2.2 Методи дослідження фрактальної розмірності сигналів дронів на основі показників Херста

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

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

Фрактальний аналіз. Останнім часом набули розвитку методи дослідження часових рядів, згідно яких часові послідовності змінювання досліджених сигналів розглядаються як сукупність хаотичних та періодичних процесів. Хаотичний компонент в таких сигналах міститься як в зміненні частот, так і в динаміці форми запису сигналів [17].

Дослідження даного алгоритму становить інтерес зіставленням періодичних та хаотичних компонент сигналу з одного боку та дослідження динаміки хаотичних компонент з іншого. Фрактали – це множини, які мають властивість самоподібності, об'єкт, що точно або приблизно збігається з частиною себе самого, тобто ціле має ту ж саму форму, що й одна або більше його частин.

Метод вивчення детермінованих неперіодичних процесів, для яких неможливе довгострокове прогнозування є одним з підходів до дослідження хаотичної компоненти, який застосовує алгоритм реконструкції дивних атракторів. Дивні атрактори можуть бути описані фрактальною розмірністю. Методи визначення фрактальної розмірності досліджуються при наявності у досліджуваної системи атракторів. Оскільки рішення для більшості нелінійних задач являють собою фрактали, фрактальні множини посідають важливе місце в теорії динамічних систем [17]. Їх фрактальна розмірність вказує на близькість подібних множин до регулярних об'єктів і дозволяє визначити кількість незалежних змінних, що описують їх.

Метод Херста часто використовують для порівняння фрактальних властивостей різноманітних процесів. В даному методі для аналізу часових рядів використовується безрозмірний показник, що визначається відношенням розмаху R накопиченого відхилення від середнього до середньоквадратичного відхилення S (R/S). Якщо побудувати залежність параметрів (R та S) у подвійному логарифмічному масштабі, можна отримати досліджуваний процес у вигляді фрактальної функції. Визначимо кутовий коефіцієнт H , що називають показником Херста, апроксимуючи визначену фрактальну функцію лінійно.

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

$$D = 2 - H.$$

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

- антиперсистентні ($0 < H < 0.5$) – для яких характерна знакозмінна тенденція в сукупності з відносно високим рівнем шуму;
- персистентні ($0.5 < H < 1$) – для яких характерне збереження стійкості тенденції у сукупності з відносно низьким рівнем шуму;

– процеси з відсутністю тренду та ступенем зашумленості яку неможливо врахувати у методі Херста ($H = 0.5$). Такі властивості характерні для білого шуму.

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

Застосування показника Херста для енергетичних та частотних спектрів динамічних процесів є гарним прикладом комбінованої методики використання теорії фракталів та вейвлет аналізу для виявлення особливостей часових рядів. При цьому аналізуються множини, які характеризують енергії частотних складових і частотний спектр.

Фазовий портрет. На підставі теоретичних даних системи з нелінійною поведінкою, які обумовлені хаотичними компонентами, представляють собою так звані атрактори. Тому з метою дослідження звукових сигналів дронів на предмет хаотичної поведінки потрібно побудувати двовимірні проекції системи. Такі дослідження також мають сенс для обчислення діаметру атрактора при обчисленні показника Ляпунова.

При описанні звукового сигналу кінцевим набором параметрів n , динаміку сигналу зручно розглядати в певному абстрактному просторі, осі якого утворені змінними x_1, \dots, x_n . Такий n -мірний простір називають фазовим портретом. Кожному стану системи відповідають точки в цьому просторі і кожній точці із цього простору відповідає єдиний стан системи. Рух точки у фазовому просторі відповідає змінам стану системи, а траєкторія цієї точки зветься фазовою траєкторією [17].

Фазові діаграми є потужними засобами для дослідження хаотичних процесів, тому що показують поведінку досліджуваних систем чи процесів в геометричній формі. Атрактори можуть бути періодичними (лімітований цикл), статичними (фіксована точка), квазіперіодичними (тор) або

хаотичними. Хаотичні атрактори також називають «дивними», вони утворюються, коли керівний параметр перевищує критичні значення.

Вейвлет-аналіз. Термін «вейвлет» з'явився відносно недавно, вейвлет в 1980-х роках запропонували О. Гросман та Ж. Морле, та використовується для аналізу властивостей сейсмічних та звукових сигналів і перекладається як «маленька хвиля». Вейвлет-аналіз використовується для обробки нестационарних сигналів при описі особливостей цих сигналів, стисненні, фільтрації перешкод [17].

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

Щоб описати функцію $x(t)$ із локальними особливостями розглядається перетворення виду:

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

де c_k – коефіцієнт розкладання;

$\psi_k(t)$ – базисна функція, спектр якої локалізований в частотній області.

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

Якщо до виразу (2.12) застосувати віконне перетворення Фур'є, в якому вікно $\psi(t - b)$ зсувається уздовж часової осі для розрахунку прямого перетворення Фур'є з центром у точці b , то перетворення Фур'є буде залежним від часу, і в результаті отримуємо частотно-часове представлення

сигналу. Для забезпечення частотної локалізації треба ввести аргумент a – коефіцієнт масштабу, що є аналогом частоти. Тоді функція матиме вигляд:

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

В формулі (2.13) параметр b вказує на зсув функції вздовж вісі часу і визначає її локалізацію в часі, а масштабний параметр a забезпечує локалізацію по частоті, що визначається стисненням або розтягуванням базисної функції. Великі значення a відповідають НЧ, малі – ВЧ. Параметр a масштабує не лише параметр t , а й змінну зсуву b так, що при стисненні або розтягненні функції зберігається відношення $b/a = \text{const}$ [17].

В науковій літературі описана достатня кількість вейвлетів, багато з яких входять до типових пакетів математичних програм. Для описання локальних властивостей сигналу застосовують сукупність вейвлетів, які утворюються єдиною початковою функцією базису, а також:

- мають можливість зсуву по часовій вісі;
- мають вигляд коротких, локалізованих у часі хвиль;
- спектр частот обмежений;
- здатні до масштабування [17].

В результаті вейвлет-перетворення скалярної функції отримаємо двовимірний масив значень коефіцієнтів $C(a,b)$, в якому міститься комбінована інформація про аналізований сигнал. Розподіл значень коефіцієнтів в просторі «часовий масштаб – часова локалізація» несе інформацію про внесок компонентів різного масштабу у часі і складає вейвлет-спектр. При цьому, певні властивості перетворення не залежать від аналізованого вейвлету, тому вейвлет-аналіз дозволяє мати об'єктивну інформацію про досліджуваний сигнал. До найбільш характерних властивостей вейвлет-перетворень сигналів можна віднести: інваріантність відносно зсуву, інваріантність відносно стиснення чи розтягування, лінійність, диференціювання [17].

Безперервне вейвлет-перетворення потребує значного об'єму розрахунків. Але технічна діагностика найчастіше виконується на кінцевому відрізку часу з обмеженою смугою частот, тому в практичних обчисленнях часто застосовується 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 надана у вигляді:

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

Вейвлет-аналіз ефективно використовувати для розв'язання задач, що пов'язані з фільтрацією сигналу від шуму, коли із сигналу з випадковою перешкодою треба виділити корисний сигнал, при цьому мінімізувавши спотворення, що вносить перешкода. В техніці цікаві результати застосування вейвлетів, що отримані при дослідженні сигналів, що затухають у часі або змінюють свою частоту. Ефективні результати можна отримати при використанні комбінованої методики сумісного використання ШПФ та вейвлет-перетворення, що застосовується, наприклад, при комплексному аналізі сигналів звукового випромінення [17].

2.3 Методика і технологія розрахунку показника Херста

Розглянемо метод реалізації RS-аналізу для часових рядів досліджуваних звукових сигналів. Візьмемо часовий ряд $x = \{x_1, \dots, x_n\}$ для представлення n послідовних значень. Середнє значення часового ряду x визначимо як:

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

Середньоквадратичне відхилення визначається як:

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

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

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

В результаті отриманий ряд Z має середнє, що дорівнює нулю [18]. Наступним етапом буде створення кумулятивного часового ряду Y :

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

Скоригований 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 показує, що це скоригований розмах для x_1, \dots, x_n . Оскільки Y скориговане до середнього нуля, то максимальне значення Y завжди буде більшим або дорівнюватиме нулю. Отже, скоригований розмах R_n завжди буде позитивним числом. Цей скоригований розмах R_n дорівнює відстані, на яку зміщується система за показник часу n [18].

Херст визначив таку 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 називають нормованим розмахом, воно змінює масштаб по міру збільшення приросту часу n , згідно значенню ступеневої залежності, яка дорівнює H , що зазвичай називають показником Херста [18]. Показник Херста може бути наближений за допомогою побудови $\log c (R/S_n)$ навпроти $\log n$ і обчислення нахилу через просту регресію методом найменших квадратів за виразом:

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

Алгоритм обчислення показника Херста можна представити наступними етапами:

1. Період часового ряду N розділяється на A суміжних підперіодів тривалістю 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 як N_k , при цьому $k = 1, 2, \dots, n$. Для кожного I_a тривалості 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 , яке міститься в підперіоді I_a тривалості n .

2. Часовий ряд накопиченого відхилення $X_{k,a}$ від середнього 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 мінімальної величини $X_{k,a}$ в межах кожного підперіоду I_a :

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

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

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

5. Для кожного діапазону R_{Ia} виконується нормалізація шляхом ділення на відповідний S_{Ia} . Тому повторно нормований розмах протягом кожного I_a підперіоду дорівнює R_{Ia}/S_{Ia} . На етапі 1 були отримані суміжні підперіоди довжиною n . Отже, середнє значення R/S для довжини n обчислюється як:

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

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

7. Методом найменших квадратів виконуємо просту регресію на $\log n$ як незалежної змінної і $\log(R/S_n)$, як залежної змінної. Відрізок, який відмічається на координатній осі є оцінкою $\log c$ і є константою. Нахил рівняння є оціночним значенням показнику Херста [18].

3 РОЗРОБКА МЕТОДУ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ДРОНІВ ПО ЇХ ЗВУКОВОМУ ВИПРОМІНЕННЮ

3.1 Звуковий портрет мел-кепстрального методу виявлення дронів

Для тестування та перевірки працездатності було проведено натурний експеримент, який проводився у межах міста. Перші 199 с записувався шум навколишнього середовища, а з 200-ї с до 600-ї с шум дрону – квадрокоптеру, що злітає та віддаляється на відстань 100 метрів.

Розрахунок проводився в середовищі програми MATLAB R2014b, в якості робочої підпрограми використовувалась підпрограма для формування матриці кепстру, що реалізована на основі алгоритму, який дозволяє отримати звуковий портрет.

На основі цієї програми отримуємо мел спектр, тобто усі спектральні складові, які попадають в трикутне вікно та додаються і замість великої кількості відліків вони є однією інтегральною оцінкою, сумою усіх спектральних складових ШПФ. В результаті маємо мел спектр, кількість спектральних складових якого дорівнює кількості спектральних вікон мел фільтрів.

Після цього проводимо кепстральну обробку. В результаті отримаємо кепстральні коефіцієнти для кожної секунди, що записуються в підсумкову матрицю (35 перших коефіцієнтів кепстру). Уся реалізація звукового сигналу розділяється на окремі фрагменти і для кожного з фрагментів формується його звуковий портрет, в якості звукового портрету беремо перші 35 коефіцієнтів на виході після кепстрального аналізу, які пройшли обробку за допомогою мел фільтру.

Застосування мел фільтру потрібне для того, щоби зменшити кількість точок спектрального аналізу.

Обрані характерні моменти з даного тесту, де 1 с відповідає шум навколишнього середовища, 23 с – шум зльоту дрону, 48 с – шум дрону на відстані приблизно 100 м.

На рис. 3.1, 3.4, 3.7 зображено вихідний спектр шуму навколишнього середовища та взльоту дрону для 1 с, 23 с та 48 с відповідно. Мел спектр (рис. 3.2, 3.5, 3.8), який складається із 35 точок, замінює частину вихідного спектру. Потім, для того, щоби отримати інформацію в більш стислому вигляді, із мел спектра отримаємо кепстральне представлення сигналу (рис. 3.3, 3.6, 3.9), дані амплітуди і є вектором ознак.

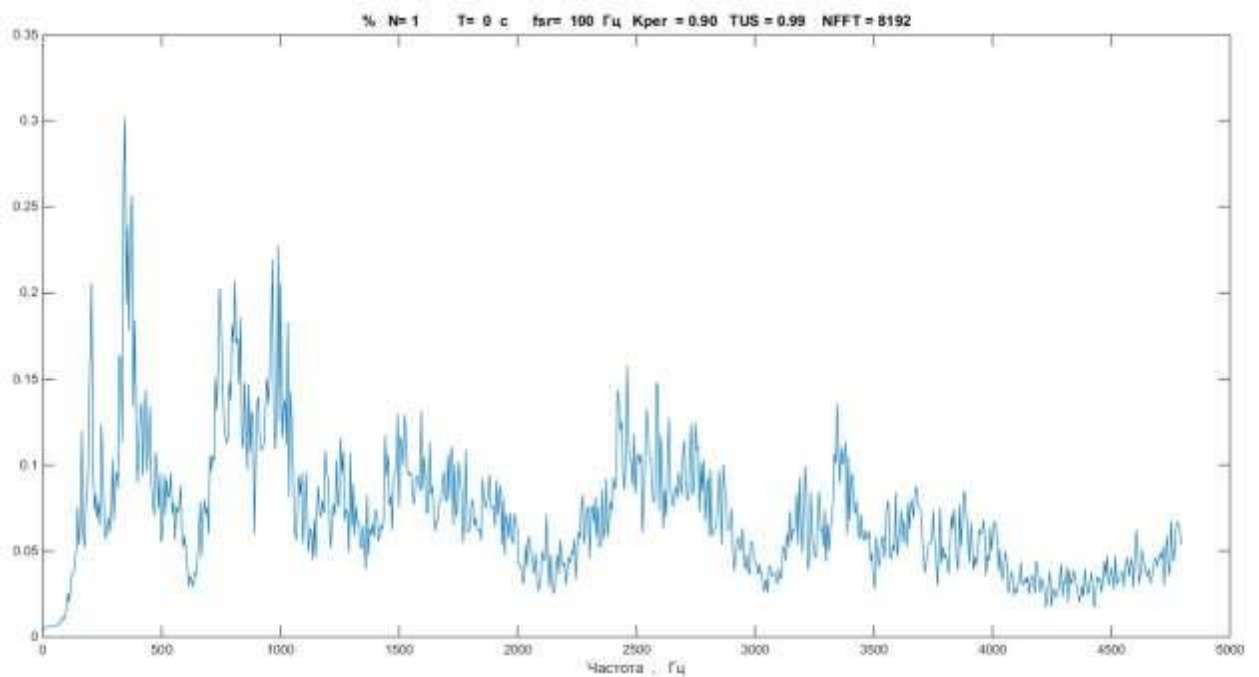


Рисунок 3.1 – Спектр шуму навколишнього середовища на вході системи

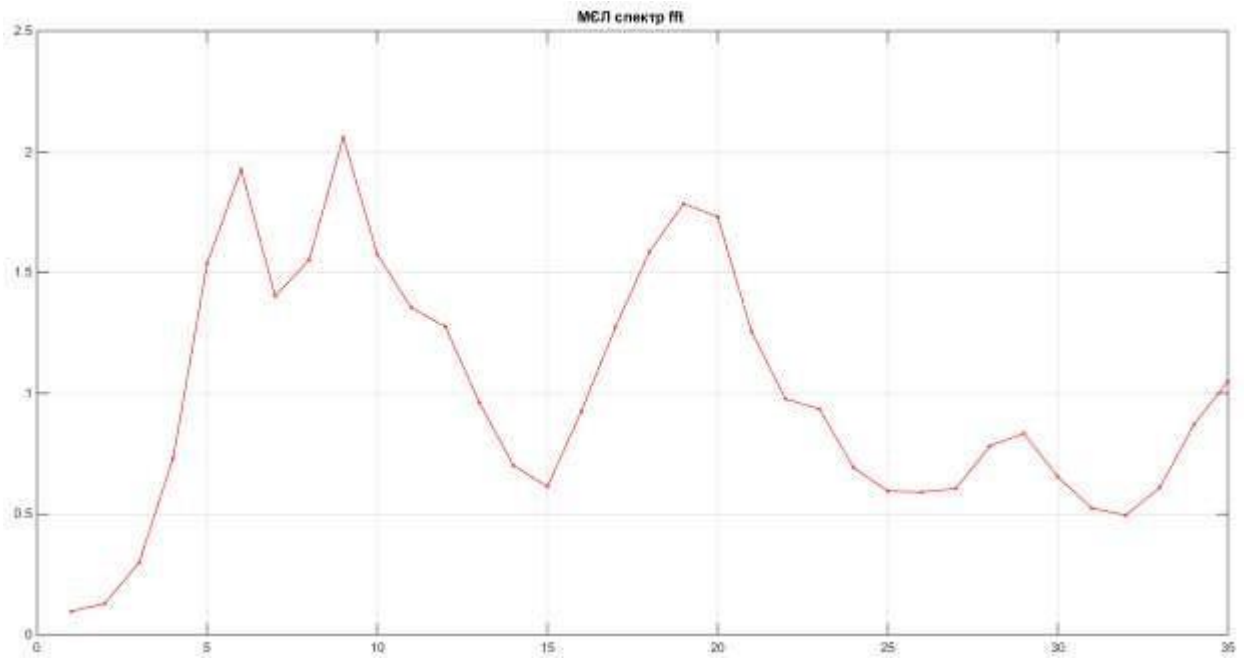


Рисунок 3.2 – Мел спектр тестового сигналу у вигляді шуму навколишнього середовища

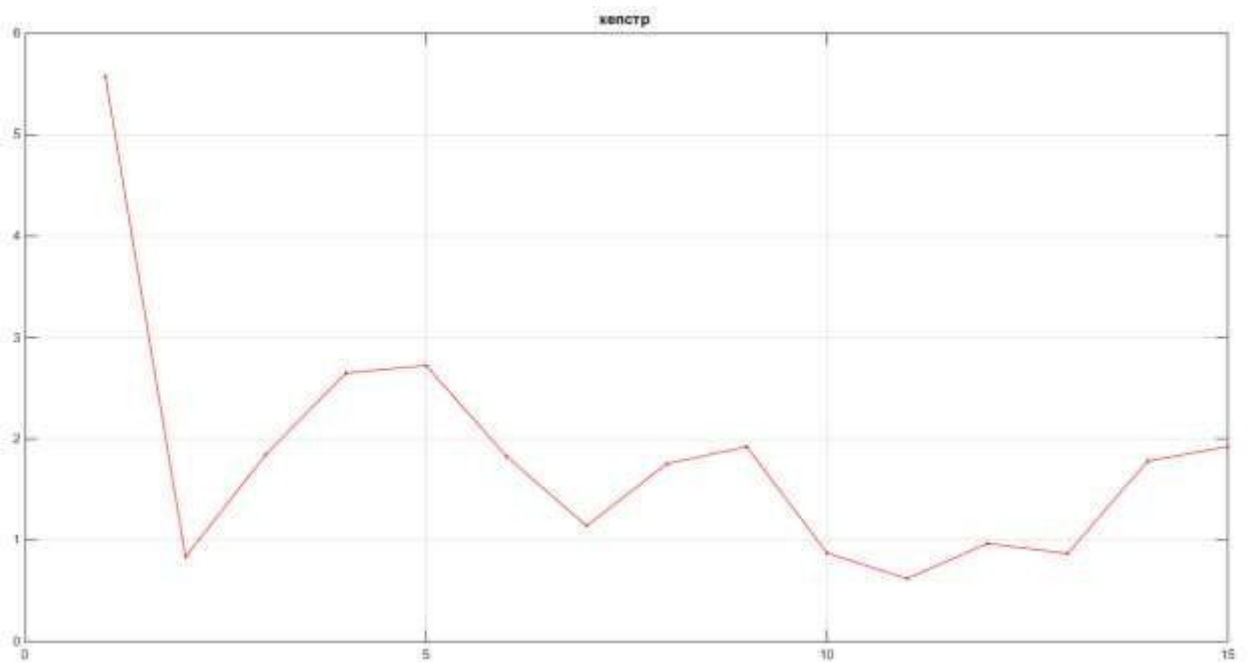


Рисунок 3.3 – Кепстральне представлення тестового сигналу у вигляді шуму навколишнього середовища

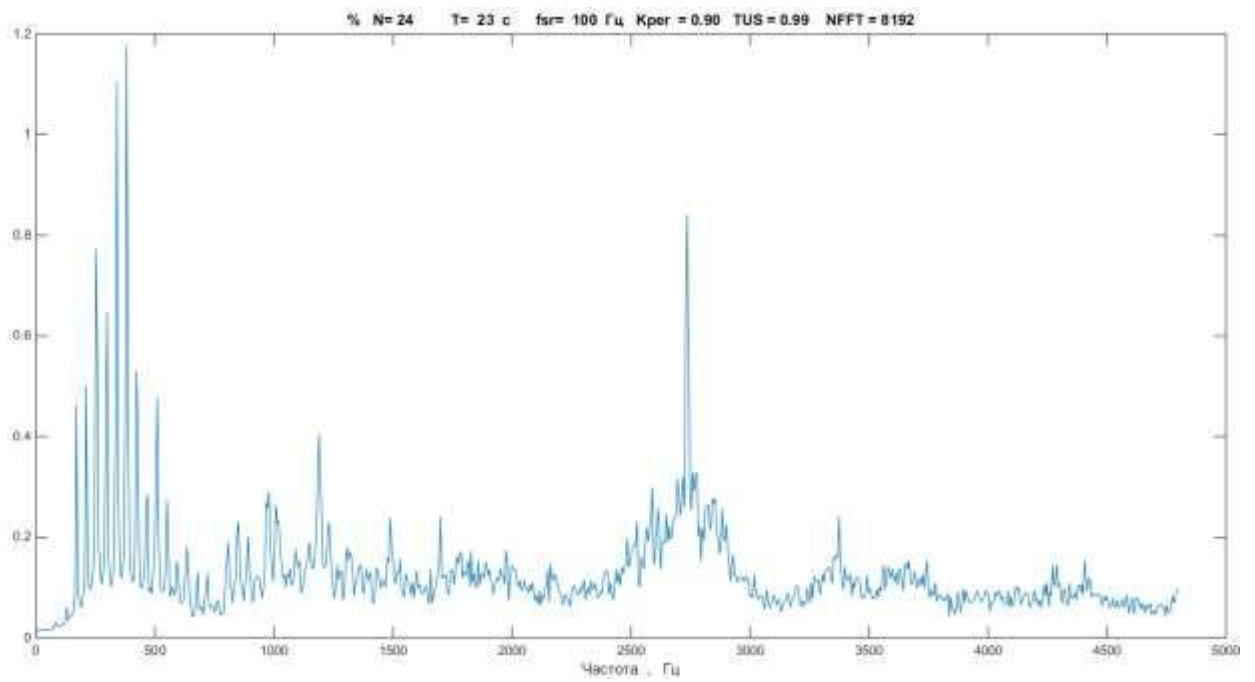


Рисунок 3.4 – Спектр сигналу зльоту дрону на вході системи

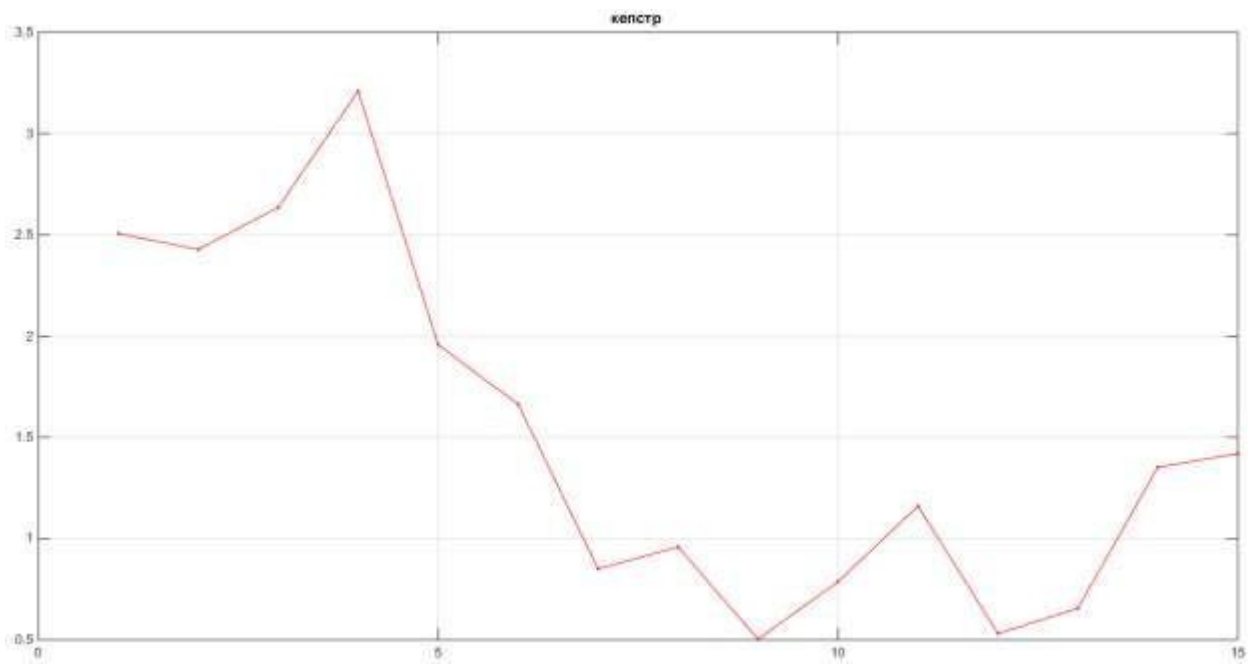


Рисунок 3.5 – Мел спектр тестового сигналу зльоту дрону

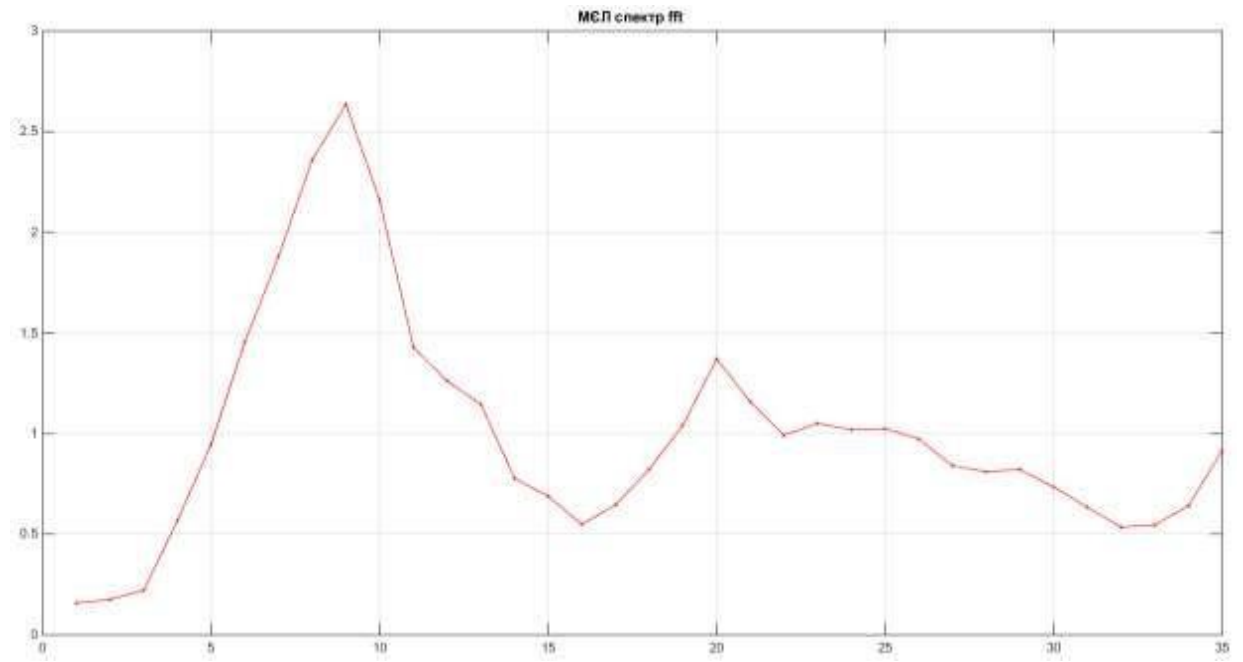


Рисунок 3.6 – Кепстральне представлення тестового сигналу зльоту дрону

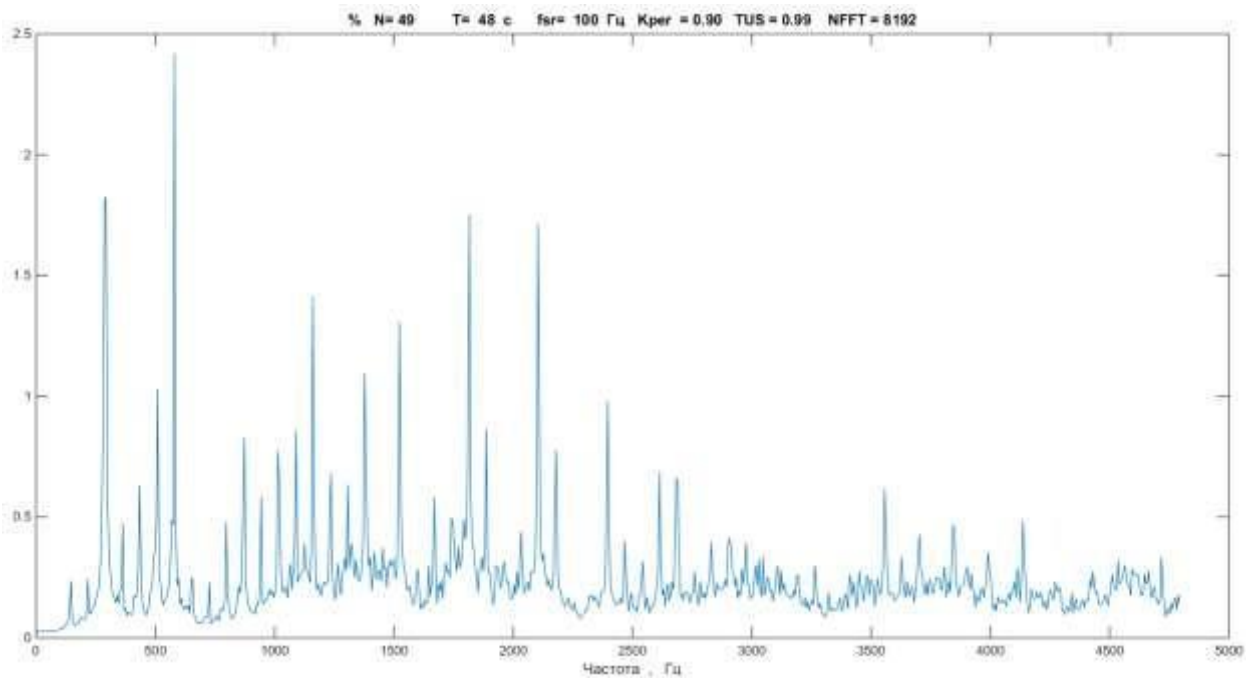


Рисунок 3.7 – Спектр сигналу дрону на відстані 100 метрів

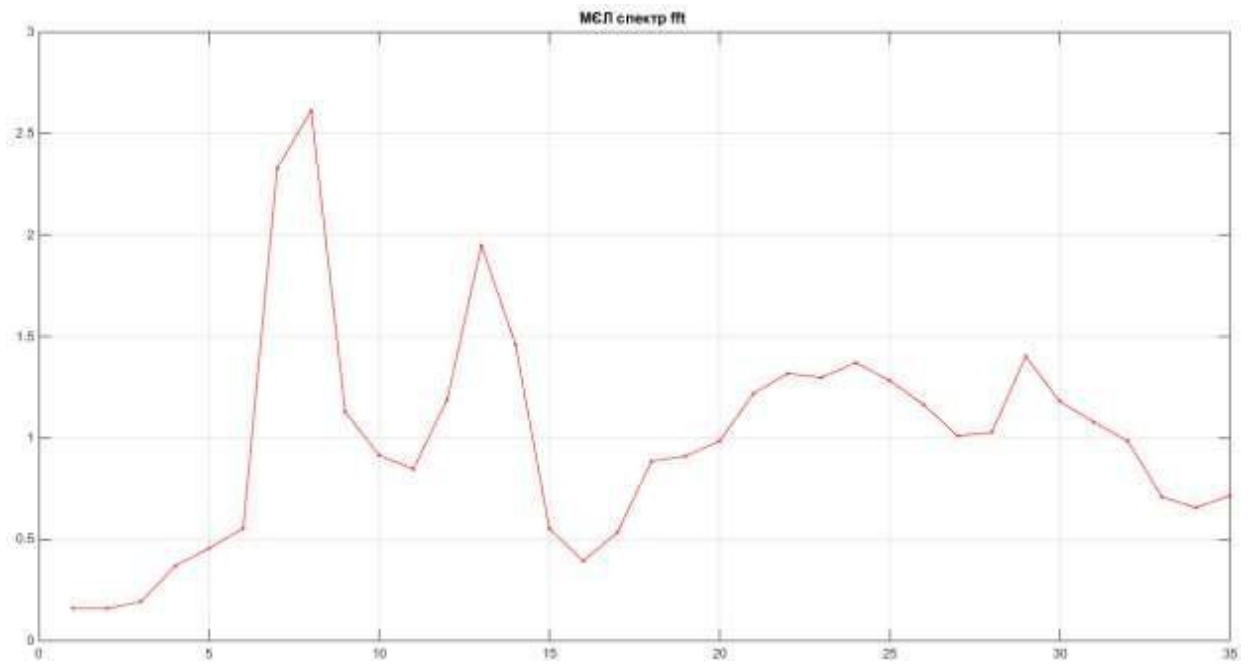


Рисунок 3.8 – Мел спектр тестового сигналу дрону на відстані 100 метрів

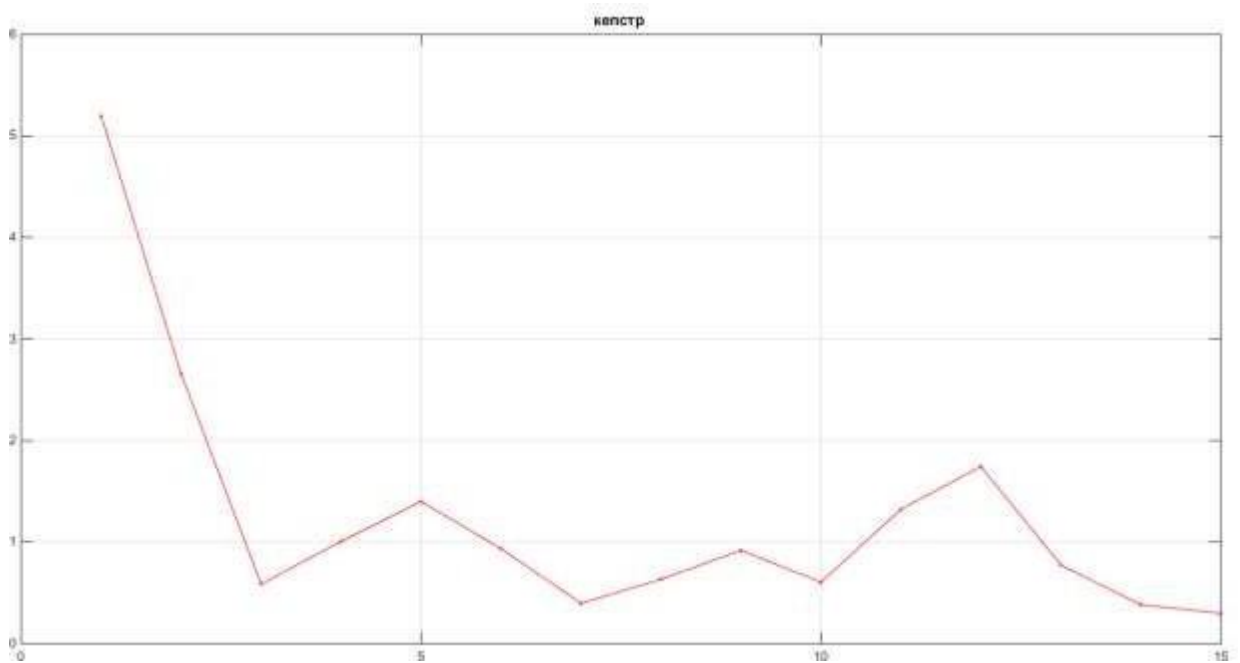


Рисунок 3.9 – Кепстральне представлення тестового сигналу дрону на відстані 100 метрів

Використовуючи описаний метод, отримано мел спектри, що є основою для побудови бази еталонних сигналів і масиву для впізнання, який використовується в подальшій обробці в розділі 3.2.

3.2 Ідентифікація джерела звуку по мел-кепстральним коефіцієнтам

Експеримент проведено з метою виявлення потрібної кількості елементів вектору ознак, щоб визначити вектори з найбільшим значенням та підібрати оптимальний поріг виявлення дрону.

Для ідентифікації використовується звукозапис польоту дрону на відстань 100 м, з попередньо записаними шумами навколишнього середовища з усіма змінами в умовах міста. Довжина файлу 600 с, зі 199 с починає злітати дрон, що можна побачити за змінами коефіцієнту кореляції (рис. 3.10).

Звукозапис з частотою дискретизації 48 кГц та розрядністю 24 біта, попередньо було оброблено і розбито на сегменти. Для кожного сегменту було отримано вектор ознак, який складається з 35 точок. При реалізації методу виявлення здійснюється фільтрація звукового сигналу з виходу мікрофона ФВЧ із частотою зрізу 89 Гц, далі виконується сегментація послідовності відліків часової реалізації звукового сигналу із довжиною сегменту $N=16384$ відліків. Для обраної частоти дискретизації довжина сегменту відповідає інтервалу 0,34 с.

При реалізації методу мел-кепстральних коефіцієнтів застосовується ділянка спектра звукового випромінення БПЛА в смузі 89...2600 Гц. Розмір сегмента обраний рівним 1, використане дискретне перетворення Фур'є з числом відліків $N=16384$. Кількість коефіцієнтів для формування вектора ознак обрано рівним 8, їх збільшення не підвищує точність розпізнавання, оскільки зі збільшенням номера коефіцієнта його значущість зменшується.

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

Кожний вектор ознак порівнюється з еталонним кепстром, який взятий на 240 секунді, де коефіцієнт кореляції дорівнює 1.

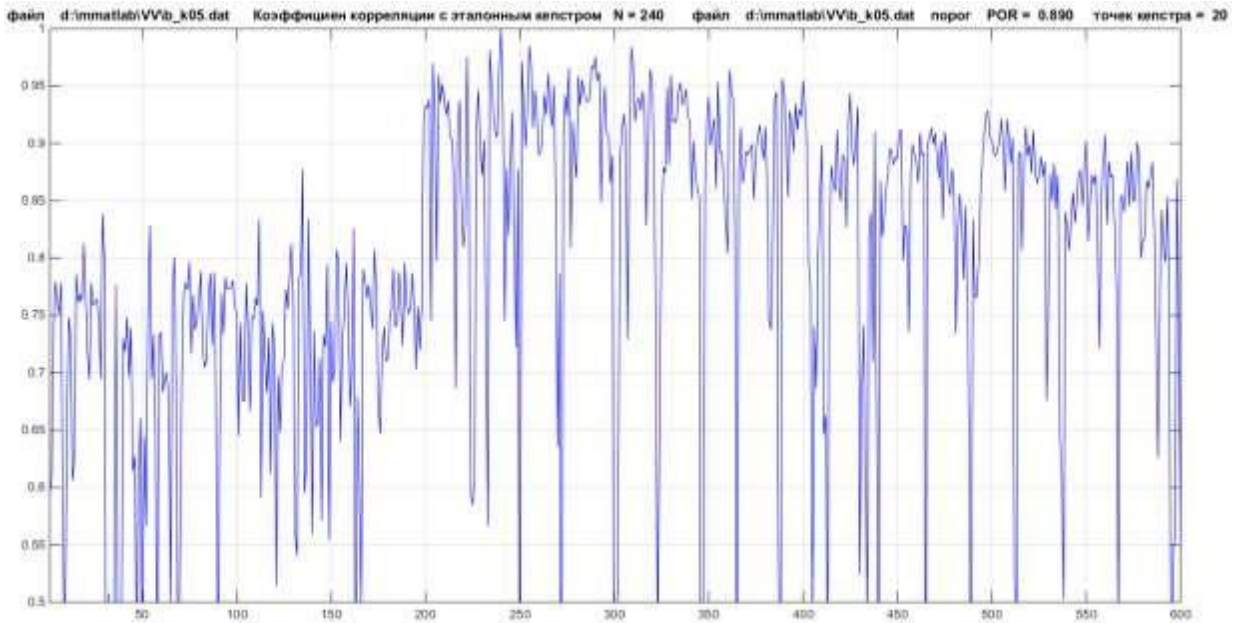


Рисунок 3.10 – Зміна коефіцієнта подібності для векторів ознак тестового сигналу та еталонного вектору ознак звукового випромінення дрону

Якщо коефіцієнт кореляції вище порогового значення (в нашому випадку 0,89), система приймає рішення, що даний сигнал відповідає сигналу дрона. Ця подія показана на рис. 3.11.

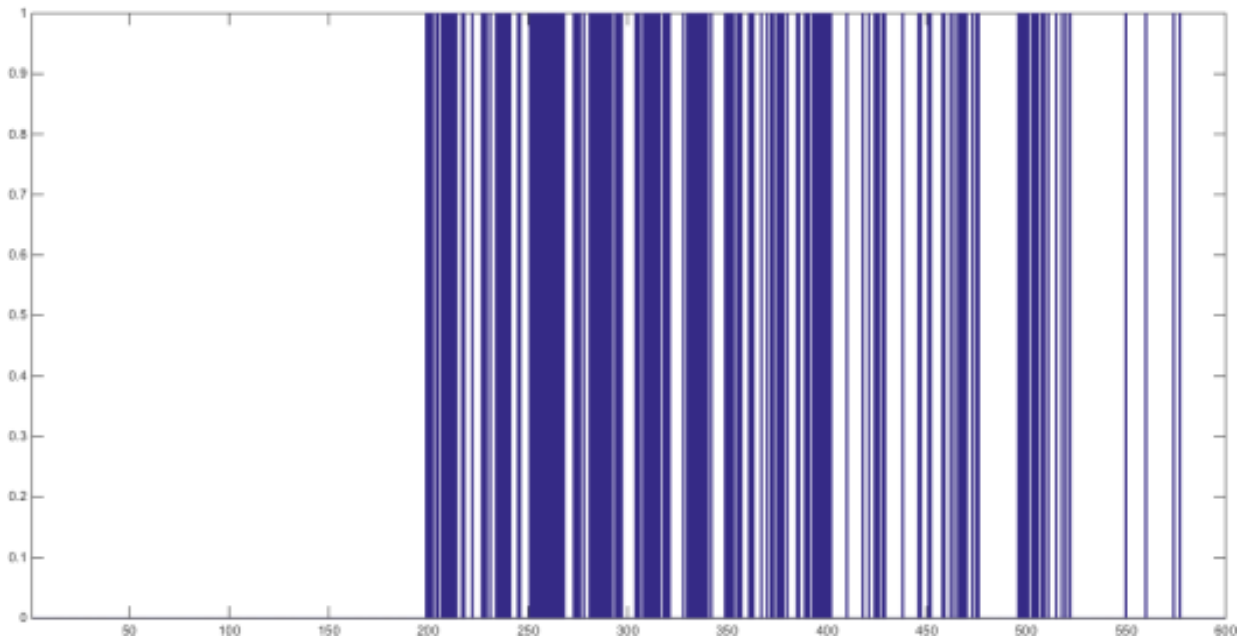


Рисунок 3.11 – Результат роботи алгоритму прийняття рішення про розпізнавання звукового випромінення дрону

Результат роботи алгоритму прийняття рішення про розпізнавання звукового випромінення дрону показано на рис. 3.11 у вигляді діаграми, у якій при перевищенні порога відображається вертикальний стовпчик. На початковій ділянці запису тестового сигналу (0...199 с) присутні лише звуки вулиці і фрагменти мовлення. Це дозволяє при вибраному порозі прийняття рішення про розпізнавання (0,89) визначити вірогідність помилкового розпізнавання ($P_{np} < 0,5\%$).

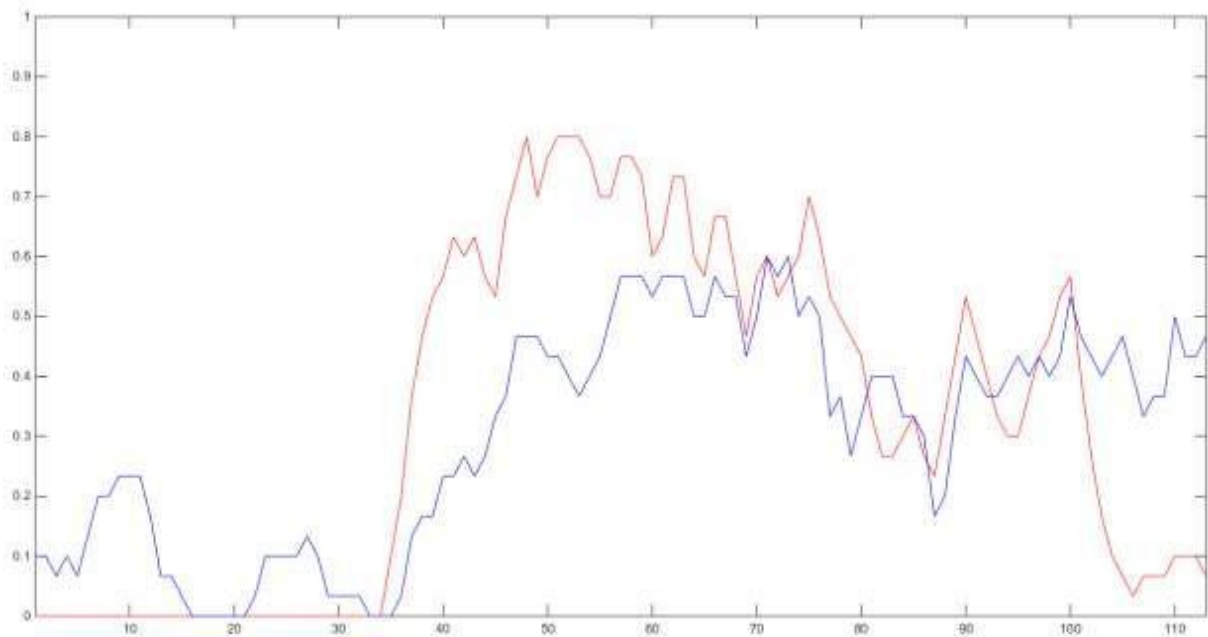


Рисунок 3.12 – Залежності вірогідності правильного виявлення та розпізнавання від відстані до дрону; червона лінія – вірогідність правильного розпізнавання дрону; синя лінія – вірогідність правильного виявлення

Ділянка тестового сигналу ТС1 (200 ... 600 с) використовувалася для побудови залежності вірогідності правильного розпізнавання $P_{прр}$ від відстані до дрону в умовах міста (рис. 3.12). На цьому ж рисунку показана аналогічна залежність для алгоритму виявлення як залежності вірогідності правильного виявлення $P_{пв}$ від відстані до джерела звукового випромінення.

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

Змінюючи поріг прийняття рішення, а саме, зменшивши його до 0,8, бачимо, як різко змінюється вірогідність правильного розпізнавання дрону в позитивний бік (рис. 3.13), але з'являються помилкові тривоги на початку, в моменти інтенсивного шуму навколишнього середовища (рис. 3.14).

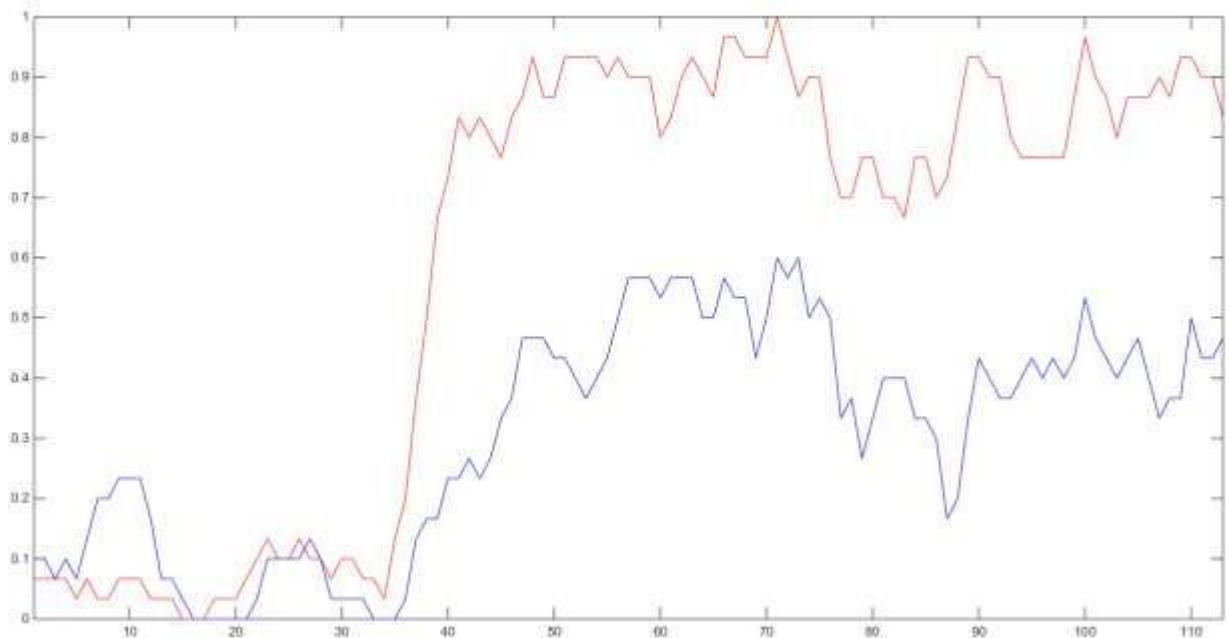


Рисунок 3.13 – Залежності вірогідності правильного виявлення та розпізнавання від відстані до дрону з порогом 0,8

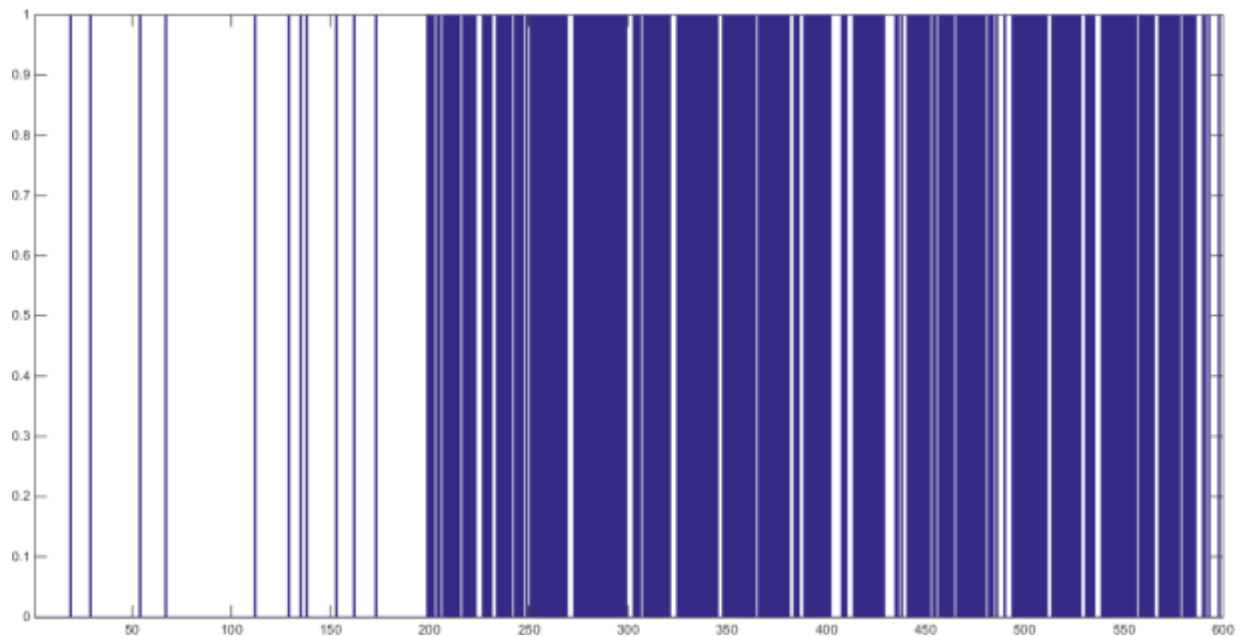


Рисунок 3.14 – Результат роботи методу прийняття рішення про розпізнавання звукового випромінення дрону з порогом прийняття рішення 0,8

Якщо скоротити мел кепстр спочатку та в кінці та обрати коефіцієнти з 3 по 25, побачимо, що при незмінному порозі виявлення дрону, коефіцієнт кореляції змінюється (рис. 3.15).

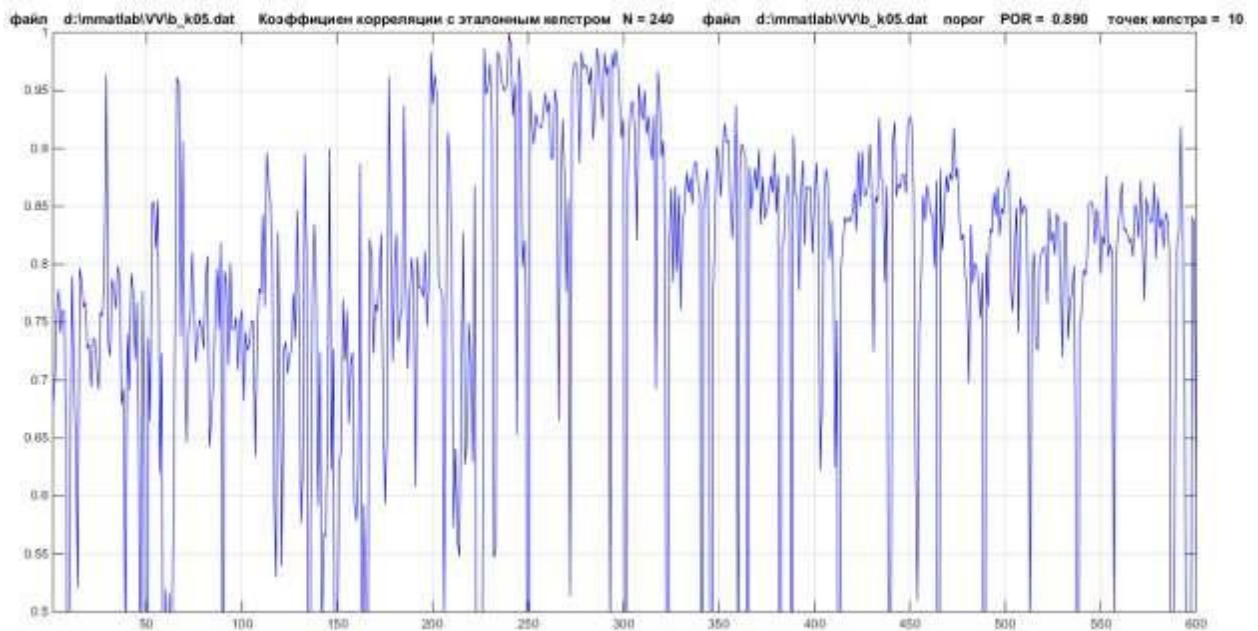


Рисунок 3.15 – Зміна коефіцієнта кореляції для векторів ознак тестового сигналу та еталонного вектору ознак звуку дрону

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

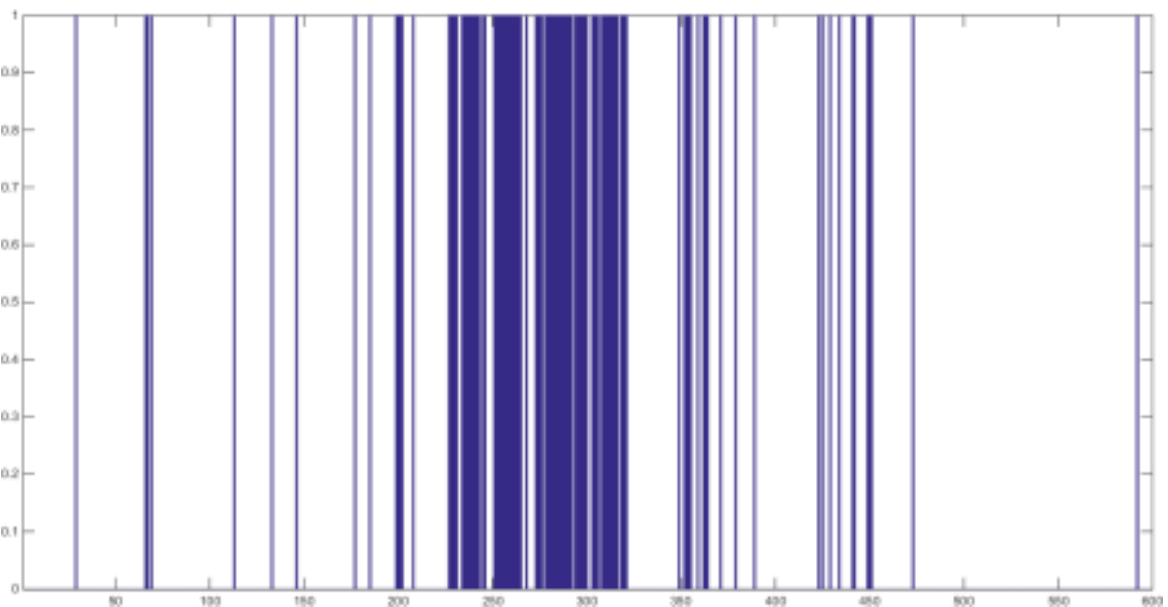


Рисунок 3.16 – Алгоритм прийняття рішення про розпізнавання звуку дрону з помилковими тривогами

Достатньо великі відмінності оцінок можливості правильного виявлення і розпізнавання пояснюються різними умовами польоту дрону, режимом роботи гвинтомоторної групи, затуханням сигналу звукового випромінення при віддаленні від мікрофона, наявністю перевідбиттів від будівель.

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

ВИСНОВКИ

Дана кваліфікаційна робота виконана на тему «Акустична система виявлення безпілотних летальних апаратів» і складається з трьох розділів.

В першому розділі виконано аналітичний огляд методів виявлення та ідентифікації акустичних сигналів дронів, розглянуто їх переваги, недоліки та особливості застосування, зокрема метод, заснований на застосуванні мелкепстральних коефіцієнтів.

В другому розділі проведено теоретичний аналіз акустичних сигналів малорозмірних дронів, розібрано отримання вектору ознак на основі мелкепстрального методу та методи визначення і дослідження фрактальної розмірності сигналів дронів на основі показників Херста і їх використання як елементів вектора ознак.

В останньому третього розділі наведено ретельний опис проведеного натурного експерименту, який проводився у межах міста. Перші 199 с записувався шум навколишнього середовища, а з 200 с до 600 с шум дрону – квадрокоптера, що злітає та віддаляється на відстань 100 м. На його основі отримано мел спектри, що є основою для побудови бази еталонних сигналів і масиву для впізнання, який застосовується в подальшій програмі, з метою виявлення необхідного числа елементів вектору ознак, щоби визначити вектори з найбільшим значенням та підібрати оптимальний поріг виявлення дрону.

Аналіз звукових сигналів дронів літакового та мультироторного типу показали, що їхні спектри мають гармонійну структуру з частотами, кратними частоті обертання ротора або колінвала двигуна. Більш чітко гармонійні складові спектру простежуються для дронів літакового типу. Для мультироторного типу дронів спектральні лінії є більш широкими через неоднаковість частот обертання гвинтів. В подальшому доцільно виконати порівняння даних, отриманих експериментальним шляхом та модельних

експериментів, та визначити акустичні портрети конкретних дронів з метою їх виявлення.

У даній роботі було запропоновано методику, засновану на отриманні розподілів мел-кепстральних коефіцієнтів отримання вектора ознак, що характеризують індивідуальні параметри звучання. Було реалізовано модуль аутентифікації дронів на основі запропонованого методу отримання вектора ознак та методу опорних векторів.

Отримані результати досліджень дозволяють свідчити про можливість використання розглянутих методів виявлення та розпізнавання звукових сигналів дронів 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., Коротцев 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.