

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

Факультет радіоелектроніки, комп'ютерних систем та інфокомунікацій
Кафедра радіоелектронних та біомедичних комп'ютеризованих засобів і
технологій

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи

магістра

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему: «Система виявлення та оцінки координат БПЛА за акустичними
шумами»

ХАІ.502.560/2 М.223.172. 1705122 ПЗ

Виконав: студент 6 курсу групи №560/2 М
Спеціальність 172 Телекомунікація та
радіотехніка

Освітня програма «Радіоелектронні
комп'ютерні засоби»

(код і найменування напрямку підготовки)

Борейчук А.О.

(прізвище й ініціали студента)

Керівник: проф. Луценко В.І.

(прізвище й ініціали)

Рецензент: проф. Невлюдов І.Ш.

(прізвище й ініціали)

Міністерство освіти і науки України
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

Факультет радіоелектроніки, комп'ютерних систем та інфокомунікацій

(повне найменування)

Кафедра радіоелектронних та біомедичних комп'ютеризованих засобів і технологій

(повне найменування)

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 172 Телекомунікація та радіотехніка

(код та найменування)

Освітня програма Радіоелектронні комп'ютерні засоби

(найменування)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувачка кафедри

О.В. Висоцька

(підпис)

(ініціали та прізвище)

« » 2022 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА**

Борейчуку Артему Олександровичу

(прізвище, ім'я та по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи Система виявлення та оцінки координат БПЛА за акустичними шумами

керівник кваліфікаційної роботи Луценко В.І., доктор фіз-мат наук, проф.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом Університету № 1815 -уч від «29» листопада 2022 року.

2. Термін подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи 14 грудня 2022 р.

3. Вихідні дані до роботи: отримання акустичних даних з використанням мікрофонів, базові характеристики найпоширеніших систем БПЛА, використання фільтрації даних отриманих з датчиків звуку.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік завдань, які потрібно розв'язати):

4.1 Аналітичний огляд технічних характеристик БПЛА.

4.2 Аналітичний огляд моделей, методів та засобів виявлення БПЛА.

4.3 Розгляд малошумлячих мікрофонів і їх підсилювачів

4.4 Опис структурної схеми пасивного акустичного радару

5. Перелік графічного матеріалу

5.1 Структурна схема системи виявлення та оцінки координат БПЛА за акустичними шумами.

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Усі розділи	<u>Луценко В.І.</u>	31.10.22	

Нормоконтроль _____ В.М. Олійник «12» грудня 2022 р.
(підпис) (ініціали та прізвище)

7. Дата видачі завдання «31» жовтня 2022 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Отримання завдання.	31.10.22	
2	Аналітичний огляд технічних характеристик БПЛА	01.11.22-06.11.22	
3	Аналітичний огляд моделей, методів та засобів виявлення БПЛА.	7.11.22 – 15.11.22	
4	Розгляд малошумлячих мікрофонів і їх підсилювачів	16.11.22 – 25.11.22	
5	Опис структурної схеми пасивного акустичного радару	26.11.22 – 07.12.22	
6	Оформлення графічних матеріалів.	08.12.21 – 10.12.21	
7	Передзахист та усунення недоліків.	12.12.2022	
8	Захист роботи.	15.12.2022	

Здобувач вищої освіти

_____ А.О. Борейчук
(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник кваліфікаційної роботи


(підпис) В.І. Луценко
(ініціали та прізвище)

РЕФЕРАТ

Дипломна робота: 92 с., 57 рис., 1 табл., 11 джерел.

АКУСТИЧНІ ШУМИ, БПЛА, ПЕРЕДАВАЧ, СОДАР.

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

Предмет дослідження – малорозмірні БПЛА.

Мета роботи – дослідження і визначення особливостей методів виявлення і розпізнавання акустичних сигналів малорозмірних БПЛА. Розробка методів експериментального дослідження акустичних сигналів

Методи дослідження – імітаційне моделювання моделі акустичного сигналу, акустичні випробування.

У роботі було проведено дослідження актуальних методів виявлення БПЛА, досліджено їх переваги та недоліки та вирішено, що акустичним методом завільняє сьогоденним вимогам до протидії малорозмірним, низьколетячим цілям. Проведено теоретичні та експериментальні дослідження характеристик акустичних сигналів БПЛА. Отримано криві виявлення для найбільш розповсюджених комерційних БПЛА. Описано принципову та структурну схему приймального пристрою акустичних шумів. Також, для більш детального вивчення, описано елементи конструкції окремих вузлів акустичної системи виявлення БПЛА.

THE ABSTRACT

Master's degree work: 92 p., 57 fig., 1 tabl., 11 sources.

ACOUSTIC NOISES, UAV, SODAR, , TRANSMITTER.

The object of the study – methods for detecting and recognizing signals of acoustic vibrance of small-sized unmanned airborne vehicles.

The subject of the study is small UAVs.

The purpose of the work – research and identification of features methods of detection and recognition of acoustic signals of small UAVs. Development of methods of experimental research of acoustic signals

Methods of research – simulation modeling of the acoustic signal model, acoustic tests.

In the work, a study of current UAV detection methods was conducted, their advantages and disadvantages were investigated, and it was decided that the acoustic method meets the current requirements for countering small-sized, low-flying targets. Theoretical and experimental studies of the characteristics of UAV acoustic signals have been carried out. Detection curves for the most common commercial UAVs are obtained. The basic and structural diagram of the acoustic noise receiver device is described. Also, for a more detailed study, the design elements of individual units of the acoustic system of UAV detection are described.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	7
ВСТУП	9
1 ОСОБЛИВОСТІ ВИЯВЛЕННЯ ТА РОЗПІЗНАВАННЯ МАЛИХ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ	11
1.1 Використання безпілотних літальних апаратів	11
1.2 Типи БПЛА	13
1.3 Канали виявлення БПЛА	19
2 ВИЗНАЧЕННЯ МІСЦЕПОЛОЖЕННЯ БПЛА ЗА АКУСТИЧНИМ ВИПРОМІНЮВАННЯМ	27
2.1 Огляд методів ідентифікації акустичних сигналів	27
2.2 Акустичні шуми природного та антропогенного походження	28
2.3 Особливості акустичного випромінювання безпілотних літальних апаратів	30
2.4 Інформаційні характеристики акустичних сигналів безпілотних літальних апаратів	36
2.5 Структура і параметри звукового поля гвинтових безпілотних літальних апаратів. Звукове поле повітряного гвинта	40
2.6 Пасивні методи визначення місцеположення БПЛА	52
2.7 Опис структури пасивного содару	57
3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ СПЕКТРАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ШУМІВ БПЛА	63
4 ПРИНЦИПОВА СХЕМА ТА КОНСТРУКЦІЯ СИСТЕМИ ВИЯВЛЕННЯ АКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ БПЛА	Ошибка! Закладка не определена.
ВИСНОВОК	90
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	91

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- АВ — акустичне випромінювання;
АМ — акустичний мікрофон;
АПС — атмосферний прикордонний шар;
АФС — антенно-фідерна система;
АЧХ — амплітудно частотна характеристика;
АШ — акустичні шумів;
БПЛА — безпілотний літальний апарат;
ГТД — газотурбінний двигун;
ДВЗ — двигун внутрішнього згорання;
ЕД — електричний двигун;
ЕПР — ефективна поверхня розсіювання;
ЕС — енергетичний спектр;
ІХ — імпульсна характеристика;
ІЧ — інфрачервоний;
МБЛА — малорозмірні безпілотні літальні апарати;
НПУ — наземний пункт управління;
ПВКС — пристрій виділення корисного сигналу;
ПД — пропелерний двигун;
ППО — протиповітряна оборона;
РДМ — різницево-дальновимірний метод;
РЛС — радіолокаційна станція;
СУ — силова установка;
СЩП — спектральну щільність потужності;
ТГД — турбогвинтовий двигун;
ТРД — турбореактивний двигунон;
ТРДД — турбореактивний двоконтурний двигун;
УКХ — ультракороткі хвилі;
ЦАП — цифро-аналогове перетворення;
 A_m — амплітуда m -тої гармоніки;
 A_k — амплітуда k -ої гармоніки;
 d — діаметр сопла реактивного струменя, м;
 F_m — частота модуляції, викликана зазначеними ефектами;
 G — коефіцієнт спрямованої дії мікрофону;
 K — кількість гармонік акустичного випромінювання ДВЗ;
 k_m — чутливість мікрофону, мВ/Па;
 $L_{розс}(r)$ — ослаблення внаслідок розходження енергії при випромінювання у вільний простір;
 $L_{ногл}(r)$ — ослаблення, яке обумовлене звукопоглинанням у атмосфері;
 $L_{екр}$ — ослаблення через екранування перепонами;
 L_m — еквівалентний рівень власних шумів мікрофону, дБ;

- M – кількість гармонік акустичного випромінювання;
 N – кількість лопастей гвинта;
 n – частота обертів ротора (об/с);
 N – число лопатів;
 N – рівень звуку на відстані r ;
 N_1 – рівень звуку на відстані r_1 ;
 $N_{об}$ – кількість обертів гвинта БЛА;
 P_S – звуковий тиск акустичного шуму, що створюється гвинтами обертання БЛА, на відстані 1 м від акустичного мікрофона, Па;
 P – кількість гвинтів;
 P_0 – пороговий рівень чутності, Па;
 r – відстань від джерела шуму до приймача, м;
 r_1 – опорна відстань, м;
 S_h – число Струхаля;
 T – температура повітря у приземному шарі, К;
 U_0 – швидкість витікання струменя, м/с;
 $V_{зв}$ – швидкість поширення звукової хвилі;
 $V_{БЛА}$ – швидкість польоту БЛА;
 α – коефіцієнт загасання звукової хвилі в атмосфері, дБ/км;
 ΔF_{II} – ширина зубця АЧХ фільтра;
 φ_m – фаза m -тої гармоніки;
 φ_k – фаза k -ої гармоніки.

ВСТУП

Сьогодні відома велика кількість різних типів безпілотних літальних апаратів (БПЛА), здатних виконувати широкий спектр корисних функцій, а з іншого боку, здатних нести потенційну загрозу для різних областей діяльності людини – господарської, повсякденному і військової. Труднощі їхнього виявлення і спостереження з використанням сучасних технічних засобів, а також порівняно невисока вартість безпілотних апаратів призводять до підвищення безкарності і масовості протиправних дій з використанням БПЛА. Тому завдання захисту різноманітних об'єктів від впливу БПЛА є однією з актуальних завдань сучасності.

З метою виявлення, розпізнавання і вимірювання координат безпілотних літальних апаратів сьогодні використовують, насамперед, радіолокаційні, акустичні, оптичні й інфрачервоні методи та засоби. Однак добре розроблені в теорії і на практиці методи енергетичного виявлення сигналів по відношенню до БПЛА не показують достатню ефективність. Внаслідок цього на практиці виявлення БПЛА при наявності подібних йому об'єктів реалізують як завдання «виявлення-розпізнавання», тобто розв'язання задачі виявлення дрона супроводжується аналізом наявності деяких додаткових ознак сигналу, однак ефективність цих методів і алгоритмів на практиці також ще не є достатньою.

Можливість виявлення БПЛА визначається рівнем його помітності в видимому, інфрачервоному, радіочастотному, а також акустичному діапазонах. Сучасні малі БПЛА мають низький рівень помітності: вони виготовляються з композитних матеріалів, мають малу ефективну поверхню розсіювання (ЕПР) в радіодіапазоні, їхні двигуни не нагріваються до високої температури і випромінюють мало тепла, працюють з низьким рівнем власного акустичного шуму.

При цьому сигнали різних інформаційних каналів можуть оброблятися як незалежно, так і комплексно: в цьому випадку, інформація отримана на виході одного каналу може використовуватися в якості цілевказівки при виявленні об'єкта з використанням іншого каналу. Комплексування різних інформаційних каналів дозволяє формувати більш точні оцінки координат і параметрів руху, а також класу БПЛА, ніж з використанням одного вимірювального каналу.

У сучасних умовах зростають вимоги до завадозахищеності засобів радіолокації, що обумовлено істотним зростанням можливостей засобів повітрянокосмічного нападу з постановки завад, зокрема, зростанням кількості й інтенсивності їхніх випромінювань, удосконалюванням способів створення й застосування завад, появою нових джерел завад. Так, сьогодні

безпілотні літальні апарати можуть застосовуватися з метою радіоелектронної боротьби як постановники активних шумових завад і прикривати ударні БПЛА. Тому РЛС виявлення БПЛА можуть функціонувати в умовах дії адитивної суміші маскувальних активних шумових і пасивних завад, тобто комбінованих завад. Проблема захисту РЛС від таких завад – ще найскладніша проблема боротьби з будь-якими завадами [1, 3].

1 ОСОБЛИВОСТІ ВИЯВЛЕННЯ ТА РОЗПІЗНАВАННЯ МАЛИХ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

1.1 Використання безпілотних літальних апаратів

Роботи, спрямовані на створення безпілотних літальних апаратів, почалися давно, ще в роки першої світової війни. У 1930-і роки з'явилися перші дистанційно пілотні повітряні мішені. А під час другої світової війни з'являється перший ударний безпілотний літак – німецький літак-снаряд Фау-1. Згодом ударні літаки-снаряди великої дальності відносили до крилатих ракет і не називали безпілотними літаками. В кінці 1950-х років з'являються безпілотні розвідники. 70-ми роками ХХ століття датуються науково-дослідні розробки і в області бойових (ударних) БПЛА, а також безпілотних літаків з великою висотою і тривалістю польоту, призначених для тривалого спостереження і використання у складі розвідувально-ударних комплексів.

БПЛА все більше знаходять широке застосування і в інших видах діяльності людства. Наприклад, в сільському господарстві БПЛА з GPS навігацією використовуються для запилення рослин на полях. При цьому досягається значна економія хімікатів і більше ретельна обробка посівів у порівнянні з пілотованою авіацією. Вони використовуються для доставки медикаментів і гуманітарних вантажів у важкодоступні райони, можуть застосовуватися для перевірки ліній електропередачі трубопроводів.

Дрони, інша назва, БПЛА, можуть використовуватися і державною службою з надзвичайних ситуацій для моніторингу і прогнозування, а також при контролі небезпечних об'єктів (безпека і охорона навколишнього середовища) і багато інших. Зокрема, в якості несучої платформи метеорологічних вимірювальних комплексів для дослідження атмосферного прикордонного шару можуть використовуватися БПЛА мультикоптерного типу. Вони мають переваги по відношенню до БПЛА літакового типу, які, в силу високої швидкості переміщення в атмосфері, не забезпечують достатнього просторового і тимчасового дозволу вимірювань, мають низьку чутливістю, не дозволяють досліджувати турбулентні процеси.

В даний час доступні і відносно недорогі мультикоптери забезпечують підйом з корисним навантаженням 3 – 5 кг на висоту 2 - 4 км при тривалості польоту 30 - 40 хв. В сучасних БПЛА бортова система навігації і управління може забезпечувати:

— політ по заданому маршруту (завдання маршруту проводиться з зазначенням координат і висоти поворотних пунктів маршруту);

- зміна маршрутного завдання або повернення в точку старту по команді з наземного пункту управління;
- обліт зазначеної точки;
- стабілізацію кутів орієнтації БПЛА,
- підтримка заданих висот і швидкості польоту (шляховий або повітряної),
- збір і передачу телеметричної інформації та параметри польоту і роботі цільового обладнання,
- програмне управління пристроями цільового обладнання [2].

Все це дозволяє забезпечити більшу мобільність і оперативність вимірів при невисокій вартості експлуатації БПЛА. Основні переваги технології вимірювань параметрів атмосферного прикордонного шару за допомогою БПЛА мультикоптерного типу:

- прямі контактні вимірювання метеорологічних і турбулентних характеристик АПС;
- можливість оперативних короточасних вимірювань характеристик АПС в заданих точках атмосфери (на висотах від 0 до 4000 м);
- високу просторову роздільну і тимчасовий дозвіл;
- хороша перешкодозахищеність;
- можливість вимірювання вертикальних профілів метеорологічних, турбулентних і екологічних характеристик АПС за допомогою контрольованого підйому (спуску) БПЛА за заданою програмою;
- невеликі вага і габаритні розміри пристрою;
- відносно невисока ціна.

Основні недоліки технології вимірювань параметрів АПС за допомогою БПЛА мультикоптерного типу:

- невелика тривалість вимірювань (20 - 40 хв);
- відносно низька вантажопідйомність несучої платформи (потрібне створення спеціалізованих вимірювальних комплексів);
- мають малу вагу, невеликі габаритні розміри і низьке енергоспоживання).

Незалежно від сфери застосування, повномасштабне виконання місій БПЛА може включати такі під задачі як виявлення, локалізація і ідентифікація цілей, супровід і ціле вказування. Як свідчать різні джерела інформації, в даний час в нашій країні і за кордоном за результатами оцінки внеску різних

технічних засобів в ефективність бойових дій угруповань збройних сил пріоритети віддані засобів отримання розвідувальної інформації. Повітряна розвідка по справедливості вважається однією з найнебезпечніших бойових завдань. Підлягають розвідці мети противна сторона прагне приховати і захищає їх потужною об'єктовою та військовою ППО.

Особливо небезпечна повітряна розвідка в початковий період бойових дій, коли ППО противника ще не пригнічена, а також при відсутності панування в повітрі. Тому особливої актуальності набуває використання комплексів на основі безпілотних літальних апаратів для повітряної розвідки. У більшості перерахованих випадків актуальною стає задача виявлення БПЛА в повітрі [3].

1.2 Типи БПЛА

Відповідно до існуючої класифікації БПЛА по їх основними характеристиками, вони впораються на дві групи:

- малорозмірні безпілотні літальні апарати (МБЛА);
- БПЛА середніх і великих розмірів.

Боротьба з МБЛА являє собою комплекс заходів по їх виявленню, розпізнаванню, прицілюванню, захоплення і поразки. У зв'язку з малою помітністю МБЛА завдання з виявлення і розпізнавання цілі є найбільш складною і важливою.

До основних параметрів класифікації МБЛА відносяться:

- габаритні і вагові характеристики (довжина, розмах крила, злітна маса, маса корисного навантаження);
- оперативні характеристики (тривалість, дальність і висота польоту, максимальний радіус застосування);
- тип конструкції;
- тип рухової установки (електродвигун, двигун внутрішнього згорання, турбореактивний двигун, реактивний двигун), а також тип рушія (пропелер, несучий гвинт, що несе крило);
- виконуються функціональні завдання (розвідувальні, розвідувальноударні, радіоелектронної боротьби, транспортні);
- ступінь автономності (політ за фіксованою або колекційною програмою, дистанційно-пілотований політ).

Сукупність цих ознак визначила класифікацію МБЛА:

- нано БПЛА масою менше одного кілограма, тривалістю польоту менше однієї години і висотою польоту до 300 м;

- мікро БПЛА масою до 10 кг, часом польоту близько однієї години і висотою польоту до 1 000 м;
- міні -БПЛА масою до 50 кг, часом польоту до декількох годин і висотою польоту до 3 000-5 000 м.

Проаналізувавши існуючі БПЛА, можна класифікувати їх за особливостями їх конструктивного виконання. Мікро-БПЛА виконані в своїй більшості за класичною аеродинамічною схемою, рідше зустрічається схема «літаюче крило». По розташуванню крила - високоплан.

Зустрічаються літаки, які мають поперечне V крила. Двигуни електричні, в основному тягнуть. Горизонтальне оперення - прямокутне, розташоване низько щодо вертикального. Дані БПЛА здійснюють зліт з руки, а посадку - на парашуті.

Міні-БПЛА виконані за класичною аеродинамічною схемою. Крило розташоване високо. Фюзеляжі представлені у вигляді як гондоли, так і однофюзеляжних схем. Вертикальне оперення представлено однокільовим, двокільовим рознесенням, рідше зустрічається V-подібне. Двигуни в основному поршневі, що штовхають або тягнуть. Зліт здійснюють з пускових установок, а посадку - на парашуті або політакового.

Міді-БПЛА відрізняються від міні-БПЛА тільки тим, що здійснюють зліт і посадку по-літаковому, мають не вбирючі трьохпирні шасі з носовою опорою і поршневі двигуни. максі-БПЛА виконані за класичною аеродинамічною схемою. Крило розташоване низько.

Оперення V-подібне. Двигуни штовхають і представлені як ТРД, ТГД, так і ПД. Шасі забирається. Зліт і посадку виконують по-літакового. «Безпілотники» розрізняються по масі (від апаратів масою півкілограма, порівнянні з авіамоделью, до 10-15-тонних гігантів), висоті і тривалості польоту.

Безпілотні літальні апарати масою до 5 кг (клас «мікро») можуть злітати з будь-якого самого маленького майданчика і навіть з руки, піднімаються на висоту 1 - 2 км і знаходяться в повітрі не більше години. Як літаки-розвідники їх використовують, наприклад, для виявлення в лісі або в горах військової техніки та терористів.

«Безпілотники» класу «мікро» масою всього 300 - 500 г, образно кажучи, можуть зазирнути у вікно, тому їх зручно використовувати і в міських умовах. Слідом за «мікро» йдуть безпілотні літальні апарати класу «міні» масою до 150 кг. Вони працюють на висоті до 3 - 5 км, тривалість польоту становить 3 - 5 г.

Наступний клас - «міді». Це більш важкі багатоцільові апарати масою від 200 до 1000 кг. Висота польоту сягає 5 - 6 км, тривалість - 10 - 20 год. І, нарешті, «максі» - апарати масою від 1000 кг до 8 - 10 т. Їх стелю - 20 км, тривалість польоту - понад 24 г. Ймовірно, незабаром з'являться машини класу «супермаксі». Можна припустити, що їх маса перевищить 15 т. Такі «ваговози» нестимуть на борту величезну кількість апаратури різного призначення і зможуть виконувати найширший коло завдань [3].

Зараз безпосередню небезпеку для України несуть БПЛА Shahed-131 (рис.1.1), баражуючий боєприпас «ZALA Lancet» (рис.1.2) та розвідувальний БПЛА Орлан-10 (рис.1.4). IRN-05 (Shahed-131) — це смертоносний безпілотний літальний апарат односторонньої атаки (OWA – one way attack). IRN-05 виготовлено з вуглецевого волокна, зміцненого внутрішніми металевими опорами. Загальна довжина 2,6 м; Розмах крил 2,2 м з орієнтовною масою 135кг. Поршневий двигун внутрішнього згоряння приводить платформу в рух за допомогою дерев'яного гвинта з фіксованим кроком.

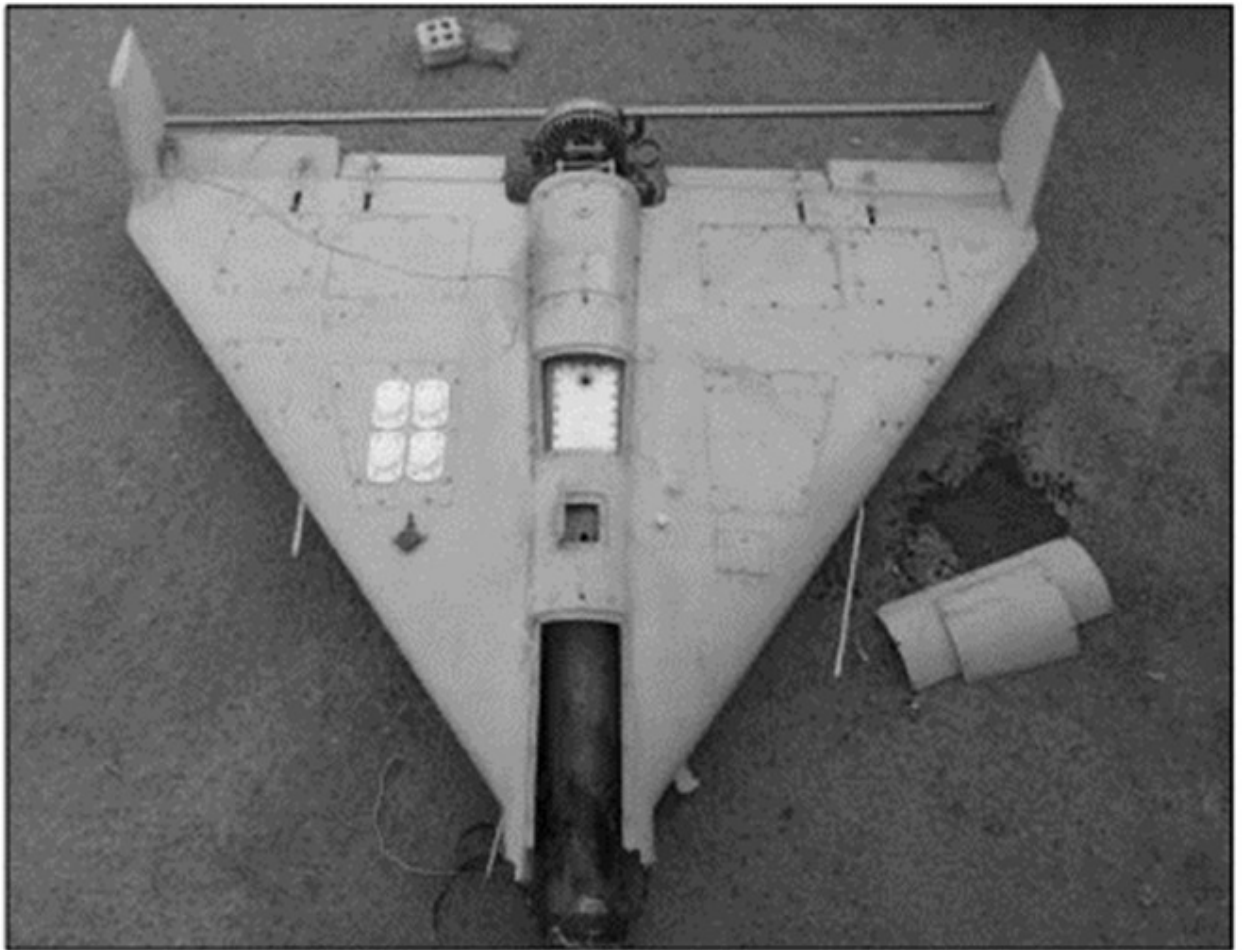


Рисунок 1.1 — БПЛА Shahed-131

БПЛА містить великий поршневий двигун. Сканування рідини в паливному баку показало суміш дизельного палива та інших речовин на основі нафти. За оцінками, максимальний запас ходу становить до 900 км.

Застосовується для перевантаження ППО у зв'язці з десятками крилатих ракет для завдання ударів по критичній інфраструктурі. Це низьколетяча, малошвидкісна ціль. Маршрут польоту часто проходить по руслу річок для ускладнення його виявлення.

Наступним БПЛА є ZALA Lancet, який може використовуватися як для розвідувальних, так і для ударних завдань, що має максимальну дальність польоту 40-50 км залежно від субверсії та максимальну злітну масу (MTOW) близько 12 кг. У бойовому режимі може бути озброєний як осколочно-фугасними, і кумулятивними бойовими частинами.

Має оптико-електронне наведення, а також блок телевізійного наведення, що дає змогу керувати боєприпасом на кінцевому етапі польоту. Безпілотник оснащений інтелектуальними, навігаційними та комунікаційними модулями. Особливістю БПЛА є, що його модулі наведення змінні можуть змінюватися під завдання. Доступний спектр датчиків досить широкий: камери в інфрачервоному та видимому діапазоні, наведення на лазерний вказівник, асистуючи датчик пошуку цілей газоаналізатором і радіометром.



Рисунок 1.2 — БПЛА ZALA Lancet

Використовується для ураження техніки, гаубиць та засобів ППО на полі бою. Не завжди знищує техніку при попаданні, іноді пошкодження мають невеликий характер, навіть при прямому влучанні, якщо не був задітий боекомплект.

На рис. 1.3 показано тактичний розвідувальний БЛА Орлан-3М, який проводить панорамну та планову фото та відеозйомку місцевості.

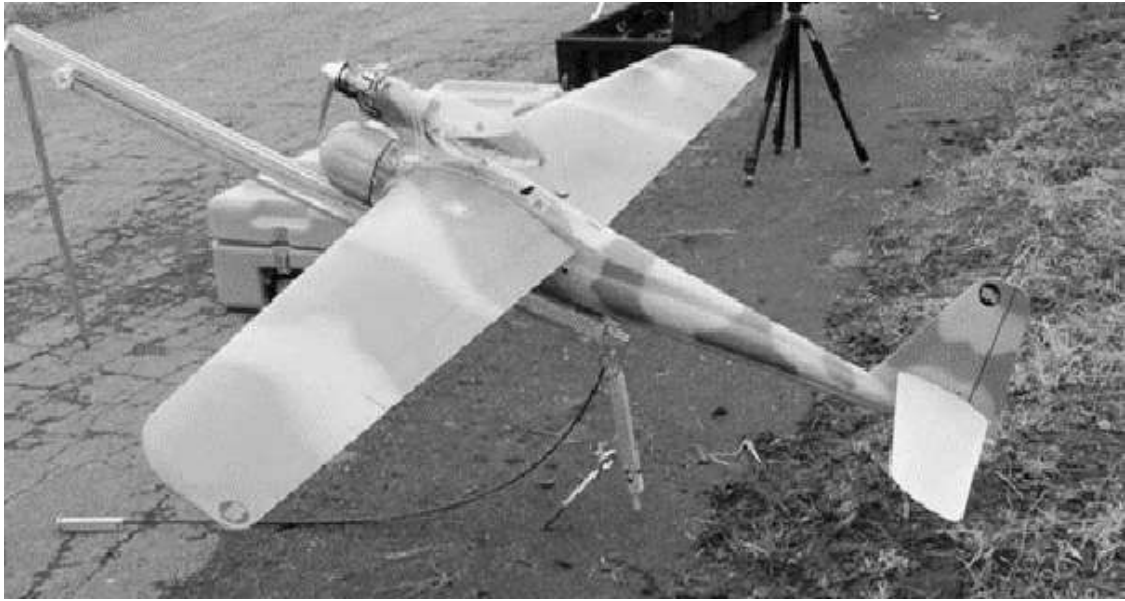


Рисунок 1.3 — БПЛА Орлан 3М

Корпус: композитні матеріали

Висота: 0.4 м; довжина: 1.5 м; розмах крила 2.1 м

Злітна вага (максимальна): 7 кг

Корисне навантаження: до 1.8 кг

Вага/корисне навантаження: 3.8

Радіус дії: до 100 км.

Швидкість: 70-150 км/год

Стеля: до 7000 метрів від рівня моря

Силова установка: ДВЗ на метанолі, 1.3 к.с.

Бортовий генератор: дозволяє використовувати активне навантаження весь час польоту

Час безпосадкового польоту: до 180 хвилин

Зліт: зі збірно-розбірної катапульти

Максимально допустима швидкість вітру на старті: 10 м/с

Управління проаодиться з наземного пункту управління (переносного, мобільного чи стаціонарного). З одного НПУ забезпечується одночасне керування до 4 БЛА. Цільове навантаження: фотокамера, відеокамера, тепловізор, гіростабілізована телекамера.

Використано модульний підхід для побудови БЛА Орлан, що дозволяє змінювати корисне навантаження без особливих складнощів. Інформаційно-вимірювальна апаратура забезпечують відео- та фотозйомку у поєднанні з реєстрацією поточних параметрів (координати, висота, номер кадру тощо). БЛА Орлан-3М може забезпечувати ретрансляцію сигналу керуючого для інших БЛА.

Комплекс із БПЛА Орлан-10 дозволяє контролювати протяжні об'єкти у важкодоступній місцевості. Може використовуватись для рятувально-пошукових робіт. Безпілотний літальний апарат Орлан-10 оснащений фотоапаратом та телевізійною камерою.



Рисунок 1.4 — БПЛА Орлан-10

Злітна вага, кг: 18.00

Дальність, км: 600.00

Швидкість, км/год: 150.00

Практична стеля, м: 5 000.00

Маса корисного навантаження, кг: 5

Макс. допустима швидкість вітру на старті, м/с.: 10

Діапазон робочих температур біля поверхні землі, С. : від -30 до +50

Макс. тривалість польоту, ч.: 18

Використовується для розвідки та наведення артилерії.

1.3 Канали виявлення БПЛА

Інформація для виявлення і подальшого пеленгації БПЛА може бути отримана шляхом прийому спеціальними засобами відбитої і випромінюваної енергії у всіх діапазонах спектру електромагнітних і акустичних хвиль. Будь-якому матеріальному об'єкту, в тому числі і БПЛА, притаманні демаскуючі ознаки, які виділяють його в навколишньому середовищі, роблячи його помітним для спостереження в даний час ступінь помітності визначають значенням його сигнатур в радіочастотному, інфрачервоному (ІЧ) і видимому діапазонах спектру, а також акустичної сигнатурою.

Сучасні легкі БПЛА мають сигнатури невеликого значення: їх виготовляють з використанням композитних матеріалів і пластика зі спеціальною забарвленням і особливою комбінацією шарів; невеликі бензинові або електричні двигуни випромінюють мало тепла і працюють майже безшумно. Значна різноманітність можливих варіантів побудови і використання коштів спостереження в кожному з зазначених діапазонів обумовлює труднощі оцінювання їх ефективності.

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

- сигнали бортового відповідача;
- сигнали радіолокаційних станцій, відображені від корпусу та агрегатів БПЛА;
- сигнали телевізійних ретрансляторів, ширококомовних 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 хвиль;
- використання тепловізора інфрачервоного діапазону хвиль;
- здійснення радіомоніторингу;
- використання радіолокаційних станцій.

Акустичний канал. Сумарний спектр акустичного випромінювання тактичного БПЛА обумовлений гармонійними і широкосмуговими складовими. Він включає в себе гармонійні залишають випромінювання

двигуна, шуму обертів гвинта, випромінювання механічної природи, а також високочастотну і низькочастотну складові шуму двигуна з безперервними по частоті спектрами. В шумі силової установки БПЛА, має поршневий двигун повітряного охолодження, при відсутності в його вихлопному тракті глушника визначальним джерелом зовнішнього шуму є поршневий двигун. Комплекси, засновані на акустичному виявленні, вловлюють шум двигунів і гвинтів квадрокоптера, що працює. За наявності спрямованих мікрофонів такі системи здатні не тільки виявити дрон, але й визначити напрямок, з якого він наближається.

Основним недоліком звукового виявника є обмежена гранична відстань, яка не перевищує кількох сотень метрів. У стаціонарному виконанні такі системи можуть розташовуватись на системах освітлення, а їх живлення може бути здійснюватись від сонячних батарей або бути інтегрованим у енергетично систему об'єкту. Актуальність мобільних систем наразі зростає, бо вони можуть ефективно протидіяти низьколетячим малошвидкісним цілям.



Рисунок 1.5 — Приклад стаціонарної (а) та мобільної (б) акустичної системи виявлення

Оптичний канал. Для виявлення БПЛА в оптичному діапазоні 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.

Оптичне виявлення БПЛА дуже залежить від чинників навколишнього середовища. Збільшення дальності виявлення досягається за рахунок звуження поля зору, зменшення зони огляду і збільшення часу пошуку. Тому візуальні сенсори є неефективними пристроями для проведення пошуку. При надходженні зовнішніх цілевказань від більш ефективного пошукового засобу оптичні сенсори можуть бути ефективно використані для супроводу БПЛА.

Оскільки безпілотники є значно меншими за розмірами в порівнянні з пілотованими засобами, то це ускладнює їх виявлення за допомогою оптичних засобів. Порівняно з літаком контрастність БПЛА щодо фону є меншою через відсутність світлових маяків, зменшений факел малого двигуна і меншу поверхню відображення.

Прикладом такої системи може слугувати система оптичного виявлення БПЛА Sky Patriot рис. 1.6. Таке рішення є пасивним, але одночасно можливо не тільки виявляти декілька БПЛА, а і класифікувати їх на дальності до 800 м. Для оптичного виявлення використовується фіксована камера, що має поле огляду (FoV) 30°. Ціль, що була виявлена, передається на спеціальну камеру (RTZ-камера), щоб класифікувати дрон і у подальшому для виключити хибні рішення. Дана система має спеціальний набір алгоритмів для виключення хибних спрацьовувань.

Велика кількість ознак, що демаскують дронів, закладені у аналітичній бібліотеці, а переміщення фонових об'єктів (птахів, засобів пересування, людей тощо) відфільтровується. Така система інтегрується до антидронної системи у комбінації з іншими технологіями, такими як: радіочастотними, акустичними, радіолокаційними тощо.



Рисунок 1.6 — Оптична система Sky Patriot

ІЧ канал. 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.

Тепло від БПЛА виділяється, в основному, силовою установкою і, в меншій мірі, електронними компонентами, а також точками гальмування на несучих краях крил, пропелерів і гвинтів. Розробники безпілотників намагаються попередити випромінювання в ІЧ діапазоні в напрямку розміщених на землі приймачів і направити це випромінювання в сторону неба. Крім того, використовують матеріали з малою випромінювальною здатністю, такі як срібло і алюміній. В даному випадку можливість БПЛА бути виявленим визначається його випромінювальною здатністю, контрастом і площею випромінювання.

З метою виключення впливу фактора навколишнього середовища застосування оптичних датчиків поєднують з інфрачервоними, що дозволяє виявляти дрон як у світлий, так і темний час доби. Однак для впевненої локалізації безпілотника потрібна постійна наявність прямої видимості, а також використання кількох камер створення кругового огляду на 360 градусів.

Прикладом ІЧ системи виявлення є система SKYLOCK. За допомогою зображень високої роздільної здатності для ідентифікації співробітники служби безпеки виявляють, ідентифікують та відстежують до 200 безпілотних літальних апаратів одночасно на відстані до 2,5 км залежно від погодних умов та розміру мети.



Рисунок 1.7 — система SKYLOCK

Радіоканал. Пошук БПЛА за допомогою активних радіолокаційних станцій досить продуктивний, так як вони мають відносно великий імпульсний обсяг пошуку і значну дальність виявлення. Однак РЛС можуть бути визначені противником по власному випромінюванню. Радіолокаційне виявлення БПЛА може бути прийнятним тільки тоді, коли не ставляться вимоги до скритності роботи або високої мобільності. Як уже зазначалося, більшість БПЛА виготовляють з композитних матеріалів, які досить погано відображають електромагнітні хвилі.

У ряді випадків БПЛА є складною метою для існуючих РЛС. Ці апарати мають малу 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.

Радіолокаційні системи здатні не тільки виявити дрон на відстані до кількох кілометрів (залежно від розміру коптера), але й визначити дальність і напрямок. Як правило, вони працюють в обмеженому секторі і для кругового покриття може знадобитися встановлення декількох модулів. Плюсом таких систем є можливість роботи з БПЛА, що функціонує в режимі радіомовчання.

Прикладом радіолокаційної системи є радар A422. Blighter «A422 Deployable Radar System» є повністю інтегрованою готовою системою виявлення дронів та наземного спостереження. Його основна місія — виявлення нано- і мікродронів, які зараз широко використовуються для розвідки на полях битв і в міських зонах бойових дій. Система охоплює сектор горизонтального азимутального сканування на 180° . Для спостереження на 360° можна використовувати конфігурацію з двома A422 «спина до спини». Система використовує антени Blighter W20S, які забезпечують широке вертикальне покриття під кутом до 30° .



Рисунок 1.8 — Радіолокаційна система A422

Канал радіорозвідки. БПЛА можуть бути виявленими і засобами радіотехнічної розвідки шляхом прийому і аналізу радіосигналів ліній зв'язку та управління, радіолокаційних висотомірів, постановників активних перешкод і радіолокаційних станцій. Однак цим методом можна встановити лише напрямок на БПЛА, причому точність визначення підвищується при збільшенні часу спостереження. Деякі низькочастотні лінії зв'язку можуть бути виявлені на значних відстанях. Випромінювання бортових РЛС і постановка активних перешкод БПЛА можуть бути виявлені на ще більших відстанях. Цей метод вимагає мінімального обладнання та дозволяє швидко визначити пеленг цілі при подальшій видачі цілевказівок на кошти оптичного або ІЧ спостереження.

На відміну від радіолокаційних, радіочастотні системи виявлення дронів у складі одного радіоприймального модуля здатні знаходити БПЛА як у вузькому секторі, так і покривати область на 360 градусів. Дальність їхньої роботи не залежить від часу доби, погоди або розмірів коптера, при цьому може досягати кількох кілометрів. Основна умова їх функціонування - наявність радіоканалу управління між оператором БПЛА та дроном, що має місце для переважної кількості безпілотників побутового або комерційного призначення.

Прикладом системи, що використовує радіоканал розвідки є білоруська станція перешкод та радіокерування зв'язку. Призначена для пошуку, виявлення та радіопридушення ліній радіозв'язку УКХ діапазону, що працюють на фіксованих частотах та в режимах адаптивної та програмної перебудови робочої частоти. До складу входить виявник-пеленгатор з приймально-пеленгаторною антенно-фідерною системою (АФС), два автоматизовані робочі місця операторів, десятиканальний радіопередавач з сімома передаючими АФС, комплект апаратури зв'язку та передачі даних, комплект апаратури електроживлення та життєзабезпечення, автомобільне шасі з двома кузовом-фургоном.

Має розширений робочий діапазон частот радіорозвідки та радіопригнічення; виявляє та пригнічує джерела радіовипромінювань на наземних та повітряних об'єктах; виявляє, пеленгує та визначає місце джерел радіовипромінювання в режимі ППРЧ зі швидкістю до 1000 стрибків на секунду, радіопригнічує лінії зв'язку в режимі ППРЧ зі швидкістю до 500 стрибків на секунду; одночасно придушує до 28 ліній радіозв'язку на фіксованих частотах.



Рисунок 1.9— Система-934УМ2 (Гроза-6)

Радіомоніторинг це 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), ущелинах та ярах, у тіні від місцевих височин та за горизонтом. Тому їх виявлення РЛС є скрутним чи неможливим. 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.

В таблиці 1 подано узагальнюючу класифікацію використання різних каналів та можливостей виявлення БПЛА.

Таблиця 1 — Можливості датчиків виявлення БПЛА

Принцип роботи датчиків	Гранична дальність, м	Фактори, що впливають на якість роботи	Особливості функціонування
акустичний	200 - 300	шум зовнішнього середовища	можливість роботи з БПЛА в режимі радіомовчання
оптичний	500 - 600	умови освітленості, погодні умови (туман, опади)	потрібна наявність прямої видимості, можливість роботи з БПЛА в режимі радіомовчання
інфрачервоний	500 - 600	погодні умови (туман, опади)	потрібна наявність прямої видимості, можливість роботи з БПЛА в режимі радіомовчання
лідар	1 000	погодні умови (туман, опади)	потрібна наявність прямої видимості, можливість роботи з БПЛА в режимі радіомовчання
радіолокаційний	2 000	розмір БПЛА (ефективна площа розсіювання)	потрібна наявність прямої видимості, можливість роботи з БПЛА в режимі радіомовчання
радіочастотний	2 000	потужність випромінювання передавача на БПЛА	робота по БПЛА, керованим дистанційно, можливість виявити оператора до зльоту дрона

Оцінюючи переваги і недоліки розглянутих фізичних каналів виявлення БПЛА, можна зробити висновок, що для виявлення малорозмірних і мало швидких безпілотників (мікро-БПЛА), так званих БПЛА широкого застосування, що є найбільш затребуваними в рішенні цивільних і військових завдань, оптимальним є акустичний канал.

2 ВИЗНАЧЕННЯ МІСЦЕПОЛОЖЕННЯ БПЛА ЗА АКУСТИЧНИМ ВИПРОМІНЮВАННЯМ

2.1 Огляд методів ідентифікації акустичних сигналів

Безпілотні літальні апарати 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. 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 БПЛА створюваний гвинтами є істотною ознакою, що демаскує. 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. 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.

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).

2.2 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 (ТГД) 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 [4].

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

$$f_{\text{макс}} = S_h \frac{U_0}{d}, \quad (2.1)$$

де $S_h = 0, 2..0, 3$ – число Струхалія;

U_0 – швидкість витікання струменя, м/с;

d – діаметр сопла реактивного струменя, м.

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 рушійці або гармати є широкосмуговим акустичним імпульсом, який представляє собою суперпозицію великої кількості гармонік. При моделюванні поширення такого сигналу в атмосфері необхідно враховувати енергетичні втрати.

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.

2.3 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. 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 [5]

$$T = \frac{2\pi}{N\Omega}. \quad (2.2)$$

Акустичний сигнал БПЛА представляє собою суму гармонік з частотами, кратними частоті обертання ротора або колінвала двигуна F . Амплітуди гармонік зменшуються зі збільшенням частоти [2].

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:

$$\chi_{ED}(t) = \sum_{m=1}^M A_m \cos(2\pi N F_m t + \varphi_m), \quad (2.3)$$

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.

Спектральний аналіз прийнятих реалізацій сигналів проводився за допомогою періодограми. На рис. 2.1 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 $N = 512$.

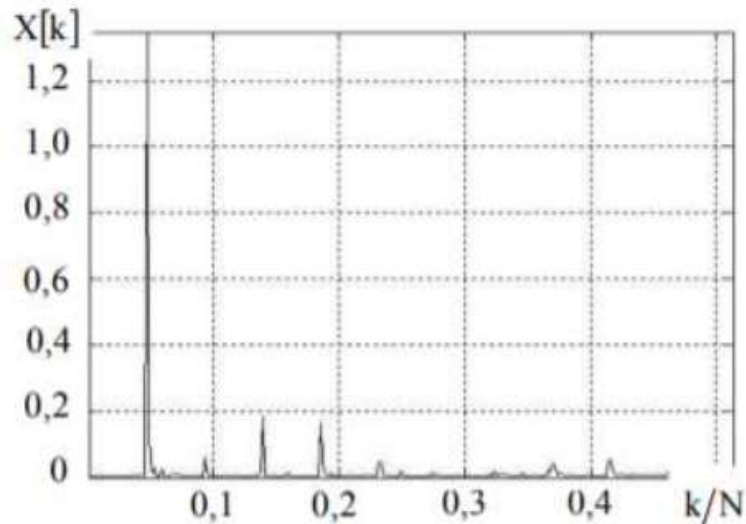


Рисунок 2.1 – Періодограма акустичного сигналу БПЛА з ЕД і повітряним гвинтом з трьома лопастями

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:

$$\begin{aligned} \chi_{ДВЗ}(t) &= \chi_{ДВ}(t) + \chi_{ГВ}(t), \\ \chi_{ДВ}(t) &= \sum_{k=1}^K A_k \cos(2\pi N F_k t + \varphi_k), \\ \chi_{ГВ}(t) &= \chi_{ЕД}(t), \end{aligned} \quad (2.4)$$

де 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. Періодограма акустичного сигналу малорозмірного БПЛА з ДВЗ зображений на рис. 2.2.

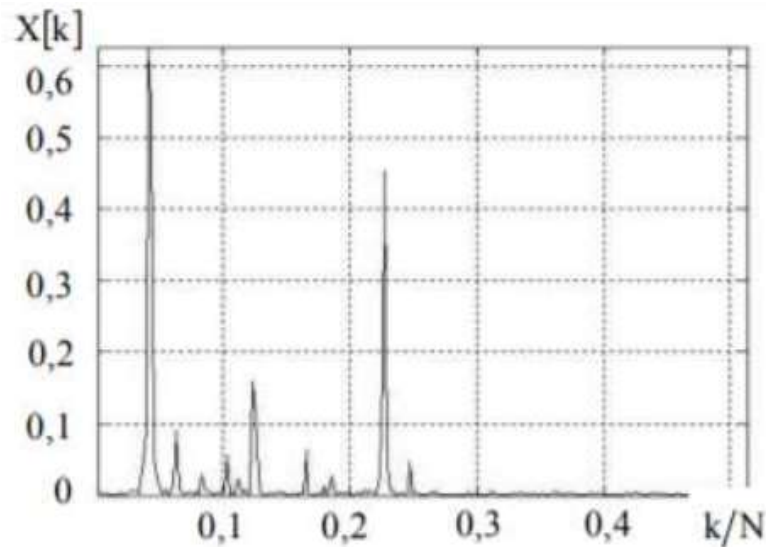


Рисунок 2.2 – Періодограма акустичного сигналу БПЛА з ДВЗ

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:

$$\chi_{MP}(t) = \sum_{p=1}^P \chi_p(t),$$

$$\chi_p(t) = \chi_{ED}(t), \quad (2.5)$$

де 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. 2.3 наведена періодограма акустичного випромінювання БПЛА мультироторного типу з чотирма гвинтами.

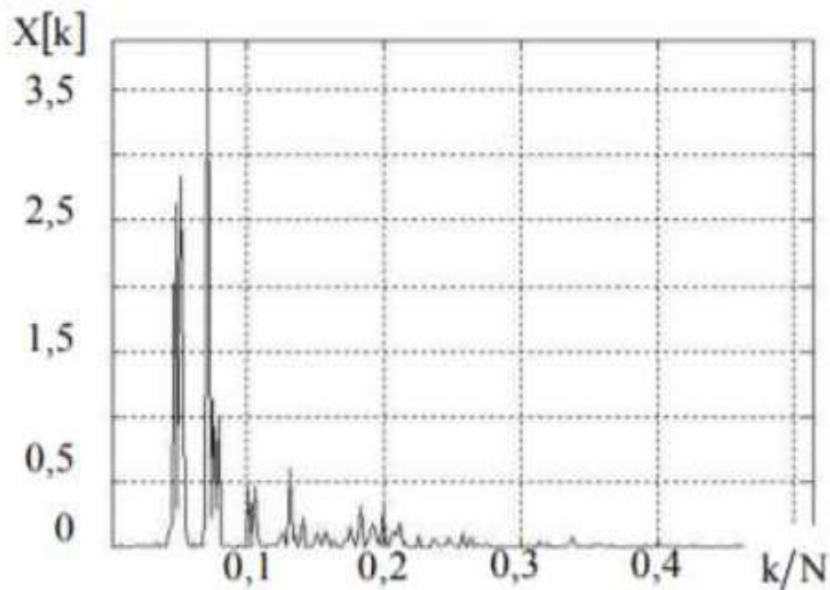


Рисунок 2.3 – Періодограма акустичного сигналу БПЛА мультироторного типу з чотирма гвинтами

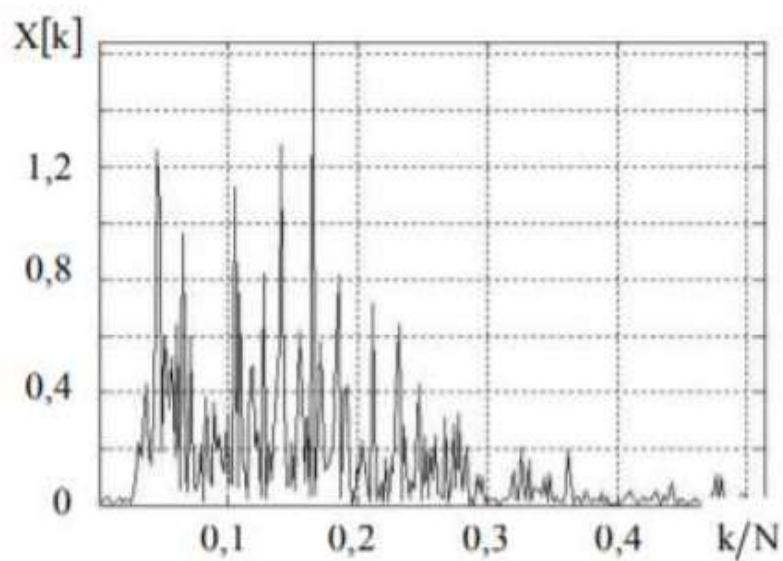


Рисунок 2.4 – Періодограма акустичного сигналу БПЛА мультироторного типу з шістьма гвинтами

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. 2.4). 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.

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):

$$S_{ДВ}(t) = \sum_{i=1}^{MK} A_i \sin \left\{ 2\pi \left[F + A_{m_i} \sin(2\pi F_m t) \right] \right\}. \quad (2.6)$$

$$S_{ГВ}(t) = \sum_{i=1}^K A_i \sin \left\{ 2\pi M \left[F + A_{m_i} \sin(2\pi F_m t) \right] \right\}. \quad (2.7)$$

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.

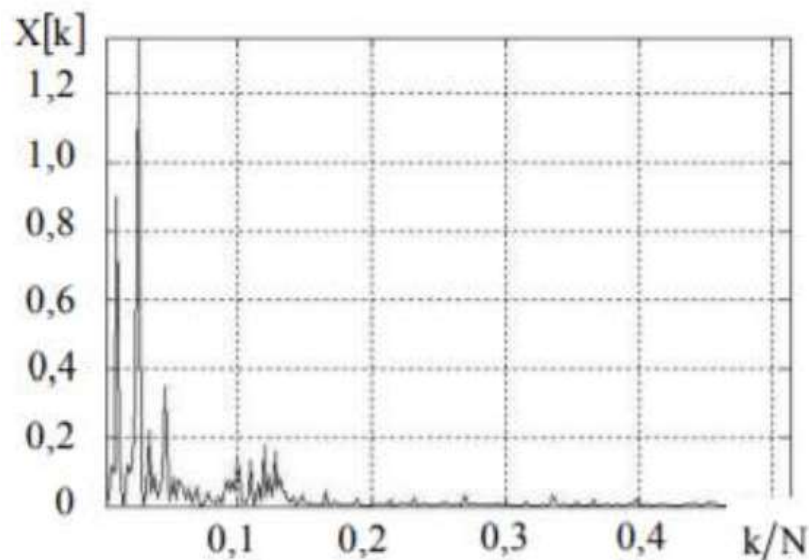


Рисунок 2.5 – Періодограма акустичного сигналу вертольота

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. 2.5 та 2.6 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.

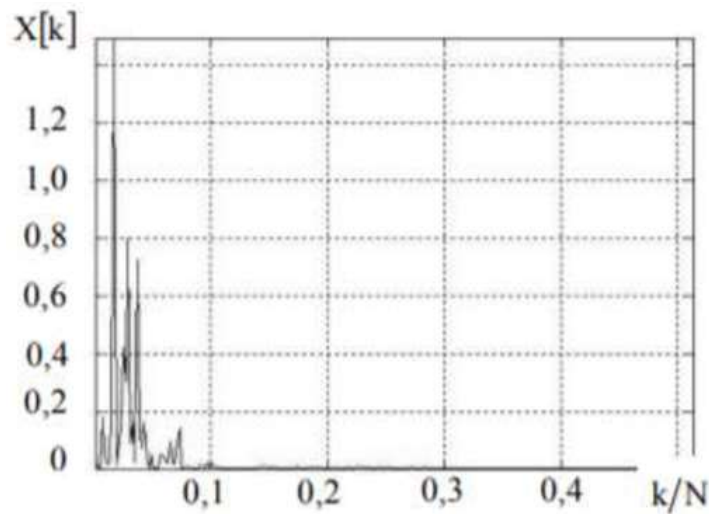


Рисунок 2.6 – Періодограма акустичного сигналу гвинтомоторного літака

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 [3].

2.4 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 [7].

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.

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. 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 [3, 6].

Із частотами $f_i = f_0 \cdot i$, впливають дискретні складові, які кратні частоті запалювання f_0 , де $i = 1, 2, 3 \dots$ – номер відповідної гармонійної складової.

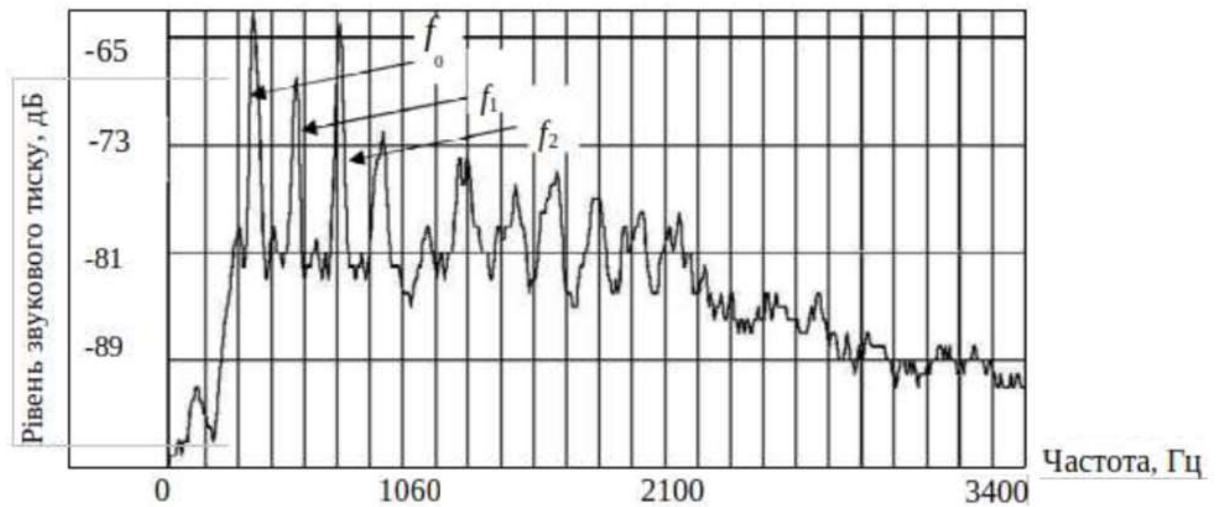


Рисунок 2.7 – Типовий спектр акустичного випромінювання роботи силової установки БПЛА

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. 2.7.

Іншою інформаційною характеристикою акустичних сигналів БПЛА, що використовується для 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.

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.

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 зрису близько 150 Гц.

Математичні моделі акустичних сигналів БПЛА, що враховують структурні, частотні і просторові особливості акустичного випромінювання безпілотних літальних апаратів, а також особливості його поширення в атмосфері [3].

Частотна структура акустичних полів, які створюються БПЛА, складається з ряду гармонічних складових, які з'являються у результаті вимушених коливань (вібрацій) окремих елементів конструкції під впливом сили, яка примушує. Акустичні поля такого типу зручно визначати як комбінаційні, оскільки вони представляють собою суперпозицію окремих взаємопов'язаних частотних складових. Очевидно, що правила виявлення таких сигналів мають базуватися на знаннях про часову амплітудно-частотну структуру акустичних полів, які підлягають розгляду. У загальному випадку вихідною умовою розробки правил виявлення БПЛА слід вважати положення, яке складається у тому, що у даному випадку необхідно вирішувати задачу

виявлення випадкового нестационарного сигналу з апіорі невідомими параметрами на фоні випадкової нестационарної завади. Це положення складає основну та вельми суттєву трудність у вирішення поставленої задачі.

Відомі методи енергетичного виявлення БПЛА недостатньо ефективні, оскільки операція виконується, як правило, на фоні різноманітних акустичних завад, які мають певні структурні подібності з сигналом БПЛА. Внаслідок цього задача виявлення БПЛА за АВ на практиці реалізується як задача «виявлення розпізнавання», тобто при вирішенні задачі виявлення приймається до уваги наявність деяких інформативних ознак у сигналу, що приймається

У літературі відомий ряд алгоритмів виявлення-розпізнавання, у тому числі є алгоритми, які побудовані з використанням моделі авторегресії (АР). Модель АР ефективно описує вузькосмугові випадкові процеси, а коефіцієнти АР несуть повну інформацію про кореляційну функцію та спектральну щільність потужності (СЩП) випадкового процесу.

Трудність використання широко розповсюдженої на практиці моделі АР у задачі виявлення БПЛА обумовлена тим, що ознаки БПЛА, які відрізняють його від інших об'єктів, які шумлять, розміщені у низькочастотній області спектра сигналу. Це потребує збільшення порядку моделі авторегресії (до декількох десятків і більше), але коефіцієнти авторегресії значних порядків, які безпосередньо використовуються при виявленні-розпізнаванні БПЛА, визначаються зі значною дисперсією – не точно, що знижує ефективність вирішення задачі.

Окрім цього, при визначенні параметрів моделі АР значних порядків зростає час їхнього розрахунку, що неприпустимо, оскільки акустичні системи виявлення БПЛА працюють на невеликих дальностях (як правило, десятки метрів) [8, 15].

2.5 Структура і параметри звукового поля гвинтових безпілотних літальних апаратів. Звукове поле повітряного гвинта

При періодичному впливі на повітряне середовище лопатів повітряного гвинта БПЛА формується звукове поле. Коливання тиску повітря за рахунок витіснення з середовища об'єму, рівного об'єму лопаті гвинта, під час його обертання призводять до появи шуму витіснення. Основна частота слідування лопатів повітряного гвинта дорівнює частоті обертів ротора, помноженої на кількість лопатів. Спектр шуму гвинта має гармонічні складові частоти

обертів ротора і гармоніки частоти лопатів. Частоти гармонічних складових в спектрі шуму повітряного гвинта визначаються у відповідності до виразу:

$$f_g = knN, \quad (2.8)$$

де k – номер гармоніки;

n – частота обертів ротора (об/с);

N – число лопатів.

Окрім цього, внаслідок створення вихорів біля лопатів повітряного гвинта з'являється так званий «вихровий звук» – широкосмуговий шум обтікання лопаті. При обтіканні лопаті повітрям утворюється «прикордонний шар», у якому зосереджена дія в'язкості, а стікання з лопаті прикордонного шару веде до утворення вихорів. Спектр шуму утворення вихорів є безперервним по частоті.

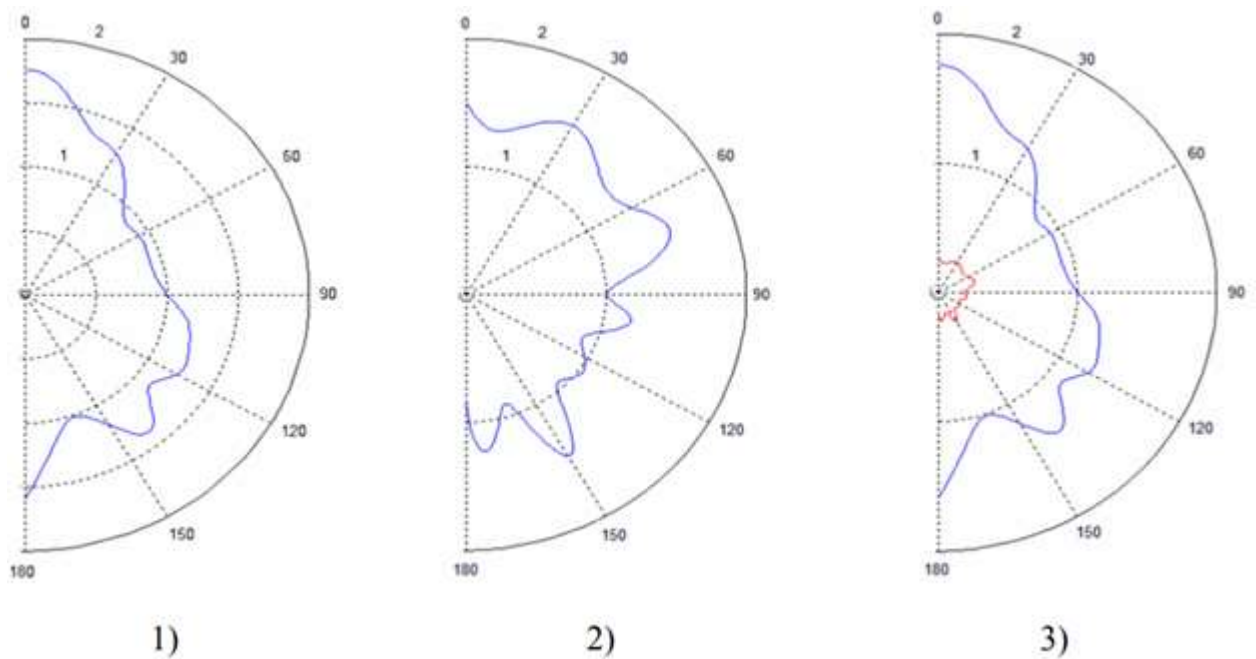
Дискретні складові спектра акустичного випромінювання, що пов'язані з шумом обертання та взаємодії, як правило, мають на 15-20 дБ більш вищі рівні, ніж широкосмуговий шум обтікання лопаті. Відомо, що двигуни внутрішнього згорання дають суттєвий внесок у загальне акустичне випромінювання БПЛА. Проаналізуємо внесок акустичного випромінювання гвинтомоторної групи у формуванні сумарного звукового поля.

Направленість акустичного випромінювання БПЛА

Характеристика направленості АВ джерела шуму визначається як різниця між фактичним розподіленням акустичної енергії джерела у оточуючому просторі і рівномірним по простору розподіленням. У експерименті здійснювалось вимірювання характеристик направленості АВ квадрокоптера DJI Phantom 3. Квадрокоптер встановлювався на висоті 2,2 м на жорсткому штативі, на якому закріплений поворотний вузол, який дозволяє обертати по куту місця штангу довжиною 2 метра відносно точки, яка лежить у площині обертання гвинтів БПЛА. Вимірювальний мікрофон встановлювався на кінці штанги з використанням звукоізолюючої втулки (з метою подавлення передачі вібрації при роботі квадрокоптера DJI Phantom3). Вимірювання направленості АВ з використанням цього устаткування проводилось у діапазоні кутів місця 00...1800 з кроком 150, (00 – зеніт, 1800 – надир). При вимірюваннях рівень природного фону був суттєво нижче рівня шуму об'єкту, який досліджується, у всьому діапазоні частот, який вимірюється.

Характеристики направленості АВ пронормовані до одиниці на рівні 900, що відповідає напрямку випромінювання паралельно поверхні землі. Характеристики направленості побудовані по експериментальним точкам з

аппроксимацією кубічним сплайном. На рис.2.8 представлені нормалізовані характеристики направленості для гвинтомоторної групи квадрокоптера (поз.1), електродвигунів квадрокоптера (поз.2) та спільні характеристики АВ у вертикальній площині. Як видно на рис.2.8, сумарне випромінювання усіх спектральних складових АВ не є ізотропним: воно має виражену просторову направленість, основне випромінювання здійснюється у верхню полусферу.



1) – для гвинтомоторної групи, 2 – електродвигунів, 3 – спільні характеристики

Рисунок 2.8 – Нормалізовані характеристики направленості у вертикальній площині

Характеристика направленості АВ електродвигунів БПЛА суттєво відрізняється від характеристики направленості випромінювання гвинтомоторної групи, оскільки має іншу природу формування сигналу. Для акустичного випромінювання спостерігається ефект екранування у нижній полусфері, обумовлений наявністю пластикового кожуха двигуна. Рівні випромінювання двигунів, нормовані по відношенню до рівня випромінювання двигуна з гвинтом, приблизно на порядок нижче та мають форму характеристики направленості, яка суттєво відрізняється від направленості випромінювання двигуна з гвинтом, оскільки мають іншу природу формування АВ. Певний інтерес представляє вивчення направленості АВ окремих гармонік лопастної частоти повітряного гвинта. На рис.2.9 представлені нормалізовані характеристики направленості випромінювання квадрокоптера DJI Phantom 3 у вертикальній площині для перших чотирьох

гармонік лопастної частоти повітряного гвинта на відповідних позиціях рисунка.

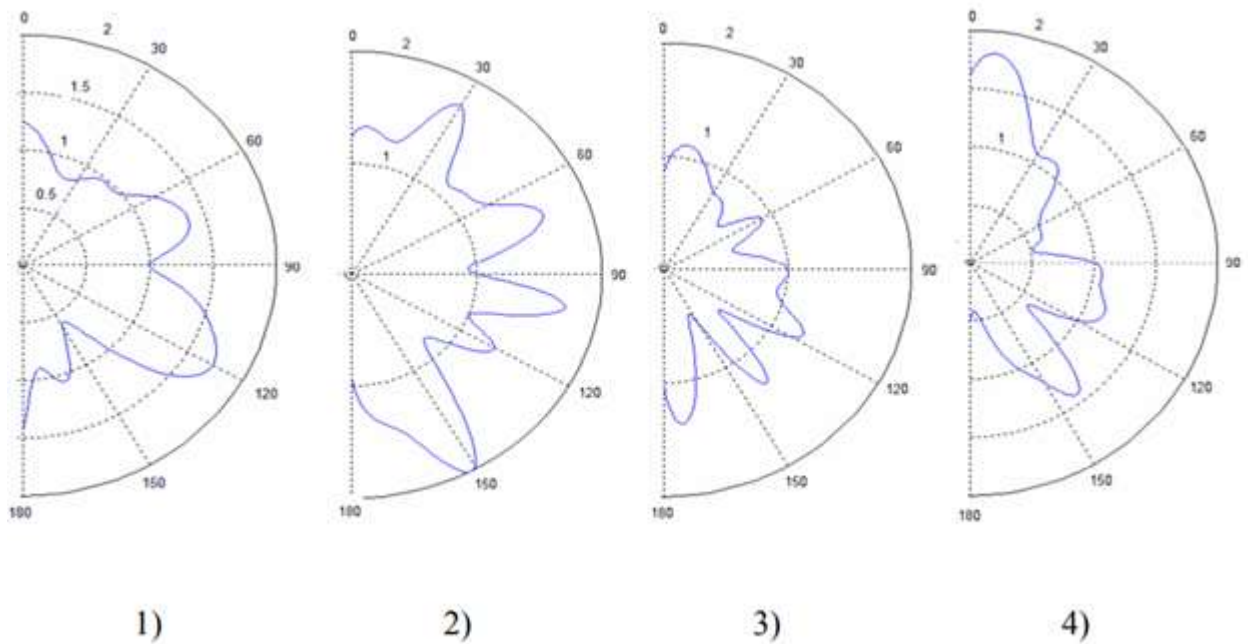


Рисунок 2.9 – Нормалізовані характеристики направленості у вертикальній площині квадрокаптера DJI Phantom 3 для перших чотирьох гармонік

Аналіз направленості АВ у вертикальній площині у смузі частот показує, що з підвищенням номера гармоніки спостерігається ускладнення форми характеристики направленості – вона стає все більш порізаною, з великою глибиною провалів, ширина пелюсток зменшується, відбувається зміна напрямку основного випромінювання. Отримані результати свідчать, що у залежності від ракурсу спостереження БПЛА спектральні складові його АВ на частотах гармонік, які визначаються характеристиками направленості, мають різні рівні.

Урахування особливостей поширення акустичних сигналів БПЛА в атмосфері.

Як виходить із аналізу, який наведено вище, БПЛА на відстані більш десяти метрів від приймального мікрофону слід розглядати як точкове джерело акустичної хвилі. З урахуванням цього факту, особливості поширення акустичних сигналів БПЛА в атмосфері складаються із ослаблення сигналів внаслідок сферичного розходження акустичного променя, внаслідок поглинання енергії акустичної хвилі атмосферним газом, та в результаті викривлення траєкторії їхнього розповсюдження із-за дії ефекту рефракції.

Тому вплив факторів, що перераховано, розглядається як складові частки в моделі акустичних сигналів БПЛА.

Потенційна дальність виявлення акустичного сигналу БПЛА.

Акустичний шум, створюваний БПЛА, для даної задачі виявлення розглядається як корисний сигнал. При цьому фоновий акустичний шум і тепловий шум вхідного кола прийомного пристрою розглядаються як перешкода. Під потенційною дальністю виявлення D_{pt} будемо розуміти таке гранично максимальне значення дальності $D_{i\ max}$, при якій у місці розташування прийомного мікрофона виконується умова:

$$q = \frac{\sigma_{mc}}{\sigma_{te}} \geq 10 \text{ дБ} \quad (2.9)$$

де σ_{mc} – середньоквадратичне значення напруги на виході прийомного мікрофона;

σ_{te} – середньоквадратичне значення напруги теплового шуму вхідного кола прийомного пристрою.

Вираз (2.9) формалізує ідеальне співвідношення сигнал/шум, при якому відсутній зовнішній фоновий шум, тобто $\sigma_N = 0$, де σ_N – середньоквадратичне значення напруги фонового шуму на виході мікрофона. Вираз для відношення сигнал/шум (2.9) вводиться у вигляді відношення середньоквадратичних відхилень у зв'язку з тим, що в системі виявлення використовується принцип пасивної акустичної локації і корисний сигнал (шум БПЛА) є випадковий нестационарний процес, що у межах розглянутого завдання можна вважати необмеженим у часі, тобто аналіз поля акустичних сигналів ведеться безперервно. Якщо рівень шумового сигналу, що генерується БПЛА, апіорі відомий, то максимальна дальність виявлення БПЛА буде залежати тільки від рівня перешкод. Очевидно, що максимальна дальність виявлення має місце при мінімальному рівні перешкод. Таким мінімальним рівнем перешкоди є середньоквадратичне значення напруги власних теплових шумів вхідного кола прийомного пристрою. У зв'язку з цим мінімальний рівень звукового тиску p_{qc} сигналу, що може бути виявлений приймачем, визначається чутливістю мікрофона s_m й величиною σ_{te} , тобто:

$$P_{qc} = \frac{\sigma_{te}}{S_M}, \quad (2.10)$$

З урахуванням умови (2.9) одержимо мінімально припустиме значення для величини P_{qc} :

$$P_{qc \min} = \frac{\sigma_{te} \cdot \sqrt{10}}{S_M}, \quad (2.11)$$

або

$$P_{qc \min} = \frac{\sigma_{mc}}{S_M}, \quad (2.12)$$

або у вигляді ослаблення у відносних одиницях стосовно порога чутливості:

$$L_{qc \min} = \frac{P_{qc \min}}{P_0}, \quad (2.13)$$

де $P_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ – поріг чутливості до звуку, Па.

Максимальна дальність D_{qstax} між джерелом і приймачем сигналу, на якій ще можливе виявлення сигналу БПЛА, визначається величиною звукового тиску p_{qstax} , що розвиває джерело на початковій (мінімальній) відстані й функцією ослаблення $F_p(D)$ акустичного тиску при поширенні акустичної хвилі в повітряному середовищі. Функція ослаблення акустичного тиску при збільшенні відстані між джерелом і приймачем звуку на величину $\Delta D = D_2 - D_1$ має вигляд

$$L_2 = L_1 - 20 \lg \frac{D_2}{D_1}, \quad (2.14)$$

де L_1 – відносний звуковий тиск (ослаблення) у початковій точці траси при відстані D_1 від випромінювача,

L_2 – ослаблення в кінцевій (наступній) точці траси при відстані D_2 від випромінювача, $D_2 > D_1$.

Якщо у виразі (2.14) величину L_1 вважати ослабленням на початковій ділянці траси, тобто вважати, що $L_1 = L_0$ при дальності $D_1 = D_0$ і ці параметри прийняти відомими, а як аргумент функції прийняти збільшення дистанції у вигляді $\Delta D = i \cdot \Delta_i$ то одержимо вираз для дистанційної залежності в наступному вигляді

$$L(i) = L_0 - 20 \lg \left(\frac{D_0 + i \cdot \Delta}{D_0} \right), \quad (2.15)$$

Вираз для потенційної дальності виявлення, при якій виконується умова $L_{qcmin} = L(i)$, одержимо з виразу (2.15) шляхом нескладних перетворень. Нехай при $L_{qcmin} = L(i)$

$$D_{qcmax} = D_0 + i \cdot \Delta, \quad (2.16)$$

Тоді вираз (2.15) перепишеться у вигляді:

$$0,05(L_0 - L_{qcmin}) = \lg \left(\frac{D_{qcmax}}{D_0} \right), \quad (2.17)$$

звідки одержимо

$$\begin{aligned} D_{qcmax} &= D_0 \cdot 10^A, \\ A &= 0,05(L_0 - L_{qcmin}). \end{aligned} \quad (2.18)$$

Потенційну дальність виявлення можна оцінити графічно з дистанційної залежності. Дистанційну залежність згідно (2.15) можна побудувати, якщо відомі параметри L_0 й D_0 . Значення цих параметрів одержимо шляхом узагальнення даних реальних вимірювань шуму БПЛА, наведених в [9].

Використовуючи конденсаторний мікрофон (наприклад, «Superlux СМН8С»), середнє значення чутливості якого $s_m = 20 \cdot 10^{-3} \text{ В / Па}$, при $\sigma_{mc} = 3,1 \cdot \sigma_{te}$ одержимо величину звукового тиску P_{qcmin} акустичного поля БПЛА, що у місці установки мікрофона забезпечує СКО напруги на клеммах

мікрофона на 10 дБ перевищує СКО напруги власного теплового шуму $P_{q_{cmin}} = \sigma_{mc} / s_m$ або $P_{q_{cmin}} = 5,37 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$, відносно порога чутливості $P_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$, складе $L_{q_{cmin}} = 8,6 \text{ дБА}$.

В результаті розрахунку згідно (2.18) одержимо $D_{q_{cmax}} = 1459 \text{ м}$. На рис.2.10 наведений графік дистанційної залежності, що ілюструє залежність ослаблення акустичного шуму БПЛА залежно від відстані між БПЛА й прийомним пристроєм, розрахований відповідно до виразу (2.15).

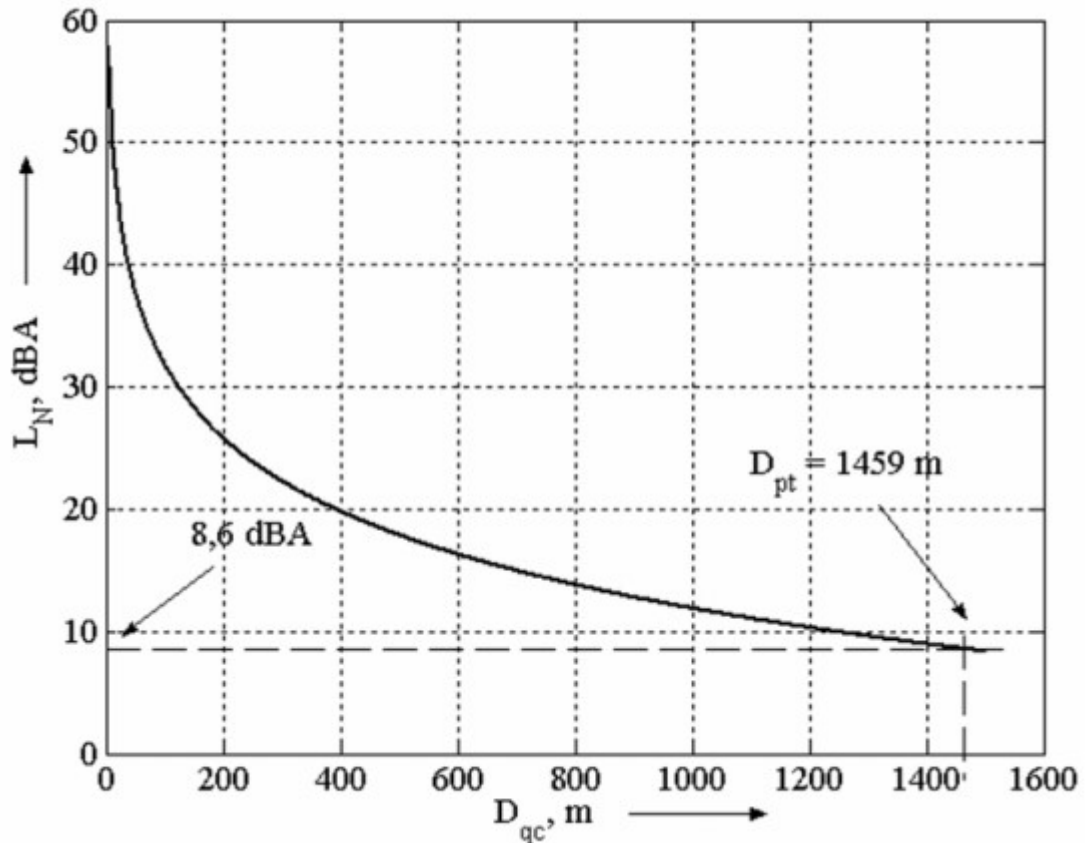


Рисунок 2.10 – Залежність ослаблення акустичного шуму БПЛА від відстані

Залежність, наведена на рис. 2.10, наочно показує, що потенційна дальність $D_{q_{cmax}}$ виявлення істотно залежить від рівня фонового шуму. Наприклад, при $L_N = 20 \text{ дБА}$ максимальна дальність складе $D_{q_{cmax}} = 400 \text{ м}$, але при $L_N = 40 \text{ дБА}$ величина $D_{q_{cmax}}$ становить тільки $D_{q_{cmax}} < 50 \text{ м}$, при цьому область використання системи виявлення істотно обмежується [9].

Врахування впливу поглинання звуку в атмосфері.

Дальність виявлення об'єктів при пасивній акустичній локації також залежить і від стану атмосфери. До факторів, що впливають на дальність

виявлення сигналів, ставиться поглинання енергії звукової хвилі атмосферним газом. Величина поглинання має дві складові: класичне поглинання, обумовлене в'язкістю, теплопровідністю, дифузією й радіацією, і не класичне поглинання, обумовлене наявністю в атмосфері водяної пари. У діапазоні частот $\Delta F = 1 \dots 10$ кГц класичне поглинання менше некласичного поглинання. У діапазоні звукових частот повне поглинання звукової енергії залежить від температури й вологості повітря. Акустичний сигнал БПЛА в середньому займає смугу частот $\Delta F_{dr} = 0,1 \dots 5,0$ кГц. Дані про залежності величини поглинання енергії акустичної хвилі від частоти в цьому діапазоні в літературних джерелах відсутні [6, 8].

Однак відомо, що теоретичні розрахунки поглинання дають відчутні розбіжності з результатами практичних вимірювань. У зв'язку із цим положенням для визначення залежності поглинання звуку в атмосфері в зазначеному діапазоні частот скористаємося експериментальними даними, отримані С.М. Харрісом (Harris, С. М., 1966). На рис. 2.11 наведені експериментальні залежності коефіцієнта α_{ec} повного поглинання звуку в атмосфері від вологості й частоти для частотного ряду через одну третину октави при температурі повітря $t_{63}^{\circ} = 20^{\circ}C$ в діапазоні частот звукового сигналу $\Delta F = 2 \dots 12$ кГц, наведені в роботі.

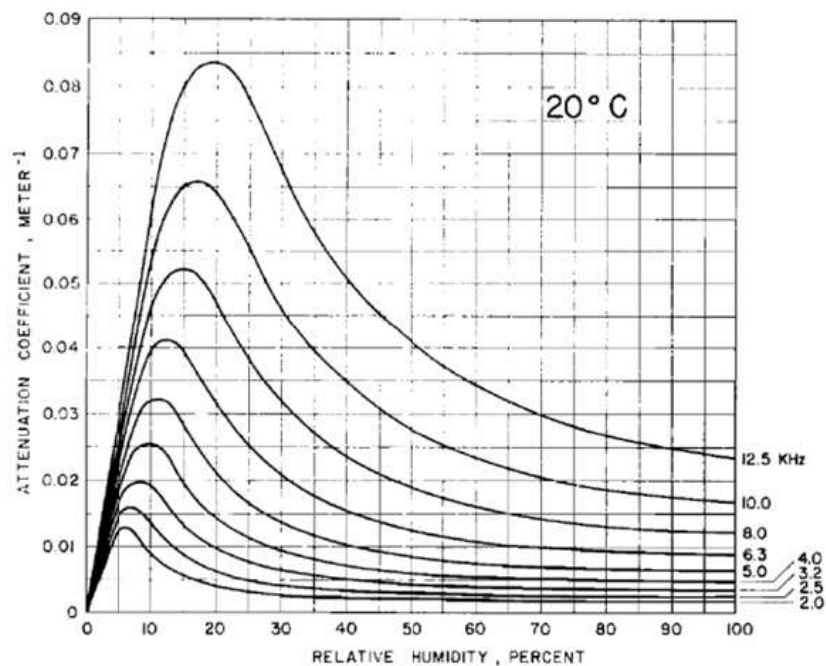


Рисунок 2.11 – Експериментальні залежності коефіцієнта α_{ec} повного поглинання звуку в атмосфері від вологості й частоти

Як видно із проведеного аналізу, основна енергія гармонійних складових звуку, випромінюваного БПЛА, зосереджена в області частот $\Delta F_{dr} = 100 \dots 1000 \text{ Гц}$. Емпірична модель для α_{ec} виглядає наступним чином:

$$\begin{aligned} \alpha_{ec} &= k \cdot F^{1,99} + C, \\ k &= 23,5 \times 10^{-11}, \\ C &= 1,4 \times 10^{-3}. \end{aligned} \quad (2.19)$$

На рис. 2.12 наведена залежність коефіцієнта поглинання звуку в діапазоні частот, які генеруються БПЛА: $\Delta F = 0,1 \dots 5 \text{ кГц}$, розрахована відповідно до моделі (2.19). Отриманий аналітичний вираз (2.19) і наведені залежності дозволяють урахувати в моделі акустичного сигналу БПЛА відносні ослаблення частотних складових спектра акустичного сигналу БПЛА залежно від явища поглинання звукової хвилі в реальній атмосфері.

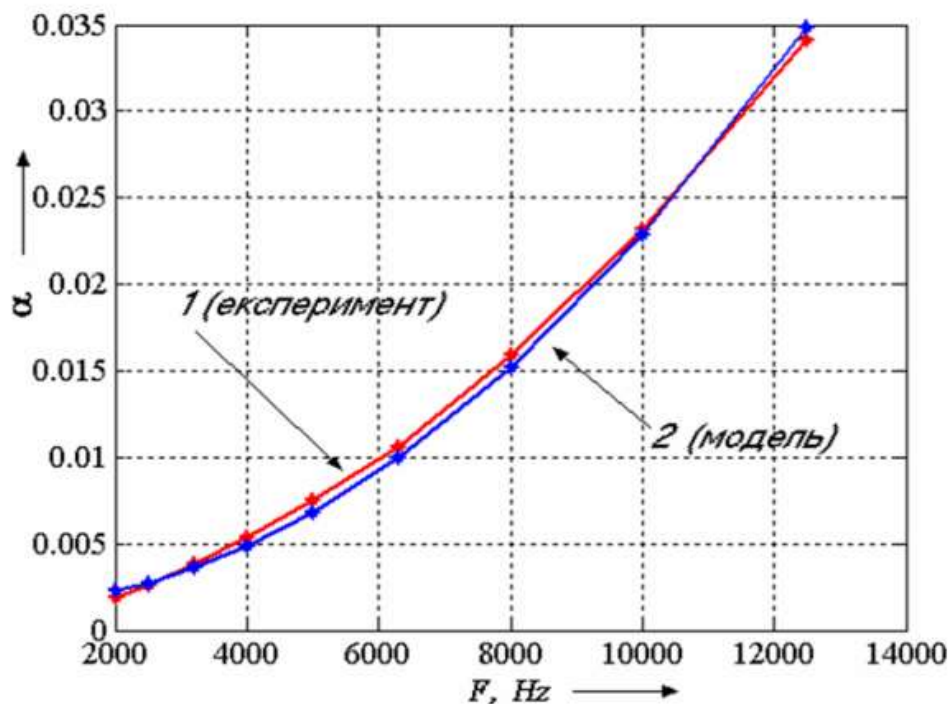


Рисунок 2.12 – Частотна залежність коефіцієнта поглинання акустичної хвилі в атмосфері

Облік впливу рефракції на помилку визначення координат БПЛА

Рефракція звукових хвиль в атмосфері визначається градієнтами зміни метеорологічних величин – температури й швидкості вітру. Вологовміст зневажено мало впливає на вид траєкторії поширення. Також впливом

горизонтальних градієнтів метеовеличин на рефракційні ефекти можна зневажити, тому що ці градієнти на відстанях $D_T < 1000$ зневажно малі.

Вертикальні градієнти швидкості (зсув) вітру спостерігаються в приповерхньому шарі атмосфери $h_\gamma \leq 1..2$ м й на висоті першої інверсії температури $h_\gamma \leq 100..200$ м, тобто в областях висот, на яких використання БПЛА не має практичного значення. Крім того, при швидкостях вітру $V_\gamma \geq 7$ м / с рух БПЛА, внаслідок їхніх невеликих розмірів, стає нестійким. Основний внесок у явище рефракції акустичних хвиль в атмосфері дають вертикальні градієнти температури $\gamma_T = -\frac{dT}{dh}$.

На рис.2.13 наведено схематичне пояснення впливу рефракції на помилку визначення дальності й кута місця БПЛА. Вихідними даними для розрахунку помилок є дальність D_i і кут місця β_2 , визначені методом акустичної локації.

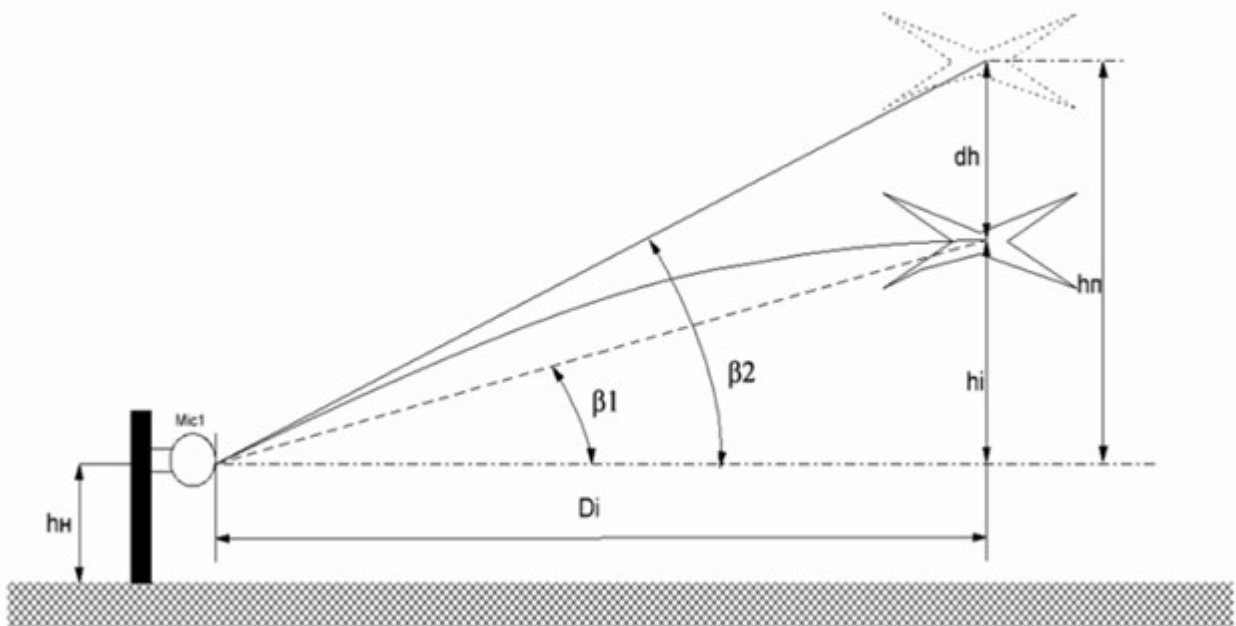


Рисунок 2.13 – Вплив рефракції на похибку визначення координат БПЛА

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

$$c_s = 20,06\sqrt{T} \quad (2.20)$$

де T – температура повітря у приземному шарі, К.

Отже, у структурі системи обробки сигналів повинен бути присутнім вимірювач температури приземного повітря. Наступна операція процедури обробки це визначення істинного положення цілі.

Для розрахунку істинної траєкторії поширення акустичної хвилі від цілі до приймача використовується подання про вертикальний профіль температури повітря, що задається рядом дискретних значень:

$$\begin{aligned} T(h_i) &= T(h_0 + \Delta h(i-1)), \\ h_{\max} &= n\Delta h. \end{aligned} \quad (2.21)$$

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

$$\beta_{i+1} = \arcsin \left(\sin \beta_i \sqrt{\frac{T_{i+1}}{T_i}} \right), \quad (2.22)$$

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

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

$$\Delta D_i = \Delta h \cdot \operatorname{tg} \beta_i. \quad (2.23)$$

У результаті проведених розрахунків одержимо ряд значень збільшень дальності для кожного значення збільшення висоти. Розрахунок значень функції $\Psi(D, h)$ припиняється при виконанні рівності $D_i = D_y$. Тоді координати D й h кінцевої точки траєкторії $\Psi(D, h)$ відповідно визначається в наступному виді

$$D_y(k) = \sum_{i=1}^k \Delta D_i, \quad (2.24)$$

$$h_y = \Delta h \cdot k.$$

Звідки помилка вимірювання висоти БПЛА визначиться, як

$$dh = h_{\text{лін}} - h_y$$

$$h_{\text{лін}} = \frac{D_y}{\text{tg} \beta_a} \quad (2.25)$$

а помилка $d\beta$ визначення кута місця β

$$d\beta = \beta_a - \beta_{\text{лін}},$$

$$\beta_{\text{лін}} = \text{arctg} \frac{h_y}{D_y}, \quad (2.26)$$

де $\beta_{\text{лін}}$ – істинний кут місця цілі при лінійній траєкторії поширення акустичної хвилі.

2.6 Пасивні методи визначення місцеположення БПЛА

Для вимірювання кутових координат джерела акустичного випромінювання БПЛА у пасивних содарах використовується масив мікрофонів різної конфігурації, який дозволяє приймати акустичні сигнали і отримувати первинні координати.

Використовуючи функцію взаємної кореляції поміж сигналами у кожній вимірювальній базі можна визначити напрямок на джерело акустичного випромінювання. Просторові координати джерела випромінювання обчислюють через первинні координати. У залежності від вигляду первинних координат, що визначають, розрізняють кутомірний, різницево-дальновимірний і комбінований методи.

Кутомірний метод дозволяє на основі даних кутових вимірювань визначити просторові координати джерела випромінювання. Це можуть бути два азимута та один кут місця, або два кута та один азимут у рознесених на відому відстань пунктів прийому.

Різницево-дальновимірний метод (РДМ) або метод гіперболічного позиціонування (англійська аббревіатура TDOA – time difference of arrival) забезпечує вимірювання кутових координат і дальності до джерела випромінювання.

Для реалізації різницево-дальновимірного методу визначення просторових координат використовується не менш як чотири мікрофона, які дозволяють отримати три незалежних різниці дадьностей до джерела випромінювання. Геометричне місце точок для двовимірного випадку, яке відповідає визначеній різниці часу приходу до двох мікрофонів, - це гіпербола, а місце розташування джерела випромінювання на площині – це точка перетину двох гіпербол. Як відомо, постійну різницю дальностей для двох рознесених точок характеризує (у двовимірному випадку) гіпербола, а трьохвимірному – гіперболоїд.

Місце розташування джерела випромінювання у просторі визначається точкою перетину трьох гіперболоїдів. У комбінованому методі для отримання просторових координат використовують різницю дальностей та кутомірні координати. Перевагу із вказаних методів надають різницево-дальновимірного методу через можливість застосування завадостійких кореляційних алгоритмів вимірювання часових затримок сигналу.

Розглянемо декілька прикладів реалізації пасивних систем для визначення місця розташування об'єктів у повітряному просторі за акустичним випромінюванням двигунів, що працюють. В університеті Чжэцзян (Ханчжоу, Китай) розроблена акустична система для відстеження місця розташування БПЛА.

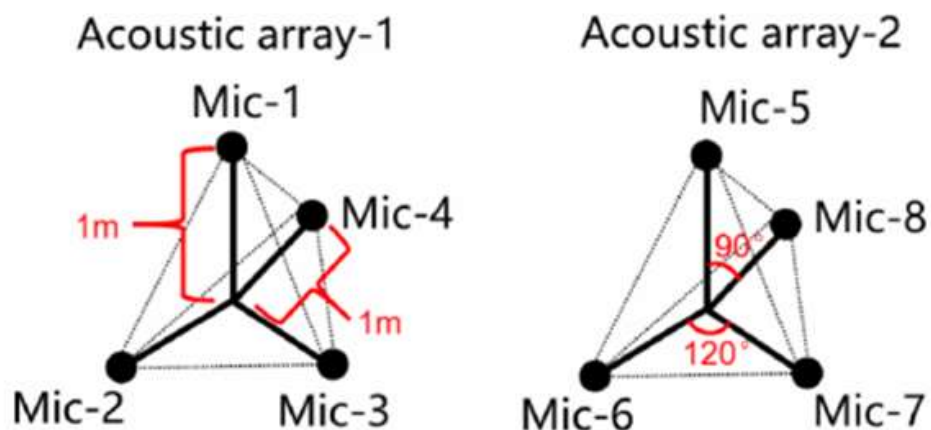


Рисунок 2.14 – Модель акустичної решітки

До складу системи входять дві мікрофонні решітки у формі тетраедра та пристрій обробки інформації і підготовки даних для реалізації алгоритмів локалізації та відстеження місця розташування БПЛА. Система встановлена на даху будівлі. Модель мікрофонної решітки показана на рис.2.14, вона реалізована з двох однакових мікрофонних решіток у формі тетраедра, які складаються з чотирьох мікрофонів. Відстань між кожною мікрофоною решіткою і центром нижньої грані тетраедра складає 1 м. Відстань між двома мікрофонними решітками складає 14 м.

Усі мікрофони мають вітрозахист та захист від впливу гідрометеорів. Для послаблення ефекту багатопроменевості мікрофони розміщуються над заукопоглинаючим матеріалом. Метод отримання координат БПЛА – різницеводальновимірний. При обробці траєкторних даних використовується фільтр Калмана.

Для перевірки ефективності алгоритму оцінки місця розташування БПЛА використовуються дані GPS трекінга. На рис. 2.15 представлено співставлення оцінки місця розташування БПЛА за даними GPS та акустичних вимірювань.

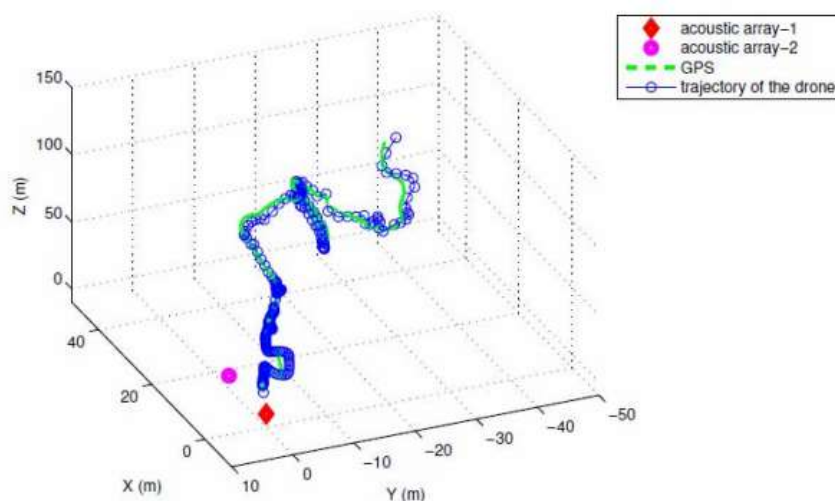


Рисунок 2.15 – Співставлення оцінки місця розташування БПЛА за даними GPS та акустичних вимірювань

У Технологічному інституті Стівенса розроблена система акустичного та сейсмічного виявлення літаків (ASAD). Система ASAD складається з двох або більше вузлів (польових станцій), які розгорнуті у районі спостережень.

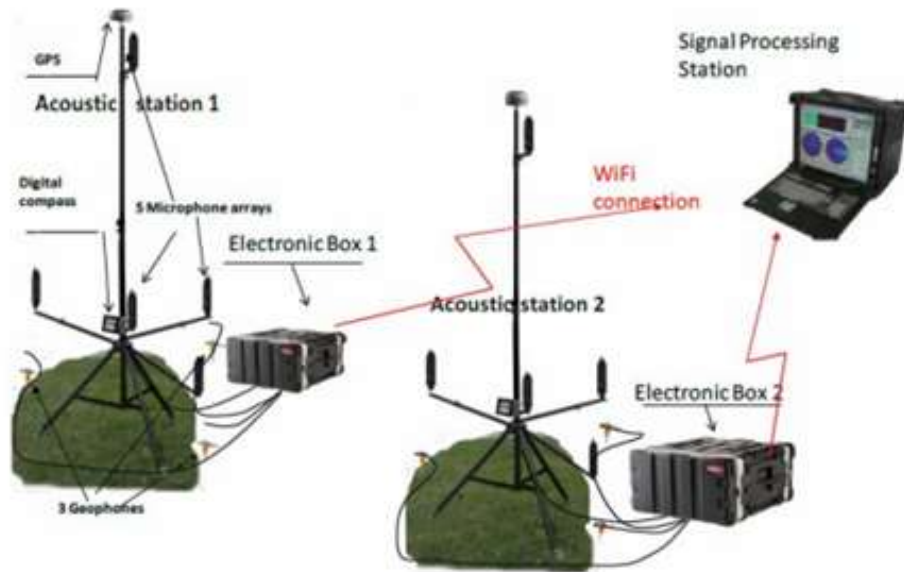


Рисунок 2.16 – Схема підключення двох вузлів (польових станцій) і центрального комп'ютера

Кожен вузол отримує дані шляхом оцифровки сигналів з восьми аналогових вхідних каналів – 5 мікрофонних давачів та 3 каналів геофонів. Три мікрофонних давачі розміщені горизонтально у формі рівностороннього трикутника зі стороною 8 футів. Четвертий мікрофонний давач розміщений у центрі трикутника, а п'ятий — піднятий на щоглі на 12 футів, утворюючи вертикальну пару.

Кожен мікрофонний давач, який входить у склад мікрофонної решітки польової станції, рис. 2.17, має довжину 1,5 фута і складається з 64 електретних мікрофонних капсулів.

Такий масив забезпечує більш високу чутливість, ніж використання одиночного мікрофону. Використання масиву мікрофонів покращує відношення сигнал/шум у порівнянні з одиночним мікрофоном з коефіцієнтом M (де M – кількість електретних мікрофонних капсулів). Аналого-цифрове перетворення виконується з 24-бітним розрізненням з частотою дискретизації 52,1 кГц. Оцифрований сигнал передається на вбудований одноплатний комп'ютер та зберігається на жорсткому диску.



Рисунок 2.17 – Зовнішній вигляд польової станції

Одноплатний комп'ютер оснащений твердотілим накопичувачем, на якому встановлена операційна система та програмне забезпечення для первинної обробки сигналів, яка включає дискретизацію, квантування, фільтрацію, часову прив'язку до даних GPS – приймача. Станція обробки сигналів забезпечує обробку акустичних даних для виявлення сигналів від цілей, які є цікавими, і визначення напрямку приходу на кожну станцію, виконання оцінки місця розташування джерела шляхом триангуляції та відстеження руху цілі у реальному часі.

Відстежування положення джерела звуку здійснюється з використанням фільтра Калмана, для уточнення положення використовуються декілька вимірювань. Метод отримання координат літальних апаратів – різницево-дальновимірний. Напрямок приходу акустичної хвилі на мікрофонну решітку визначається за записаною часовою затримкою від декількох мікрофонних давачів. Метод найменших квадратів використовується для оцінки положення джерела звуку шляхом об'єднання даних з двох або більшої кількості станцій.

Натурний експеримент з визначення місця розташування джерела звуку проводився у гористій місцевості, акустична система складалася з двох польових станцій (FS1 і FS2), рознесених на 850 м. Використовувалися три типи літальних апаратів, оснащених GPS-приймачами: гвинтокрил, надлегкий літак та літак Cessna, які літали у безпосередній близькості від вимірювальної системи. Приклад відстежування треків трас польотів літальних апаратів показаний на рис.2.18

Синя лінія – справжнє розташування літака, яке визначене за допомогою приймача GPS на борту літака, червона лінія – це оцінка місця його знаходження акустичною системою. Достовірна точність місця розташування знаходиться у межах зони, окресленій чорним контуром розташування, яка отримана за допомогою акустичної системи. За даними авторів статті, розмір зони, у межах якої забезпечується достовірна точність місця розташування вказаних вище типів літальних апаратів, знаходиться у межах 3,5 км.

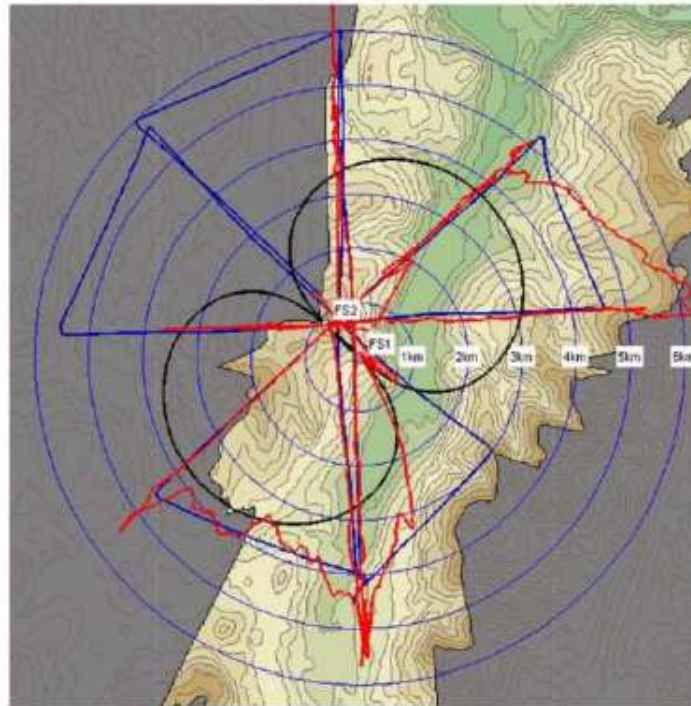


Рисунок 2.18 – Приклад відстежування місця розташування літальних апаратів содаром

2.7 Опис структури пасивного содару

Для визначення місця розташування АВ БПЛА у експериментах, проведених згідно Технічного завдання, використовувався пасивний содар, реалізований з використанням чотирьох каналів прийому акустичних сигналів. Прийом АВ БПЛА здійснювався з використанням вимірювальних конденсаторних мікрофонів Superlux ECM-999.

Виходи мікрофонів підключалися за допомогою симетричного аудіоінтерфейсу XLR до входів чотирьохканальної зовнішньої звукової карти Behringer U-Phoria UM2. Звуковий сигнал оцифровувався з частотою дискретизації $F_s = 48$ кГц та розрядністю 24 біта. Застосований метод координат БПЛА у експерименті – пасивний різницево – дальновимірюваний

(гіперболічний). Пасивний різницево – дальновимірюваний метод передбачає використання рознесених мікрофонів, які створюють вимірювальні бази в азимутальній та кутомісній площинах.

На рис. 2.19 представлена МР M_1 - M_4 пасивного содара, сфотографована в умовах проведення польових вимірювань. МР містить дві азимутальні бази у горизонтальній площині M_1 - M_2 – пеленгатор 1, M_2 - M_3 – пеленгатор 2, ($d_1=2$ м, $d_2=2$ м) і одну кутомісну базу у вертикальній площині M_2 - M_4 – пеленгатор 3, ($d_3=1$ м). Висота встановлення мікрофонів азимутальних баз дорівнює 1,3 м. Нумерація мікрофонів зліва направо M_1 , M_2 , M_3 , верхнього мікрофону – M_4 .

На виході кожного з пеленгаторів формується оцінка кутового положення джерела звуку відносно бази відповідного пеленгатора. У спектрі акустичного випромінювання електричної гвинтомоторної групи сучасних БПЛА присутні вузькосмугові тональні і широкосмугові шумоподібні складові з переважаючим випромінюванням повітряного гвинта. Оскільки використовується широкосмугове акустичне випромінювання БПЛА, формування оцінки місця розташування здійснюється на основі вимірювання часу затримки. Для визначення часу затримки сигналів між двома мікрофонами знаходиться положення максимуму взаємкореляційної функції.



Рисунок 2.19 – Мікрофонна решітка M_1 - M_4 пасивного содара

Різниця у часі прибуття перераховується у різницю відстаней до точки розміщення джерела звуку. Поверхня положення представляє собою поверхню двополосного гіперболоїда обертаня, у фокусах якого розміщені мікрофони. Якщо відстань від фокусів до цілі великі у порівнянні з розмірами бази, то гіперболоїд обертаня в околиці цілі практично співпадає зі своєю асимптотою – конусом, вершина якого співпадає з серединою бази [10, 12].

Різниця у часі прибуття перераховується у різницю відстаней до точки розміщення джерела звуку. Поверхня положення представляє собою поверхню двополосного гіперболоїда обертаня, у фокуси якого розміщені мікрофони. Якщо відстань від фокусів до цілі великі у порівнянні з розмірами бази, то гіперболоїд обертаня в околиці цілі практично співпадає зі своєю асимптотою – конусом, вершина якого співпадає з серединою бази. Розміщення джерела звуку визначається як точка перетину множини гіперболоїдів з мікрофонами, розміщеними у їхніх фокусах [7-9, 14].

Похибка визначення координат РДМ залежить від точності вимірювання різниці моментів приходу сигналу у кожний мікрофон масиву. Підвищити точність вимірювання різниці моментів приходу сигналу можна збільшенням відношення сигнал/шум сигналу, що приймається.

Обробку прийнятої реалізації сигналу отримання вихідної статистики Z можна розділити на етапи декореляції фону і виділення корисного сигналу. Етап декореляції фону виконується пристроєм, квадрат амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) якого $|K_I(f)|^2$ обернено пропорційний енергетичному спектру (ЕС) перешкоди:

$$|K_I(f)|^2 = \frac{1}{G_V(f)}. \quad (2.27)$$

За відсутності джерел сторонніх акустичних шумів (АШ), до яких у разі виявлення БЛА віднесемо розмовну мову, звуки птахів, роботу рухових установок та ін., як зовнішні АШ розглядається тільки шум вітру, що виникає в результаті наголосу повітряних потоків поривів вітру про тверді краї АМ, що створюють завихрення. Акустичний шум вітру є корельованим і включає швидкі та повільні флуктуації швидкості вітру (ШФШВ та ПФШВ). Умовою поділу на повільні та швидкі флуктуації є $\tau_{кШФШВ} < \tau_{кПФШВ}$ (рис 2.20, а). Вид

автокореляційної функції та енергетичного спектру (ЕС) ШФШВ та ПФШВ представлені на рис. 2.20 б.

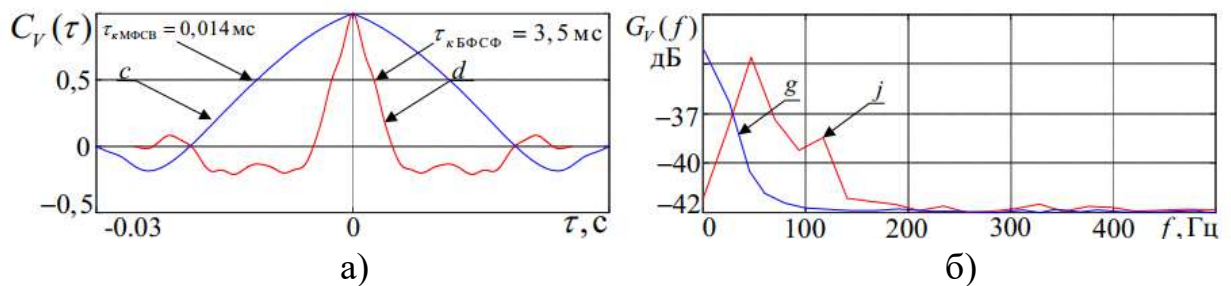


Рисунок 2.20 — Автокореляційна функція (а) та енергетичний спектр (б) акустичного шуму вітру: с - АКФ ПФШВ; d - АКФ ШФШВ; g - ЕС ПФШВ; j – ЕС ШФШВ

Для енергетичного спектра АШ, представленого на рис. 2.20, б, декореляція фону може бути виконана фільтром високих частот із зоною режекції області 0...120 Гц. Примітно, що приблизно таку АЧХ мають сучасні АМ, призначені для роботи на відкритій місцевості. Частотної вибіркості мікрофонів домагаються вибором параметрів елементів перетворення звукового тиску в напругу, а також застосуванням спеціальних вітрозахисних пристроїв (що виконують роль своєрідного фільтра), які гальмують вітер перед АМ, перешкоджаючи наголосу повітря на його міцні стінки, і ніяк не впливають на частоту та амплітуду корисного сигналу. Як приклад на рис. 2.21 представлена АЧХ мікрофону Rode NTG-5 [10].

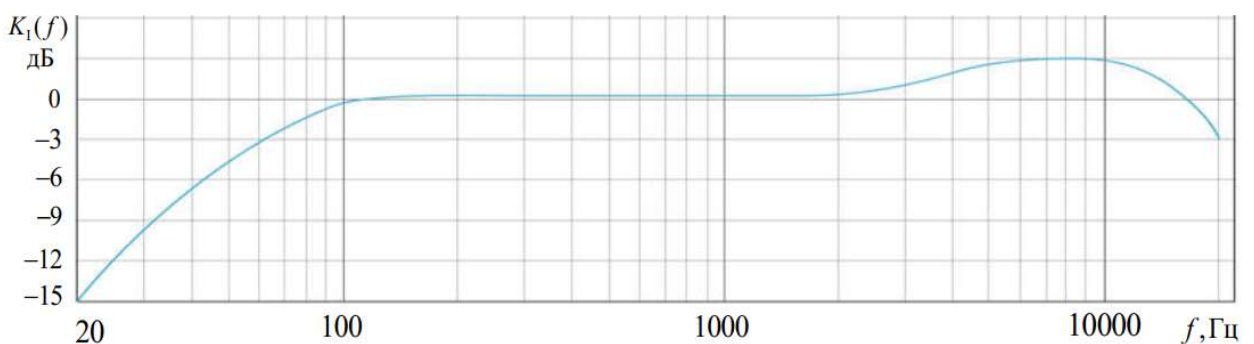


Рисунок 2.21 — АЧХ мікрофону Rode NTG-5

Етап виділення корисного сигналу на декорельованому фоні реалізується фільтром, імпульсна характеристика якого узгоджена з корисним корисним сигналом. Алгоритм обробки вихідного сигналу пристрою декореляції фону з

імпульсними характеристиками (ІХ) пристрою виділення корисного сигналу (ПВКС) на виході ПВКС описується виразом

$$Z_m = \left| \sum_{n=1}^N \xi_n h_{m-n} \right|^2, \quad (2.28)$$

де h_{m-n} – дискретні відліки ІХ фільтра ПВКС.

Фільтрова обробка в ПВКС не що інше як когерентне накопичення імпульсів АШ, створюваного БЛА на інтервалі T_{kn} . Інтервал (час) когерентного накопичення T_{kn} визначається шириною зубця спектра флуктуацій Δf_c . Проведені експериментальні дослідження показали, що ширина зубця ЕС АШ різних типів БЛА становить 10...40 Гц. Ширина зубця ЕС залежить від часу кореляції флуктуацій АШ та кількості гвинтів БЛА. Ширина гармонік ЕС АШ чотиригвинтового БЛА приблизно вдвічі перевищує ширину гармонік ЕС АШ одногвинтового БЛА, що обумовлено впливом флуктуацій параметрів акустичного шуму пари гвинтів. Оскільки значення періоду повторення імпульсів T_{PV} АШ БЛА апіорно невідоме, від оптимального алгоритму виділення корисного сигналу можна перейти до квазіоптимального багатоканального алгоритму виду

$$Z_{Im}^i = \left| \sum_{n=0}^{N-1} \xi_n h_{m-n}^{T_{PV}^i} \right|^2, \quad (2.29)$$

де i – номер каналу обробки;

$h_{m-n}^{T_{PV}^i}$ – дискретні відліки ІХ фільтра ПВКС, налаштованого на очікуваний апіорно невідомий період повторення T_{PV}^i , в i -му каналі обробки.

У частотній області це еквівалентно використанню набору фільтрів ПВКС, АЧХ яких неузгоджено між собою на частоту ΔF_{II} та перекривають можливий діапазон частот гармонік ЕС АШ БЛА. Кількість каналів ПВКС визначається неузгодженістю ΔF_{II} та діапазоном значень частот гармонік ЕС АШ БЛА, який залежить від кількості обертів гвинта (гвинтів) та швидкості польоту БЛА. Для сучасних БЛА вказаний діапазон частот становить 150...500 Гц.

Потенційна ефективність ПВКС v_{kn} може бути розрахована за виразом

$$v_{kn} = \frac{(N_{об} N_L)(V_{зв} \pm 2V_{БЛА})}{\Delta F_{II} V_{зв}}, \quad (2.30)$$

де $V_{зв}$ – швидкість поширення звукової хвилі;

$V_{БЛА}$ – швидкість польоту БЛА;

$N_{об}$ – кількість обертів гвинта БЛА;

ΔF_{II} – ширина зубця АЧХ фільтра.

Як видно з виразу (2.30) ефективність ПВКС залежить від швидкості польоту, швидкості звуку, кількості обертів та числа лопатей гвинта (гвинтів) БЛА, ширини зубця ЕС флуктуацій та за час польоту може змінюватися. Структурна схема пристрою виявлення БЛА по АШ, представлена на рис. 2.22.

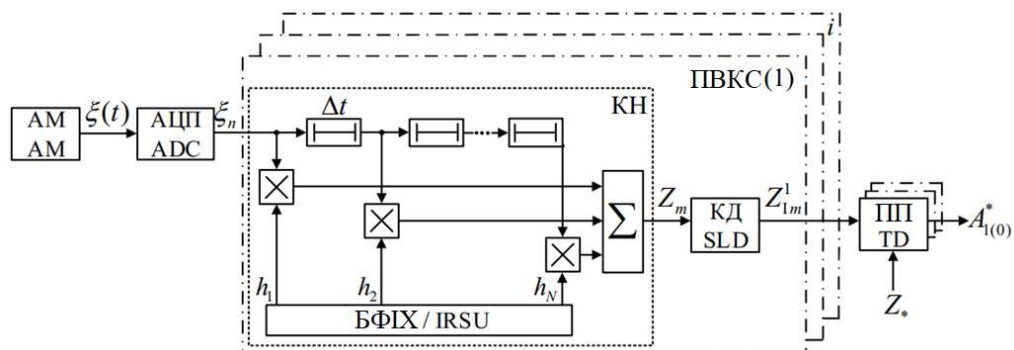


Рисунок 2.22 — Структурна схема розробленого пристрою: АМ – акустичний мікрофон; АЦП – аналогоцифровий перетворювач; КД – квадратичний детектор; ПП - пороговий пристрій; БФІХ – блок формування імпульсної характеристики

Акустичний мікрофон здійснює перетворення АШ у напругу та її декореляцію. Після етапу декореляції та перетворення на цифрові відліки за допомогою АЦП прийнята реалізація сигналу надходить на багатоканальне ПВКС. У кожному каналі ПВКС виробляється згортка відліків прийнятої реалізації з відліками ІХ фільтра, налаштованого на конкретне значення періоду повторення АШ БЛА. Результат згортки після квадратичного детектування порівнюється із порогом виявлення. У разі перевищення порога хоча б у одному ПП формується рішення про виявлення БЛА.

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ СПЕКТРАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ШУМІВ БПЛА

У якості тестової моделі БПЛА при проведенні акустичних вимірювань використовувався квадрокоптер DJI Phantom 3. Рішення про використання цього квадрокоптеру ґрунтується на його доступності. Акустичні вимірювання виконувалися у студії звукозапису, стіни якої мають звукопоглинаюче покриття. Квадрокоптер закріплювався на жорсткому штативі на висоті 1,5 м, мікрофон розташовувався на відстані 2 м. Звукозапис акустичного випромінювання здійснювався з використанням конденсаторного мікрофона Superlux ECM-999, який має кругову діаграму скерованості.

Вихід мікрофона підключався за допомогою симетричного аудіоінтерфейсу XLR до входу зовнішньої звукової карти Behringer U-Phoria UM2. Звуковий сигнал оцифровувався з частотою дискретизації $F_s = 48$ кГц та розрядністю 24 біта. Для експериментальної оцінки внеску повітряного гвинта у створення звукового поля була проведена реєстрація спектральних складових акустичного випромінювання квадрокоптера під час роботи електродвигунів і чотирьох гвинтів, електродвигунів зі знятими повітряними гвинтами, а також власного шумового фону студії звукозапису.

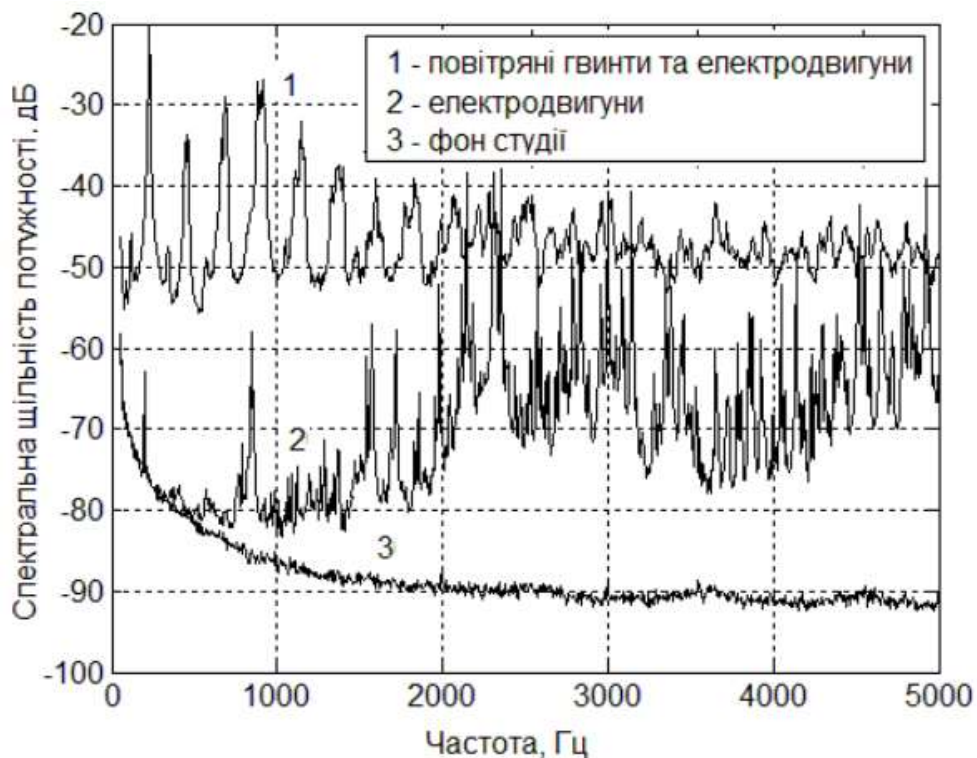


Рисунок 3.1 – Спектри акустичного випромінювання

Спектр акустичного випромінювання при роботі гвинтів і електродвигунів (рис. 3.1, поз.1) має набір дискретних складових, а максимуми перших чотирьох гармонік знаходяться у діапазоні 230-920 Гц. Перша гармоніка лопатевої частоти відповідає $f=230$ Гц, що для гвинта з двома лопатями відповідає частоті обертання ротора 115 об/с (6900 об/хв). Акустичний спектр електродвигунів зі знятими повітряними гвинтами (рис. 3.1, поз.2) зосереджений у діапазонах 2-3, 4-6 кГц, при цьому він виділяється на 20-25 дБ у порівнянні з прилеглими ділянками зовнішнього шуму, які можна порівняти з рівнем шуму гвинтомоторної групи у цих смугах.

Рівні деяких спектральних складових (2100, 2300, 4900 Гц) перевищують рівні акустичного випромінювання гвинтомоторної групи. Відзначемо, що при проведенні акустичних вимірювань рівень власного шумового фону студії звукозапису (рис. 3.1, поз.3) розташовувався нижче рівня шуму БПЛА у всьому діапазоні частот, який аналізується [11,13].

Спектр АВ БПЛА визначається, у першу чергу, конструктивними особливостями гвинтомоторних груп та несучих конструкцій, а також режимами роботи двигунів. Окрім того, як показують результати експериментальних досліджень, форма спектру зазнає суттєві зміни у залежності від умовоточуючого середовища, у яких ведеться їх реєстрація. Нижче розглянуті приклади реєстрації акустичного випромінювання в умовах студії звукозапису та відкритого простору. На рис.3.2 і рис.3.3 відповідно наведені спектри АВ одиночної групи макета БПЛА та БПЛА, який завис на висоті 1 м.

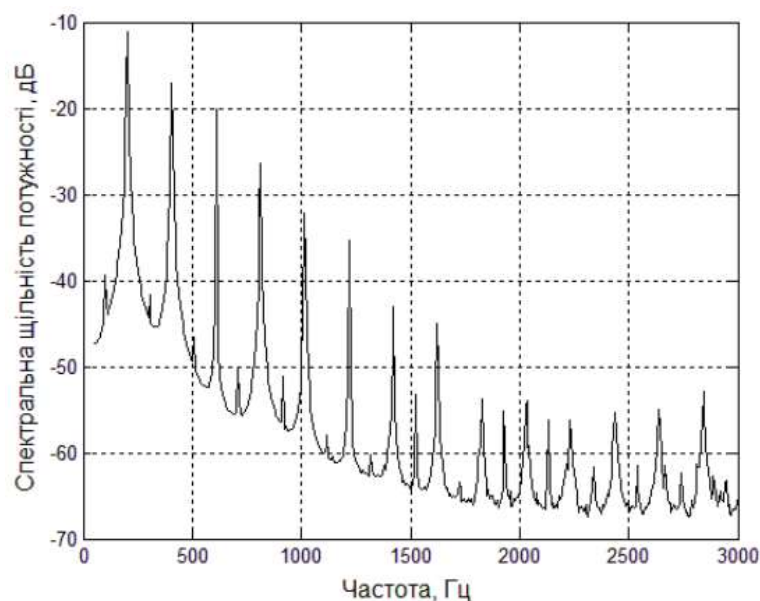


Рисунок 3.2 – Спектр АВ одиночної групи макета БПЛА

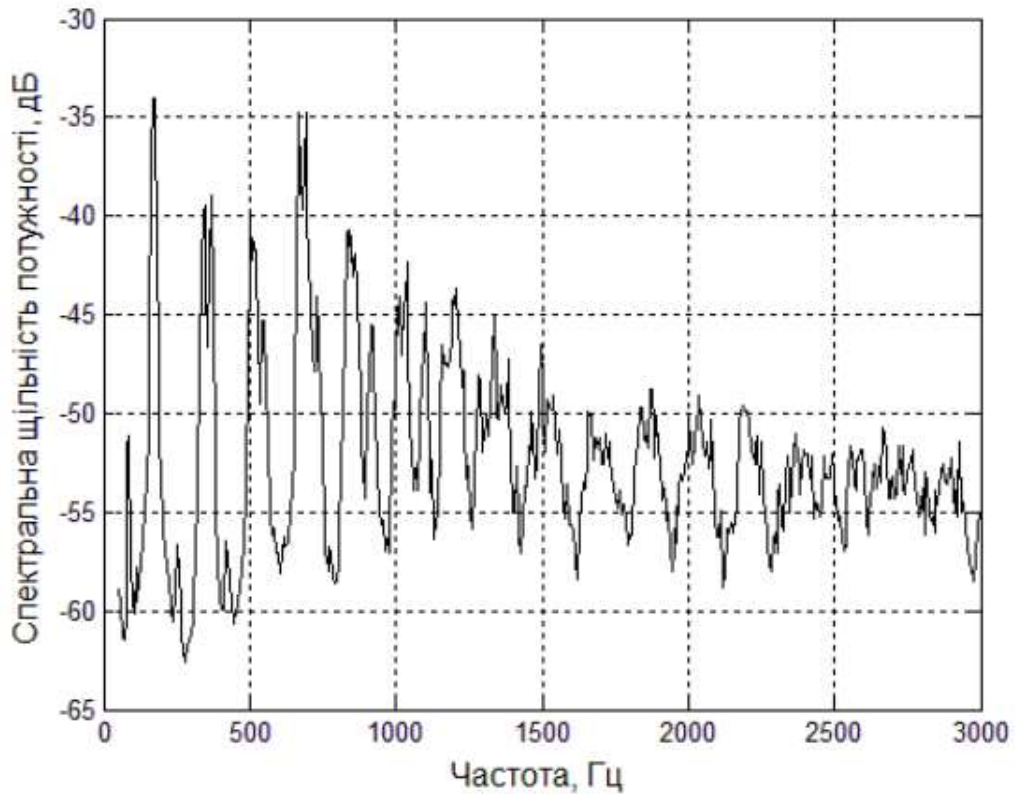


Рисунок 3.3 – Спектр АВ БПЛА, який завис на висоті 1 м

На рис.3.4 подано спектри акустичних сигналів БПЛА на різних відстанях – 5, 35 и 80 м.

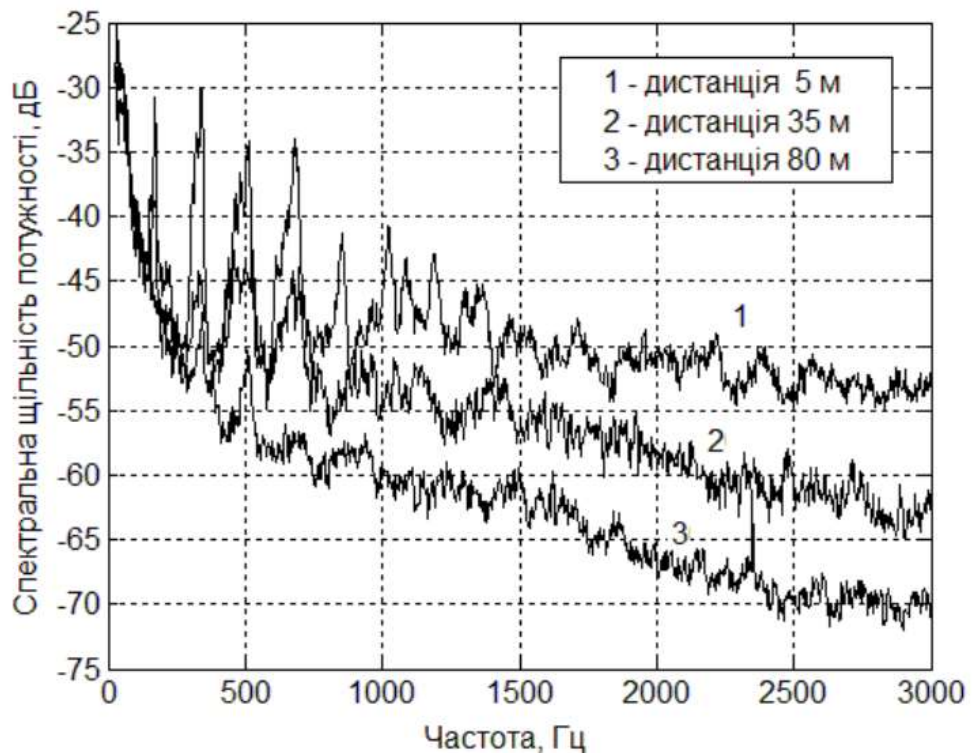


Рисунок 3.4 — Частотні залежності на різних дистанціях

Спектр шуму гвинтомоторної групи має гармонічні складові частоти обертів ротора і гармоніки лопастної частоти, які лінійно з'язані та представлені у всій смузі частот (у даному випадку до 3 кГц). Швидкість загасання спектральних складових – близько 30 дБ/кГц, окремі спектральні складові чітко виражені, що не розмиті.

Спектр шуму гвинтомоторної групи квадрокоптера DJI Phantom 3 (рис.3.3) вже помітно відрізняється. Швидкість ослаблення спектральних складових знизилась і складає близько 10 дБ/кГц, окремі спектральні складові розмиті і проглядаються до 2,2 кГц. Це пояснюється різницею режимів роботи (частоти обертів) чотирьох двигунів у процесі компенсації автоматикою БПЛА впливу дестабілізуючих факторів, які з'являються у процесі польоту, що веде до розширенню спектральних ліній. Розширення спектральних ліній проявляється дужче з ростом номера гармоніки. Спектральна щільність потужності атмосферних шумів подана на рис. 3.5.

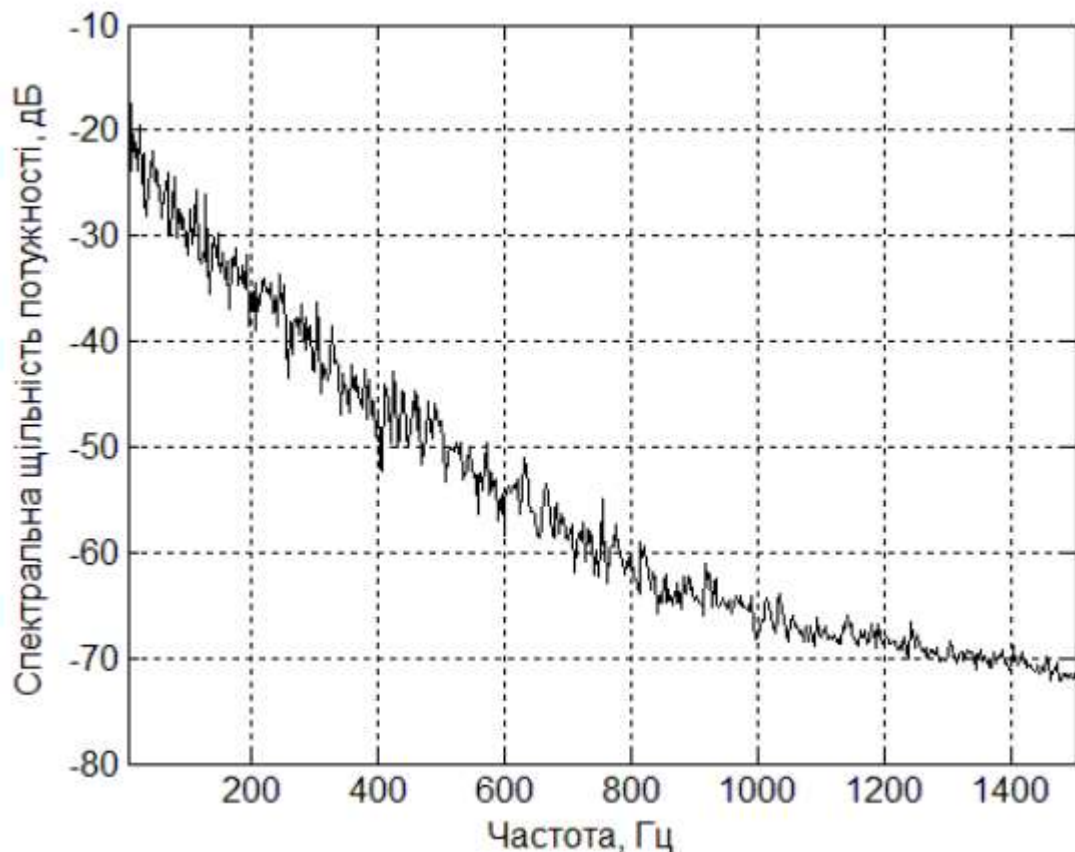


Рисунок 3.5 – Спектральна щільність потужності атмосферних шумів

Вплив ослаблення звуку у атмосфері на просторову мінливість спектрів

При проходженні акустичною хвилею відстані s вихідний звуковий тиск p_i внаслідок поглинання звуку атмосферою падає за експонентою. Зниження рівня звукового тиску p_i на відстані s , за рахунок поглинання звукових

коливань атмосферою $\delta L_t(f)$, при гармонічному акустичному сигналі з частотою f , розраховують за формулою

$$\delta L_t(f) = 10 \lg \left(\frac{p_i^2}{p_t^2} \right) = \alpha s, \quad (3.1)$$

де α – коефіцієнт ослаблення внаслідок поглинання звуку атмосферою.

Змінними величинами під час розрахунку ослаблення є частота звуку, температура та відносна вологість повітря. На рис 3.6 подана залежність погонного ослаблення при розповсюдженні акустичної хвилі у атмосфері. Для оцінки форми спектрів БПЛА при відльоті його на деяку відстань необхідно знати вихідний спектр випромінювання, дисперсні властивості атмосфери, а також враховувати вплив поверхні, яка підстилає [11].

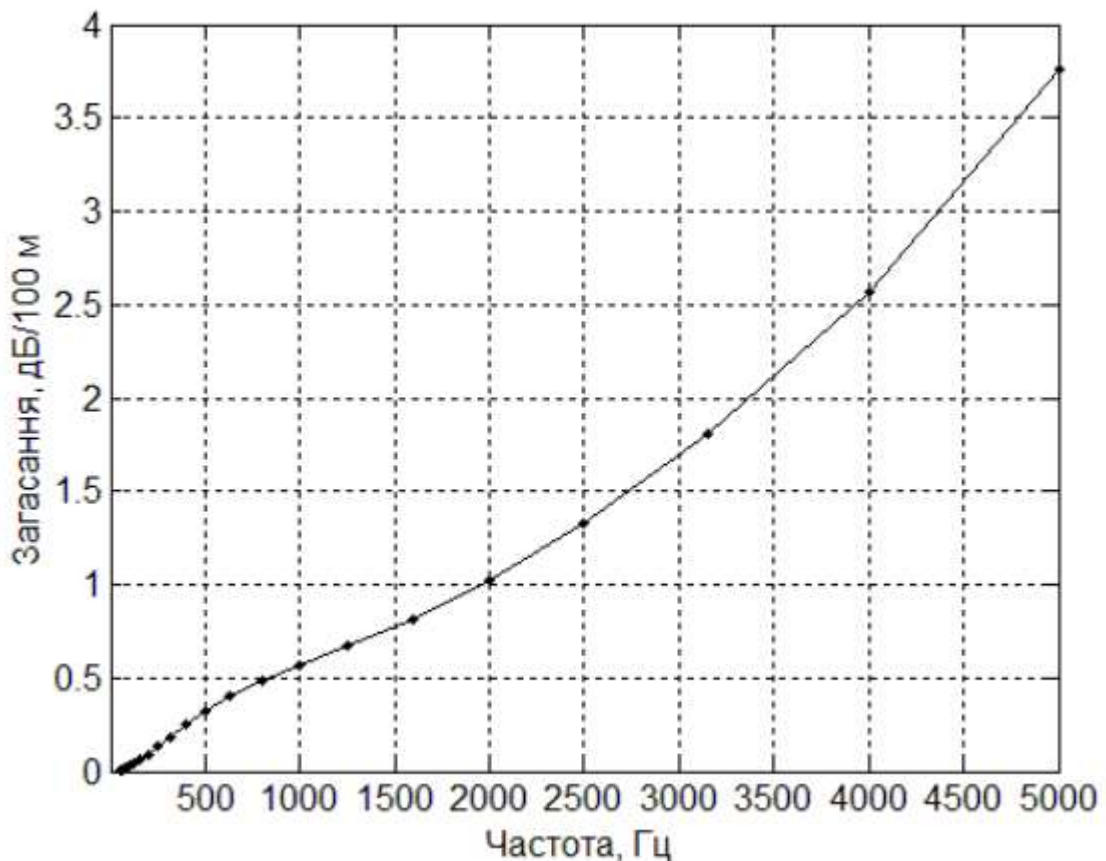


Рисунок 3.6 – Залежність погонного ослаблення при розповсюдженні акустичного сигналу у атмосфері (температура 250 С, відносна вологість $\varphi=50\%$)

При збільшенні відстані, яку пройшла акустична хвиля, відбувається деградація спектру АВ з помітним подавленням високочастотних складових (рівень подавлення досягає 3,7 дБ на частоті 5 кГц при віддаленні 100 м, температурі 250 С, відносної вологості $\varphi=50\%$). Ослаблення акустичного сигналу у атмосфері $L(r)$ розраховують за формулою

$$L(r) = L_{розс}(r) + L_{ногл}(r) + L_{екр}, \quad (3.2)$$

де r – відстань від джерела шуму до приймача, м;

$L_{розс}(r)$ – ослаблення внаслідок розходження енергії при випромінювання у вільний простір;

$L_{ногл}(r)$ – ослаблення, яке обумовлене звукопоглинанням у атмосфері;

$L_{екр}$ – ослаблення через екранування перепонами.

Ослаблення у вільному просторі внаслідок розходження звукової енергії, що відбувається у результаті сферичного розповсюдження звуку точечного джерела шуму у вільному просторі, розраховують за формулою:

$$L_{розс}(r) = 20 \lg \left(\frac{r}{r_1} \right), \quad (3.3)$$

де r – відстань від джерела шуму до приймача, м;

r_1 – опорна відстань, м.

Звуковий тиск у вільному просторі N зменшується на 6 дБ при кожному подвоєнні відстані r , а саме

$$N = N_1 - 20 \lg \left(\frac{r_1}{r} \right), \quad (3.4)$$

де N – рівень звуку на відстані r ;

N_1 – рівень звуку на відстані r_1 .

На рис. 3.7 представлені результати експериментальних вимірювань рівня шуму АВ квадрокоптера DJI Phantom 3 у залежності від відстані. Вимірювання

здійснювались з використанням шумовимірювача типу МВШ 003. Для отримання представленої залежності вимірювання рівня шуму проводилися у режимі зависання квадрокоптера DJI Phantom 3 на висоті 2 м – послідовно на відстанях від 5 до 80 м з просторовим кроком 5 м.

На рис. 3.7 показані експериментальні точки та апроксимуюча лінія, яка побудована за формулою:

$$N = 55 - 20 \lg \left(\frac{r_1}{30} \right).$$

У якості опорних точок тут використані результати вимірювань, які виконані на відстані 30 м

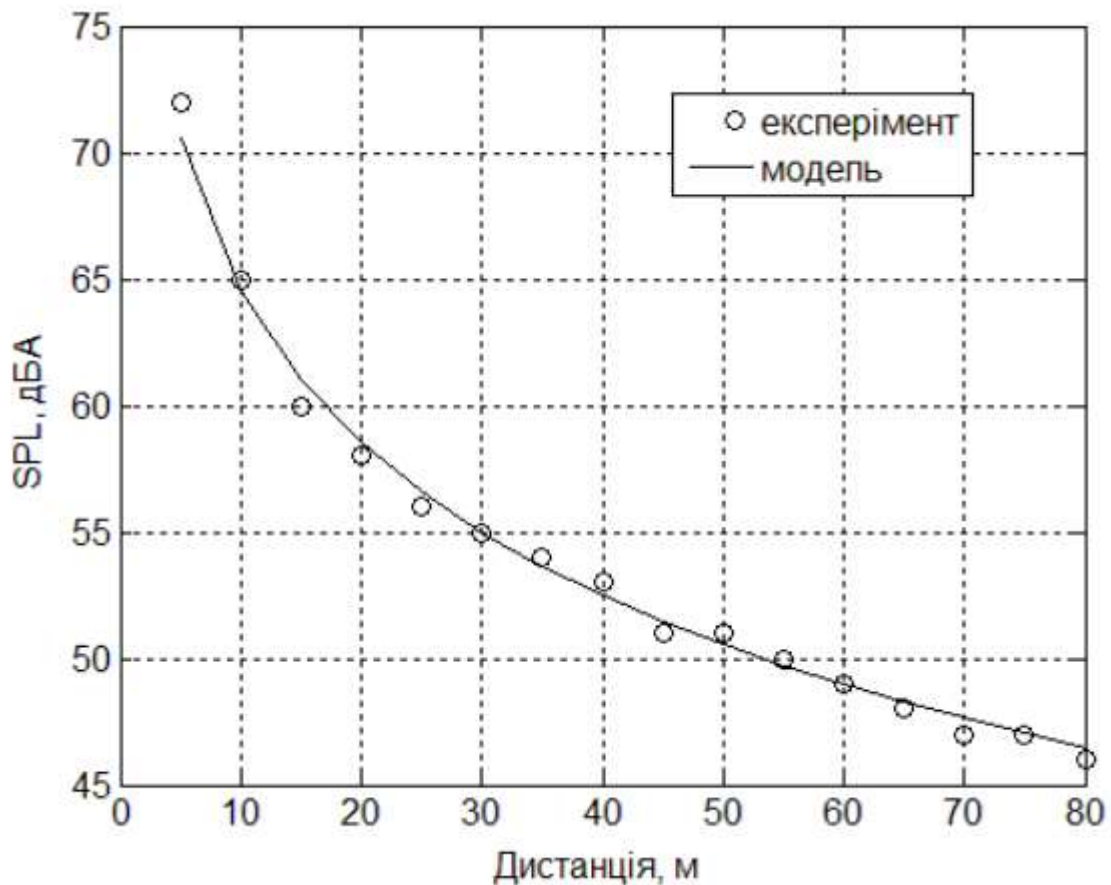


Рисунок 3.7 — Рівень шуму АВ квадрокоптера DJI Phantom 3 у залежності від відстані

Експериментальні результати задовільно узгоджуються з модельною залежністю сферичного розповсюдження звуку точечного джерела шуму у

вільному просторі, інші фактори (екранування та звукопоглинання атмосферою) на даній трасі і при використанні даного методу вимірювань практично не виявляються.

Ефективна полоса частот спектра БПЛА

При виявленні і розпізнаванні сигналів АВ БПЛА важливу роль віграють енергетичні характеристики і параметри частотного спектра. У випадку складної структури спектра сигнала, характерного для БПЛА, зручно користуватися моделю апроксимації спектра з параметром, який характеризує його ефективну ширину смуги. У якості міри ефективної ширини смуги частот використовується параметр $\alpha = P(\Delta F)$, який визначає смугу ΔF , у якій зосереджується задана доля (зазвичай, половина) повної середньої потужності P . Параметр α спектра БПЛА визначається співвідношенням:

$$\alpha = P(\Delta F) = \frac{\int_0^{\Delta F} S(F) dF}{\int_0^{\infty} S(F) dF}, \quad (3.5)$$

де $S(F)$ – спектральна щільність акустичного випромінювання.

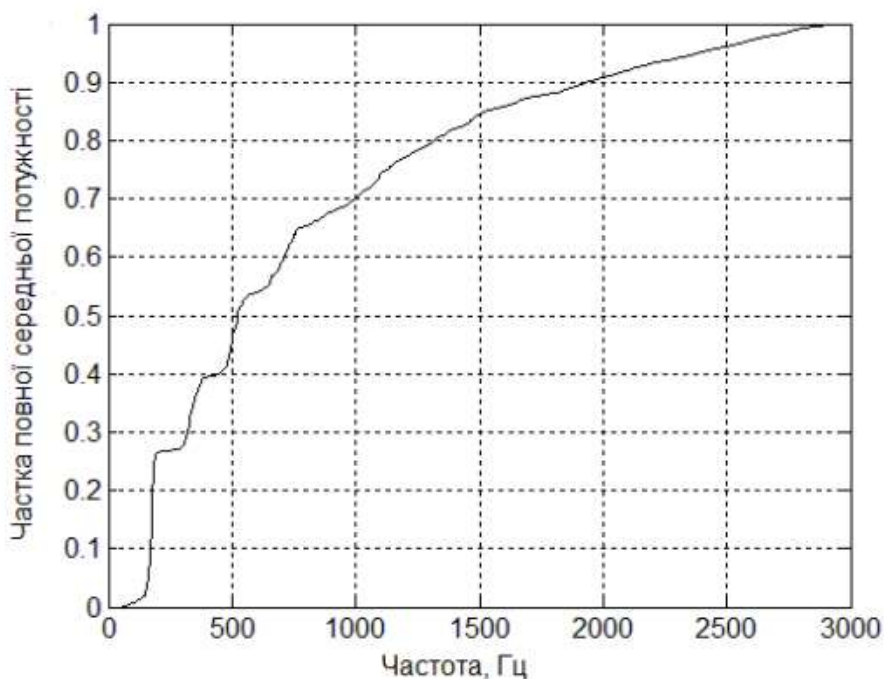


Рисунок 3.8 – Залежність частки повної середньої потужності АВ від частоти

На рис. 3.8 представлений графік залежності частки повної середньої потужності акустичного випромінювання квадрокоптера DJI Phantom 3, як функції смуги при розташуванні мікрофона на віддаленні 10 м. Як видно з представленого графіку, ефективна смуга спектра складає 690 Гц.

Виконано також аналіз зміни ефективної смуги спектра акустичного випромінювання БПЛА у різних режимах та умовах польоту. Так, на рис. 3.9 представлена зміна ефективної смуги спектра акустичного випромінювання квадрокоптера DJI Phantom 3 у польоті вздовж траси протяжністю 80 м; на рис.3.10 – при вертикальному підйомі на висоту 100 м; а на рис. 3.11 – під час пілотажу БПЛА на віддаленні від мікрофону у діапазоні дальностей 10...50 м.

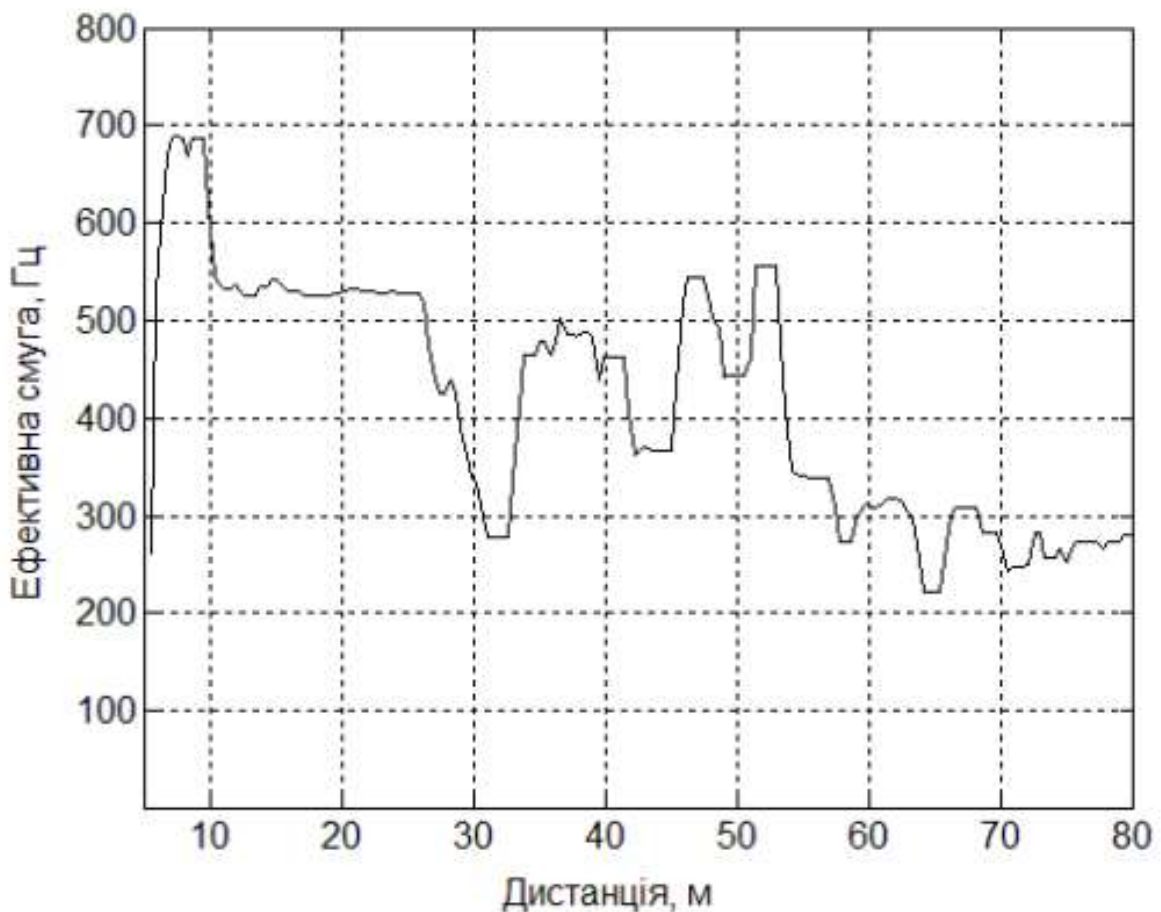


Рисунок 3.9 – Зміна ефективної смуги спектра АВ БПЛА DJI Phantom 3 у польоті вздовж траси протяжністю 80 м

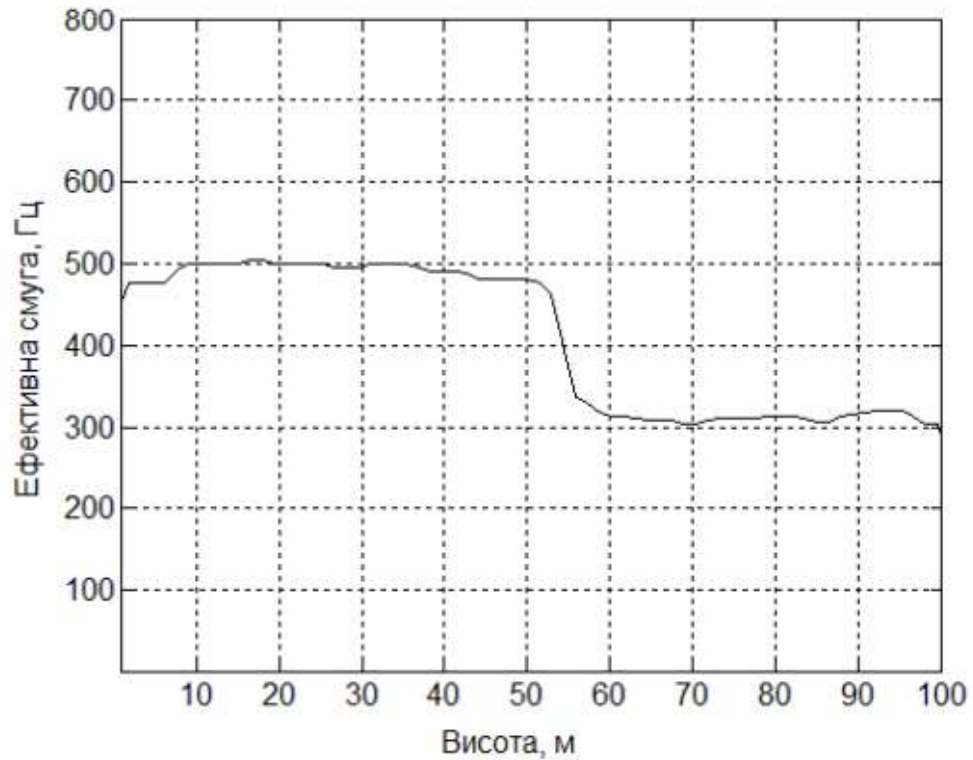


Рисунок 3.10 — Зміна ефективної смуги спектра АВ БПЛА DJI Phantom 3 при вертикальному підйомі на висоту 100 м

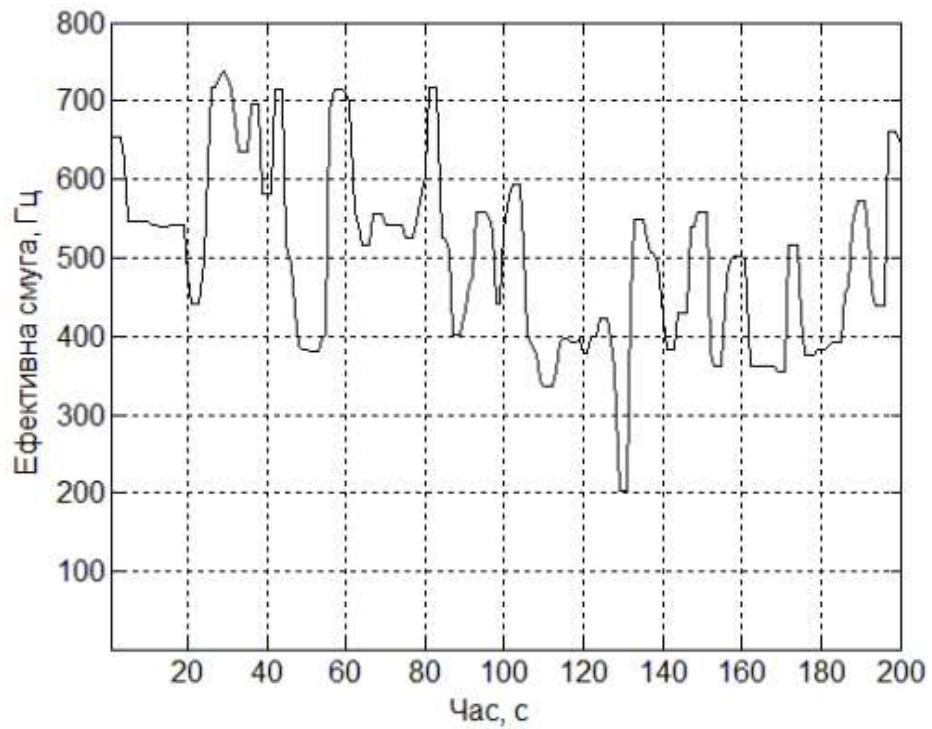


Рисунок 3.11 – Зміна ефективної смуги спектра АВ БПЛА DJI Phantom 3 під час пілотажу

Слід зазначити, що ефективна смуга звужується з підвищенням дальності до джерела звуку. Під час польоту БПЛА вздовж траси у більшому ступені позначаються перевідбиття від місцевих предметів, що веде до більш високої мінливості оцінок ефективної смуги.

Ефективність розробленого алгоритму виявлення можна охарактеризувати залежністю ймовірності правильного виявлення від відношення сигнал/шум на виході КД (характеристика виявлення), а також дальністю виявлення БЛА, що реалізується. Характеристика виявлення визначається законом розподілу випадкової величини на виході ПВКС. Для розробленого ПВКС з урахуванням нормального розподілу вхідної реалізації, вихідна статистика має експоненційний закон розподілу. Для експоненційного закону розподілу характеристика виявлення визначається за виразом

$$D = F^{\frac{1}{1+\mu\nu_{kn}}}$$

$$F = e^{\frac{-Z}{\bar{Z}_0}}$$

де \bar{Z}_0 – середнє значення потужності шуму на виході пристрою обробки;
 μ – відношення сигнал/шум на виході пристрою декореляції фону.

На рис. 3.12 представлені характеристики виявлення, отримані теоретично та методом математичного моделювання для наступних даних: $\nu_{kn} = 11$; $N_{об} = 105,55 об / с$; $N_L = 2$; $V_{БПЛА} = 20 м / с$; $V_{зв} = 330 м / с$; $\Delta f_c = 21 Гц$, при цьому вважається, що БЛА наближається прямолінійною траєкторією до АМ

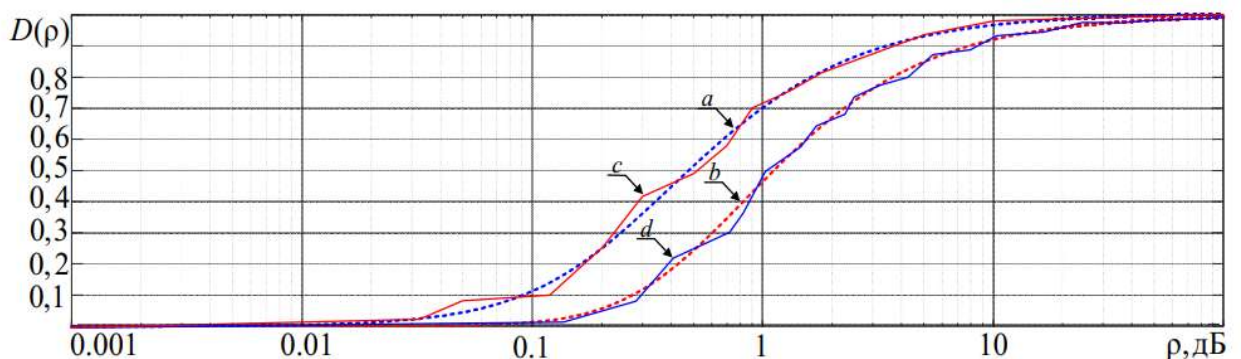


Рисунок 3.12 — Характеристики виявлення розробленого пристрою: a, b – теоретична крива для $F_a = 10^{-2}$ та $F_b = 10^{-4}$ відповідно; c, d – результат математичного моделювання для $F_a = 10^{-2}$ та $F_b = 10^{-4}$ відповідно

Як видно із рис. 3.12 для значень ймовірності хибної тривоги 10^{-2} і 10^{-4} вірогідність правильного виявлення 0,9 досягається при значеннях відношення сигнал/шум 4 і 8 дБ відповідно.

Оцінка дальності виявлення є оберненим завданням до завдання визначення відношення сигнал/шум, необхідного для забезпечення заданої ймовірності правильного виявлення при фіксованій ймовірності помилкової тривоги. Вираз для дальності виявлення БЛА АШ залежно від відношення сигнал/шум на виході ПВКС має вигляд:

$$R = \sqrt{\frac{P_s G v_{kn} k_m}{L_m}} \sqrt{10^{20} P_0 \alpha \mu(D, F)}, \quad (3.6)$$

де P_s – звуковий тиск акустичного шуму, що створюється гвинтами обертання БЛА, на відстані 1 м від акустичного мікрофону, Па;

G – коефіцієнт спрямованої дії мікрофону;

k_m – чутливість мікрофону, мВ/Па;

L_m – еквівалентний рівень власних шумів мікрофону, дБ;

P_0 – пороговий рівень чутності, Па;

α – коефіцієнт загасання звукової хвилі в атмосфері, дБ/км.

На рис. 3.13 представлені залежності дальності виявлення від інтенсивності звукового тиску P_s , створюваного БЛА, для різних значень ймовірності правильного виявлення при ймовірності помилкової тривоги 10^{-4} . Як видно із рис. 3.13, при рівні звукового тиску АШ БЛА 70-75 дБ, характерного для малорозмірних БЛА комерційного використання (типу DJI Phantom 4 Pro, Mavic тощо), дальність виявлення становить близько 250-350 м [11].

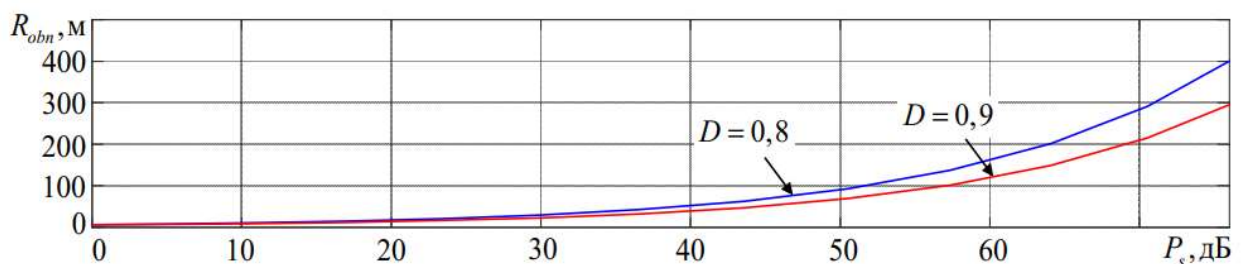


Рисунок 3.13 — Залежність дальності виявлення БЛА від інтенсивності звукового тиску

4 РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ВИЯВЛЕННЯ ТА ОЦІНКИ КООРДИНАТ БПЛА ЗА АКУСТИЧНИМИ ШУМАМИ

Для реалізації ситеми виявленн акустичних шумів від БПЛА, розроблено чотирьохканальний автономний мікроконтролерний пристрій з бездротовою передачею записаних даних в пристрій обробки. Блокова схема такого пристрою представлена на рис. 4.1.

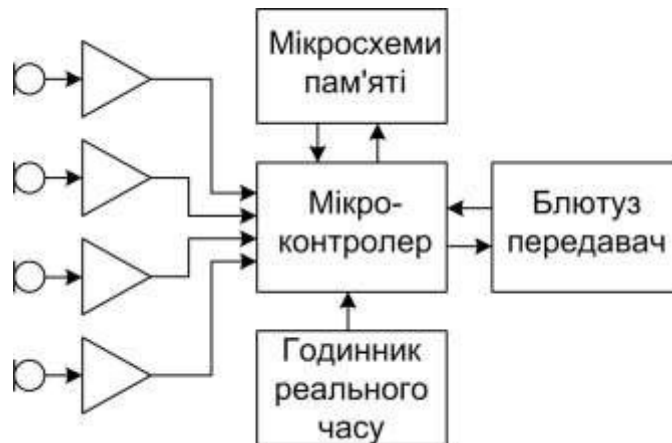


Рисунок 4.1 – Блокова схема мікроконтролерного пристрою для запису, накопичення і передачі даних акустичних шумів БПЛА.

Електретні мікрофони змонтовуються на платах мікрофонних підсилювачів. Посилені звукові сигнали акустичних шумів БПЛА, зафіксовані з різних точок простору, одночасно оцифровуються аналого-цифровими перетворювачами мікроконтролера і записуються в мікросхеми пам'яті.

Використання в схемі пристрою мікросхем пам'яті обумовлено тим, що, в разі безпосередньої передачі результатів оцифровки в керуючий пристрій, швидкість передачі буде обмежена величиною 2000 вибірок за секунду, в той час як передача результатів в мікросхеми пам'яті дозволяє збільшити цю швидкість до 50000 вибірок за секунду.

Після закінчення сеансу запису отримана інформація, що забезпечена часовим ідентифікатором, отриманим від незалежної мікросхеми годинника реального часу, передається по бездротовому каналу зв'язку в керуючий пристрій. Таким пристроєм може бути смартфон або ПК.

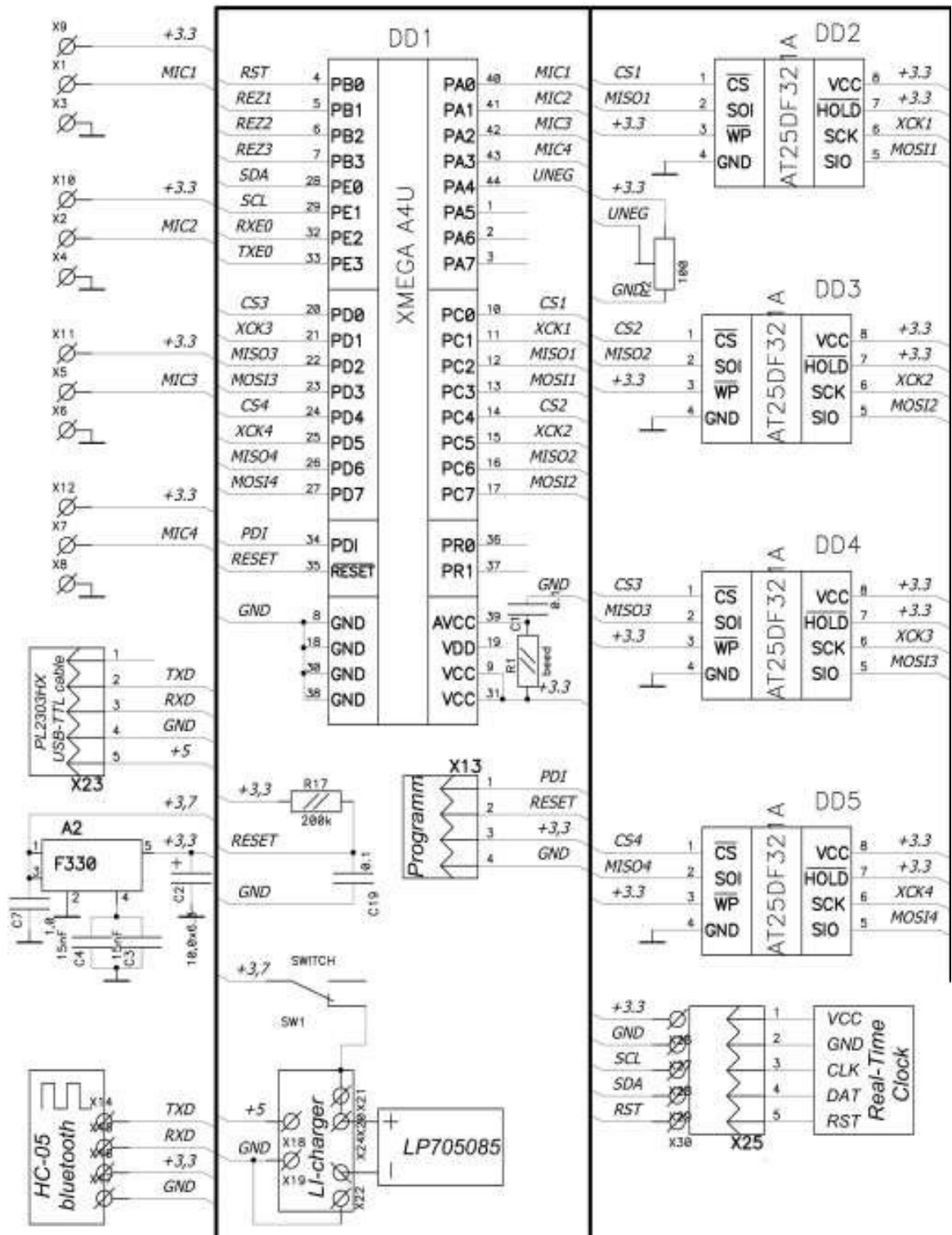


Рисунок 4.2. – Принципова схема мікроконтролерного пристрою для запису, накопичення і передачі даних

На рис. 4.2 представлена принципова схема розробленого пристрою.

У пристрої використовуються всеспрямовані конденсаторні електретні мікрофони ВСМ-9765Р (рис. 4.3), що мають такі основні характеристики:

- діапазон частот – 20 – 16000 Гц;
- електричний опір – 2,2 кОм;
- споживаний струм – не більше 0,5 мА;
- робоча напруга – від +1,5 В до +10 В;
- співвідношення сигнал/шум – не менш за 60 дБ;
- чутливість на частоті 1 кГц – -44 дБ (0 дБ=1 В/Па)



Рисунок 4.3 – Електретний мікрофон ВСМ-9765Р.

Оцифровка електричних сигналів, вироблених мікрофоном, здійснюється аналого-цифровим перетворювачем (АЦП) мікроконтролера. Для посилення слабких сигналів мікрофона до рівнів, потрібних для нормальної роботи АЦП, в пристрої застосовується мікрофонний підсилювач з використанням мікросхеми МАХ4466, яка спеціально оптимізована виробником для застосування в якості мікрофонного попереднього підсилювача і має наступні основні параметри:

- напруга живлення – від +2,4 В до +5,5 В;
- споживаний струм – не більше 24 мкА;
- смуга частот – 600 МГц;
- коефіцієнт посилення – 125 дБ;

Схема мікрофонного підсилювача з використанням мікросхеми МАХ4466 представлена на рис. 4.4.

Мікросхема підсилювача МАХ4466 реалізована в мікрокорпусі SC70, що дозволяє, використовуючи пасивні елементи, виготовлені у виконанні для поверхневого монтажу (SMD), реалізувати сам підсилювач на друкованій платі і помістити його безпосередньо на корпусі електретного мікрофона.

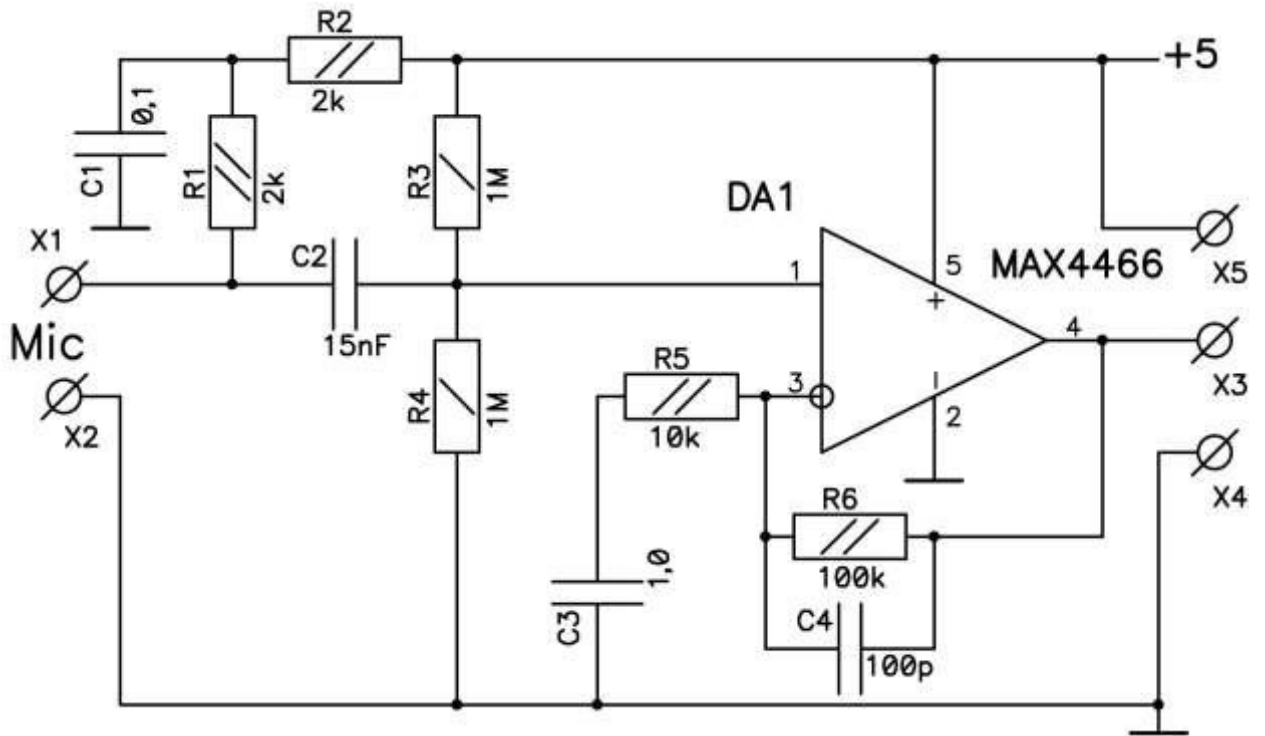
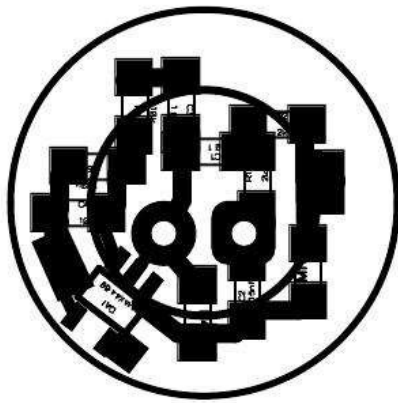
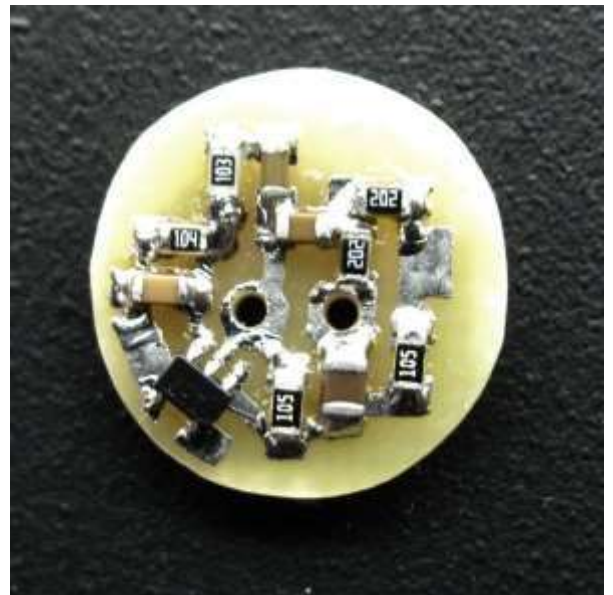


Рисунок 4.4 – Схема мікрофонного підсилювача.

Розроблена топологія плати і виготовлений мікрофонний підсилювач представлені на рис. 4.5.



а)



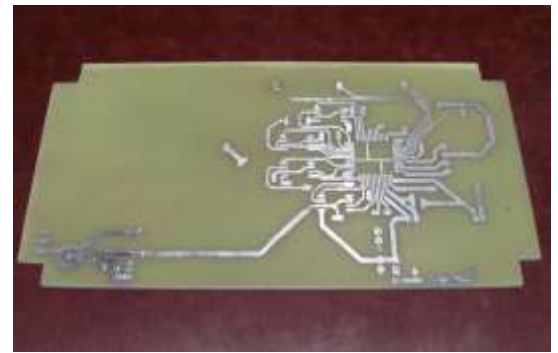
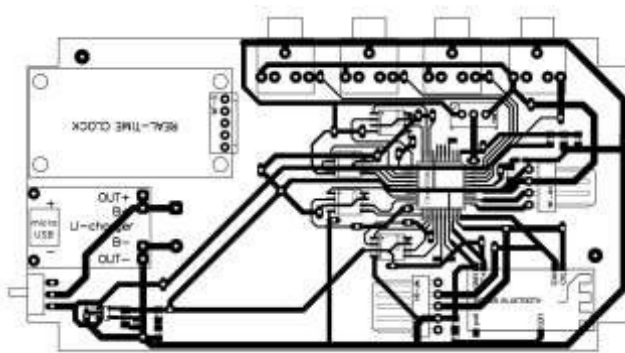
б)

Рисунок 4.5 – Топологія плати (а) і зібраний мікрофонний підсилювач (б).

З огляду на необхідність виготовлення пристрою, що має малий розмір, схему (рис. 4.2) розроблено з використанням мінімальної кількості корпусів і

з застосуванням технології поверхневого монтажу. Виняток в даному випадку становить присутність в схемі кола програмування мікроконтролера і кіл дротового зв'язку мікроконтролера з персональним комп'ютером. Обидва кола використовуються на етапі налагодження роботи і можуть бути ліквідовані без шкоди для працездатності конструкції, що призведе до додаткового зниження габаритів і маси пристрою.

Відповідно з наведеною принциповою схемою була розроблена та виготовлена друкована плата (рис. 4.6) і розроблений пристрій (рис. 4.7).



а)

б)

Рисунок 4.6 – Топологія (а) і верхній шар (б) друкованої плати

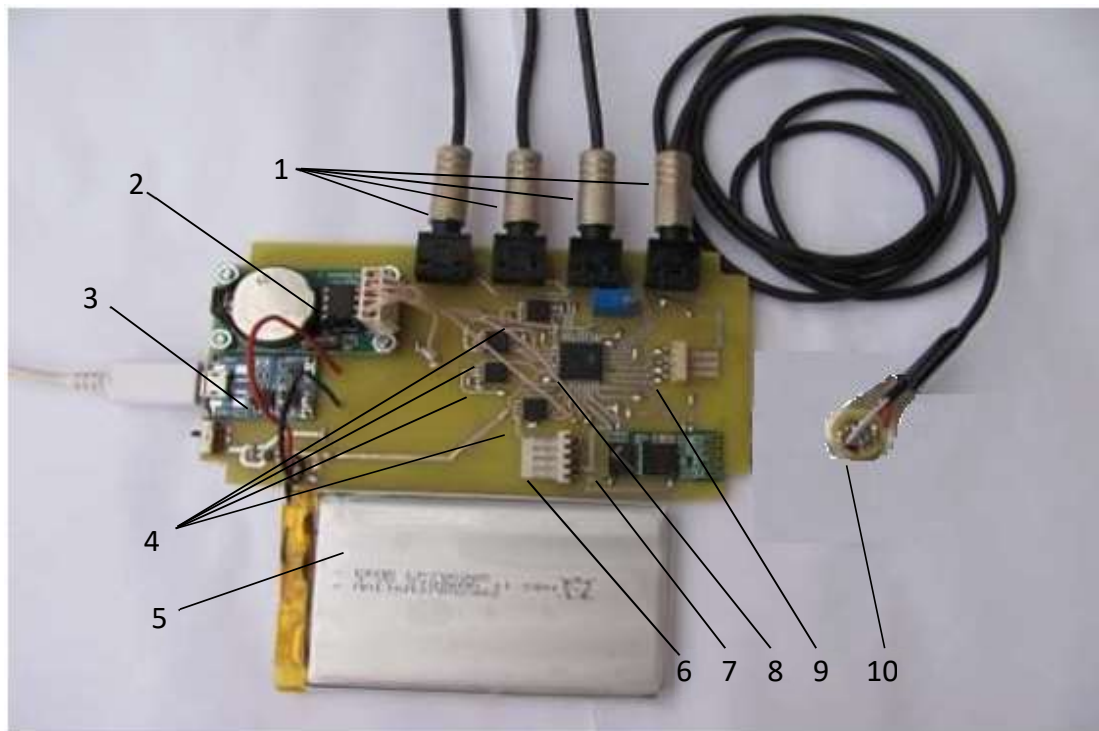


Рисунок 4.7 – Зібрана плата пристрою

На рис. 4.7 цифрами показано основні складові частини виготовленого пристрою:

1. Чотири роз'єми вхідних каналів;
2. Плата «DS1302-MOD» годинника реального часу;
3. Плата LI-CHARGER-MicroUSB з під'єднаним шнуром підзаряду;
4. Чотири мікросхеми пам'яті «AT25DF321A» для кожного з каналів;
5. Літій-іонний акумулятор «LP705085-PCM-LD»;
6. Роз'єм для дротового зв'язку з комп'ютером;
7. Плата «HC-05-BLUTOOTH» бездротового зв'язку з комп'ютером;
8. Мікроконтролер «ATXMEGA128A4»;
9. Роз'єм для програмування мікроконтролера;
10. Плата мікрофонного підсилювача з мікрофоном;

Годинник реального часу (RTC - real time clock) - електронна схема, призначена для обліку часу, дати, дня тижня та ін. Використання окремої мікросхеми дозволяє домогтися більш низького енергоспоживання, звільнити ресурси процесора для вирішення інших завдань і домогтися більш високої точності.

Модуль (рис. 4.8) виконаний на чипі DS1302. Доступні: секунди, хвилини, години AM/PM, день, місяць, рік (з урахуванням високосних років). Календар до 2100 року. Взаємодія з контролером відбувається через послідовний інтерфейс.

Електронна схема, що представляє собою систему з автономного джерела живлення і розрахункового пристрою, має наступні характеристики:

- робоча напруга від +2 В до +5,5 В;
- робочий струм при напрузі живлення +2 В менше 300 нА;
- трьох-провідний інтерфейс SCLK, I/O, RST;
- кварц 32,768 кГц;
- батарейка CR2032.



Рисунок 4.8 – Плата «DS1302-MOD» годинника реального часу.

Для забезпечення безпечного заряду акумулятора була застосована плата «LI-CHARGER-MicroUSB» (рис. 4.16), що представляє собою контролер заряду на мікросхемі TP4056 з функцією захисту. Мікросхема TP4056 застосовується в автономних лінійних зарядних пристроях літій-іонних акумуляторів з тепловим захистом в корпусі SOP 8. Завдяки малій кількості зовнішніх компонентів TP4056 ідеально підходить для портативних пристроїв.

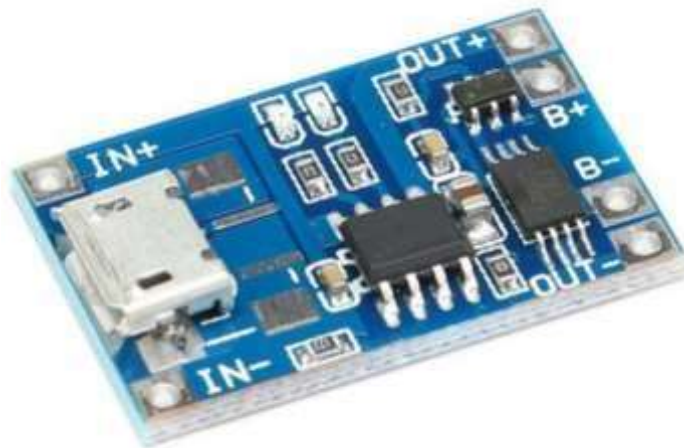


Рисунок 4.9 – Плата «LI-CHARGER-MicroUSB»

Напруга заряду фіксована на рівні 4,2 В, а струм заряду в межах 1 А може бути заданий за допомогою одного резистора. TP4056 автоматично завершує цикл зарядки, коли струм заряду знижується до 1/10 від початкового. Контролер заряду має такі характеристики:

- струм заряду: до 1 А (регульований);
- похибка: 1,5%;
- вхідна напруга: DC від +4,5 В до +5,5 В;

- напруга повного заряду: +4,2 В;
- індикатор зарядки: червоний – йде зарядка, зелений – заряджений;
- вхідний інтерфейс – Micro USB; - робоча температура: від -10 до +85 °С; - розміри: 25x18 мм.

На рис. 4.10 показана виміряна залежність напруги на акумуляторній батареї в циклі - «закінчення розряду-заряд», в процесі роботи акумулятора під керуванням контролера LI-CHARGER-MicroUSB.

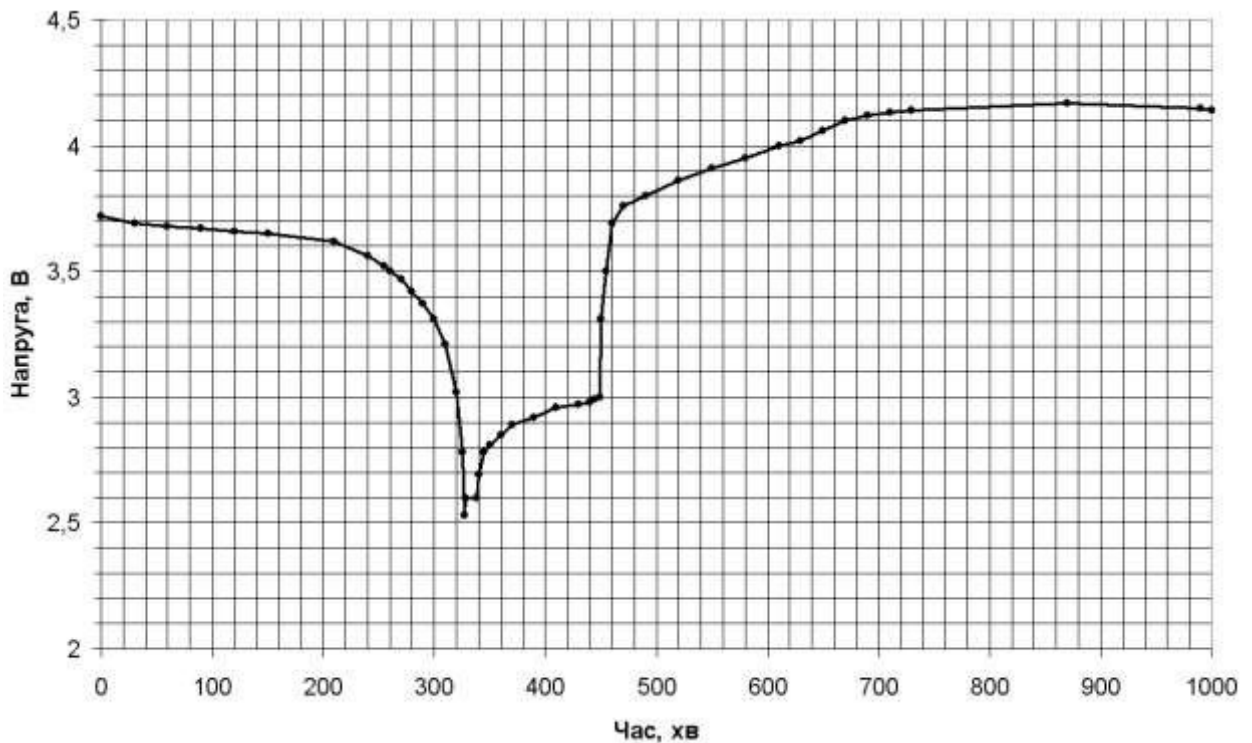


Рисунок 4.10 – Розряд-заряд акумулятора

З рис. 4.10 видно, що напруга на акумуляторі поступово знижується в міру розряду на навантаження до величини 3,6 В після чого починається стрімкий розряд, який міг би закінчитися зануленням напруги з подальшим виходом акумулятора з ладу, якби система контролю не відключила навантаження при зниженні напруги до величини менше 2,5 В. У подальшому, при підключенні зарядного пристрою з напругою +5 В, контролер заряду не дозволяє робити заряд великим струмом, щоб уникнути пошкодження акумулятора аж до досягнення напруги +3 В.

Після цього заряд здійснюється максимальним струмом, величина якого задана шляхом установки в плату контролера резистора відповідного номіналу. Після досягнення повної зарядки (напруга на акумуляторі +4,2 В) коло заряду відключається і акумулятор залишається зарядженим до величини 4,15 В.

Мікросхеми постійної пам'яті з електричним стиранням даних, виконані за технологією FLASH, зайняли міцні позиції в електронній та обчислювальній техніці. Їх головна перевага – можливість перепрограмування "в системі", тобто, не випаюючи мікросхему з друкованої плати або не виймаючи її з панелі.

Застосовані в нашому пристрої мікросхеми пам'яті AT25DF321A мають наступні характеристики:

- інтерфейс Serial, SPI, RapidS;
- об'єм пам'яті 32 Мбіт;
- організація пам'яті – 16384 сторінки по 256 байти;
- швидкість запису 100 МГц;
- напруга живлення від +2,7 В до +3,6 В;
- робочі температури від -40 до +85 °С.

Споживаний пристроєм струм не перевищує величину 20 мА. Це значення підвищується до 35 мА на період, протягом якого відбувається передача даних модулем Bluetooth. Виходячи з цього, для забезпечення роботи пристрою буде досить використовувати літій-іонний акумулятор ємністю щонайменше 2000 мАг. Акумулятори такого типу широко поширені в сучасній побутовій електронній техніці завдяки відсутності «ефекту пам'яті», здатності працювати при негативних температурах навколишнього середовища, досить малим габаритам і зручності підзарядки.

Для пристрою був обраний акумулятор LP705085-PCM-LD, який має такі характеристики:

- номінальна ємність – 3500 мАг;
- номінальна напруга – 3,7 В;
- робоча температура – -20...+60°С;
- габарити – 86x50,5x7,3 мм; вага – 70,88 г.

Ступінь зарядженості акумулятора контролюється контролером заряду «LI-CHARGER-MicroUSB», про який було сказано вище. За допомогою цього контролера відбувається і заряд акумулятора від будь-якого джерела напруги +5 В. Це може бути блок заряду смартфона від побутової електромережі або USB-порт будь-якого додатного пристрою.

Зовнішній вигляд акумулятора наведено на рис. 4.7.

При виборі типу бездротового каналу передачі оцифрованих результатів акустичних шумів БПЛА на керуючий пристрій вважається, що сфера застосування пристрою не вимагає великої дальності передачі, що, в свою чергу, дозволяє не витратити зайву енергію для передачі інформації і,

відповідно, підвищити час роботи пристрою між сеансами підзарядки акумулятора.

Було прийнято рішення для передачі даних застосувати бездротову лінію зв'язку з використанням специфікації «Bluetooth». В радіоканалі «Bluetooth» застосовується вільний від ліцензування діапазон 2,4-2,4835 ГГц, який використовується в різних побутових приладах і бездротових мережах. Для зв'язку застосовується метод розширення спектра зі стрибкоподібною перебудовою частоти, який, забезпечує стійкість до широкосмугових завад, простий в реалізації, а обладнання, яке його використовує, має невисоку вартість.

У Bluetooth-з'єднання несуча частота сигналу стрибкоподібно змінюється 1600 разів в секунду, причому послідовність перемикання між частотами для кожного з'єднання є псевдовипадковою і відома тільки передавачу і приймачу, які синхронно перебудовуються з однієї несучої частоти на іншу. Таким чином, якщо поруч працюють кілька пар приймач-передавач, то вони не заважають один одному, а цифрові дані, в разі втрати пакета інформації, будуть передані повторно.

У розробленому каналі зв'язку комп'ютера з мікроконтролером використовується модуль зв'язку «HC-05-BLUTOOTH» (рис. 4.11). Такий Bluetooth-модуль призначений для передачі інформації зі швидкістю 721 кбіт / с в пристроях з невеликим радіусом дії.

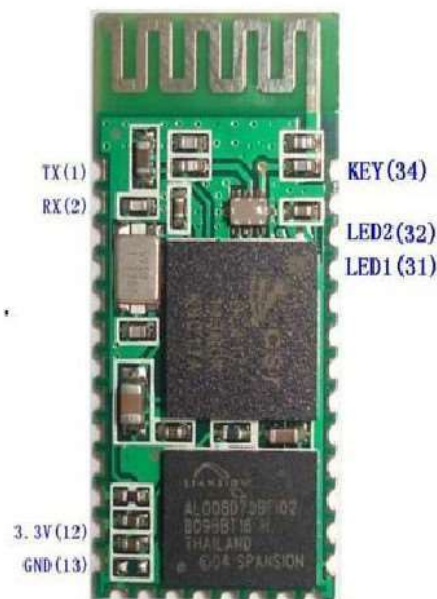


Рисунок 4.11 – Модуль зв'язку «HC-05-BLUTOOTH»

Модуль дозволяє підключати мікроконтролер до комп'ютерів, ноутбуків, і будь-яких інших пристроїв, які мають Bluetooth, що працює в режимі master. Для використання Bluetooth модуля потрібно записати в мікроконтролер спеціальну програму, на комп'ютері потрібно створити COM-порт по Bluetooth з'єднанню (якщо такий порт в комп'ютері відсутній). Управління Bluetooth модулем здійснюється з пристрою master Bluetooth. Дані передаються по стандарту UART, який вшитий в більшості вбудованих систем (такий порт є майже у всіх мікроконтролерах, або легко організовується програмно). Також можливо управління за допомогою АТкоманд.

Шини інтерфейсу мають таке призначення:

- 3.3V – живлення +3,3 В;
- GND – земля;
- TX – передача даних;
- RX – приймання даних;
- KEY – примусове включення / вимикання модуля; - LED1, LED2 – індикаторні світлодіоди.

В нашому випадку шини KEY, LED1, LED2 не використовуються.

Технічні параметри модуля наступні:

- Bluetooth протокол: v2.0+EDR;
- Частота: 2,4 GHz (ISM діапазон);
- Модуляція: GFSK(Gaussian Frequency Shift Keying);
- Потужність випромінювання: $\leq 4\text{dBm}$;
- Чутливість: $\leq -84\text{dBm}$;
- Робоча температура: $-20 \sim +75 \text{ }^\circ\text{C}$;
- Розміри: 26,9 x 13 x 2,2 мм.

Для оцифрування переданих мікрофонним підсилювачем сигналів а також передачі оцифрованих значень в персональний комп'ютер (ПК) або смартфон, застосовується мікроконтролер «АТХМЕГА128А4» (рис. 4.12). Даний мікроконтролер є однією з моделей мікроконтролерів серії AVR фірми «Analog devices». Він здатний працювати з тактовою частотою до 32 МГц і має в своєму складі автомат по роботі з периферійними пристроями з використанням різноманітних інтерфейсів (SPI, I2C, стандарту UART).

Мікроконтролери AVR XMEGA виготовлені на основі технології рiсoPower другого покоління, інноваційної системи обробки подій "Event System" що забезпечує незалежну від ЦПП швидку передачу даних між внутрішніми периферійними пристроями 4-канального контролера. Також

вони мають швидкодіючі порти 12-бітних аналого-цифрових та цифро-аналогових (ЦАП) перетворювачів, флеш-пам'ять розміром 16...384 кбайт.



Рисунок 4.12 – Мікроконтролер «ATXMEGA128A4»

Загальні характеристики мікроконтролера:

- корпус – TQFP-44;
- ядро – AVR;
- максимальна частота ядра – 32 МГц;
- об'єм пам'яті програм – 128 кбайт;
- тип пам'яті програм – FLASH;
- об'єм пам'яті EEPROM – 2 кбайт;
- об'єм оперативної пам'яті – 8 кбайт;
- кількість входів/виходів – 34;
- інтерфейси – I2C, IrDA, SPI, UART/USART, USB;
- кількість портів АЦП – 12;
- кількість портів ЦАП – 2;
- напруга живлення – від 1,6 В до 3,6 В;
- робоча температура – від -40 °С до +85 °С.

Обмін даними здійснюється між персональним комп'ютером і мікроконтролером, що здійснюють зняття показань АЦП (Контролер).

З боку Контролера обмін здійснюється через автомат типу UART з можливим перетворенням в стандарт RS232, USB, Bluetooth. З боку ПК всі ці варіанти приймаються як віртуальний COM-порт. Передбачувана швидкість

обміну даними 9600 біт/с. (При необхідності можна збільшити швидкість обміну даними до 115 кбіт / с). Протокол зв'язку: дані передаються пакетами, де перша четвірка байта - тип даних, друга четвірка - власне дані.

Використовувані типи даних:

5xh - Команда від ПК до Контролеру: Заголовок пакета.

4xh - Дані від контролера на ПК: Заголовок пакета.

3xh - Дані, потетрадно передані в пакеті. Першою йде старша тетрада, останньою - молодша.

2xh - Контрольна сума (для пакетів більше одного байта): Кінець пакета
Контрольна сума визначається за принципом: значення молодшої тетради суми всіх байтів пакета (з заголовком включно) має дорівнювати нулю.

Зарезервовані команди і типи даних:

50h - Зупинити передачу даних.

51h - Почати передачу даних.

5Ah 3xh 2sh - Дільник для потоку даних: $x = 1..15$ - визначає швидкість передачі даних (0 - одноразово по команді 51h), s - контрольна сума.

40h - Передача даних зупинена.

41h - Передача даних розпочато.

4ah 3x3h 3x2h 3x1h 3x0h 2sh - Показання:

$X = 4096 * x_3 + 256 * x_2 + 16 * x_1 + x_0$, s - контрольна сума.

4Fh - Аварія.

Дані на ПК розподіляються по дев'яти потокам. Перший потік включає в себе загальну інформацію. При включеному ехосигналі записується вся передані і прийняті байти. При вимкненому ехосигналі — тільки позначки про початок і кінець передачі даних і аварійних ситуаціях.

Потоки 2 ... 9 включають в себе прийняті за повним протоколом і які пройшли контроль на суму дані АЦП з відповідним номером. Всі потоки заповнюються незалежно один від одного, тому відсутність або несправність одного АЦП ніяк не впливає на накопичення даних з інших АЦП. При необхідності, показання АЦП можуть бути доповнені поточним часом прийому даних, узятим з ПК. Накопичені дані можуть бути збережені на жорсткому диску в текстових файлах з розширенням .txt_n, де n = 2 ... 9 - номер потоку (перший йде з розширенням .txt).

Розрядність АЦП мікроконтролера АТХМЕГА128А4 становить 12 біт. З такою роздільною здатністю ведеться цифрування сигналів мікрофонів. Але, запис з такою високою щільністю потребує дуже багато часу. Тому в мікросхемі пам'яті здійснюється запис тільки 8 старших розрядів. Подальший

аналіз результатів дасть змогу знайти оптимальне співвідношення розрядності та часу запису.

Вікно робочої програми на екрані ПК має такий вигляд (рис. 4.13).

На рисунку екрану цифрами позначені наступні елементи:

- 1 - Вибір СОМ-порту. Якщо порт відсутній або зайнятий, колір вікна червоний. Якщо колір зелений, то можна працювати.
- 2 - Вікно набору тестового рядку для посилки на контролер.
- 3 - Кнопка посилки тестового рядку.
- 4 - Вікно прийому службової інформації. Якщо включений перемикач (5) то тут виводяться всі HEX-коди прийнятих байтів. Це вікно можна використовувати як текстовий редактор.
- 5 - Перемикач режиму відображення прийнятих даних.

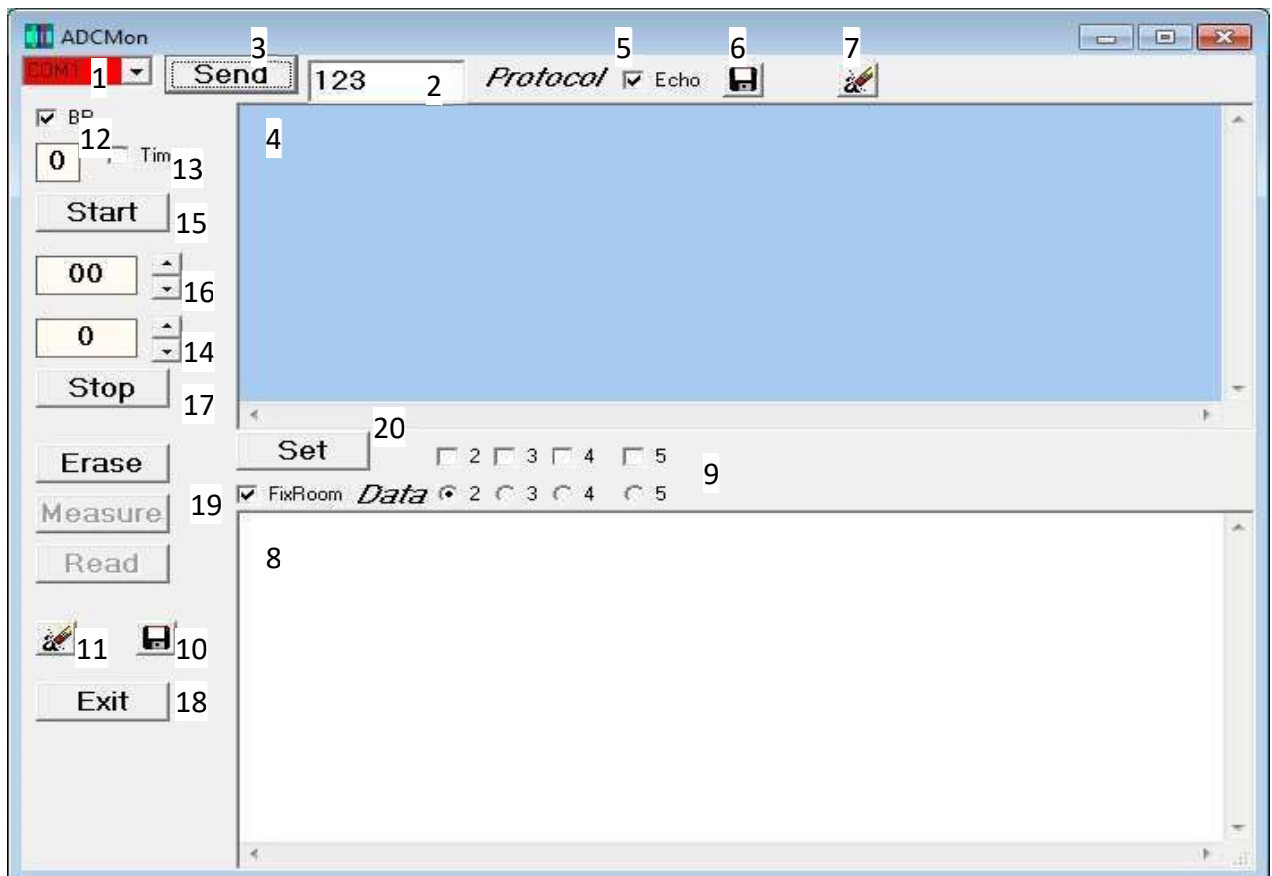


Рисунок 4.13 – Вікно робочої програми

- 6 - Кнопка запису вмісту вікна (4) на диск.
- 7 - Кнопка очищення вмісту вікна (4).
- 8 - Вікно перегляду даних вимірювань АЦП. Вибір каналу для перегляду вибирається блоком перемикачів (9). Вікно можна використовувати як текстовий редактор.

- 9 - Блок перемикачів номера каналу АЦП для перегляду.
- 10 - Кнопка запису вмісту вікон (8) на диск.
- 11 - Кнопка очищення вмісту вікон (8).
- 12 - Індикатор контрольної суми пакета. Червоний колір - помилка контрольної суми, зелений - норма.
- 13 - Вмикач режиму добавки поточного часу (ПК) до показань АЦП.
- 14 - Кнопка одноразового вимірювання. (Посилка 51h).
- 15 - Кнопка запуску передачі потоку вимірювань. (Посилка 5Ah 3xh 2sh 51h. X - визначається (16)).
- 16 - Визначення інтервалу між передачею даних. Конкретний час задає програма контролера.
- 17 - Зупинка передачі потоку вимірювань (Посилка 50h 5Ah 30h 26h). 18 - Кінець роботи програми. (Посилка 50h і затримка 2 з для очищення буфера обміну).
- 19 - Захист від зміни розміру екрану програми. Якщо захист вимкнено, розмір екрану (в основному вікна (8)) можна змінити.
- 20 - Блок управління каналами. При натисканні кнопки "Set" передається обрана комбінація вимикачів каналів.

Правильно оформлені і такі, що пройшли контроль пакети з даними вимірів АЦП записуються в вікна, відповідні їх номеру. Ця процедура виконується незалежно від установки режиму потоку даних і наявності даних з інших АЦП.

ВИСНОВОК

В першому розділі проведено аналітичний огляд щодо використання БПЛА у цивільних та війських цілях, розглянуті різні типи БПЛАЮ зокрема ті, що несуть безпосередню небезпеку зараз. А також розглянуті канали виявлення БПЛА, їхні переваги та недоліки та сфери застосування, зокрема було обрано метод виявлення ао акустичних шумах БПЛА для компенсації недоліків інших відомих методів виявлення.

В другому розділі проведено аналіз акустичних сигналів малорозмірних безпілотних літальних апаратів, було виконано огляд методів ідентифікації акустичних сигналів, було проведено класифікацію всіх шумів на акустичні шуми природного та антропогенного походження та виявлено їх особливості.

З огляду на те, що основними джерелами шуму БПЛА є двигун, повітряний гвинт та планер було проаналізовано інформаційні характеристики акустичних сигналів БПЛА та виявлено структуру і параметри звукового поля гвинтових безпілотних літальних апаратів. Також було описано пасивні методи визначення місцеположення БПЛА, зокрема запропонована структурна схема пасивного содару.

В третьому розділі описано експериментальні визначення спектральних характеристик шумів БПЛА, та визначено, що оптимальна дальність виявлення комерційних дронів для акустичного методу складає 250-350 м.

В четвертому розділі показані принципові схеми приймального пристрою акустичних шумів. Також, для більш детального вивчення, описано елементи конструкції окремих вузлів акустичної системи виявлення БПЛА.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

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. 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.
6. Исакович М.А. Общая акустика. М.: Наука. – 1973. – С. 496.
7. 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.
8. Олейников В.Н., Зубков О.В, Карташов В.М., Корытцев И.В., Бабкин С.И., Шейко С.А, Селезнев И.С. Экспериментальная оценка эффективности алгоритмов пеленгования беспилотных летательных аппаратов по акустическому излучению // Радіотехніка: Всеукраїнський міжвідомчий наук.-техн. збірник. 2019. Вип. 199. С. 29 – 37.
9. Карташов В.М., Корытцев И.В., Олейников В.Н., Зубков О.В., Шейко С.А., Бабкин С.И., Левский Н.А., Селезнев И.С. Алгоритмы пеленгации

беспилотных летательных аппаратов по их акустическому излучению // Радіотехніка: Всеукраїнський міжвідомчий наук.-техн. збірник. 2019. Вип. 196. С. 22 – 31

10. 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.

11. Puzanau A.D., Nefedov D.S. «Result of experimental studies of the spectral-temporal characteristics of acoustic noise from unmanned aerial vehicles». Nauka i voennaya bezopasnost'. 2020;4(66):19-24.

12. 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.

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

14. 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.

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