

Національний технічний університет України  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»  
ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ  
КАФЕДРА АКУСТИКИ ТА АКУСТОЕЛЕКТРОНІКИ

«На правах рукопису»

УДК 681.884

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Дідковський В.С.

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2019 р.

## Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності (спеціалізації) 171 "Електроніка"

на тему: Акустичний пеленгатор маломірних літаючих апаратів

Виконав: студент 2 курсу, групи ДГ-81мп

Висоцький Денис Олексійович

(підпис)

Керівник: доцент кафедри ААЕ, доц., к.ф.-м.н., Козерук С.О.

(підпис)

Консультант \_\_\_\_\_

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент \_\_\_\_\_

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі  
немає запозичень з праць інших авторів  
без відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_

Київ – 2019 року

**Національний технічний університет України**  
**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Факультет електроніки

Кафедра акустики та акустoeлектроніки

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність (спеціалізація) 171"Електроніка"

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Дідковський В.С.

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 р.

**ЗАВДАННЯ**

**намагістерську дисертацію студенту**

Висоцькому Денису Олексійовичу

1. Тема дисертації: Акустичний пеленгатор маломірних літаючих апаратів. науковий керівник дисертації \_\_: Козерук Сергій Олександрович, к.ф-м.н., доц., затверджені наказом по університету від «01» вересня 2019 р. №3859-С.
2. Строк подання студентом дисертації: 10.12.19.
3. Об'єкт дослідження: акустичне поле маломірних літаючих апаратів.
4. Предмет дослідження (Вихідні дані – для магістерської дисертації за освітньо-професійною програмою) Розробка пристрою для виявлення маломірного літаючого апарату. Вихідні дані: дальність виявлення – не менше 100 м; робочий діапазон частот дронів – 100-2000 Гц.; рівень випромінювання малим літаючим апаратом – 67дБ; рівень завад в смузі частот – 40дБ.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: Провести огляд літературних інформаційних джерел та встановити акустичні характеристики випромінювання маломірних літаючих апаратів. Розробка технічного завдання. Розробка пристрою пеленгування та виявлення. Провести оціночні розрахунки максимальної відстані виявлення.

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: комплект презентацій в Power Point.

7. Орієнтовний перелік публікацій: Visnyk NTU UKPI Serii – Radiotekhnika Radioaparato buduvannia.

8. Консультанти розділів дисертації\*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

9. Дата видачі завдання: 1 вересня 2019 року.

---

\*Консультантом не може бути зазначено керівника дипломного проекту (роботи)

## Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Збір та вивчення джерел інформації для написання дипломної роботи; складання бібліографії наукових джерел	05.09.2019 - 15.09.2019	
2	Складання плану магістерської дисертації	16.09.19 - 20.09.19	
3	Аналітичний огляд поставленої задачі; написання першого розділу	21.09.19 - 10.10.19	
4	Розробка кореляційного пеленгатору; моделювання кореляційного приймача; написання другого розділу	11.10.19 - 26.10.19	
5	Розробка стартап-проекту; написання третього розділу	27.10.19 - 14.11.19	
6	Здача оформленої роботи на кафедру	15.11.19 – 10.12.19	

Студент \_\_\_\_\_

Д.О. Висоцький

Керівник проекту (роботи) \_\_\_\_\_

С.О. Козерук

## АНОТАЦІЯ

Дипломна робота містить основну частину на 57 аркушах, 26 ілюстрацій, 9 таблиць.

Метою роботи є створення ефективного пристрою пеленгування маломірних літаючих апаратів. Пристрій може інтегруватися в систему локалізації маломірних літаючих апаратів. В роботі проведено аналіз технічної літератури та веб-ресурсів по зазначеній проблемі. Розроблено технічне завдання на пристрій. Змодельовано кореляційний приймач. Проведено оціночні розрахунки максимальної відстані виявлення.

Ключові слова: *маломірний літаючий апарат, акустичне пеленгування, кореляційний приймач, максимальна відстань виявлення*

## ANNOTATION

This thesis contains the bulk of the 57 pages, 26 illustrations, 9 tables.

The purpose of the work is to create an effective bearing device for small-sized flying vehicles. The device can be integrated into the system of localization of small aircraft. The paper analyzes the technical literature and web resources on the problem. Technical specification for the device has been developed. The correlation receiver is modeled. Estimates of the maximum detection distance are estimated.

*Keywords: small aircraft, localization, correlation search, maximum detection distance*

## ЗМІСТ

<b>СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ .....</b>	<b>8</b>
<b>ВСТУП .....</b>	<b>9</b>
<b>РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ПОСТАВЛЕНОЇ ЗАДАЧІ... 10</b>	<b>10</b>
<b>1.1</b> Акустичні характеристики малих літаючих апаратів .....	10
<b>1.2</b> Методи визначення координат .....	18
<b>1.2.1</b> Топографічні методи визначення координат .....	18
<b>1.2.2</b> Акустичні методи визначення кутових координат .....	26
<b>1.3</b> Огляд акустичних систем виявлення дронів .....	34
<b>1.4</b> Особливості розповсюдження акустичних хвиль у повітрі .....	35
<b>1.5</b> Висновки по розділу .....	38
<b>РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА КОРЕЛЯЦІЙНОГО ПЕЛЕНГАТОРА..... 39</b>	<b>39</b>
<b>2.1</b> Розробка технічного завдання на роботу.....	39
<b>2.2</b> Теоретичне обґрунтування методу.....	40
<b>2.3</b> Приклад розрахунку МВВ квадрокоптера .....	47
<b>2.4</b> Моделювання кореляційного приймача .....	48
<b>2.5</b> Висновки по розділу .....	54
<b>РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТА .....</b>	<b>55</b>
<b>3.1</b> Опис ідеї проекту .....	55
<b>3.2</b> Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	61
<b>3.3</b> Висновки по розділу .....	65
<b>ВИСНОВКИ .....</b>	<b>66</b>
<b>ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ .....</b>	<b>68</b>

**СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ**

МЛА	-	маломірний літаючий апарат;
ЧПЛ	-	частота проходження лопаті;
КПЛ	-	комплексом пасивної локації;
ВКФ	-	взаємо-кореляційна функція;
КПХ	-	кут приходу хвиль;
КФ	-	кореляційна функція;
КП	-	кореляційний пеленгатор;
ЛЗ	-	ланцюг затримки;
ПР	-	перемножувач;
ІН	-	інтегратор;
ППР	-	пристрій прийняття рішення;
КД	-	квадратичний детектор;
ХВ	-	характеристика виявлення;
СФ	-	смуговий фільтр;
МВВ	-	максимальна відстань виявлення;
СПП	-	спектральна густина потужності.



## ВСТУП

Використання маломірних літаючих апаратів все більше поширюється та охоплює різні сфери: розваг, цифрове 2D- і 3D-картографування, досліджень навколишнього середовища, екологічного контролю, охорони важливих об'єктів, як атомна електростанція так і у сфері бізнесу — для доставки товарів споживачам, збору даних, моніторингу земної і водної поверхонь. Тобто маломірний літаючий апарат — це технологія, якій під силу доставляти людей та вантажі, створювати карти та збирати різного типу інформацію. Можна очікувати, що ця тенденція збережеться і в майбутньому.

Одними із завдань застосування маломірних літаючих апаратів є виконання відеозйомки для військових цілей, нанесення ударів по наземних і повітряних об'єктах, ведення розвідки. Саме тому пристрої виявлення є необхідними для забезпечення безпеки суспільства. У сукупності з методами визначення дальності і швидкості, методи пеленгування дозволяють визначити місце розташування об'єкта в чотиривимірному просторі. Акустичні методи спостереження забезпечують виявлення в умовах складного рельєфу і наявності зелених насаджень. Виявлення ускладнюється особливістю траєкторії польоту, а саме висотою, яка може змінюватись від одиниць до десятків метрів, та динамікою руху — від зависання до прискорення в довільному напрямку. Дальність виявлення залежить від обраного приймального пристрою, рівня випромінювання об'єкта і рівня акустичних перешкод в зоні спостереження.

Застосовують у військовій сфері пеленгування для визначення розташування ворожої техніки. Акустичний пеленгатор створює огляд місцевості та повідомляє про проникнення на неї ворожого літаючого апарату.

## РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ПОСТАВЛЕНОЇ ЗАДАЧІ

### 1.1 Акустичні характеристики маломірних літаючих апаратів

Розглянемо найбільш поширені маломірні літаючі апарати (МЛА), інша назва – дрони, та встановимо їх технічні та акустичні характеристики. В роботі[1] приведені результати акустичних вимірювань чотирьох невеликих комерційно доступних МЛА, включаючи фіксоване крило літака, трикоптер, квадрокоптер і гексакоптер, де числовий префікс показує число роторів на кожному транспортному засобі. Характеристики шуму, такі як спектральний склад, рівні звуку та час, що змінюють характер звукового поля. Обговорюються деякі проблеми, що виникають при проведенні акустичних вимірювань цих транспортних засобів, включаючи складність отримання точної інформації про місцезнаходження дрону. Акустичні вимірювання на малих дронах проводилися в двох окремих випробуваннях на двох різних місцях розташування. Хоча це не спричиняло жодних проблем з керуванням, розумно припустити, що шум з цим корисним навантаженням буде відрізнятися від того ж шуму транспортного засобу без корисного навантаження. На ці відмінності впливатимуть менші частоти проходження лопатей через меншу тягу, необхідну для утримання дрона в повітрі. Ефекти нестабільного навантаження лопатей також можуть бути більш вираженими на випробуваному квадрокоптері з навантаженням, ніж на менш навантаженому.



Vehicle Name	Type	Flight Weight (kg)	Max Speed (m/s)	Power	Location
Edge 540 <sup>1</sup>	fixed-wing	~11.3	27	gas engine	42VA
DJI Phantom 2 <sup>2</sup>	quadcopter	1.6	15	electric motor	42VA
3DR Y6 <sup>3</sup>	tricopter	2.5	15	electric motor	42VA
Prioria Hex <sup>4</sup>	hexcopter	7.3	15	electric motor	AP Hill

Рис.1.1. Протестовані дрони

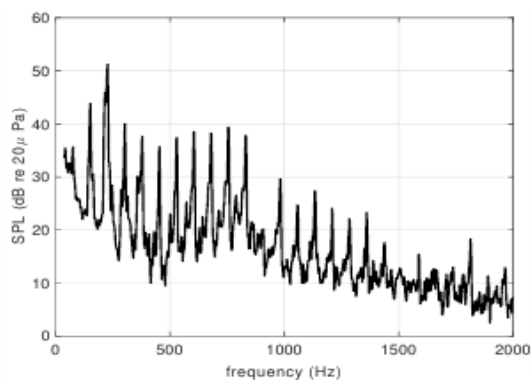
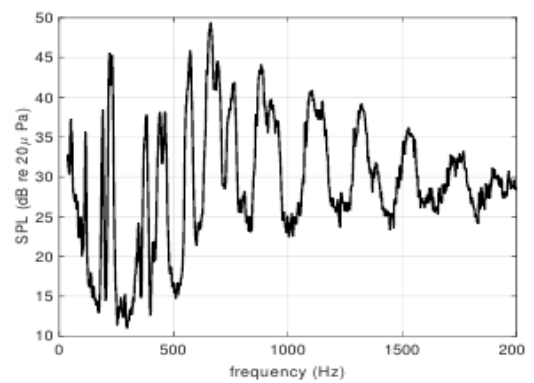
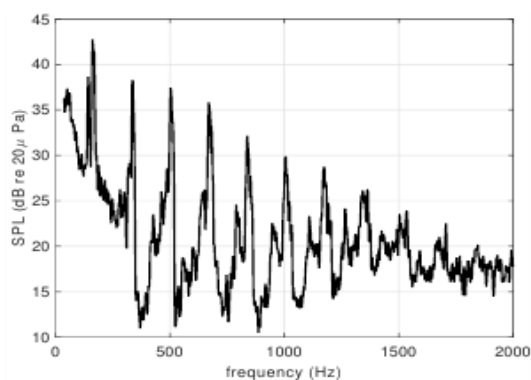
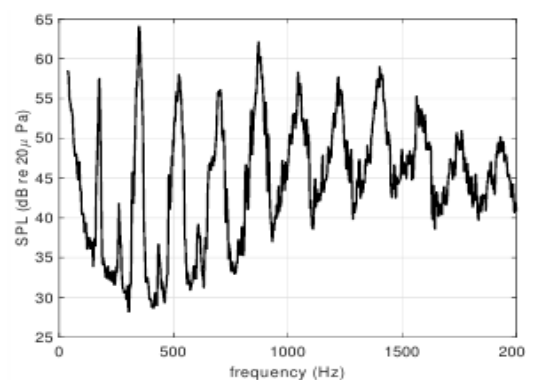
(a) Fixed-wing approach ( $M_{tip} \sim 0.5$ ).(b) Quadcopter hover ( $M_{tip} \sim 0.2$ ).(c) Tricopter hover ( $M_{tip} \sim 0.2$ ).(d) Hexcopter hover ( $M_{tip} \sim 0.3$ ).

Рис.1.2. Порівняння спектрів дронів

На рисунку 1.2 показані основні спектральні характеристики рівня звукового тиску кожного дрона до 2 кГц. Кожен спектр був розрахований з семи секунд часу, використовуючи вікно Хеммінга. У вимірюваному шумі всіх чотирьох транспортних засобів домінують шуми, пов'язані з пропелером, в тому числі вузькосмуговий детермінований шум і широкосмуговий шум. Нестабільна сила шуму, що відбувається на періодичній основі, наприклад, від порушеного руху внаслідок інших роторів або фюзеляжу, є важливим джерелом шуму при вищих гармоніках частоти проходження лопаті і може пояснити високі рівні при цих вищих гармоніках. Широкасмуговий шум також є важливим джерелом шуму для цих транспортних засобів, включаючи шум, викликаний нестационарними флуктуаціями тиску внаслідок турбулентності піків на гармоніці частоти проходження лопаті у спектрах фіксованого крила, рис. 1.3., зазвичай вузчі ніж в мультикоптерних спектрах. Збільшена ширина тонів у мультикоптерних спектрах через щонайменше два чинники: наявність декількох роторів, що працюють на тісно розташованих частотах поширює енергію в спектрі. Крім того, варіанти швидкості ротора пов'язані з управлінням системи, яка виникає в рамках вікна спектрального аналізу, також поширюватиме енергію в спектрі. Ці зміни швидкості використовуються системою керування повітряним двигуном для регулювання відношення транспортного засобу, отже вони виникають майже постійно у зовнішньому середовищі (з присутністю вітру).

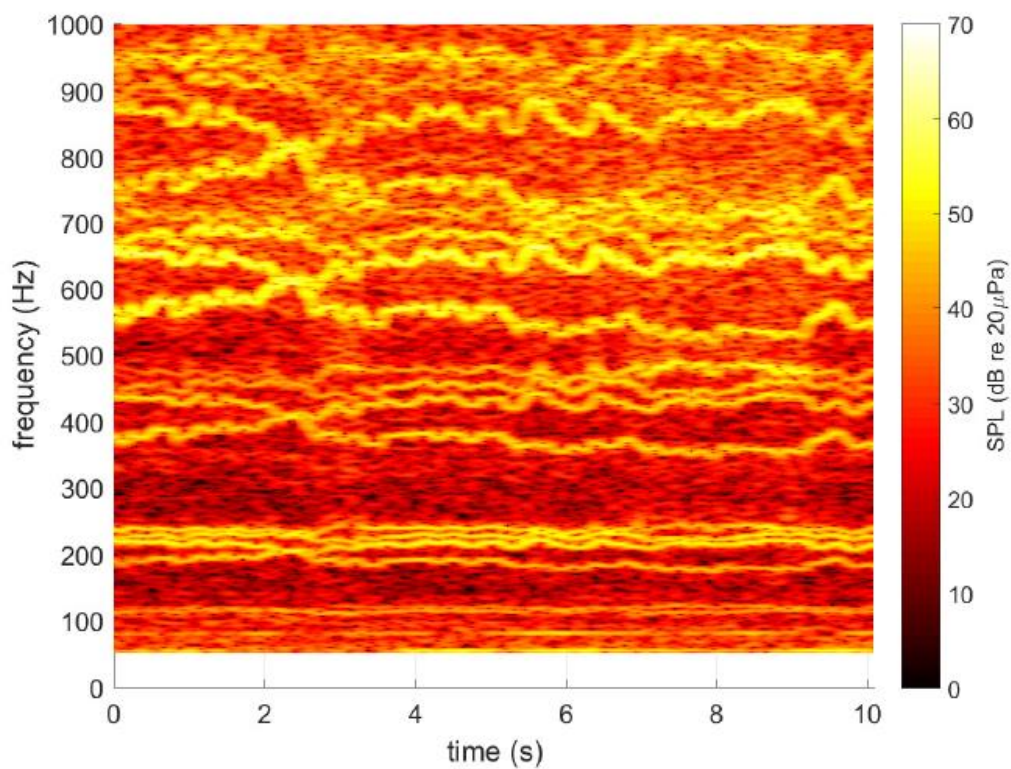


Рис.1.3. Спектрограма багатоходових перельотів квадрокоптера в повітрі, 6 м/с

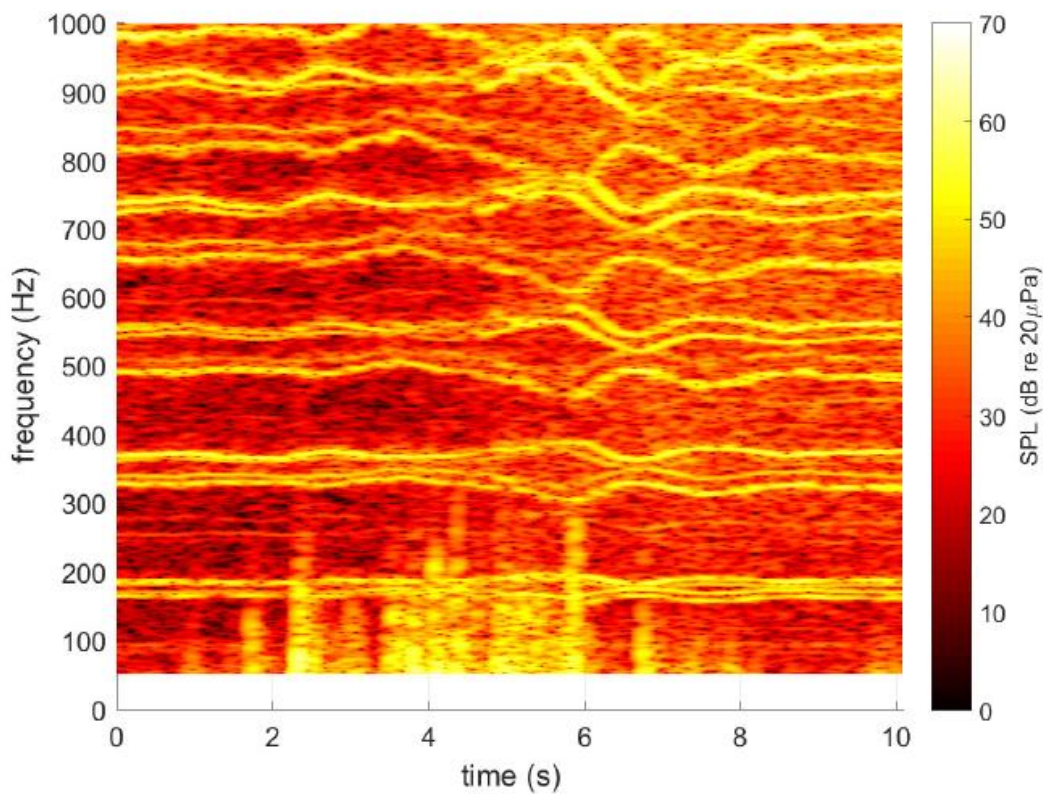


Рис.1.4. Спектрограма багатоходових перельотів гексакоптера в повітрі, 13 м/с

Спектрограми, що показують частотну поведінку з часом, показують для цих невеликих транспортних засобів, де нестационарна поведінка є звичайним явищем. На рисунках 1.3 та 1.4 показані 10-секундні спектрограми для зависання квадрокоптерів і гексакоптерів (середня висота над рівнем землі і А-зважений рівень звукового тиску на 10-секундний сегмент показаний на малюнку).

Спектрограми багаті гармоніками від частот проходження лопаті, близько 200 Гц для обох транспортних засобів. Чотири різних спектральних лінії видно на рис. 1.3 поблизу 200 Гц, по одному для кожного ротора на квадрокоптері. Швидкості обертання ротора не рівні через незначні зміни характеристик лопатей і двигуна і вітер. Невеликі варіації згодом в частоті проходження лопатей збільшені при більш високих гармоніках, тому на кількох сотих герц спектр являє собою суміш різних гармонік роторних частот проходження лопатей.

Спектрограма для гексакоптера на рис. 1.4 аналогічна спектроскопу, але частота проходження лопатей, розташована трохи нижче 200 Гц, тому побачити окрему лінію для кожного ротора складно.

Частота проходження лопатей виглядає більш стійкою з часом для гексакоптера, ніж для квадрокоптера, що може бути обумовлено більшою інерцією гексакоптера, меншою чутливістю до вітру.

Спектрограми для квадрокоптера і гексакоптера показані на рис. 1.3; 1.4. В спектрограмах все ще видно тони, а рівень широкопasmового шуму значно нижчий, за винятком точки найближчого наближення, яка сталася приблизно на 7 секунд на обох графіках. Більш тонка різниця між спектрографами наведення і відображення являє собою поділ частоти проходження лопатей (ЧПЛ), яке відбувається для підтримки дальності польоту. Зокрема, для того, щоб квадрокоптер підтримував передню частину, задні ротори наводяться з більш високою швидкістю обертання, щоб

забезпечити більший підйом, ніж передні ротори. Різниця швидкостей ротора з'являється на спектрограмі у вигляді двох ЧПЛ нижче 200 Гц і двох трохи вище 200 Гц. Ця різниця в швидкостях ротора була особливо помітна на випробуваному транспортному засобі через те, що корисне навантаження повітряної системи збору даних було встановлено нижче транспортного засобу, створюючи зсув між аеродинамічним центром і центром тяжіння транспортного засобу. Цей зсув вимагало більшої тяги від задніх пропелерів, щоб просунути вперед автомобіль і зробити рух вперед. Крім того, що рівні звукового тиску гармонік заднього ротора при частоті 450 Гц, 675 Гц і 900 Гц здаються бути вище, ніж ЧПЛ-гармоніки переднього ротора при 350 Гц і 525 Гц. Гармоніки частоти проходження видно навіть в точці найближчого підліту, коли широкосмуговий шум є найвищим.

Часова історія А-зваженого рівня звукового тиску, розрахована з 0,5-секундними інтервалами, показана на рис.1.6. Хоча квадрокоптер набагато легше, ніж гексоптер, його рівні звуку постійно вище, ніж гексакоптер. А-зважений спектр для кожного транспортного засобу в той час сегмент, який відповідає максимальному рівню, зважений за А, показаний на рис.1.6. Широкосмуговий шум гексоптера вище, ніж у квадрокоптера, але спектр квадрокоптера має виражені гармоніки ЧПЛ між 500 і 1000 Гц, що призводить до збільшення А-зваженого рівня звукового тиску.

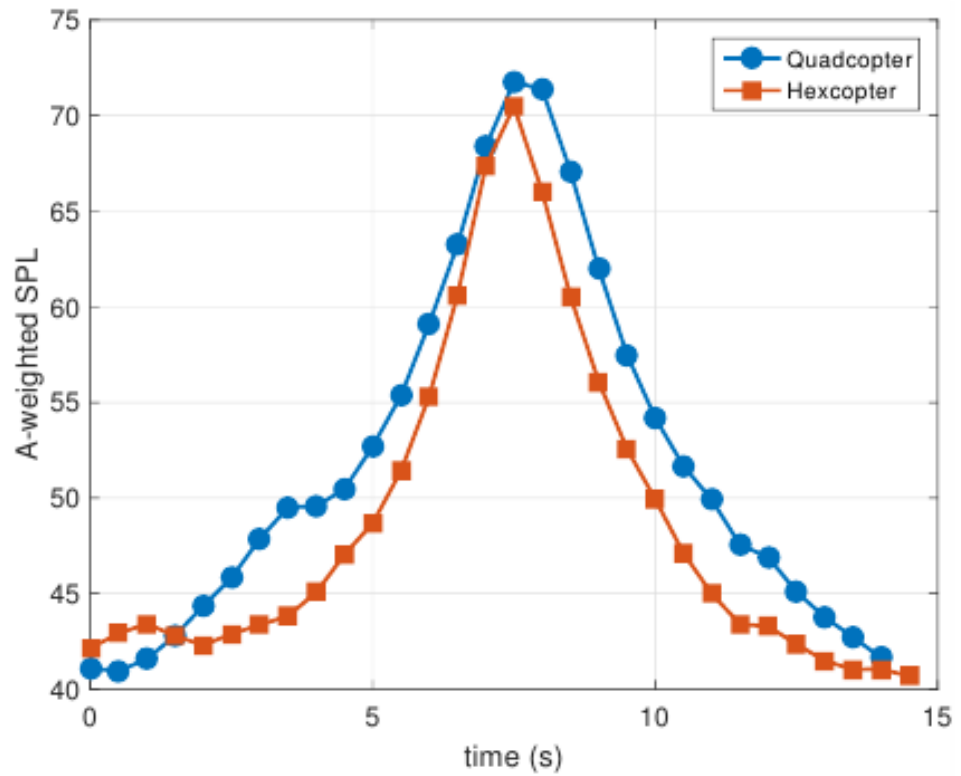


Рис.1.5. Рівень звукового тиску, розрахований з 0,5-секундними інтервалами підліту квадрокоптера і гексакоптера.

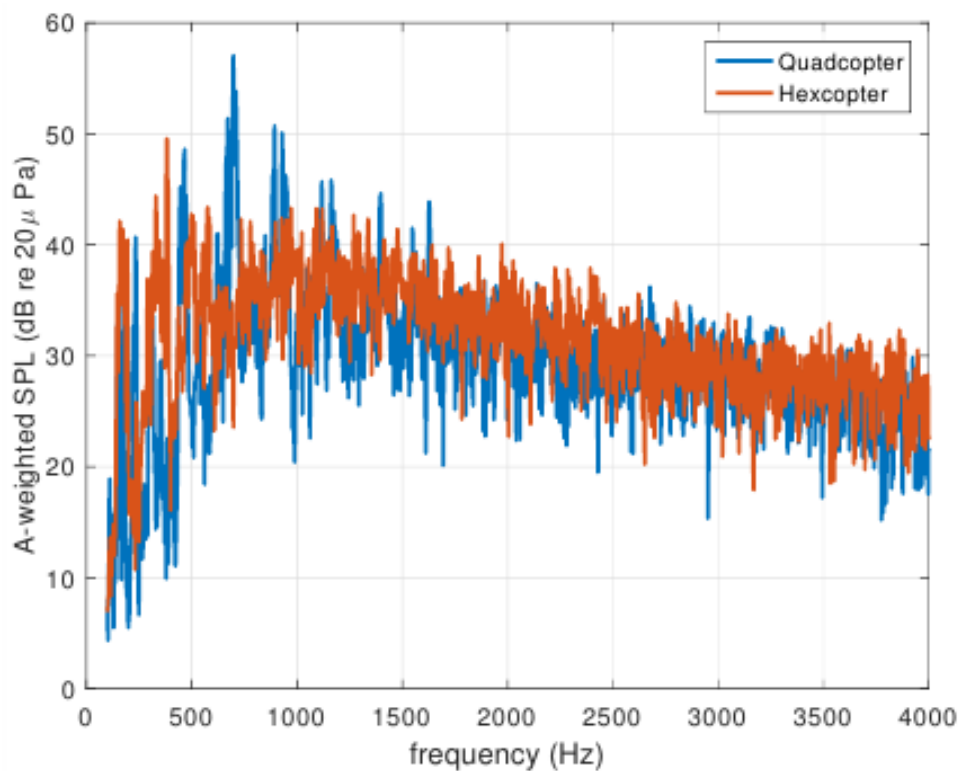


Рис.1.6. Сигмент підліту гексакоптера і квадрокоптера з максимальним рівнем звуку.



Типовий спектр акустичного випромінювання при роботі електричного двигуна на рисунку 1.7.

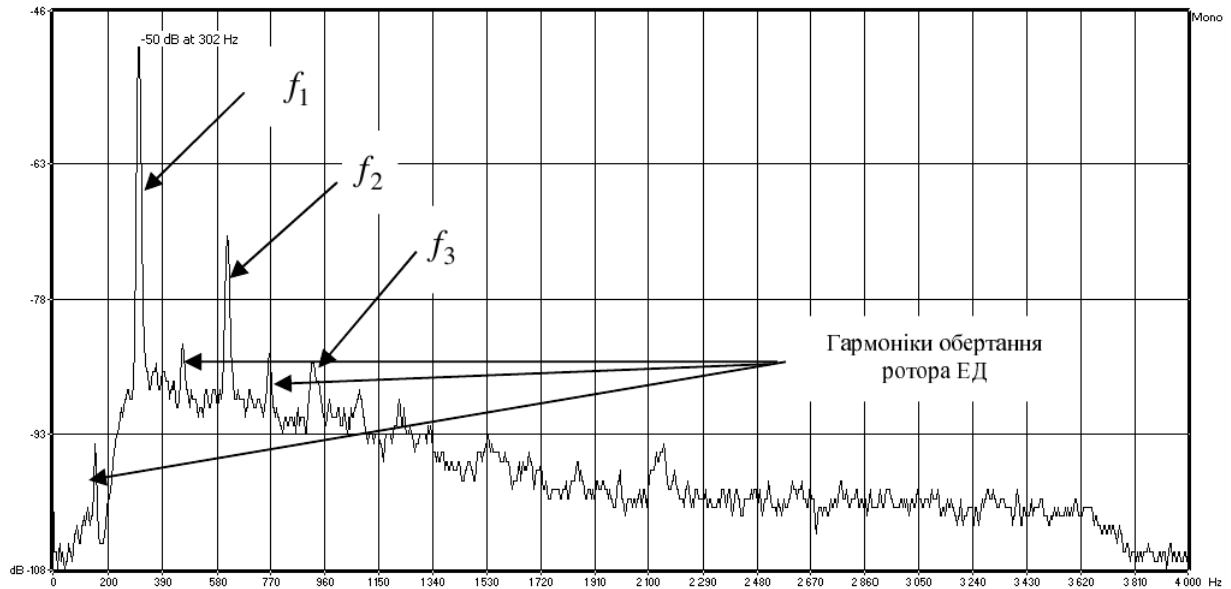


Рис.1.7. Спектр акустичного випромінювання роботи електричного двигуна (частота обертання гвинта 9000 обертів за хвилину).

Було досліджено акустичні характеристики квадрокоптера[2] та встановлено широкосмугову шумову складову і багатоконпонентну гармонійну структуру випромінювання в діапазоні частот до 10кГц. За відсутності руху квадрокоптера значення амплітуди та фази гармонік змінюються випадково. Це пояснюється деяким розходженням режимів роботи двигунів в процесі компенсації автоматикою безпілотної літального апарату вітрового впливу. Автори запропонували розглядати акустичне випромінювання як широкосмуговий випадковий процес з відповідним енергетичним спектром, а інформаційними параметрами вибрати спектральні коефіцієнти.

Спектр випромінювання містить набір дискретних складових, максимуми обвідних яких розміщуються в області 300-900 Гц, тобто перших трьох гармонік. Перша гармоніка знаходиться на частоті 300 Гц, всі наступні

слідують з кратними частотами. Тобто спектральний акустичний портрет матиме гармоніки на частотах, що кратні частоті обертання двигуна.

Проведений аналіз дає можливість встановити основні акустичні характеристики МЛІА :

- Характер випромінювання – широкопasmовий шумовий процес з флуктуючими тональними дискретами;
- Найбільш інформативний діапазон частот випромінювання (100-2000)Гц;
- Рівень випромінювання по шкалі А приведений до відстані 1 м становить приблизно (70 – 75)дБА

## **1.2 Методи визначення координат**

В радіолокації, гідроакустиці та атмосферній локації використовують одні і ті ж методи вимірювання координат. Розглянемо найбільш поширені.

### **1.2.1 Топографічні методи визначення координат**

Методи локації розробили для задач топографії та радіолокації. З часом їх адаптували та створили прототипи для гідроакустики та повітряної акустики. Розглянемо найбільш відомі з них.

Особливістю пасивного методу є відсутність інформації про час випромінювання. Дальність, як правило, не може бути визначена за даними прийому тільки в одній точці спостереження. Тому для визначення координат джерела випромінювання необхідно мати дві або кілька рознесених точок прийому з'єднаних каналами зв'язку. Прийом прямого, а не відбитого сигналу полегшує виявлення джерела випромінювання, а

відсутність інформації про форму сигналу і наявність інших джерел випромінювання ускладнюють виявлення. Відсутність передавальних пристроїв при пасивній локації спрощує апаратуру і підвищує скритність роботи.

За принципами побудови підсистема пасивної локації істотно відрізняється від підсистеми активної локації. Існує декілька основних відмінностей:

- засоби пасивної локації не випромінюють, це забезпечує прихованість їхньої роботи й ускладнює противникові організацію протидії;
- системи пасивної локації мають бути багатопозиційними. Це обумовлено тим, що в одному приймальному пункті можна виміряти тільки кутові координати випромінювального об'єкта й не можна, як правило, визначити дальність до цілі. Сукупність декількох взаємозалежних приймальних пунктів, спільна обробка вихідної інформації яких дозволяє визначити просторові координати випромінювальних цілей й відслідкувати реальні цілі від хибних, називається комплексом пасивної локації (КПЛ).

У комплексах пасивної локації, що реалізують триангуляційний метод, на приймальних пунктах виміряються кутові координати активних завад. Кожній кутовій координаті, вимірюваній у приймальному пункті, можна поставити у відповідність певну координатну поверхню – поверхню можливого положення цілі.

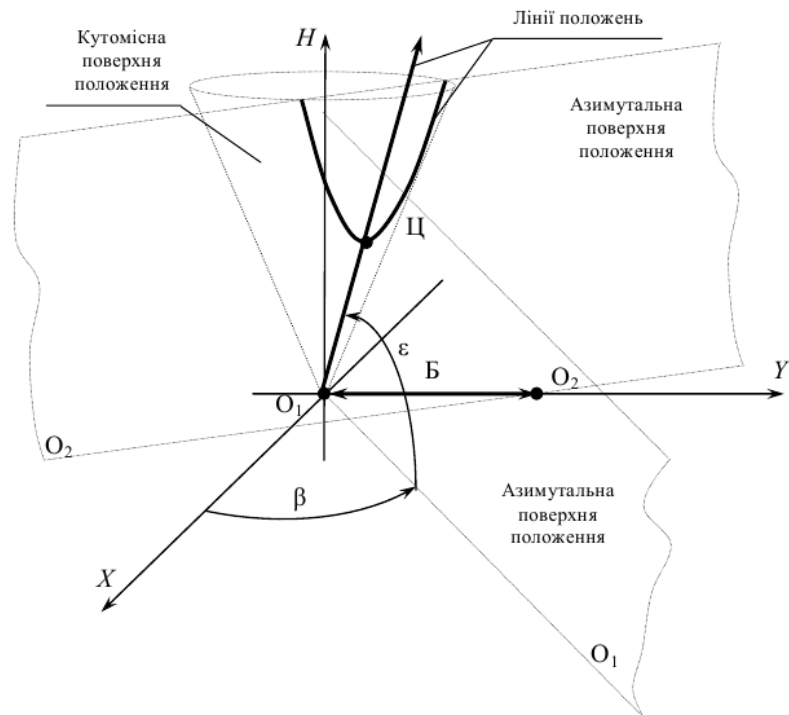


Рис.1.8.Схема пасивного методу

Перетин цих поверхонь створює координатну лінію або лінію положення, що являє собою промінь, який виходить із точки прийому. Для визначення точки положення цілі на цій лінії необхідна третя координатна поверхня. Нею може бути координатна поверхня азимута або кута місця, вимірювана іншим приймальним пунктом. Перетин трьох поверхонь положення дає точку положення цілі в просторі. Отже, триангуляційний метод полягає у вимірюванні кутових напрямків на об'єкт як мінімум в двох точках прийому, рознесених на деяку відстань яку називають базою. Якщо джерело випромінювання розташоване в горизонтальній (або вертикальній) площині, як показано на рис.1.9., досить виміряти два азимути  $\beta_1$  і  $\beta_2$  (при потребі і кути місця  $\varepsilon_1$  і  $\varepsilon_2$ ). Перетин ліній положення і буде місцем розташування об'єкта[3].

$$r \cdot \cos \varepsilon_1 \cdot \cos \varepsilon_2 + r_A \cdot \cos \varepsilon_2 \cdot \cos(180 - \beta_2) = D1 + D2 = D \quad (1.1)$$

$$r \cdot \cos \varepsilon_1 \cdot \sin \beta_1 = r_A \cdot \cos \varepsilon_2 \cdot \cos(180 - \beta_2) = h \quad (1.2)$$

$$r_A \cdot \cos \varepsilon_2 = \frac{r \cdot \cos \varepsilon_1 \cdot \sin \beta_1}{\sin(180 - \beta_2)} \quad (1.3)$$

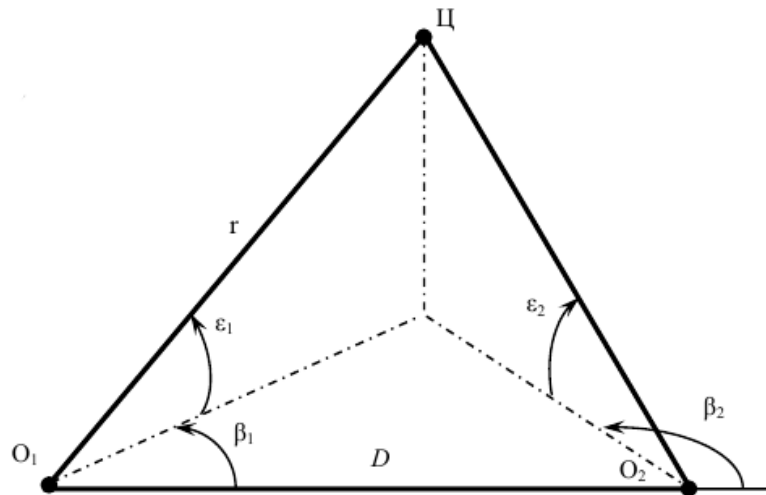


Рис. 1.9. Схема триангуляційного методу

Підставимо замість  $r_A \cdot \cos \varepsilon_2$  його значення у рівняння і врахуємо, що:

$$\frac{\cos(180 - \beta_2)}{\sin(180 - \beta_2)} = -ctg \beta_2 \quad (1.4)$$

В результаті отримаємо, що:

$$r = \frac{D}{\cos \varepsilon_2 (\cos \beta_1 - \sin \beta_1 ctg \beta_2)} \quad (1.5)$$

Триангуляційний метод простий в технічній реалізації. Тому широко застосовується в системах визначення координат випромінюючих об'єктів.

Істотним недоліком триангуляційного методу є те, що при збільшенні кількості джерел випромінювання, які перебувають в зоні дії пеленгаторів, можуть відбуватися помилкові виявлення неіснуючих джерел (рис.1.10).

Якщо є багато джерел випромінювання, рішення задачі стає невизначеним. У цьому випадку необхідна інформація про окреме джерело може бути отримана при збільшенні числа точок прийому або зіставленні тонкої структури прийнятих коливань в сусідніх точках[4].

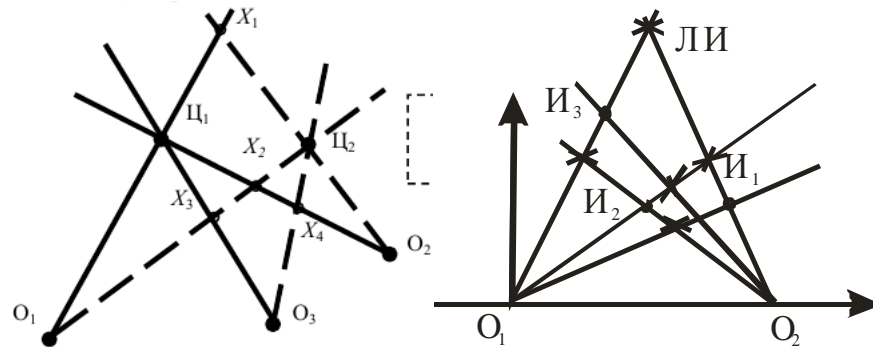


Рис.1.10. Виявлення помилкових джерел випромінювання

При використанні додаткових результатів вимірювань підвищення точності відбувається завдяки надлишкової інформації. Найбільша потенційна точність може бути досягнута при використанні статистичного аналізу, хоча обробка при цьому ускладнюється[5].

Метод різниці відстаней визначення координат джерела звуку заснований на вимірюванні різниці відстаней від джерела випромінювання до пунктів прийому.

Для визначення площинних координат досить точно виміряти дві різниці відстаней  $(r_A - r)$  і  $(r_B - r)$ , (кожна з яких характеризує свою лінію положення. Лініями положення також будуть гіперболи з фокусами в точках розташування приймальних пунктів (рис. 3), що впливає з визначення гіперболи. Місцезнаходження джерела випромінювання визначається точкою перетину гіпербол[2].

Розрахунок площинних координат джерела випромінювання зводиться до розташування приймальних пунктів на одній лінії і теореми косинусів.

$$\begin{cases} r_A^2 = D^2 + r^2 + 2D \cdot r \cos \beta \\ r_B^2 = D^2 + r^2 - 2D \cdot r \cos \beta \end{cases} \quad (1.6)$$

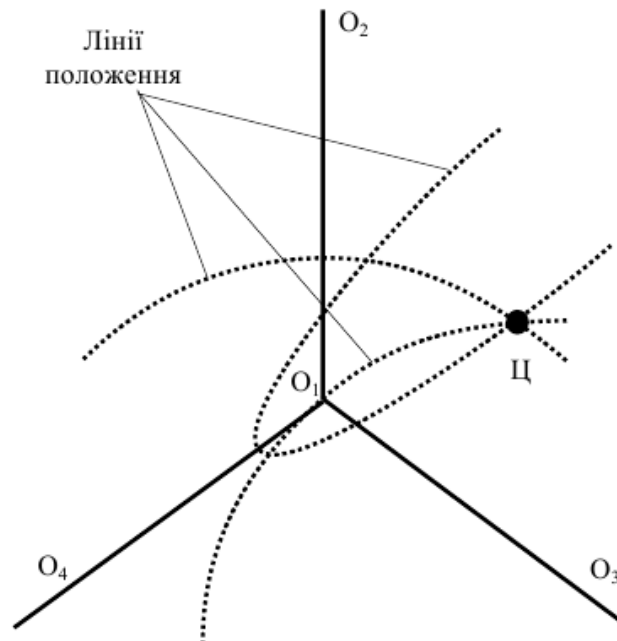


Рис.1.11. Визначення координат джерела звуку методом різниці відстаней

З другого рівняння системи отримаємо такий вираз:

$$2 \cdot D \cdot r \cos \beta = D^2 + r^2 + r_B^2, \quad (1.7)$$

яке підставимо в перше рівняння (вирішуємо систему рівнянь), а також позначимо  $R_1 = r_A - r$ ,  $R_2 = r_B - r$  - різниці відстаней між джерелом випромінювання і пунктами прийому. Після нескладних перетворень отримаємо вираз:

$$r = \frac{2D^2 - R_1^2 - R_2^2}{2(R_1 + R_2)}, \quad (1.8)$$

який визначає дальність до джерела випромінювання. Азимут на джерело знаходимо по формулі:

$$\beta = \arccos \frac{R_1(D^2 - R_2^2) - R_2(D^2 - R_1^2)}{D(2D^2 - R_1^2 - R_2^2)} \quad (1.9)$$

Різниця відстаней від джерела випромінювання до приймальних пунктів визначається методом кореляційної обробки перешкод, прийнятих приймальними пунктами.

Перевагою методу є висока точність вимірювання координат, яка визначається в основному шириною спектра сигналів завад. Метод не критичний до числа джерел випромінювання, що знаходяться в зоні виявлення системи пасивної радіолокації.

Метод різниці відстаней з відомим азимутом пасивної радіолокації для визначення координат джерела звуку також необхідні два приймальні пункти. Визначення координат засноване на вимірі кутових пеленгів на джерело випромінювання і різниці відстаней від нього до приймальних пунктів. На одному з них визначаються кутові координати цілі, за якими можна знайти лінію положення у вигляді променя, що виходить із точки прийому.

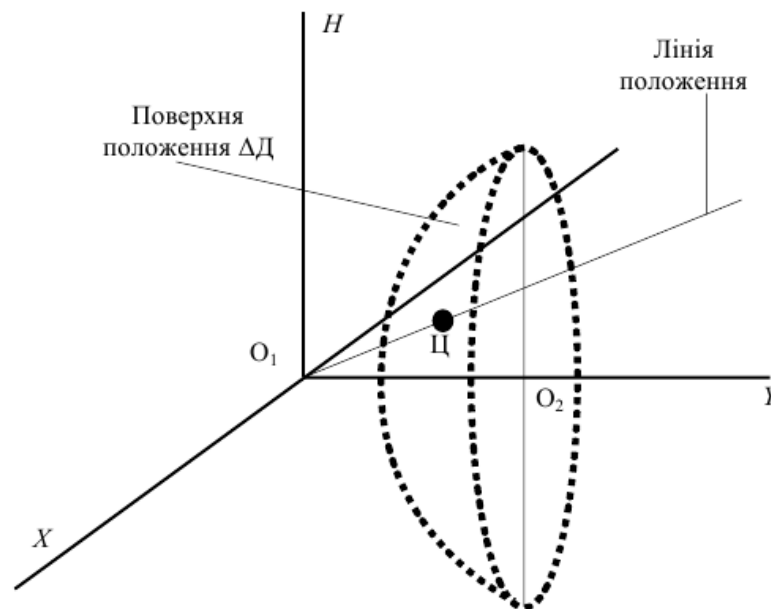


Рис.1.12.Схема методу різниці відстаней з відомим азимутом

Для визначення координат джерела випромінювання на площині досить точно виміряти азимут  $\beta$  і різницю відстаней від пунктів прийому до



джерела (рис. 1.13.а). Місцезнаходження цілі визначається точкою перетину прямої і гіперболи.

Для визначення просторових координат потрібно додатково в одному з приймальних пунктів виміряти кут місця джерела випромінювання (рис. 1.13.б). Місцезнаходження джерела випромінювання відповідає точці перетину двох площин і поверхні гіперболоїду (рис. 1.13.в)[6].

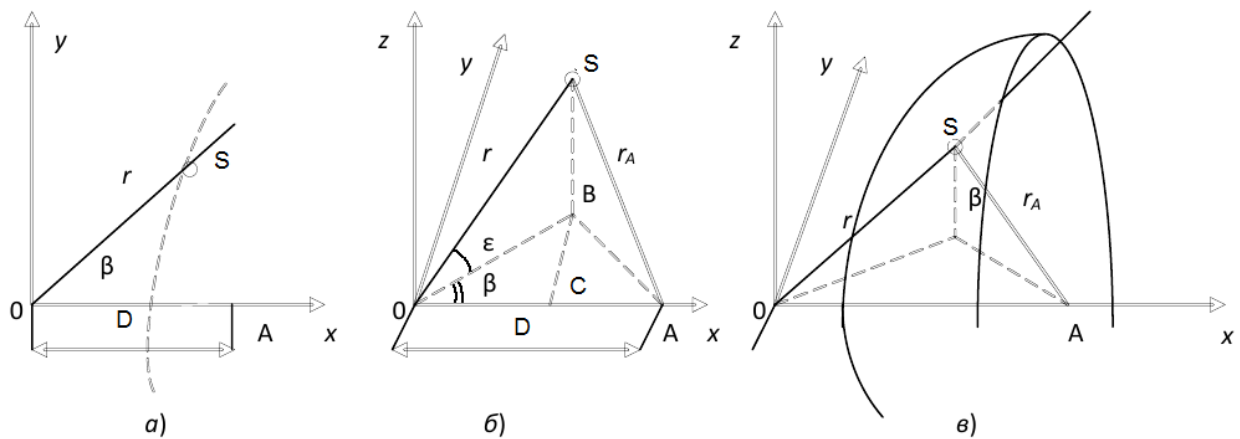


Рис.1.13. Метод різниці відстаней для визначення координат на площині (а) і в просторі (б,в)

Дальність до цілі (рис. 1.3.б)

$$r = r_A + R \quad (1.10)$$

Визначимо відстань, для чого скористаємося відомою теоремою для прямокутного трикутника:

$$c^2 = a^2 + b^2$$

У нашому випадку:

$$r_A^2 = (SB)^2 + (BA)^2; \quad (1.11)$$

$$(SB)^2 = r^2 \sin^2 \varepsilon \quad (1.12)$$

$$(BA)^2 = r^2 \cos^2 \varepsilon \cdot \sin^2 \beta + (D - r \cos \varepsilon \cos \beta)^2 \quad (1.13)$$

Звідси:

$$r_A^2 = r^2 \sin^2 \varepsilon + r^2 \cos^2 \varepsilon \cdot \sin^2 \beta + (D - r \cos \varepsilon \cos \beta)^2 \quad (1.14)$$

З іншого боку:

$$r_A^2 = (r - R)^2 \quad (1.15)$$

Проводячи нескладні обчислення і враховуючи, що  $\sin^2 x + r^2 \cos^2 y = 1$ , остаточно отримуємо

$$r = \frac{D^2 - R^2}{2(D \cdot \cos \varepsilon \cdot \cos \beta - R)} \quad (1.16)$$

Місцезнаходження джерела знаходиться як точка перетину трьох поверхонь - гіперболоїдів обертання. Точність в цьому методі досягається розташуванням пунктів на взаємно перпендикулярних базах.

Перевагою методу є достатня точність вимірювання координат. Метод також не критичний до числа джерел випромінювання, що знаходяться в зоні виявлення системи пасивної радіолокації. Достатньо двох пунктів прийому, але реалізація методу складна[7].

### 1.2.2 Акустичні методи визначення кутових координат

Визначення кутових координат ведеться з використанням спрямованих властивостей приймальних антен. Найбільш поширені амплітудний, рівно сигнальний, фазовий та кореляційний методи. У сукупності з методами визначення дальності і швидкості, методи пеленгування дозволяють визначити місце розташування об'єкта в чотиривимірному просторі. Розглянемо детальніше фазовий та кореляційний методи.

Фазовий метод ґрунтується на вимірюванні різниці фаз акустичних хвиль прийнятих двома ідентичними приймачами, рознесеними в просторі на відстань  $d$  (рис.1.14). Акустична хвиля  $p$  довжиною  $\lambda$ , що падає під кутом  $\alpha$  до акустичної бази, досягає дальнього приймача, по відношенню до ближнього, з просторовим запізненням  $\Delta r = d \sin \alpha$ . Фазовий зсув  $\varphi$  між електричними коливаннями на виході приймачів складає[6]:

$$\varphi = 2\pi \frac{d}{\lambda} \sin \alpha$$

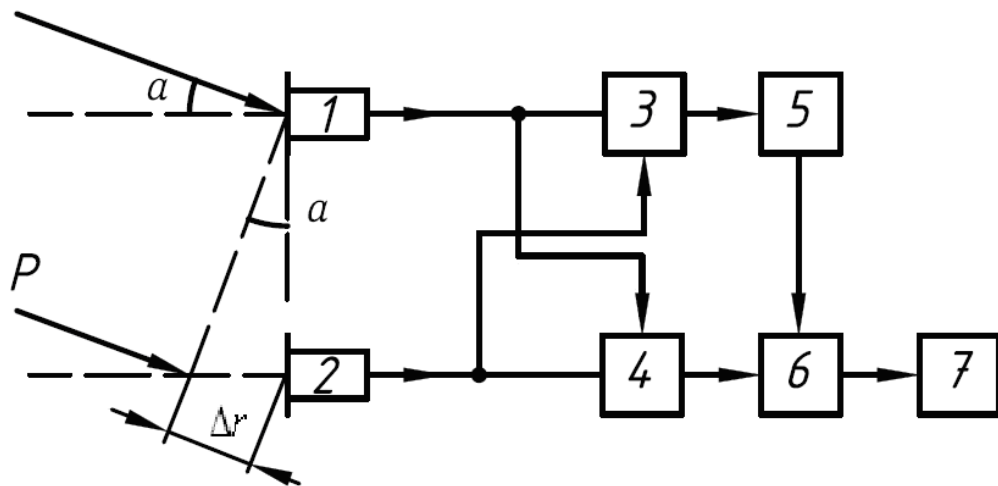


Рис.1.14.Схема фазового пристрою пеленгування

Миттєві значення напруги електричних коливань на виході приймачів  $u_1(t)$  та  $u_2(t)$  запишемо з урахуванням фазового зсуву:

$$\begin{cases} u_1(t) = U_m R(\alpha) \sin(\omega t); \\ u_2(t) = U_m R(\alpha) \sin(\omega t - \varphi); \end{cases} \quad (1.17)$$

де:

$R(\alpha)$  - діаграми спрямованості приймачів.

З метою отримання фазової інформації просумуємо та віднімемо з першого рівняння системи (1.17) друге:

$$\begin{cases} u_{\Sigma} = u_1(t) + u_2(t) = U_m R(\alpha) \sin(\omega t) + U_m R(\alpha) \sin(\omega t - \varphi); \\ u_D = u_1(t) - u_2(t) = U_m R(\alpha) \sin(\omega t) - U_m R(\alpha) \sin(\omega t - \varphi); \end{cases} \quad (1.18)$$

$$\begin{cases} 2U_m R(\alpha) \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) \sin\left(\omega t - \frac{\varphi}{2}\right); \\ 2U_m R(\alpha) \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) \cos\left(\omega t - \frac{\varphi}{2}\right); \end{cases}$$

Якщо сумарний сигнал затримати на  $\pi/2$ , та поділити різницю сигналів на суму, то отримаємо співвідношення для розрахунку зсуву фаз:

$$u_{\Sigma}^* = 2U_m R(\alpha) \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) \sin\left(\omega t - \frac{\varphi}{2} + \frac{\pi}{2}\right) = 2U_m R(\alpha) \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) \cdot \cos\left(\omega t - \frac{\varphi}{2}\right) \quad (1.19)$$

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\varphi}{2}\right) = \frac{u_D}{u_{\Sigma}^*}; \quad (1.20)$$

$$\varphi = 2 \operatorname{arctg}\left(\frac{u_D}{u_{\Sigma}^*}\right) \quad (1.21)$$

Пеленг на об'єкт  $\alpha$  знаходимо по (1.21) з урахуванням (1.16):

$$\alpha = \operatorname{arc\,sin}\left(\frac{\operatorname{arctg}\left(\frac{u_D}{u_{\Sigma}^*}\right)}{\pi \frac{d}{\lambda}}\right) \quad (1.22)$$

Структурна схема фазового пристрою пеленгування (рис.1.14.) складається з блоків, що відтворюють приведені вище математичні операції. Електричні коливання  $u_1(t)$  та  $u_2(t)$  з виходів приймачів (1) та (2) подаються на пристрої суми (3) та різниці (4). У канал суми вводиться пристрій зсуву фази на  $90^0$  (5). Тоді результуючі коливання каналів стають синфазними, а

величина їх значень залежатиме від величин  $u_1(t)$  та  $u_2(t)$  і зсуву фаз між ними. Фаза зсуву розраховується у блоці(6) та виводиться на індикатор (7). В якості індикатора використовують ХУ - дисплей, сигнали двох каналів подають одночасно на обидві осі. Коли пеленг на об'єкт  $\alpha = 0$ , на екрані дисплея графічна лінія займе вертикальне положення. Відхилення об'єкту вправо або вліво призведе до відхилення графічної лінії в той або інший бік. При пеленгуванні можливе виникнення хибного пеленга. Для зняття неоднозначності (1.17) треба щоб фазовий зсув не перевищував  $|\varphi| \leq 180^\circ$ . Тому для пеленгування в секторі кутів  $-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$  слід брати акустичну базу  $d = \lambda / 2$ . Якщо акустична база  $d \geq \lambda / 2$  то сектор пеленгування зменшується до значення  $\alpha \leq |\arcsin(\lambda / 2d)|$ .

Для оцінки середньої квадратичної помилки відхилення пеленга можна скористатися виразом[6]:

$$\sigma^2 = \frac{\lambda}{q} (\lambda / 2\pi d)^2 \quad (1.23)$$

Великі значення сигнал/завада на практиці досягаються застосуванням значних за площею акустичних антен, безперервних або дискретних, розділених на дві частини в площині пеленгування. Такі антени еквівалентні двом точковим приймачам, розташованим в центрах обох половин, а завадостійкість зростає за рахунок загострення характеристики спрямованості половини антени.

Застосування фазового методу вимагає абсолютної ідентичності амплітудних і частотних характеристик обох каналів, що на практиці досягається з великими труднощами. Використовується фазовий метод в пристроях автоматичного супроводу об'єктів по кутових координатах.

Кореляційний метод пеленгування ґрунтується на вимірюванні взаємної кореляційної функції між акустичними сигналами двох приймачів

рознесеними в просторі на відстань  $d$  (рис. 1.15.). Акустична хвиля  $p$ , що падає під кутом  $\alpha$  до акустичної бази, досягає дальнього приймача з просторовим запізненням

$$\Delta r = d \sin \alpha . \quad (1.24)$$

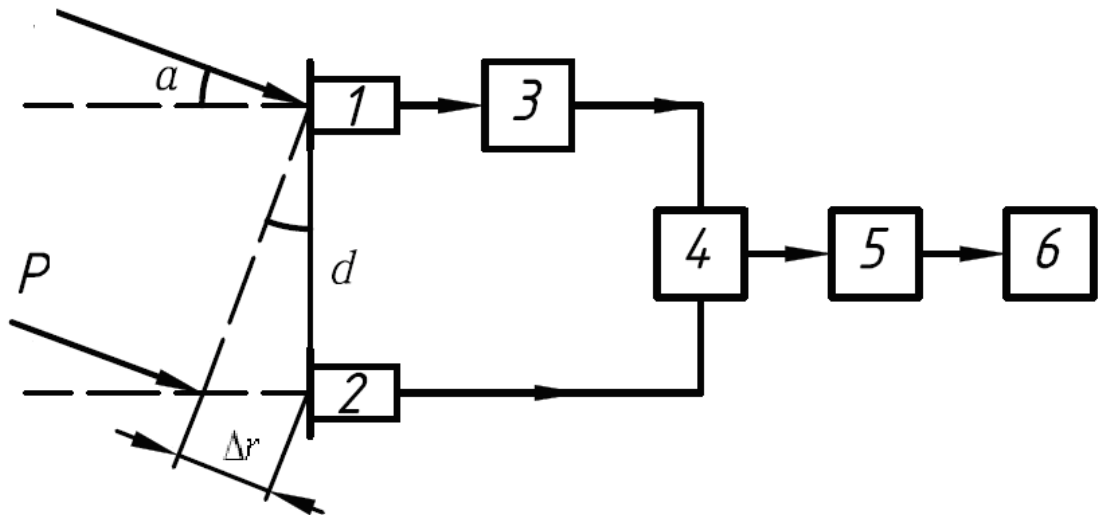


Рис.1.15.Схема кореляційного пеленгатора.

Часова затримка  $\tau$  між електричними коливаннями на виході приймачів:

$$\tau = \frac{d}{c_0} \sin \alpha \quad (1.25)$$

Якщо сигнал і завада некорельовані, а відстань між приймачами така, що шуми завад на виході кожного приймача статистично незалежні, то взаємна кореляційна функція запишеться у вигляді:

$$C(\alpha) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T u_1(t) u_2(t - \tau) dt = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T u_1(t) u_2 \left( t - \frac{d}{c_0} \sin \alpha \right) dt \quad (1.26)$$

Схема кореляційного приймача побудованого у відповідності до (1.26) представлена на рис.1.15. Акустичний сигнал та завада приймаються ідентичними приймачами (1) та (2) і подаються на перемножувач (4). В одному

з каналів введено блок затримки(3). Результат перемноження подається на інтегратор (5) і далі на індикатор (6). Змінюючи час затримки в блоці (3) досягають максимального значення амплітуди вихідного сигналу – значення кореляційної функції, що контролюється індикатором(6). Знаючи час затримки розраховують кутову координату[6]:

$$\alpha = \arcsin \frac{\tau c_0}{d} \quad (1.27)$$

Через обмеженість часу усереднення  $T$  кореляційна функція буде флюктуючою величиною. Припустивши, що відстань до джерела сигналу велика в порівнянні з відстанню між приймачами, а характеристики приймачів ідентичні і вони не спрямовані ( $R(\alpha) = 1$ ), запишемо відношення сигналу до завади на виході  $q_{вих}$  через співвідношення на вході  $q_{вх}$  корелятора:

$$q_{вих} = q_{вх} \Delta f T \quad (1.28)$$

Де:

$\Delta f, T$  - смуга частот сигналу та час спостереження відповідно.

Як видно з (1.28), при заданому відношенні сигнал/завада на вході перевищення сигналу над перешкодою на виході кореляційного пеленгатора прямо пропорційно добутку ширини смуги частот  $\Delta f$  на час інтегрування  $T$ . Якби можна було реалізувати дуже великі часи інтегрування, то на фоні як завгодно великої завади можна було б виявити як завгодно малий сигнал. Із збільшенням відстані між приймачами і розширенням смуги частот спрямована дія при прийомі виявляється лише в невеликій частині діапазону кутів пеленгування, тобто антена такого пеленгатора має достатньо гостру характеристику спрямованості[6].

Якщо пеленгується вузько смугове джерело шуму, пристрій втрачає здатність спрямованого прийому, так як в цьому випадку кореляційна функція є функцією косинуса з численними максимумами. Покажемо це на прикладі пеленгування джерела гармонійного сигналу. Миттєві значення напруги електричних коливань на виході приймачів  $u_1(t)$  та  $u_2(t)$  запишемо з урахуванням часової затримки:

$$\begin{aligned} u_1(t) &= U_m R(\alpha) \sin(\omega t); \\ u_2(t) &= U_m R(\alpha) \sin(\omega(t - \tau)) \end{aligned} \quad (1.29)$$

Реакція  $C(\tau)$  на виході кореляційного пеленгатора має вигляд:

$$\begin{aligned} C(\tau) &= \frac{1}{T} \int_0^T u_1(t) u_2(t - \tau) dt = \frac{1}{T} \int_0^T U_m R(\alpha) \sin(\omega t) U_m R(\alpha) \sin(\omega(t - \tau)) dt = \\ &= \frac{1}{2} U_m^2 R^2(\alpha) \cos(\omega \tau) \end{aligned} \quad (1.30)$$

Закон зміни сигналу на виході пеленгатора описується функцією  $\cos(\omega \tau)$ , яка періодична і досягає однакового максимального значення багато разів коли характеристики спрямованості перетворювачів всенаправлені.

Для пеленгування джерел сигналів часто застосовують знаковий корелятор, робота якого ґрунтується на порівнянні знаків електричних напруг у двох або більше каналах. З теорії ймовірності відомо, що за наявності кореляційних зв'язків між акустичними сигналами у двох просторових каналах ймовірність збігу знаків  $P_{++}, P_{--}$  визначається виразом:

$$P_{++} = P_{--} = \frac{1}{4} \left( 1 + \frac{2}{\pi} \arcsin C(\tau) \right) \quad (1.31)$$



Значення кореляційної функції  $C(\tau)$  для некорельованих процесів дорівнює 0, а для взаємно пов'язаних досягає 1. Тому для сигналів, які прийняті від об'єкту спостереження ймовірність збігу знаків збільшується на величину  $\frac{2}{\pi} \cdot \arcsin C(\tau)$ . Схема знакового корелятора приведена на рис.1.16.

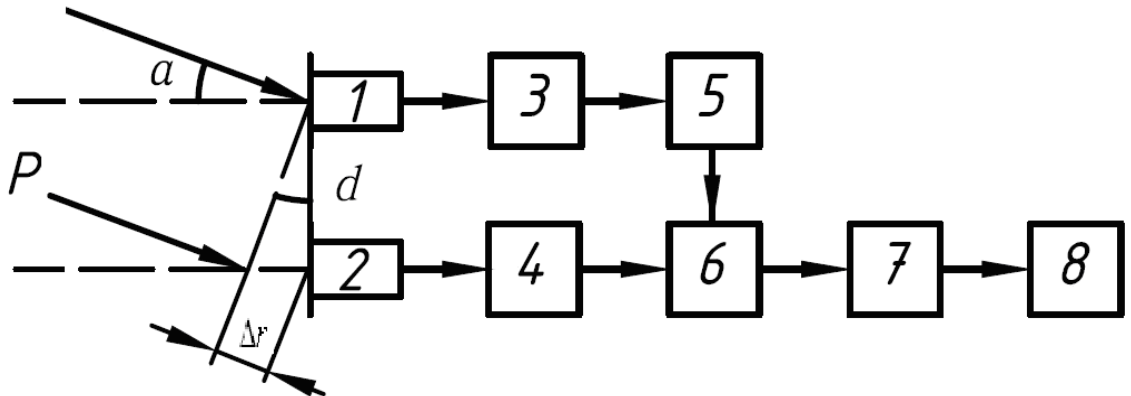


Рис.1.16.Схема знакового корелятора

Акустичний сигнал та завада приймаються ідентичними приймачами (1) та (2). На виході підсилювачів (3) та (4) формуються обмежені по амплітуді прямокутні імпульси різної полярності, які поступають далі на схему співпадіння (6). В одному з каналів введено блок затримки (5). Результат обробки у схемі співпадіння подається на інтегратор (7) і далі на індикатор (8). Змінюючи час затримки  $\tau$  в блоці (5) досягають максимального значення вихідного сигналу – значення ймовірності збігу знаків, що контролюється індикатором (8). Пеленг на джерело сигналу визначається по (1.27). Для того щоб пеленгувати тональне джерело сигналу з довжиною хвилі  $\lambda$  без хибного(неоднозначного) пеленгу в секторі  $0^{\circ} \leq \alpha \leq 90^{\circ}$  треба виконати умову отримання одного максимального значення функції (1.30). Ця умова досягається вибором акустичної бази  $d \leq 0.25\lambda$ , коли затримка  $\tau$  не перевищує чверті періоду кореляційної функції.

### 1.3 Огляд акустичних систем виявлення дронів

Найбільш ефективними є мультисенсорні системи, тобто такі, що використовують методи радіо та акустичної локації і водночас аналізують отримані дані різних типів. Використання радіолокації дозволяє виявляти дрони на відстані до 1000м на відкритих територіях. Акустичні методи спостереження забезпечують виявлення в умовах складного рельєфу та наявності зелених насаджень. Для ефективного виявлення та локалізації дронів використовують рознесену систему детекторів. Розгортання декількох детекторів дозволяє сформувати акустичний бар'єр і, таким чином, виявити і локалізувати дрон на основі обраної геометрії бар'єру. Результати дослідження акустичних сигнатур МЛА для трьох, чотирьох та шести електромоторних дронів приведені в роботі[8]. Звук, що випромінюється дронами, має тональні складові випромінення пропелерів та широкопasmовий шум випромінювання механічного походження.

В залежності від вибраної моделі шуму випромінювання для детектування дронів використовують різні способи. В роботі[9] для локалізації МЛА запропоновано мікрофонний масив із чотирьох мікрофонів в формі тетраедра. Кутові координати (азимут та кут підвищення) визначались по часу затримки хвиль прийнятих мікрофонами. Час затримки встановлювався по піку взаємо-кореляційної функції (ВКФ) між сигналами мікрофонів. Обробка інформації способом локалізації має недолік даної системи через велику кількість операцій.

Розташована на поверхні землі система із 24 мікрофонів приведена в роботі[10]. Виявлення представляє собою синтезування характеристики спрямованості з кутом розкриття 10 та огляду простору в секторі кутів +/-450. Результат у вигляді траєкторії руху дрона виводився на дисплей. Із недоліків основним є налаштовані на частоту 700 Гц лінійка мікрофонів, для просторової обробки широкопasmового акустичного випромінювання в діапазоні частот (450-3000)Гц.

Результати спостереження за польотом одномоторного МЛА в роботі[11]. В цій роботі добре виражена гармонійна структура спектра випромінювання. По суті дві лінійки мікрофонів розташованих ортогонально та налаштованих на прийом хвиль із частотою нижче 500 Гц. Можливість забезпечити круговий огляд простору на відстані до 2 км. Якщо використати некогерентну обробку гармонійних складових в смузі частот (100-200) Гц, можна побудувати зображення траєкторії руху об'єкту з високою кутовою роздільною здатністю і малим спотворенням.

У всіх цих роботах локалізація МЛА потребує багатоеlementних мікрофонних масивів, дорогого програмного та апаратного забезпечення. Простішими є акустичні детектори[12] з одним мікрофоном. Вони дають можливість виявити, але не локалізувати об'єкт. Якщо використати декілька детекторів - це допоможе створити акустичний бар'єр певної геометричної форми та виявити і локалізувати дрон.

#### **1.4 Особливості розповсюдження акустичних хвиль у повітрі**

Рівень звукового тиску (рівень шуму), що створюється цимджерелом у певній точці простору, залежить від[13] :

- втрат акустичної енергії у процесі поширення звуку;
- характеристики джерела;
- геометрії звукового поля у межах променевих допущень і зрахуванням рельєфу;
- погодних умов та неоднорідності атмосфери (температури, вологості, атмосферного тиску, швидкості й напрямку вітру).

В умовах забудови населених пунктів (особливо, міст) поширення шумів залежить від специфіки забудови – архітектурних особливостей, зон зелених

насаджень, транспортних шляхів, рельєфу місцевості, типів ґрунтів, конструкцій спеціалізованих засобів екранування тощо. При цьому, оскільки погодні умови зазнають нерегулярних змін - рівні звуку (здебільшого на великих  $r \geq 100$  м відстанях від джерела) можна розглядати лише як такі, що оцінені статистично з певною похибкою. Похибка тим більша, чим більша мінливість погодних умов і відстань.

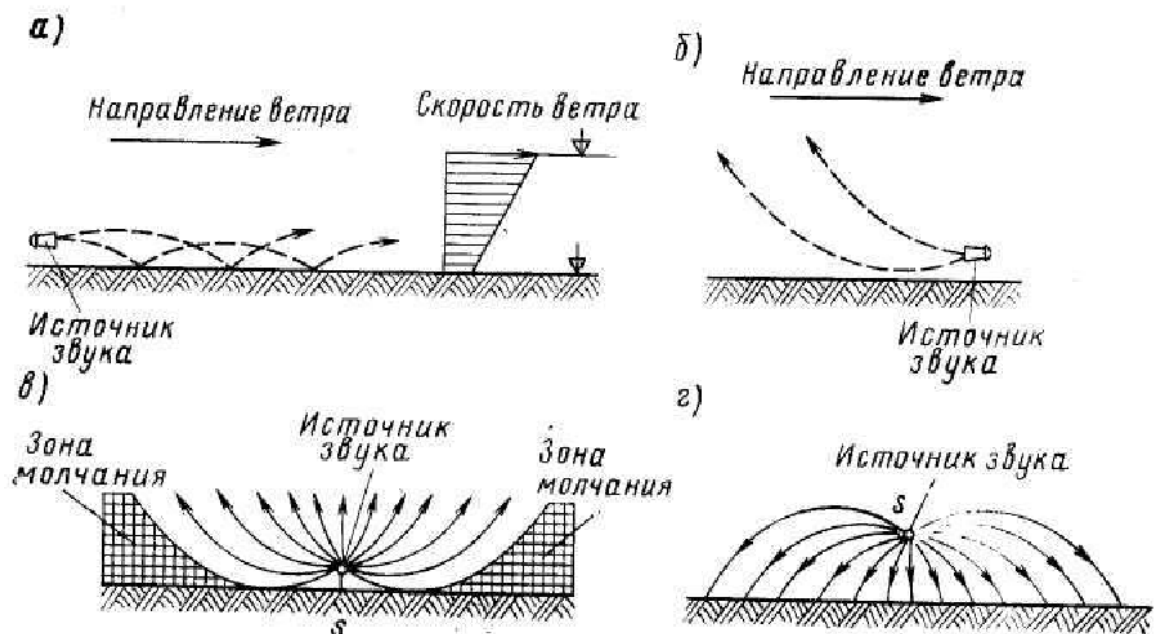


Рис.1.17. Особливості розповсюдження хвиль за різної температури середовища та напрямку вітру

Поширення коливань у середовищі називається хвильовим процесом (рухом). Варто зазначити, що поширення коливань не супроводжується перенесенням частинок середовища – вони лише коливаються навколо положень рівноваги. Енергія переноситься в просторі з хвилею, що розповсюджується. Ці втрати пов'язані з розширенням фронту хвилі, поглинанням звукової енергії та розсіюванням звуку. Процес проходження звукової хвилі в повітряному середовищі супроводжується втратами енергії завдяки теплопровідності та в'язкості повітря і його називають затуханням, або класичним поглинанням.

Табл.1.Затухання звуку в повітрі  $\beta$ , дБ/100 м

Відносна вологість повітря, %	Частота звуку, Гц					
	1000	3000	5000	7000	9000	10 000
10	1,3	8,3	14,0	18,3	21,0	22,0
20	0,6	5,0	10,0	18,3	25,0	32,0
30	0,5	2,5	6,0	10,0	16,0	21,0
40	0,4	1,6	3,3	7,0	11,0	14,0
50	0,3	1,0	2,4	5,0	8,3	10,5

Причина втрат акустичної енергії пов'язана з перевідбиттям звуку перешкодами, що зумовлює трансформацію фронту хвилі.

## 1.5 Висновки по розділу

Актуальність досліджуваної проблеми обумовлена зростанням кількості малих літаючих апаратів, які можуть нести загрозу як державним так і приватним інтересам.

Встановлено, що більшість МЛА мають декілька двигунів з двома лопатями. В польоті режими роботи двигунів змінюються в залежності від вітрового та ходового навантаження. При цьому змінюються і акустичне випромінювання. Проведений вище аналіз дає можливість встановити основні акустичні характеристики МЛА :

- Характер випромінювання – широкосмуговий шумовий процес з флуктуючими тональними дискретами;
- Найбільш інформативний діапазон частот випромінювання лежить в межах (100-2000)Гц;
- Рівень випромінювання по шкалі А приведений до відстані 1 м становить приблизно (70 – 75)дБА

Для визначення координат джерела можна використати триангуляційний метод по відомим : базі D між двома пеленгаторами та двома пеленгам на об'єкт випромінення.

Для визначення пеленгу на джерело використаємо кореляційний метод пеленгування.

## РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА КОРЕЛЯЦІЙНОГО ПЕЛЕНГАТОРА

### 2.1 Розробка технічного завдання на роботу

Виходячи із завдання на роботу та враховуючи проведений аналіз в розділі 1 розробимо технічне завдання на пристрій.

#### Технічне завдання на проект «Акустичний пеленгатор маломірних літаючих апаратів»

##### 1. Найменування та область застосування.

Акустичний пеленгатор маломірних літаючих апаратів – детектор дронів, застосовується для виявлення і розрахунку кутових координат (пеленгу) на літаючий об’єкт. Може використовуватись окремо так і в складі системи локалізації маломірних літаючих апаратів.

##### 2. Підстави для розробки.

Завдання навиконання магістерської роботи.

##### 3. Мета і призначення розробки.

Метою розробки є створення ефективного пристрою пеленгування дронів. Пристрій може інтегруватися в систему локалізації маломірних літаючих апаратів.

##### 4. Джерела розробки.

Стаття: Козерук С. О., Коржик О.В. Виявлення малих літальних апаратів за акустичним випромінюванням //Вісник НТУУ "КПІ". Серія Радіотехніка, Радіоапаратобудування. – 2019. – №. 76. – С. 15-20.

##### 5. Склад продукції та вимоги до конструкції.

Кореляційний пеленгатор складається із двох мікрофонів, двох смугових фільтрів, корелятора та пристрою прийняття рішення. Мікрофони приймають і трансформують прийнятий акустичний сигнал в електричний. Смугові фільтри виділяють інформаційний спектр і подають його на входи корелятора. Корелятор, обробляє суміш завади і сигналу. Пристрій прийняття рішення встановлює факт наявності дрону.

### **5.1. Показники призначення.**

- робочий діапазон частот 170- 1400 Гц;
- рівень випромінювання дронів 70-76 дБ;
- рівень завади в зоні спостереження 40 дБ;
- максимальна відстань виявлення – не менше 100 м;
- характеристики виявлення:  $D=0.90$ ;  $F=0.001$ .

Умови експлуатації: нормальні.

## **6. Загальнотехнічні характеристики**

### **6.1. Вимоги до надійності**

Забезпечуються дотриманням показника достовірності результатів.

### **6.2. Вимоги до транспортування і зберігання**

Транспортувати у захисній упаковці, можливе транспортування на необмежені відстані.

## **2.2 Теоретичне обґрунтування методу**

Проведений в розділі 1 аналіз акустичних сигнатур МЛА[14] дає можливість розглядати звукове випромінювання дрона як широкосмуговий випадковий процес з деяким енергетичним спектром. Враховуючи локальне походження шумового сигналу дрону розглянемо задачу пеленгування, а саме:



- детектування сигналу прийнятій акустичній хвилі з заданими ймовірностями виявлення і хибної тривоги;
- розрахунок кута приходу хвиль (КПХ) випромінювання МЛІА;
- прогноз максимальної відстані виявлення .

Детектування сигналу у прийнятій акустичній хвилі з заданими ймовірностями виявлення і хибної тривоги.

В атмосферній акустиці [15] отримання інформації про присутність об'єкту випромінювання ведеться по прийнятим звуковим хвилям з використанням просторової, часової та спектральної обробки. Для вирішення поставленої задачі двома мікрофонами застосуємо кореляційний метод пеленгування.

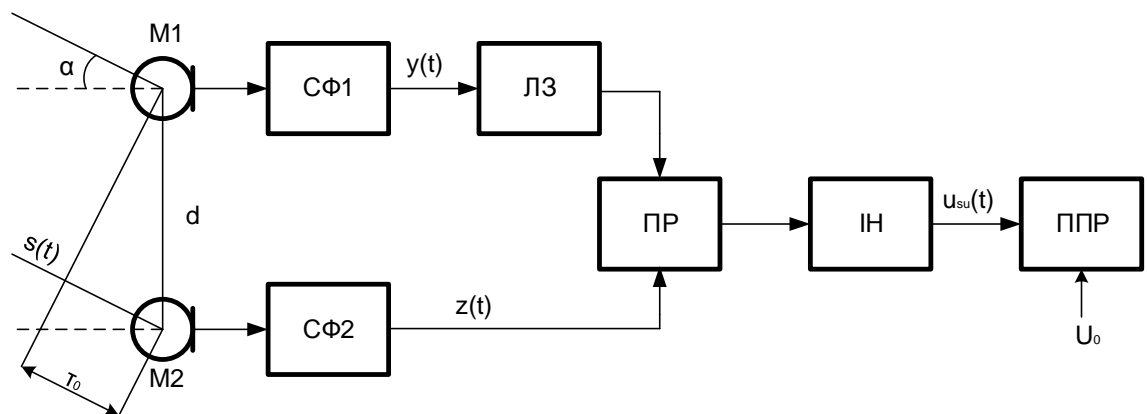


Рис.2.1.Схема кореляційного пеленгатора.

Нехай на входи мікрофонів (рис.2.1), розташованих на відстані  $d$  один від одного, під кутом  $\alpha$  падає акустична плоска хвиля  $s(t)$ . В зоні розташування мікрофонів діють акустичні завади  $n(t), m(t)$ . Завади відносяться до стаціонарних ізотропних процесів з нульовим математичним очікуванням. Шумовий сигнал випромінюється МЛІА розглядається як

стаціонарний анізотропний процес з нульовим математичним очікуванням і дисперсією  $\sigma_s^2$ . Шумовий сигнал і завади статистично незалежні. Прийняті мікрофонами хвилі  $y(t), z(t)$  є випадковими процесами записаними у вигляді:

$$\begin{aligned} y(t) &= s(t) + n(t), \\ z(t) &= s(t - \tau_0) + m(t). \end{aligned} \quad (2.1)$$

Відносна часова затримка  $\tau_0$  визначається по максимуму взаємної кореляційної функції (ВКФ)  $R_{yz}(\tau)$  між прийнятими хвилями на деякому часовому проміжку спостереження  $T$ :

$$\begin{aligned} R_{yz}(\tau) &= \frac{1}{T} \int_0^T [s(t) + n(t)][s(t - \tau_0 + \tau) + m(t + \tau)] dt = \\ &= R_{ss}(\tau - \tau_0) + R_{sm}(\tau) + R_{ns}(\tau - \tau_0) + R_{nm}(\tau), \end{aligned} \quad (2.2)$$

де  $R_{ss}(\tau - \tau_0)$  – кореляційна функція (КФ) вхідного сигналу із затримкою  $\tau_0$ ;  $R_{sm}(\tau), R_{ns}(\tau - \tau_0), R_{nm}(\tau)$  – ВКФ процесів, які діють на входи приймачів, наближаються до нуля із збільшенням часу спостереження  $T$ . КФ шумового сигналу визначається співвідношенням:

$$R_{ss}(\tau - \tau_0) = \sigma_s^2 \frac{\sin(2\pi\Delta f(\tau - \tau_0))}{2\pi\Delta f(\tau - \tau_0)} \cos(2\pi f_0(\tau - \tau_0)), \quad (2.3)$$

де  $\sigma_s^2 = N_s \Delta f$ ;  $N_s$  – спектральна густина потужності шумового сигналу;  $f_0, \Delta f$  – центральна частота та ефективна смуга спектру випромінювання.

Реалізацію алгоритму кореляційної обробки (3) забезпечує кореляційний пеленгатор (КП) побудований за схемою рис.2.1. Прийняті мікрофонами (М1, М2) звукові коливання трансформуються в електричні, проходять через смугові фільтри (СФ1, СФ2) налаштовані на смугу частот випромінювання МЛА. На виході СФ електричні коливання  $y(t), z(t)$  можна розглядати як стаціонарні нормальні процеси з нульовим математичним очікуванням і дисперсіями:  $\sigma_n^2 = \sigma_m^2, \sigma_s^2, \sigma_{sn}^2 = \sigma_{sm}^2$  – завад, сигнала та суміші відповідно. Один із процесів, пройшовши по ланцюгу затримки (ЛЗ), подається на вхід

перемножувача (ПР). На інший вхід перемножувача поступає другий процес. Результат перемноження поступає в інтегратор (ІН). На виході останнього формуються низькочастотні напруги  $U_n(T), U_{sn}(T)$  для ситуацій відсутності та наявності сигналу на вході приймача відповідно. Прийняття рішення про присутність сигналу визначається умовою  $U_{sn}(T) \geq U_0$  та реалізується в пристрої прийняття рішення (ППР). Значення  $U_0$  розраховується по заданому значенню ймовірності хибної тривоги  $F$  та середньоквадратичному значенню  $U_\sigma$  напруги  $u_{sn}(t)$  на виході інтегратору:

$$U_0 = U_\sigma \cdot \Phi^{-1}(1 - F), \quad (2.4)$$

де  $\Phi^{-1}(l)$  - функція обернена інтегралу ймовірностей  $\Phi(l)$ .

де  $C$  - швидкість звуку у повітрі.

Ймовірність виявлення  $D$  для КП розраховують як функцію відношення дисперсій сигналу до завади  $q_1^2 = \frac{\sigma_s^2}{\sigma_n^2} = \frac{\sigma_s^2}{\sigma_m^2}$  на виході СФ із смугою частот проходження рівною ефективній смузі сигналу. Скористаємось для розрахунку  $D$  виразом отриманим в [16,17]:

$$D = \Phi\left(\frac{2q_1^2 \sqrt{\Delta f T}}{\sqrt{1 + 2q_1^4}} - \frac{\Phi^{-1}(1 - F)}{\sqrt{1 + 2q_1^4}}\right). \quad (2.5)$$

На рис.2.2, приведено графіки характеристик виявлення(ХВ) приймачів побудованих по схемі КП і квадратичного детектору(КД) [18] для заданої ймовірності хибної тривоги  $F = 10^{-3}$ . Параметри налаштування приймачів  $M = \Delta f T$ : смуга частот СФ  $\Delta f = 1230 \text{Гц}$ ; час інтегрування  $T = 0.1$  та  $1 \text{с}$ .

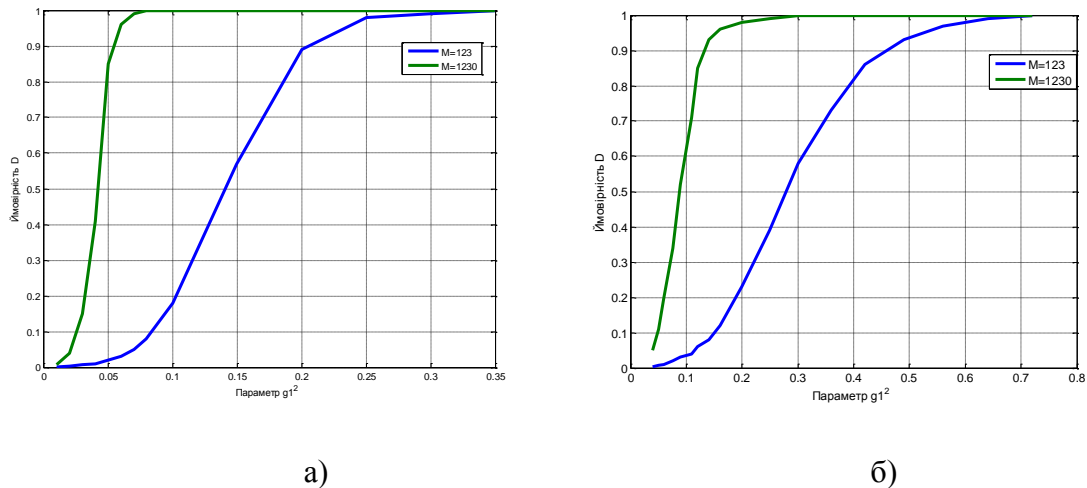


Рис.2.2. Характеристики виявлення приймачів: а) кореляційний пеленгатор;  
б) квадратичний детектор.

Порівнюючи ХВ для КП і КД можна оцінити вигравш корелятора при виявленні слабких шумових сигналів приблизно в 6 дБ. Такий вигравш дає можливість збільшити максимальну відстань виявлення (МВВ) дронів.

Встановимо правило прийняття рішення про виявлення сигналу. Використаємо співвідношення для С/З на виході СФ та його зв'язок з ВКФ (3) на виході корелятора:

$$q_1^2 = \frac{\sigma_s^2}{\sigma_n^2} = \frac{\sigma_s^2}{\sigma_m^2} = \frac{R_{ss}(\tau - \tau_0)}{R_{mm}(\tau)} = \frac{R_{yz}(\tau) - R_{sm}(\tau) - R_{ns}(\tau - \tau_0) - R_{nm}(\tau)}{R_{mm}(\tau)} = \frac{R_{yz}(\tau)}{R_{mm}(\tau)} - 1. \quad (2.6)$$

Електрична напруга на виході корелятора  $U_{sn}(T)$  пропорційна значенню потужності сигналу і завади на виході СФ. У відсутності сигналу на виході корелятора напруга  $U_n(T)$  дорівнює потужності завади. Встановимо з (6) правило прийняття рішення:

$$U_{sn}(T) \geq (1 + q_1^2)U_n(T), \quad (2.7)$$

Висновок. У разі перевищення вихідної напруги  $U_{sn}(T)$  КП значення напруги  $U_n(T)$  у відсутності сигналу на величину  $q_1^2$ , розраховану по заданим ХВ, будемо вважати дрон виявленим.

Визначення КПХ (пеленгу) ведемо наступним чином. Змінюючи час затримки в ЛЗ (рис.2.1) знаходять максимум вихідної напруги  $u_{sn}(t)$  на виході блоку ІН, визначають  $\tau_0$  і розраховують КПХ:

$$\alpha = \arcsin \frac{\tau_0 c}{d}, \quad (2.8)$$

Прогноз максимальної відстані виявлення дрона.

Дрон у вибраному діапазоні частот випромінює акустичні хвилі всенаправлено та може розглядатись як джерело сферичних хвиль. Сферичні хвилі розповсюджуючись ослабляються за рахунок поглинання в повітрі та розходження хвильового фронту. Звуковий тиск  $p_r$  та інтенсивність  $I_r$  на вході приймача, розташованого на відстані  $r$  від випромінювача, визначається відомими співвідношеннями [19]:

$$p_r = p_s \exp(-\alpha r) \frac{r_s}{r}, I_r = \frac{P_s^2}{\rho c} \exp(-2\alpha r) \left(\frac{r_s}{r}\right)^2 \quad (2.9)$$

де  $r_s$  - відстань, для якої визначено звуковий тиск випромінювання  $p_s$ ;  
 $\rho c$  - питомий хвильовий опір повітря;  $\alpha$  - коефіцієнт поглинання звуку в повітрі.

Акустична завада в зоні прийому характеризується тиском  $p_n$  та інтенсивністю  $I_n$ . Відношення  $C/3$  по тиску  $q$  та інтенсивності  $q^2$  (параметр виявлення) в зоні прийому визначається співвідношеннями:

$$q = \frac{p_r}{p_n}, q^2 = \left(\frac{p_r}{p_n}\right)^2 = \frac{I_r}{I_n}. \quad (2.10)$$

Величина коефіцієнта поглинання  $\alpha$  для частот нижчих 2кГц не перевищує 0.01 дБ/м [19], тому для вибраного діапазона частот випромінювання його не враховуємо. МВВ, для зручності використання в подальшому, знайдемо з (9) як функцію параметра виявлення (10):

$$r = \sqrt{\frac{I_s}{q^2 I_n}} r_s. \quad (2.11)$$

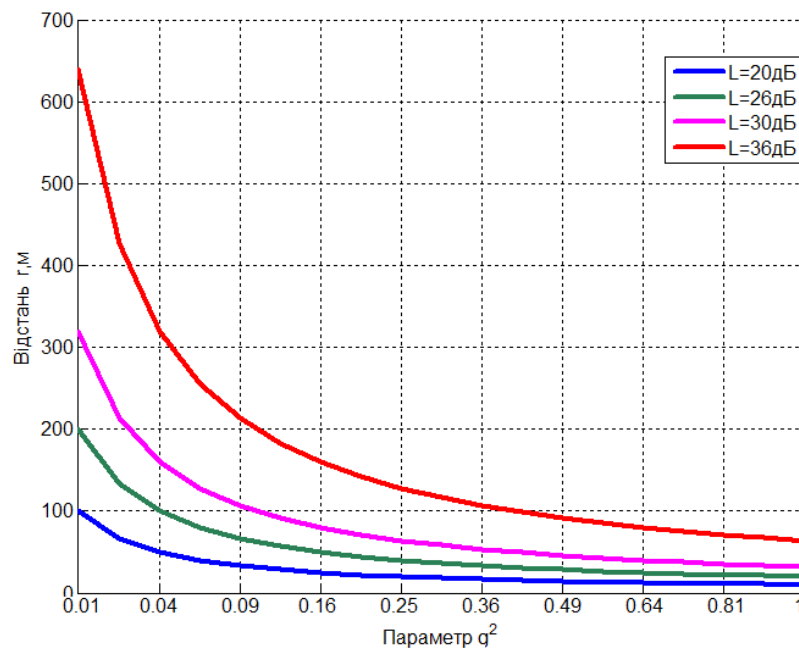


Рис.2.3. Залежність максимальної відстані виявлення від параметра виявлення

На рис.2.3 представлені графіки залежності МВВ від  $q^2$  для різниці рівнів  $L = 10 \lg \frac{I_s}{I_n} = L_s - L_n$  випромінювання об'єкта  $L_s$  і завади  $L_n$  за умови  $r_s = 1$  м. Аналізуючи графіки можна зробити висновок, що МВВ визначається відношенням С/З в зоні прийому. Чим менше величина сигналу який впевнено реєструє приймач тим більша відстань виявлення джерела випромінювання.

Враховуючи розглянутий вище алгоритм обробки шумового сигналу і акустичної завади КП та поклавши коефіцієнт трансформації мікрофоном акустичних хвиль в електричні рівним одиниці, можна записати рівність:

$$q_1^2 = \frac{\sigma_s^2}{\sigma_n^2} = \frac{p_s^2}{p_n^2} = q^2. \quad (2.12)$$

Співвідношення (12) дає можливість встановити зв'язок параметра виявлення з заданими ХВ та налаштуванням схеми КП і прогнозувати МВВ.

### 2.3 Приклад розрахунку МВВ квадрокоптера

Використаємо отримані результати для прогнозу МВВ по заданим  $D$  і  $F$  та відомим акустичним характеристикам квадрокоптера і заводи. Спочатку визначимо енергетичні характеристики заводи. З технічного завдання була задана ефективна смуги частот випромінювання  $\Delta f = 1230 \text{ Гц}$ , що перекриває три нормовані октавні смуги з середніми частотами [20]:  $f_{cp1} = 250 \text{ Гц}$ ;  $f_{cp2} = 500 \text{ Гц}$ ;  $f_{cp3} = 1000 \text{ Гц}$ . Рівень заводи задаємо довільно. Наприклад, для приміських територій по нормативам [20] він становить  $L_1 = 40 \text{ дБ}$ ;  $L_2 = 34 \text{ дБ}$ ;  $L_3 = 30 \text{ дБ}$  у визначених смугах частот відповідно. Розрахуємо потужність  $N_n$  та рівень потужності  $L_n$  акустичних завод в смузі частот випромінювання:

$$N_n = \sum_{i=1}^3 n_0 10^{0.1L_i}; n_0 = 10^{-12} \text{ Вт}; \quad (2.13)$$

$$N_n \approx 13.5 \cdot 10^{-9} \text{ Вт}; L_n = 10 \lg\left(\frac{N_n}{n_0}\right) = 41.3 \text{ дБ}$$

Рівень випромінювання квадрокоптера [14] на відстані  $r_s = 6 \text{ м}$  від мікрофона, скорегований по шкалі А, становить  $L_s = 72 \text{ дБА}$ . Знайдемо рівень звука в вибраній смузі частот випромінювання. Для цього спочатку розрахуємо середню спектральну густину потужності (СГП)  $N$  випромінювання скориговану по шкалі А в діапазоні частот  $\Delta f_A = (8000 - 18) \text{ Гц} = 7982 \text{ Гц}$ :

$$N = \frac{n_0 10^{0.1L_s}}{\Delta f_A}; N \approx 2 \cdot 10^{-9} \text{ Вт} / \text{Гц}.$$

Перейдемо до СГП  $N_{si}$  в октавних смугах  $\Delta f_i$  з середніми частотами  $f_{cp1} = 250 \text{ Гц}; f_{cp2} = 500 \text{ Гц}; f_{cp3} = 1000 \text{ Гц}$  взявши з [19] коефіцієнти корекції  $\Delta L_1 = 8.6 \text{ дБ}; \Delta L_2 = 3.2 \text{ дБ}; \Delta L_3 = 0 \text{ дБ}$  відповідно:

$$\begin{aligned} N_{si} &= N10^{0.1\Delta L_i}; i = 1, 2, 3; \\ N_{s1} &\approx 14.5 \cdot 10^{-9} \text{ Вм} / \text{Гц}; N_{s2} \approx 4.2 \cdot 10^{-9} \text{ Вм} / \text{Гц}; N_{s3} \approx 2 \cdot 10^{-9} \text{ Вм} / \text{Гц} \end{aligned} \quad (2.14)$$

По результатам (10) розрахуємо акустичну потужність  $N_s$  та рівень  $L_s$  в смузі частот випромінювання:

$$N_s = \sum_{i=1}^3 N_{si} \Delta f_i; N_s = 5.41 \cdot 10^{-6} \text{ Вм}; L_s = 10 \lg\left(\frac{N_s}{n_0}\right) = 67.3 \text{ дБ}; \quad (2.15)$$

Сформулюємо алгоритм прогнозу максимальної відстані виявлення. Для заданих ймовірностей  $D$  і  $F$  та вибраного параметра  $M = \Delta f T$  по графікам ХВ приведеним на рис.3 знаходимо  $q_1^2$ . Враховуючи рівність  $q^2 = q_1^2$  та знаючи різницю рівнів випромінювання і завади  $L$  визначаємо МВВ по відповідній кривій приведеній на рис.2.3.

Наприклад, по заданим ймовірностям  $D = 0.90$  і  $F = 10^{-3}$ , параметром виявлення  $q^2 = 0.13$  та різницею рівнів  $L = 26 \text{ дБ}$ , МВВ квадрокоптера приймачем з параметрами налаштування  $\Delta f T = 1230$  становить приблизно 60м.

## 2.4 Моделювання кореляційного приймача

Для підтвердження доцільності вибору у якості каналу виявлення кореляційного приймача та вірності проведених розрахунків характеристик виявлення було проведено моделювання у програмному середовищі Matlab. На основі схеми кореляційного приймача (рис.2.1) була розроблена імітаційна модель (рис 2 .12).



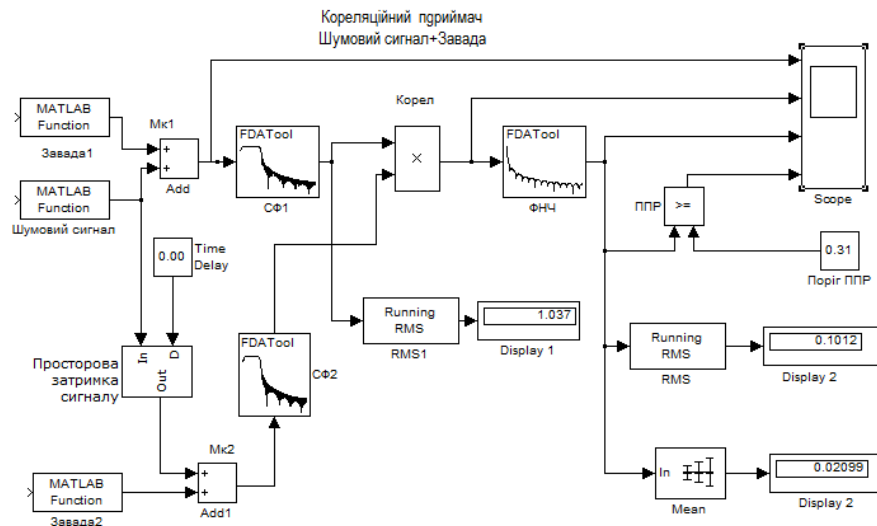


Рис.2.4. Імітаційна модель кореляційного приймача.

ІМ включає в себе блоки "Завода1", "Завода2" та генератор "Шумовий сигнал" які синтезують сигнал та заваду з відповідними параметрами. Їх суми поступають на смугові фільтри "СФ1" та "СФ2", з виходів останніх суміші поступають на два входи "Корелятора". На виході "ФНЧ" формуються низькочастотні напруги  $U_n(T), U_{sn}(T)$  для ситуацій відсутності та наявності сигналу на вході приймача відповідно. Ці напруги подаються на блок прийняття рішення "ППР". Порогове значення "ППР"  $U_0$  задається у блоці "Поріг ППР". У випадку присутності сигналу, визначеного умовою  $U_{sn}(T) \geq U_0$ , на виході блоку "ППР" з'являється "1". Процеси в кореляторі спостерігаються на осцилографі "Scope". Ефективне та постійне значення процесів розраховується блоками бібліотеки Matlab.

Задача моделювання. Виявити шумовий сигнал замаскований завадою кореляційним приймачем з двох мікрофонів розміщених на акустичній базі  $d$ . Хибна тривога  $F = 10^{-3}$ . Вірогідність виявлення  $- D = 0.9$ .

Вихідні дані для моделювання. Шумовий сигнал - нормальний процес з дисперсією  $\sigma_s^2$  та ефективною смугою частот  $\Delta f = 1200 \text{ Гц}$ . Завади -

нормальний широкосмуговий процес із дисперсіями  $\sigma_n^2 = \sigma_m^2$ . СФ1 та СФ2 мають смугу пропускання  $\Delta f = 1200 \text{ Гц}$ . Час інтегрування ФНЧ  $T = 0.1 \text{ с}$ .

Моделювання:

1. Визначимо по заданим ХВ  $F = 10^{-3}, D = 0.9$  та параметру налаштування КП  $M = \sqrt{\Delta f T} = 123$  значення  $q_1^2 = \frac{\sigma_s^2}{\sigma_n^2} = \frac{\sigma_s^2}{\sigma_m^2}$  на виході СФ.

Скористаємось відповідним графіком на рис.2.2а, знайдемо  $q_1^2 = 0.2$ .

2. Встановимо значення параметрів  $\sigma_n = \sigma_m$  та  $\sigma_s$  для блоків моделі "Завада1", "Завада2" та генератор "Шумовий сигнал" так, щоб на виході СФ1 та СФ2 була реалізована умова  $q_1^2 = 0.2 \Rightarrow q_1 = 0.44$ . Такими значеннями параметрів можуть бути  $\sigma_n = \sigma_m = 2.27; \sigma_s = 1.0$ .

3. Проведемо модельний експеримент з метою визначення значення  $U_n$  у відсутності сигналу, тобто  $\sigma_s = 0$ . По показанням вольтметра ефективного значення процесу на виході "ФНЧ" визначаємо  $U_n = 0.101$ . Розрахуємо згідно виразу (2.4) та встановимо в блоці "ППР" потрібний поріг  $U_0 = 3.07 U_n = 0.31$  (рис.2.4).

4. Експеримент у відсутності сигналу (рис.2.5а). Осцилограми демонструють обробку вхідного процесу. Треба зауважити, що у відсутності сигналу на вході - на виході КП постійна складова відсутня, а змінна  $U_n$  - незначна.

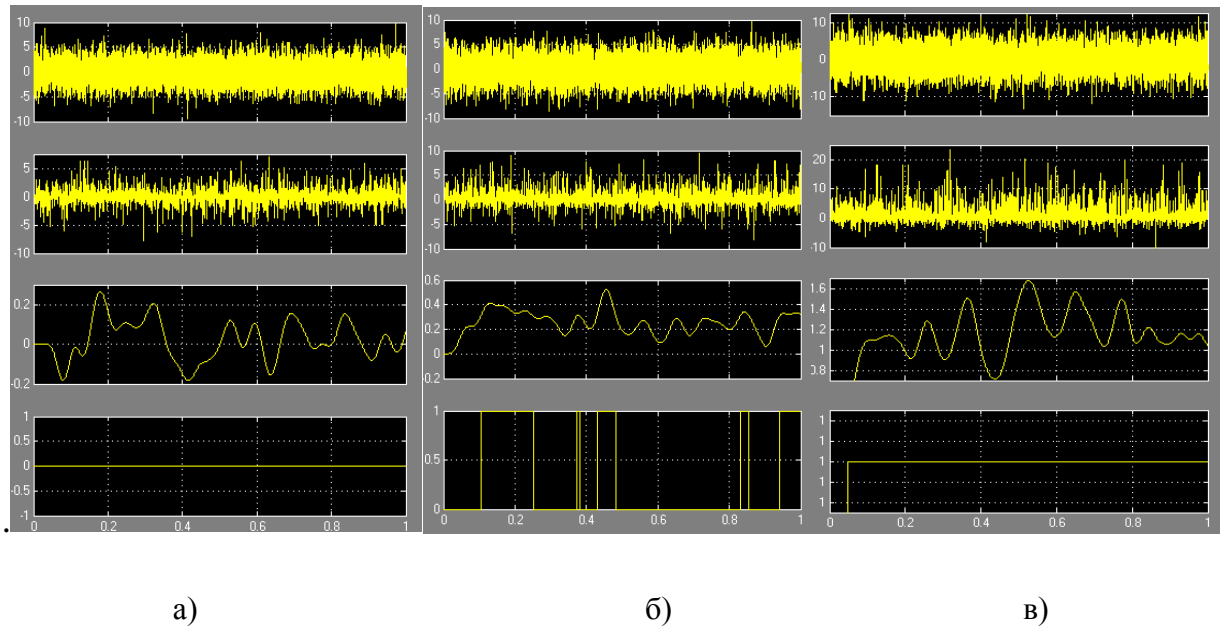


Рис.2.5.Осцилограми процесів в КП.

5. Експеримент за присутності сигналу (рис.2.5б). Відношення  $C/3$  на вході  $q_1 = 0.44$  відповідає вимогам по ХВ:  $F = 10^{-3}, D = 0.9$ . Параметри блоків "Завада1", "Завада2" та "Шумовий сигнал" відповідно  $\sigma_n = \sigma_m = 2.27; \sigma_s = 1.0$ . З осцилограми на виході "ППР" (рис.2.5б) видно що виявлення сигналу мало місце по завершенні 0.1с інтегрування. Наявність багатьох «1» на виході "ППР" вказує на межу виявлення. Збільшення сигналу  $\sigma_s = 2.27; q_1 = 1$  приводить до надійного виявлення шумового сигналу (рис.2.5в).

6. Експеримент "Пеленгування". Мета експерименту – побудова ВКФ та визначення параметру  $\tau_0$ . Змінюючи час затримки в блоці "Просторова затримка сигналу" (рис.2.4) знаходять значення вихідної напруги  $U_{sn}(T)$  на виході блоку "ФНЧ" по показанням вольтметра "Mean". По максимуму значень вольтметра визначають  $\tau_0$  і розраховують КПХ по виразу (2.8).

Спочатку визначимо крок зміни параметру  $\Delta\tau$  в блоці "Просторова затримка сигналу". Визначимо параметр кореляції та довжину акустичної бази, вибраної за умови відсутності просторової кореляції сигналу:

$$\tau = \frac{1}{2\Delta f} = 0.00042\text{с}; d = \frac{c}{2\Delta f} = \frac{340}{1200} = 0.142\text{м}$$

Виберемо крок моделювання:  $\Delta\tau = 0.1\tau \approx 0.4 \cdot 10^{-4}\text{с}$ .

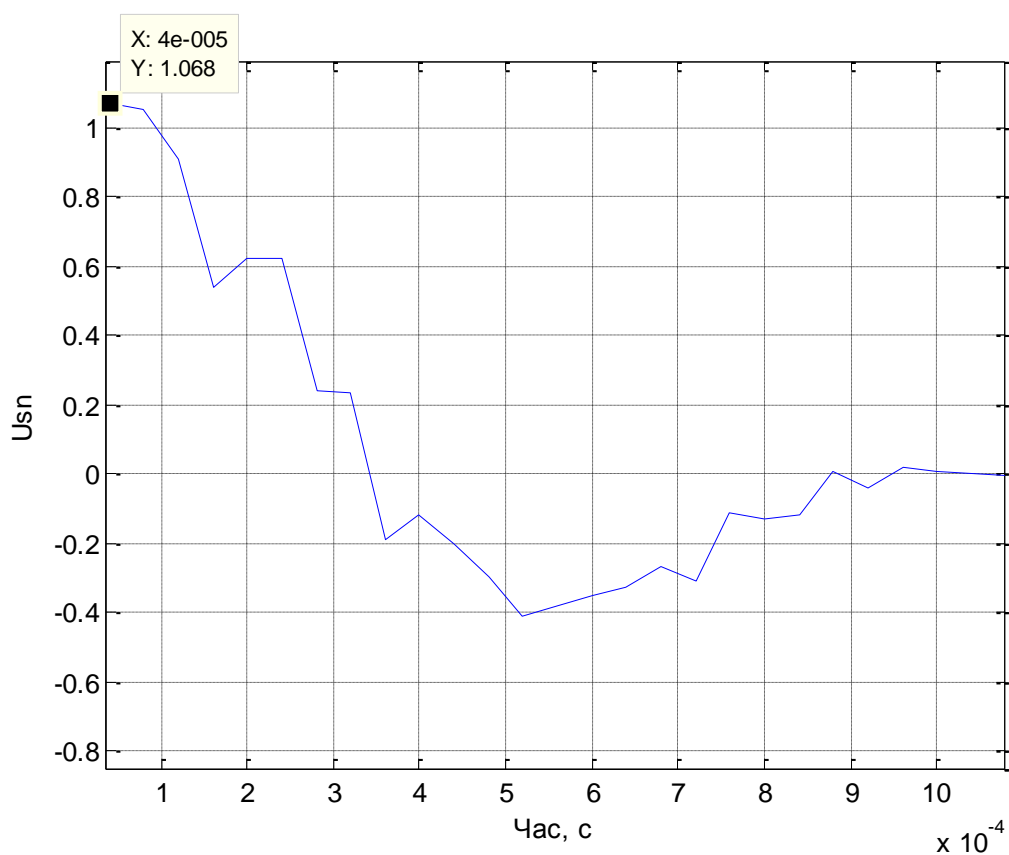


Рис.2.6. ВКФ для відношення С/З на вході  $q_1 = 1$ .

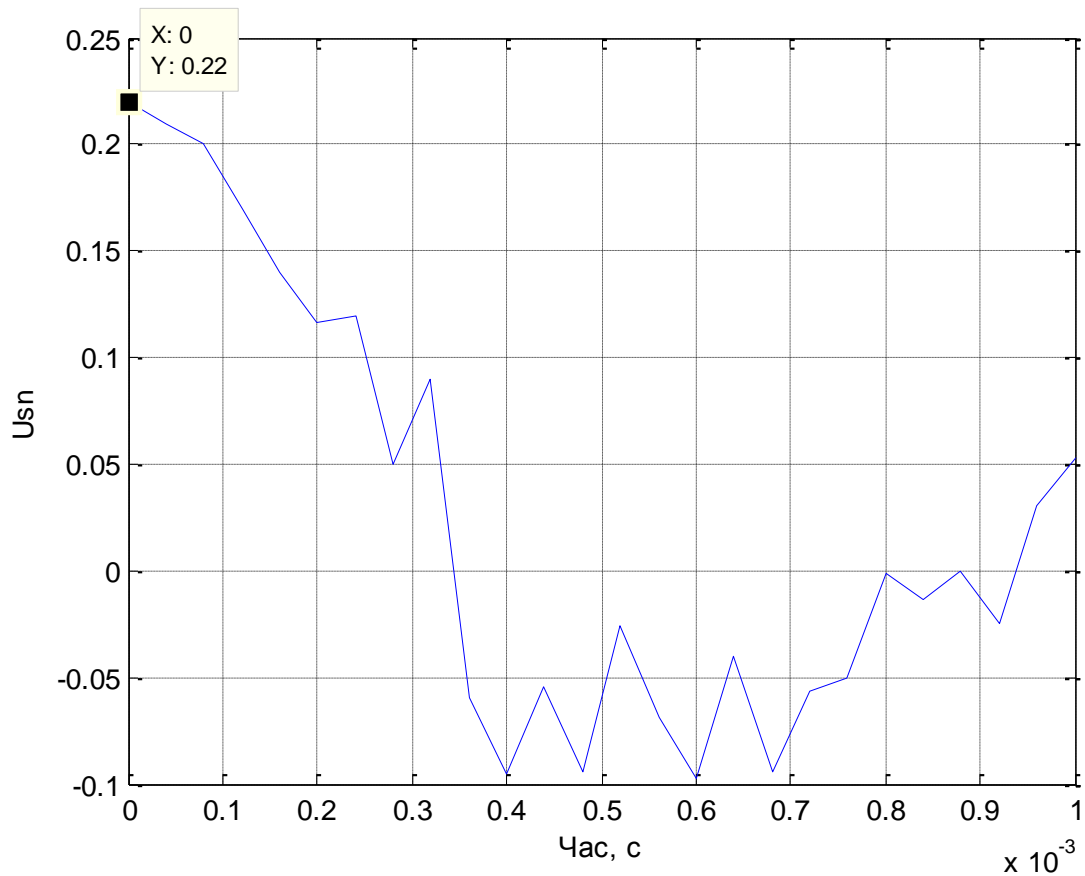


Рис.2.7. ВКФ для відношення  $C/3$  на вході  $q_1 = 0.44$ .

Результати моделювання підтвердили можливість визначення параметру  $\tau$  по ВКФ навіть для граничного значення відношення  $C/3$  на вході приймача  $q_1 = 0.44$ .

## 2.5 Висновки по розділу

В дисертаційній роботі проведено аналіз літературних джерел та встановлено акустичні характеристики МЛА: характер випромінювання – широкосмуговий шумовий процес з флуктуючими тональними дискретамі. Виходячи із завдання на роботу та враховуючи проведений аналіз літературних джерел розроблено технічне завдання на пристрій. Для виявлення і пеленгування МЛА запропоновано кореляційний приймач.

Для заданих значень умовних вірогідностей  $D$  і  $F$  розраховані характеристики виявлення. Встановлено параметр виявлення (відношення сигналу до завади на вході приймача) яке забезпечить задані ХВ.

Проведено прогноз максимальної відстані виявлення від відношення сигналу до завади в зоні прийому. Він суттєво залежить від рівня випромінювання МЛА та акустичних завад в зоні прийому. Важливим фактором є метеорологічна ситуація, а саме розподіл температури повітря з висотою та напрямом руху повітряних мас.

Розроблена імітаційна модель кореляційного приймача. Проведено модельний експеримент підтверджуючий проведені розрахунки. Результати моделювання підтвердили можливість визначення параметру  $\tau$  по ВКФ навіть для граничного значення відношення  $S/Z$  на вході приймача.

## РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТА

Метою розділу є ознайомлення з ідеєю стартап-проекту та її аналізом ринкових можливостей, маркетингової програми та ринкової стратегії.

### 3.1 Опис ідеї проекту

Дрони набувають дуже великого попиту. Їх використовують для відео зйомки в важкодоступних місцях, для розвідки, доставки та інших цілей. Відповідно з попитом на дронів і зростає попит на апарати та системи по їх виявленню задля захисту приватної власності, військових об'єктів і в цілому для контролю повітряного простору.

Далі послідовно проаналізовано та подано у вигляді таблиць: зміст ідеї, можливі напрямки застосування, основні переваги, які може отримати користувач товару та чим проект відрізняється від існуючих аналогів.

Таблиця 3.1. SWOT-аналіз

Сильні сторони	Слабкі сторони
1. На ринку мала конкуренція схожого продукту. 2. Актуальність проблеми дозволить досить легко знайти клієнтів. 3. Ризик незначний.	1. Конкуренти досить відомі компанії в світі. 2. Відсутність власної фінансової бази. 3. Відсутність фахівців для встановлення апарату. 4. Продукт може не прижитись на ринку.
Можливості	Загрози

<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Попит на продукт.</li> <li>2. Розширення потенційного підприємства.</li> <li>3. Залучення інвесторів.</li> <li>4. Використання в воєнних розробках.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Повільний старт.</li> <li>2. Втрата актуальності через нові покоління дронів.</li> </ol>
--	--

В табл. 3.1 наведено SWOT-аналіз. Споживачами можуть бути як компанії, які займаються охороною або звичайні люди. Розширювати потенціал підприємства можна за допомогою виготовлення різних моделей апарату під різні завдання, а поширювати продукт в маси слід за допомогою інтернет магазинів.

Проаналізувавши потенційних конкурентів, можна зробити висновок, що в боротьбі за ринок слід виготовляти максимально дешевий та ефективний продукт.



Таблиця 3.2. Розрахунок собівартості і ціни продукції

Найменування статей витрати і елементів ціни	Витрати:		
	На одиницю продукції, грн	Місячні, грн *35 – кількість приладів	На розробку(оплачується один раз), грн
Разом змінні витрати	1103.86	38635	18 936
1. Залучення професіоналів для розробки пристрою	0	0	4 500
2. Деталі та складові пристрою	900	31 500	0
3. Допоміжні матеріали	72	2 520	0
4. Затрати на енергію	0.43	15	0
5. Розробка електронного каталогу	0	0	2 100
6. Придбати патент	0	0	9 236
7. Реклама	131.43	4 600	0
8. Створення web-сторінки компанії	0	0	3 100
Разом постійні витрати	1 008.6	35 600	0
1. Амортизація	0	300	0
2. Комунальні послуги	65.71	2 300	0
3. Оренда приміщення	514.29	18 000	0
4. Заробітна плата працівникам	428.6	15 000	0
Собівартість(ЗВ+ПВ)	2 112.46	88 090	18 936
Повна собівартість	2 112.46	107 026	
Прибуток: -при мінімальному рівні ціни +9%	190 529	9 632 26 757	
-при максимальному рівні ціни +25%			
Оптова ціна: -при 9%	2302 2641	116 658 133 782	
-при 25%			
ПДВ(ставка 20%): -при 9%	460 528	23 331 26 756	
-при 25%			
Відпускна ціна підприємства: -при 9%	2 762 3 169	139 989 160 538	
-при 25%			
Рентабельність продукції		31% 50%	

Залучення професіоналів – це люди, які допоможуть створити оптимальний варіант приладу з найбільш сприятливими характеристиками.

Ціну патенту було в'зято для фіз.осіб, що являються авторами патенту, резидентів України – 9236 грн. На стадії розробки і формуванні справи, реклама – це участь в конкурсах і виставках, на які будуть витрачені кошти – близько 4600 грн.

За перший місяць доведеться витратити 107 026 грн, надалі кожен місяць це 88090 грн – постійних витрат. Реально продати близько 35 приладів за місяць, тоді ціна одиниці продукції складе 2112 грн 46 коп.

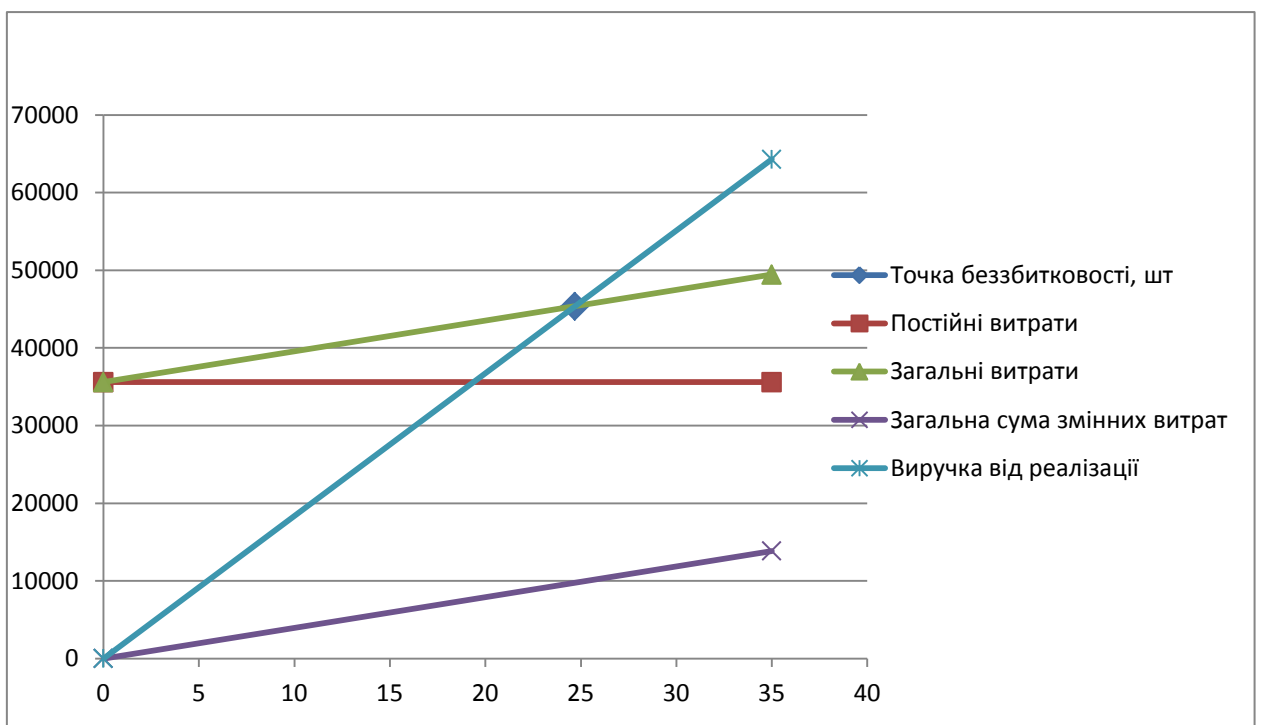


Рис.3.1. Точка беззбитковості при націнці на товарі 9%

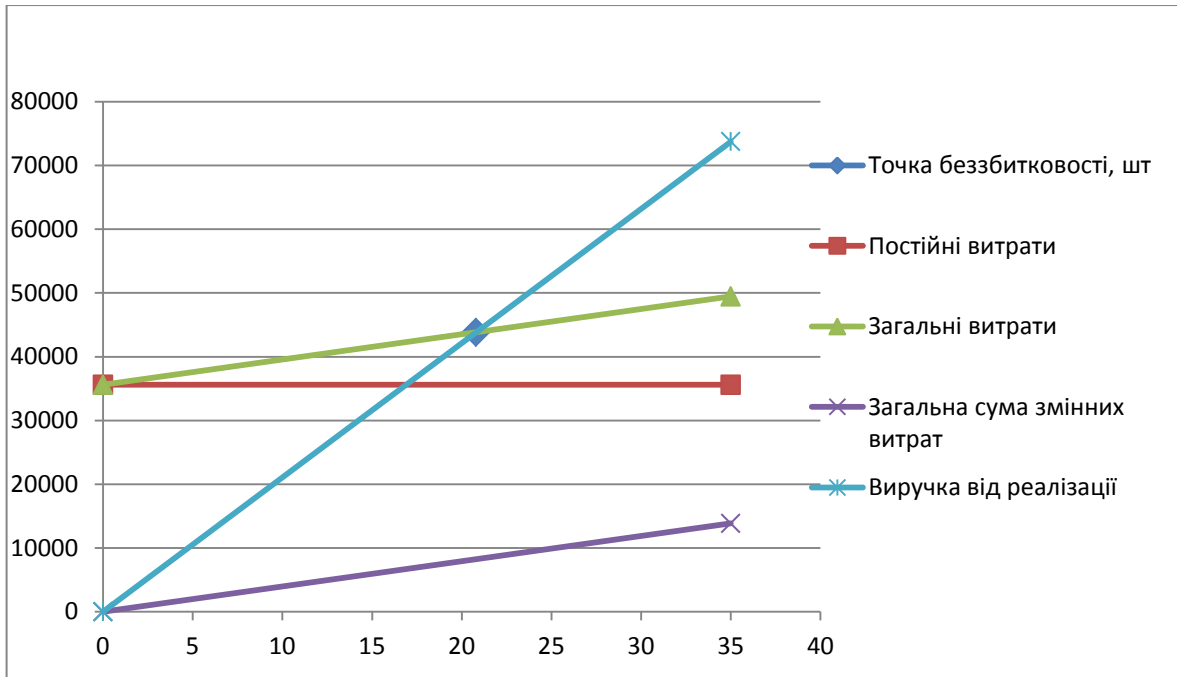


Рис.3.2. Точка беззбитковості при націнці на товарі 25%

Оплата працівникам підприємства: директор – 30 000 грн/міс., три інженера – по 20 000 грн/міс., секретар – 15 000 грн/міс., прибиральниця – 7 000 грн/міс, загальна зарплата рівна 112 000 грн/міс.

Перерахунок суми інвестицій :  $112\ 000 + 18\ 936 = 130\ 936$  грн.

Таблиця 3.3. Розрахунок грошового потоку

Рік	Сума інвестицій (CI)	Прибут. (B)	Витрат. (C)	$\frac{1}{(1+d)^t}$	$B \cdot \frac{1}{(1+d)^t}$	$C \cdot \frac{1}{(1+d)^t}$	Грош. потік (PV)
0	130936						
1		771565	589873	0,847	653515	499622	153893
2		771565	589873	0,718	553983	423528	130454
3		771565	589873	0,608	469111	358642	110468
Σ					1676611	1 281794	394816

1) Грошовий потік:  $PV = \sum_{t=1}^3 B \cdot \frac{1}{(1+d)^t} - \sum_{t=1}^3 C \cdot \frac{1}{(1+d)^t} = 394\,816$  грн

2) Дисконтний грошовий потік:

$$NPV = PV - CI = 394\,816 - 130\,936 = 263\,880 \text{ грн.}$$

$$3) BCR = \frac{\sum_{t=1}^3 \frac{B}{(1+d)^t}}{\sum_{t=1}^3 \frac{C}{(1+d)^t}} = 1.308$$

$$4) \text{ Індекс прибутковості } PI = \sum_{t=1}^3 \frac{B-C}{(1+d)^t} / CI = 3.0153$$

$$5) \text{ Середня рентабельність інвестицій } P_C = \frac{BCR-1}{t} \cdot 100\% = 7.7\%$$

### 3.2 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Таблиця 3.4. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту.

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од.	1
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	420 умовних одиниць
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Обмежень немає
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Специфічних вимог немає
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	7,5

Таблиця 3.5. Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Повільний старт	Нестача фінансової підтримки сповільнить вихід на ринок	Кооперація з компаніями, які виробляють щось схоже. Залучення інвесторів шляхом поширення ідеї на виставках чи щось на кшталт
2	Конкуренти	Аналоги все таки є, частина аудиторії довіряє конкуренту більше	Або об'єднатись з такими компаніями, або запропонувати ринку кращі умови
3	Умови надання послуг не задовольняють споживача	Споживач хоче від компанії повну підтримку та обслуговування продукту	Створити гарячу лінію для споживачів та за певну ціну надавати повну підтримку продукції

Таблиця 3.6. Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Попит на продукт	Продукт новий, тому легко приверне увагу	Робота з аудиторією та реклама. Конкуренція на початку буде слабкою або відсутня.
2	Вихід на міжнародний ринок	Заумовуспішного розвитку, продукт продаватиметься за кордоном	Відкриття декількох філіалів у Європі та США. Потрібно буде більше коштів, тому не виключено, що доведеться шукати спонсорів.
3	Залучення інвесторів	Потрібно швидко залучити інвесторів, щоб вийти на ринок першими.	Презентація товару на різних виставках та науково-технічних конференціях, поширення реклами в соц.мережах, магазинах електроніки.

Сфера ринку є відносно новою та швидко розвивається. Данні технології вводяться в розвинених країнах світу, що спричиняє зростання клієнтів на ринку, які в свою чергу збільшують попит на запропоновану систему в тому числі. Це призведе до збільшення об'ємів виробництва та заключення великої кількості контрактів, що в свою чергу створює вигідні економічні можливості для дослідження нових технологій, та покращення існуючої системи.

Таблиця 3.7. Ступеней аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентноспроможною)
1. Тип конкуренції <u>чиста</u>	Ми першими виходимо на ринок	Постійне вдосконалення товару
2. За рівнем конкурентної боротьби <u>державна</u>	Невеликий обсяг виробництва	Напочатку робити доставки в інші міста. Потім відкривати філії в містах
3. За галузевою ознакою <u>міжгалузєва</u>	Конкуренція у військовій галузі	На початку військові не є конкурентами.
4. Конкуренція за видами товарів <u>товарно-родова</u>	Аналогічні розробки можуть бути приховані (військовими).	В разі виходу військових на ринок – або модифікація свого продукту під їх, або доведення, що наш кращий
5. За характером конкурентних переваг <u>нецінова</u>	Аналогів немає	Ціну встановлюємо самостійно

Ринок є конкурентним, проте вид конкуренції є чистим, так як окремі гравці мало впливають на ціну товару. Конкурентний ринок є міжгалузєвим. Конкуренція за видами товарів – товарно-родова.

Таблиця 3.8. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	Прямої конкуренти в немає	Компанії, що обслуговують військових	Визначити фактори сили постачальників	Визначити фактори сили споживачів	Фактори загроз з боку замінників
Висновки	На початковому етапі конкуренція відсутня.	Можуть вийти на ринок в будь-який момент.	Постачальники продаватимуть складові апаратури	Бажання (умови) клієнтів будуть враховані	Аналогів немає

З аналізу можна зробити висновок, що запропонований пристрій має більший рейтинг відносно головного конкурента. SWOT-аналіз стартап-проекту: сильними сторонами продукту можна вважати низьку собівартість, високу продуктивність та надійність завдяки ідеї підтримки споживачів та встановленню продукції; слабкими сторонами є відносно слабка конкурентоспроможність для певної аудиторії. Можливо здійснити вихід на міжнародний ринок та збільшити попит.

Маркетингова кампанія відбувається за рахунок соціальних мереж та цільових рекламних кампаніях. Метою даних оголошень є донести усі перспективи та можливості даної системи для користувача.



### 3.3 Висновки по розділу

Було розроблено перший етап створення стартап-проекту. Кожна наукова робота повинна знаходити своє місце в застосуванні у реальному житті, тому стартап-проект може бути практичним відображенням наукової праці.

Спочатку було висвітлено зміст ідеї проекту. Для цього було розглянуто потенційних зацікавлених осіб, які в майбутньому можуть стати клієнтами запропонованої продукції. Також були розглянуті ризики реалізації продукції. Аналіз сильних та слабких сторін дають можливість визначити аспекти, на які слід звернути увагу.

Далі було проведено технічний аудит проекту. Були визначені технології, які використовуватимуться. Запропоновані технології вже існують, проте їх використання не дає переваги над конкурентом.

Після цього було проведено аналіз усіх аспектів ринку. Даний аналіз показав, що реалізація проекту можлива в реальних умовах, проте слід враховувати, що на ринку вже існують гравці з досить високою репутацією, що може зіграти негативну роль у впровадженні проекту. Для уникнення провалу проекту, потрібно провести потужну рекламну кампанію, якою донести до споживача усі переваги даного проекту, та необхідність обрати саме запропонований продукт.

## ВИСНОВКИ

Актуальність досліджуваної проблеми обумовлена зростанням кількості малих літаючих апаратів, які можуть нести загрозу як державним так і приватним інтересам.

Встановлено, що більшість МЛА мають декілька двигунів з двома лопатями. В польоті режими роботи двигунів змінюються в залежності від вітрового та ходового навантаження. При цьому змінюються і акустичне випромінювання. Проведений вище аналіз дає можливість встановити основні акустичні характеристики МЛА :

- Характер випромінювання – широкосмуговий шумовий процес з флуктуючими тональними дискретамі;
- Найбільш інформативний діапазон частот випромінювання лежить в межах(100-2000)Гц;
- Рівень випромінювання по шкалі А приведений до відстані 1 м становить приблизно (70 – 75)дБА

Для визначення координат джерела можна використати триангуляційний метод по відомим : базі D між двома пеленгаторами та двомпеленгам на об'єкт випромінення.

Для визначення пеленгу на джерело використаємо кореляційний метод пеленгування.

В дисертаційній роботі проведено аналіз літературних джерел та встановлено акустичні характеристики МЛА: характер випромінювання – широкосмуговий шумовий процес з флуктуючими тональними дискретамі. Виходячи із завдання на роботу та враховуючи проведений аналіз літературних джерел розроблено технічне завдання на пристрій. Для виявлення і пеленгування МЛА запропоновано кореляційний приймач. Для заданих значень умовних вірогідностей D і F розраховані характеристики

виявлення. Встановлено параметр виявлення (відношення сигналу до завади на вході приймача) яке забезпечить задані ХВ. Проведено прогноз максимальної відстані виявлення від відношення сигналу до завади в зоні прийому. Він суттєво залежить від рівня випромінювання МЛА та акустичних завад в зоні прийому. Важливим фактором є метеорологічна ситуація, а саме розподіл температури повітря з висотою та напрямом руху повітряних мас.

Розроблена імітаційна модель кореляційного приймача. Проведено модельний експеримент підтверджуючий проведені розрахунки. Результати моделювання підтвердили можливість визначення параметру  $\tau$  по ВКФ навіть для граничного значення відношення С/З на вході приймача.

Було розроблено перший етап створення стартап-проекту. Кожна наукова робота повинна знаходити своє місце в застосуванні у реальному житті, тому стартап-проект може бути практичним відображенням наукової праці.

Спочатку було висвітлено зміст ідеї проекту. Для цього було розглянуто потенційних зацікавлених осіб, які в майбутньому можуть стати клієнтами запропонованої продукції. Також були розглянуті ризики реалізації продукції. Аналіз сильних та слабких сторін дають можливість визначити аспекти, на які слід звернути увагу. Було проведено технічний аудит проекту. Запропоновані технології вже існують, проте їх використання не дає можливість переваги над конкурентом.

Аналіз аспектів ринку показав, що реалізація проекту можлива в реальних умовах, проте слід враховувати, що на ринку вже існують гравці з досить високою репутацією, що може зіграти негативну роль у впровадженні проекту. Для уникнення провалу проекту, потрібно провести потужну рекламну кампанію, в якій донести до споживача усі переваги даного проекту, та необхідність обрати запропонований продукт.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

[1]-Виявлення малих літальних апаратів заакустичним випромінюванням /Козерук С. О., Коржик О. В. НТУУ “КПІ ім. Ігоря Сікорського”. - Visnyk NTUU KPI Seria – Radiotekhnika Radioaparatabuduvannia, 2019, Iss. 76, pp. 15–20

[2] -Карташов В.М.Информационные характеристики звукового излучения малих беспилотных летательных аппаратов / В.М. Карташов, С.А. Шейко, С.И. Бабкин, И.В. Корытцев, О.В. Зубков // Радиотехника ХНУРЭ. – 2017. –Вып.191. – с.181-187.

[3] - Основи побудови радіолокаційних засобів розвідки повітряного простору: конспект лекцій / К. С. Васюта, О. В. Тесленко, В. М. Купрій, О. А. Малишев. – Х.: ХУПС, 2013. – 212 с.

[4] - Патент Англії № 1360345, H4D, від 17.07.74.

[5] - Митько В.В.,Евтюттов А.П., Гуцин С.Е. Гидроакустические средства связи и наблюдения –Л.: Судостроение,1982-200 с.

[6] - В.Н. Тяпкин, А.Н. Фомин, Е.Н. Гарин Основы построения радиолокационных станций радиотехнических войск. Красноярск, 2011. – 536 с.

[7]-Телятников В.И. Методы и устройства для определения местоположения источников звука. – Зарубежная радиоэлектроника. 1978, №4, с. 66-86.

[8] – NASA Technical Reports Server: Cabell, Randolph, McSwain, Robert, Grosveld, Ferdinand «Measured Noise from Small Unmanned Aerial Vehicles» [Електроннийресурс] // Conference Paper. – 2016.

[9] - Finn A. and Franklin S. (2011) Acoustic Sense & Avoid for UAV's, 2011 Seventh International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing, pp.586-589.DOI:10.1109/ISSNIP.2011.6146555

[10] - Case E.E. , Zelnio A.M. and Rigling B .D . (2008) Low-Cost Acoustic Array for Small UAV Detection andTracking.

[11] - Pham T. and Sim L. (2002) Acoustic Data Collection of Tactical Unmanned Air Vehicles (TUAVs).

[12] - Drone Labs [Електронний ресурс]. Режим доступу:<http://www.drone-detector.com>

[13] - O.V. Korzhyk, O.H. Leiko, andV.S. Didkovskyi, *Shumi i vibratsiyi [Noisesandvibrations: Textbook]*. Kyiv: TOVImeks-LTD, 2010.

[14] - K.Massey, R Gaeta. Noise measurements of tactical UAVs.In 16th AIAA/CEAS aeroacoustics conference (p. 391).

[15] - Damarla, T. Battlefield Acoustics [Text] /T. Damarla // Springer International Publishing – 2015. – 262p.

[16] - Ольшевский В.В. Статистические методы в гидролокации.- Л.: Судостроение, 1973.- 184 с.

[17] - Евтютов А.П., Митько В.Б. Примеры инженерных расчетов в гидроакустике.- Л.: Судостроение, 1981.- 256 с

[18] - КозерукС.О.,КоржикО.В.Виявленнямалихлітальнихапаратівзаакустичнимвипромінюванням//ВісникНТУУ"КПІ". СеріяРадіотехніка, Радіоапаратобудування. – 2019. – №. 76. – С. 15-20.

[19] - ДідковськийВ.С., КоржикО.В, ЛейкоА.Г. Шумивібрації. Підручник/ В.С.Дідковський, О.В. Коржик, А.Г. Лейко. – Київ: ТОВІмекс-ЛТД, 2010.-336с.

[20] - DBN V.1.1-31:2013. Zakhistteritoriy, budinkiv ta sporud vid shumu.[Electronicresource]:[dbn.co.ua/load/normativy/dbn/zakhist\\_vid\\_shumu/1-1-0-1814](http://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/zakhist_vid_shumu/1-1-0-1814)

[21] - В. Magliozzi, D.B. Хансон и Р.К. Амье. Пропеллер и профан шумы. В Харви Х. Хаббард, редактор, Аэроакустика летательных аппаратов: теория и практика: Том 1: Источники шума, номер NASA RP-1258, страницы 1-64, 1991.