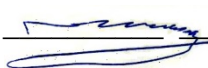


НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ
КАФЕДРА АКУСТИЧНИХ ТА МУЛЬТИМЕДІЙНИХ СИСТЕМ

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

 Найда С.А.
 (підпис) (ініціали, прізвище)

“01” червня 2020 р.

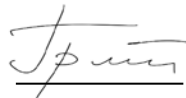
Дипломна робота
 на здобуття ступеня бакалавра

зі спеціальності (спеціалізації) 171 «Електроніка»

на тему: Акустичний детектор малих літальних апаратів

Виконав: студент 4 курсу, групи ДГ-г61-1

Гриша Федір Сергійович

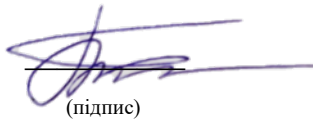


Керівник доцент кафедри АМЕС, доц., к.ф-м.н., Козерук С.О.

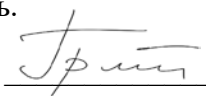


Консультант _____
 (назва розділу) (посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент Професор каф ЕІ, доц, д.т.н . Прокопенко Ю.В.
 (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 
 (підпис)

Київ – 2020 року

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

Факультет електроніки

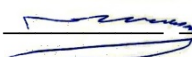
Кафедра акустичних та мультимедійних систем

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність (спеціалізація) 171 «Електроніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

 Найда С.А.
(підпис) (ініціали, прізвище)

“01” червня 2020 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проект (роботу) студенту

Гриша Федору Сергійовичу

1. Тема проекту (роботи): Акустичний детектор малих літальних апаратів

керівник роботи: доцент кафедри АМЕС, доц., к.ф.-м.н., Козерук С.О.,

затверджені наказом по університету від «__» _____ 20__ р. № _____

2. Строк подання студентом проекту (роботи) _____

3. Вихідні дані до проекту (роботи): Рівень випромінювання не перевищує 80дБ, рівень завади в зоні спостереження становить 40дБ.

4. Зміст (дипломної роботи) пояснювальної записки (перелік завдань, які потрібно розробити): Аналітичний огляд інформаційних джерел. Визначення акустичних характеристик випромінювання літальних апаратів. Запропонувати приймач. Оцінка максимальній дальності виявлення. Комп'ютерне моделювання приймача.

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): презентація в Power Point

6. Консультанти розділів проекту (роботи)*

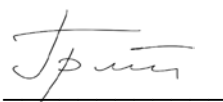
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1.	Огляд інформаційних джерел	15.04.20	Виконав
2	Визначення акустичних характеристик	20.04.20	Виконав
3	Аналіз відомих технічних рішень детекторів акустичних сигналів	25.04.20.	Виконав
4	Обґрунтування методу та схеми приймача	05.05.20	Виконав
5	Комп'ютерне моделювання	15.05.20	Виконав
7	Проведення модельного експерименту	24.05.20	Виконав
8	Висновки	25.05.20	Виконав
9	Оформлення роботи	05.06.20	Виконав

Студент



Гриша Ф.С.

Керівник проекту (роботи)



Козерук С.О.

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

АНОТАЦІЯ

Дипломна робота містить основну частину на 30 аркушах, 18 ілюстрацій, 1 таблицю.

Метою роботи є створення детектора безпілотних літальних апаратів. В ході аналізу літературних джерел були встановлені їх акустичні характеристики та способи виявлення. Було запропоновано використання типового каналу виявлення по схемі квадратичного детектора.

Розроблено приймач по схемі типового каналу виявлення. Проведено оціночні розрахунки даних дальності виявлення джерела. Побудовано віртуальну імітаційну модель за допомогою середовища Simulink. Проведено модельні експерименти в ході яких встановлено надійне виявлення при відношенні сигнал/завада 0.7.

Ключові слова: *малий літальний апарат, акустичне випромінювання, типовий канал виявлення, дальність виявлення.*

ANNOTATION

Thesis contains the bulk of 30 pages, 18 illustrations, 1 table.

The purpose of the work is to create a detector of unmanned aerial vehicles. During the analysis of literary sources, their acoustic characteristics and methods of detection were determined. It has been proposed to use a typical quadratic detector detection channel.

A receiver according to a typical detection channel scheme has been developed. Estimated calculations of source detection range data were performed. Built a virtual simulation model using Simulink. Model studies were carried out in the course of which valid parameters of blocks were set at signal-interference ratio 0. 7.

Keywords: *Acoustic detector, Small aircraft, acoustic detection, typical detection channel*

ЗМІСТ

СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	7
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ПРОБЛЕМИ.....	9
1.1 Класифікація безпілотних літальних апаратів.....	9
1.1.1 Загальні характеристики БПЛА.....	9
1.1.2 Характеристики деяких безпілотних апаратів.....	11
1.2 Акустичні характеристики безпілотних літальних апаратів.....	15
1.3 Виявлення безпілотних літальних апаратів.....	18
1.4 Висновок до розділу.....	22
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА АКУСТИЧНОГО ДЕТЕКТОРА МЛА.....	23
2.1 Задача та алгоритм виявлення.....	23
2.2 Розрахунок максимальної дальності виявлення.....	25
2.3 Комп'ютерне моделювання процесу детектування типовим каналом виявлення.....	27
2.3.1. Побудова імітаційної моделі.....	27
2.3.2 Проведення модельного експеримента.....	30
2.4 Висновки по моделюванню.....	32
ВИСНОВКИ.....	33
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	34

СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

БПЛА	- безпілотний літальний апарат;
МЛА	- малий літальний апарат;
ТКВ	- типовий канал виявлення;
КВ	- канал виявлення;
М	- мікрофон;
СФ	- смуговий фільтр;
КД	- квадратичний детектор;
ФНЧ	- фільтр нижніх частот;
ППР	- пристрій приймання рішення;
С/З	- відношення сигнал-завада.

ВСТУП

Малі літальні апарати (МЛА), або дрони використовують для моніторингу земної і водної поверхонь, екологічний контроль. Енергетична сфера – для моніторингу трубопроводів. Сфера охорони важливих об'єктів, як атомна електростанція. Тобто МЛА– це не просто літаючий апарат, а технологія, якій під силу доставляти вантажі та збирати різного типу інформацію. На сьогоднішній день використання безпілотних літальних апаратів набуває все більшого поширення у різних військових та цивільних галузях, виконуючи різноманітні функції в залежності від потреб користувача. Застосування радіолокації дозволяє виявити і локалізувати об'єкт на достатній відстані, але реалізація подібних пристроїв потребує значних витрат ресурсів та фінансів. Погодні умови обмежують відстань спостереження оптичних засобів виявлення. Акустичні засоби використовують пасивні методи пеленгування, забезпечують непомітне спостереження, але мають невелику дальність виявлення. Одним із способів підвищення ефективності пеленгаторів є збільшення їх відстані виявлення. Тому метою роботи є розрахунок детектора МЛА за акустичним випромінюванням та оцінка максимальної відстані детектування.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ПРОБЛЕМИ

1.1 Класифікація безпілотних літальних апаратів

На сьогоднішній день використання безпілотних літальних апаратів набуває все більшого поширення у різних військових та цивільних галузях, виконуючи різноманітні функції в залежності від потреб користувача.

1.1.1 Загальні характеристики БПЛА

Спираючись на роботу [1] можна виділити деякі характеристики.

Застосування безпілотних літальних апаратів за призначенням:

1. Транспортування

Доставка вантажів різних габаритів без пілота у автономному варіанті по запрограмованому маршруту.

2. Аерофотозйомка

Аерофотозйомка місцевості з стратегічною, дослідницькою або художньою цілями.

3. Забезпечення безпеки

Охорона об'єктів і людей: моніторинг стратегічно важливих об'єктів.

У надзвичайних ситуаціях: попередження при виникненні НС, виконання рятувних та пошукових робіт, радіаційний контроль місцевості.

4. Військова сфера

Військові БПЛА виконують такі завдання:

4.1.розвідувальні дії;

4.2.передача відомостей в наземний пункт в реальному часі;

4.3.бойова атака;

4.4.наведення авіації на наземні цілі;

4.5.коригування вогню ракетних військ;

4.6.відведення уваги противника через створення помилкових цілей;

4.7. ретрансляція зв'язку.

Також, безпілотні літальні апарати можуть бути класифіковані за способом керування, типом конструкції апарата і технічними характеристиками, такими, як розміри і маса.

Класифікація БПЛА за способом керування:

1. Дистанційно-пілотуючий спосіб. При цьому способі керування польотом відбувається у двох режимах:

2. ручне керування, відбувається за рахунок керування оператором безпілотного літального апарату в режимі реального часу;

3. автоматизоване керування відбувається автономно, з можливістю його корегування. Попередньо вводять координати точок маршруту, визначаючи положення літального апарату в даний момент часу за допомогою навігаційних систем.

4. Автоматичний спосіб. Керування здійснюється автопілотом по заздалегідь заданій траєкторії на заданій висоті з заданою швидкістю і з стабілізацією кутів орієнтації.

Найбільш розповсюдженим на сьогоднішній день є дистанційно-пілотуючий спосіб, що дозволяє в режимі реального часу проводити дослідження необхідної місцевості та об'єктів. Оператор за допомогою цифрових засобів з землі керує безпілотним літальним апаратом, або вносить зміни в заданому маршруті. Але з точки зору захисту від завад спричинених електромагнітним впливом цей спосіб є найбільш вразливим.

За типом конструкції безпілотні літальні апарати поділяються на БПЛА з конструкцією фіксованого крила і на БПЛА з крилом, що обертається.

Безпілотні літальні апарати фіксованого крила – це безпілотні літаки, які для піднімаються у повітря за допомогою прямого поштовху по прямому крилу, завдяки якому отримують підйомну силу. Вони потребують відносно високої пускової швидкості, щоб отримати цю підйомну силу, тому не підходять для роботи в обмеженому чи небезпечному навколишньому середовищі.

Безпілотні літальні апарати з крилом, що обертається для підняття у повітря використовують несучі гвинти. В свою чергу поділяються на одnogвинтові та багатогвинтові:

1. одnogвинтові – ці схеми використовуються для побудови вертольотів. Вони зазвичай використовують привідний несучий гвинт, що забезпечує підйомну силу, що врівноважується хвостовим рульовим гвинтом;
2. багатогвинтові (мультикоптер) – мають більше двох несучих гвинтів для керування всіма формами руху.

При зміні розмірів і маси безпілотних літальних апаратів також змінюються їх можливості що до безперервного перебування у повітрі без під заправки. Від цього залежить категорія безпілотного літального апарату. Далі наведена таблиця класифікації БПЛА за розмірами та масою (табл. 1.1).

Табл. 1.1. Класифікація БПЛА за розмірами та масою

Класифікація	Категорія	Взлітна маса [кг]	Висота польоту [м]	Час польоту [год]
Мікро та міні	Мікро	0.1	250	1
	Міні	30	150-300	2
Тактичні	Близької відстані	150	3000	2-4
	Середнього діапазону	150-500	3000-5000	6-10
	Дальнього діапазону	150-500	5000	9-13
	Високо витривалий	2500-12500	15000-20000	24-48
Стратегічні	Смертоносний	250	3000-4000	3-5
Спеціального призначення	Приманка	250	50-5000	4
	Стратосферний	-	20000-30000	48

1.1.2 Характеристики деяких безпілотних апаратів

Mavic Mini (рис. 1.1) – як зазначено на інтернет ресурсі компанії виробника [2], найменший на даний час існуючий безпілотний літальний апарат. Є любительським квадрокоптером і знаходиться у вільному доступі для всіх

бажаючих. Розроблений китайською компанією DJI і поступив у продаж наприкінці 2019 року.

При створенні Mavic Mini компанія-виробник намагалася досягти найменшої можливої ваги для безпілотного літаючого апарату. Дрон важить 249 грамів, що дозволяє обходитися без потреби реєстрації дрона у США.

Керування дроном може відбуватися за допомогою пульта дистанційного керування, на безпілотнику встановлено камеру, що має можливість трансляції зображення на смартфон зі встановленою на ньому операційною системою iOS 10.0 або Android 5.0 і пізніших версій.



Рис 1.1 Дрон Mavic Mini та його комплектуючі

Технічні характеристики:

1. Злітна маса: 249г.
2. Розміри:
 - 2.1. у складеному стані: довжина – 140 мм, ширина – 82 мм;

- 2.2. у розкладеному стані: довжина – 160 мм, ширина – 202 мм;
- 2.3. у розкладеному вигляді (з пропелерами): довжина – 245 мм, ширина – 290.
- 3. Розмір за діагоналлю: 213 мм.
- 4. Максимальна висота польоту над рівнем моря: 3000 м.
- 5. Максимальний час польоту 30 хвилин.

General Atomics MQ-9 Reaper (рис. 1.2) — розвідувально-ударний БПЛА. Розроблений американською компанією General Atomics Aeronautical Systems. Був створений для використання в першу чергу американськими та британськими ВПС. Перший політ відбувся 2 лютого 2001 року. Прототипом став MQ-1 Predator. Оснащений турбогвинтовим двигуном. Використовувався під час бойових дій в Афганістані, а також для патрулювання кордону з Мексикою.

На літальний апарат встановлена радіолокаційна станція AN/APY-8 Lynx II з синтезованою апаратурою, що знаходиться в носовому відсіку здатна працювати в режимі картографії. А також комбіновану електро-оптичну і теплові зорну прицільну станцію [3].

Технічні характеристики:

- 1. Розмах крила: 20 м.
- 2. Довжина: 11 метрів.
- 3. Максимальна висота підйому (стеля): 15 км.
- 4. Максимальний час автономного польоту: 16-28 год.
- 5. Дальність польоту: 5920 км.
- 6. Вантажопідйомність: 1700 кг.
- 7. Злітна маса: 2223 кг (порожній); 4760 кг (при максимальному завантаженні).
- 8. Розмах крила: 20 м.
- 9. Максимальна швидкість: 400 км/год.



Рис 1.2 General Atomics MQ-9 Reaper

М-7 «Небесний патруль» (рис. 1.3) - ціле сімейство українських цивільних безпілотних літальних двохмоторних апаратів. Керування ними здійснюється дистанційно. Розробкою займався науково-виробничий центр безпілотної авіації «Віраж» Національного авіаційного університету. Безпілотний літальний апарат «Небесний патруль М-7» призначений для картографії і аерофотозйомки, а також відеоспостереження в реальному часі. Являє собою двомоторний літальний апарат нормальної схеми з високим розташуванням крила, винесеного на двох пілонах [4].

Технічні характеристики:

1. Вантажопідйомність: 55 кг.
2. Довжина: 3,7 м.
3. Розмах крил: 5,16 м.
4. Злітна маса: 80 кг (порожній); 150 кг (при максимальному завантаженні).
5. Максимальна швидкість: 190 км/год.



Рис 1.3 М-7 «Небесний патруль»

1.2 Акустичні характеристики безпілотних літальних апаратів

Для наведення акустичних характеристик БПЛА було використано результати досліджень на чотирьох комерційно доступних дронах [5]. Серед досліджуваних зразків були БПЛА з фіксованим крилом, трикоптер, квадрокоптер та гексакоптер. Під час дослідження були виміряні такі акустичні характеристики, як спектральний склад шуму, рівні звуку та час, що змінює характер звукового поля. Під час дослідження дрони мали корисне навантаження. Можливе припущення, що шум з корисним навантаженням буде відрізнятися від шуму без корисного навантаження. На це впливає зменшення частот проходження лопатей через меншу тягу. Далі наведені протестовані дрони та їх деякі характеристики (рис 1.4).



Figure 1: Tested vehicles(1 to r: Y6, Edge 540, Phantom 2, Hex Flyer)

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

Рис 1.4. Протестовані дрони та їх деякі характеристики

Спектральна характеристика (рис. 1.5) будується на основі звукового тиску кожного дрона до 2 кГц. Спектри були розраховані з використанням вікна Хеммінга з 7 секунд часу. У вимірюваних шумах всіх чотирьох літальних апаратів домінують шуми пропелера, в тому числі вузькосмуговий детермінований шум та широкосмуговий шум. Також спостерігається нестабільний шум, що має періодичну природу, викликаний порушенням руху в наслідок фюзеляжу, або інших роторів, за умови вищих гармонік частоти проходження лопаті, який є важливим шумовим джерелом. Чим і пояснюються високі рівні при цих вищих гармоніках.

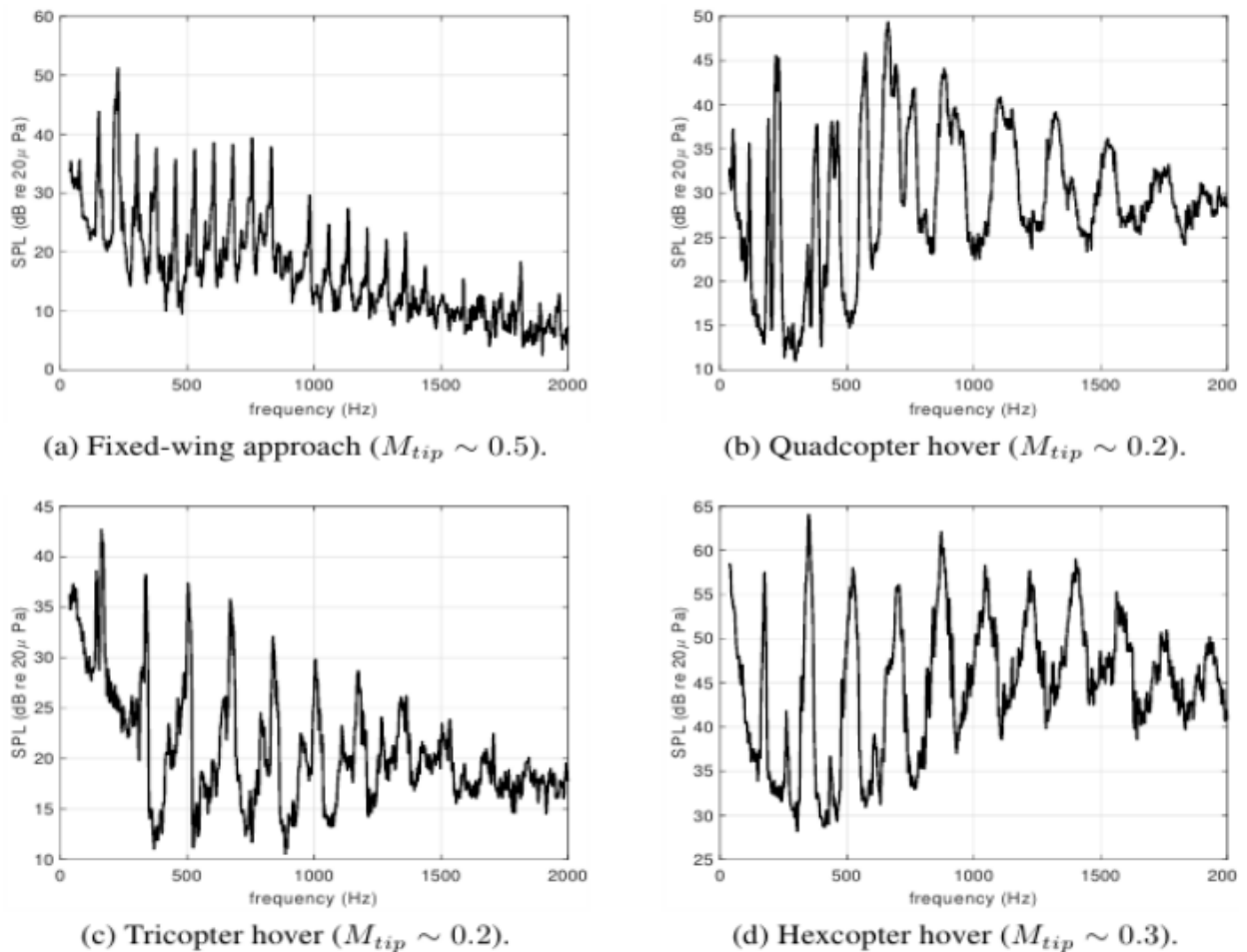


Рис 1.5. Порівняння спектральних характеристик

Частота обертання ротора двигуна та кількість лопатей на його осі впливають на звукові характеристики пропелера. Частота дискретів в періодичному спектрі випромінювання залежить від кількості обертів двигуна. Частоти f_i максимумів спектру визначаються як $f_i = N f_0 i$, $i = 1, 2, 3 \dots$, де f_0 - частота обертання двигуна, N - кількість лопатей пропелера.

У спектрі дрона присутні декілька близьких дискрет. А такі фактори, як режим польоту та сила вітрового навантаження, впливає на швидкість обертання кожного з електродвигунів окремо, впливають на положення дискрет на осі частот у часі. Вище перераховані фактори також впливають на випадкову зміну величини і частоти, що можуть розглядатись як широкосмуговий шумовий процес з гармонічними компонентами. Форма корпусу дрону впливає на форму шумів його обтікання, що мають як високочастотну, так і низькочастотну

складові. Але, аеродинамічні шуми обтікання не використовуються для виявлення літального апарату через суттєву залежність від форми його корпусу. Шляхом дослідження акустичних характеристик квадрокоптера за допомогою експериментів, було встановлено широкосмугову шумову складову і багатокомпонентну гармонійну структуру випромінювання в діапазоні частот до 10 кГц. Навіть при відсутності руху безпілотного літального апарату, тобто, коли він зависає у повітрі, спостерігається випадкова зміна значень фази гармонік та їх амплітуди. Це пояснюється тим, що автоматика безпілотного літального апарату компенсує вітровий вплив, в результаті чого спостерігаються розбіжності роботи двигунів.

Таким чином можна стверджувати що акустичні характеристики більшості розглянутих МЛА це шум з наступні параметри:

1. Смуга інформаційних частот 125-2000Гц;
2. Рівень випромінювання -60-80 дБА

1.3 Виявлення безпілотних літальних апаратів

Виявлення дронів є доволі проблематичною задачею. Це пов'язано з їх низькою помітністю в електромагнітних та акустичних діапазонах хвиль. Ці складнощі обумовлені особливістю траєкторії руху дронів, адже вона може змінюватися від одиниць до десятків метрів, а також їх динамікою руху. БПЛА можуть як зависати в повітрі, так і прискорюватись у довільному напрямку. Виявлення дронів за допомогою радіолокації можливе на відстані до 1000 метрів, при умові, що територія, на якій відбувається виявлення літального апарату є відкритою. Акустичні методи виявлення БПЛА надають можливість робити це в умовах складного рельєфу і наявності зелених насаджень. Вибір алгоритму виявлення залежить від характеристик звукового випромінювання літального апарату.

Від вибору моделі шумового випромінювання залежить спосіб детектування дрону.



Рис 1.6. Акустичний детектор з одним мікрофоном

Найменш затратними та найпростішими у використанні є акустичні детектори з одним мікрофоном (рис. 1.6). Цей пристрій не локалізує об'єкт, але дає можливість його виявити. Акустичні детектори з одним мікрофоном мають доволі не велику дальність виявлення. Щоб компенсувати цей недолік, можливе розгортання декількох акустичних детекторів, що дає можливість формування акустичного бар'єру. Це дає можливість локалізації дрону на основі обраної геометрії бар'єру.

У роботі [6] для виявлення БПЛА було запропоновано масив з чотирьох мікрофонів (рис. 1.7), що мав форму тетраедра. Кутові координати (азимут і кут підвищення) визначалися виходячи із часу затримки хвиль, прийнятих мікрофоном. Цей спосіб потребує виконання багатьох операцій для обробки сигналу, що є його недоліком.

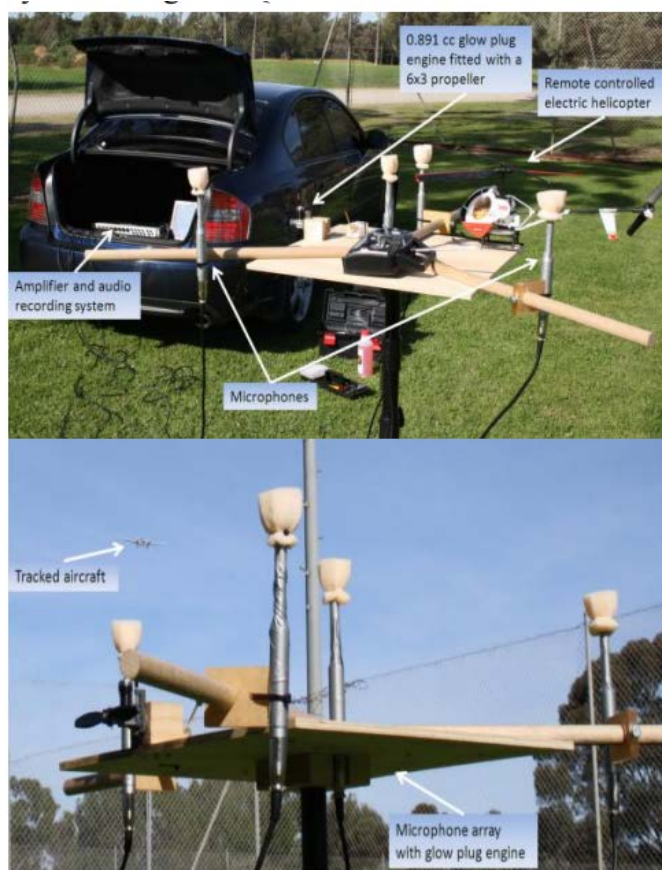


Figure 1: Prototype used to track acoustic signatures of an approaching aircraft

Рис 1.7. Прототип масиву для локалізації БПЛА з 4 мікрофонів

Також детектування безпілотних літальних апаратів може відбуватися за допомогою масиву з 24 мікрофонів, що розташовані на землі, що описано у роботі [7]. Алгоритм виявлення являє собою синтезування характеристики спрямованості з кутом розкриття 10 та огляду простору в спектрі кутів - -450 . Це дозволяє визначити траєкторію руху об'єкта спостереження, яка буде виведена на дисплей координатах: кут проходження хвилі – час. Пристрій використовує лінійку мікрофонів з налаштованою частотою 700 Гц для просторової обробки широкопasmового акустичного випромінювання в діапазоні частот 450-3000 Гц, що призводить до появи інтерференційних смуг на зображенні траєкторії руху, що є його недоліком.

Добре виражену гармонійну структуру спектра випромінювання можна побачити представленою у роботі [8], яка надає результати спостережень за польотом одномоторного літального апарату.

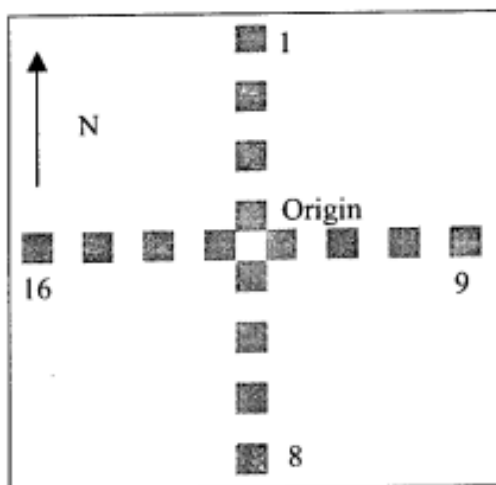


Figure 2. ARL's 16X array: 8-element uniform linear array (ULA) in north-south (N-S) axis and 8-element ULA in east-west (E-W) axis with 1-ft spacing between elements.

Рис 1.8. Схема установки з двох лінійних масивів

Круговий огляд простору на відстані до 2 кілометрів забезпечила установка, в якій було застосовано два лінійні масиви з 8 мікрофонів кожний (рис. 1.8), розташованих ортогонально, та налаштованих на прийом сигналів частотою нижче 500 Гц. Разом з використанням некогерентної обробки декількох гармонійних складових в смузі частот (100-200 Гц) це дало змогу побудувати зображення траєкторії руху об'єкту з високою кутовою роздільною здатністю і малим спотворенням. У цій роботі були використані результати спостереження за одномоторним МЛА (рис. 1.9), що має добре виражену структуру спектра випромінювання.

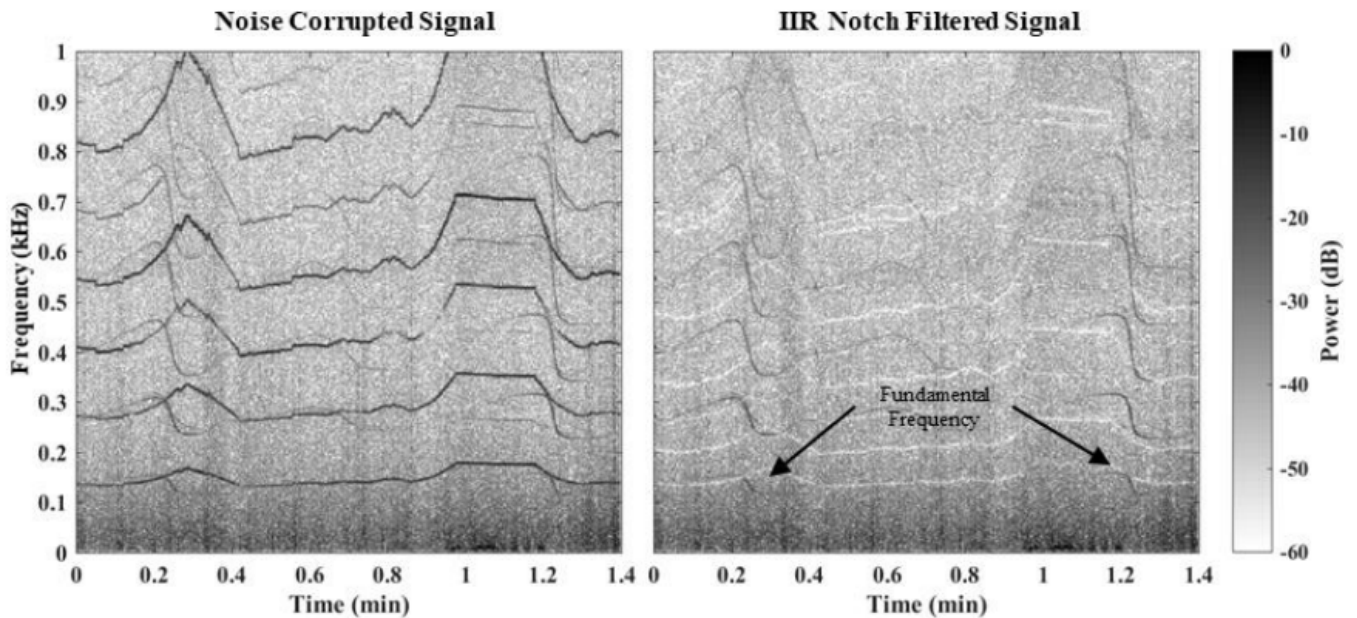


Рис 1.9. Спектрограми одномоторного МЛА

На відміну від акустичних детекторів з одним мікрофоном, для реалізації приведених вище способів виявлення і локалізації безпілотних літальних апаратів виникає необхідність в багатоелементних мікрофонних масивах, дорогій апаратурі і програмному забезпеченні.

1.4 Висновок до розділу

Аналіз інформаційних джерел дав змогу оцінити сучасний стан проблематики детектування МЛА. Були визначені особливості конструкцій та технічні характеристики дронів. У більшості літальних апаратів використовуються декілька електричних моторів з декількома лопатями на кожному. Кількість обертів змінюється в процесі польоту випадково, тому випромінений ними звук має широку смугу частот та великий діапазон рівнів.

Встановлені акустичні характеристики випромінювання МЛА:

1. Ефективна смуга частот випромінювання – (100-1300) Гц
2. Рівень випромінювання – (50-70дБа)

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА АКУСТИЧНОГО ДЕТЕКТОРА МЛА

2.1 Задача та алгоритм виявлення

Виходячи з досліджень звукових сигнатур малих літальних апаратів [9], звукове випромінювання розглядається як широкосмуговий процес з деяким спектром випромінювання. Коли модель акустичного випромінювання визначена, можна розглянути задачу виявлення, яка формулюється як визначення присутності шумового сигналу у прийнятому акустичному шумі з заданими ймовірностями виявлення і хибної тривоги та розрахунку максимальної відстані виявлення. Для цього і застосовується акустичний детектор.

Приймач є основним елементом акустичного детектора і має можливість реалізувати різні способи обробки звукових сигналів. Найбільш простий спосіб базується на алгоритмі квадратичного детектування вхідного процесу та порівнянні вихідної реакції з деяким пороговим значенням. Структурна схема каналу виявлення (КВ) акустичного детектора представлена на рис.2.1.

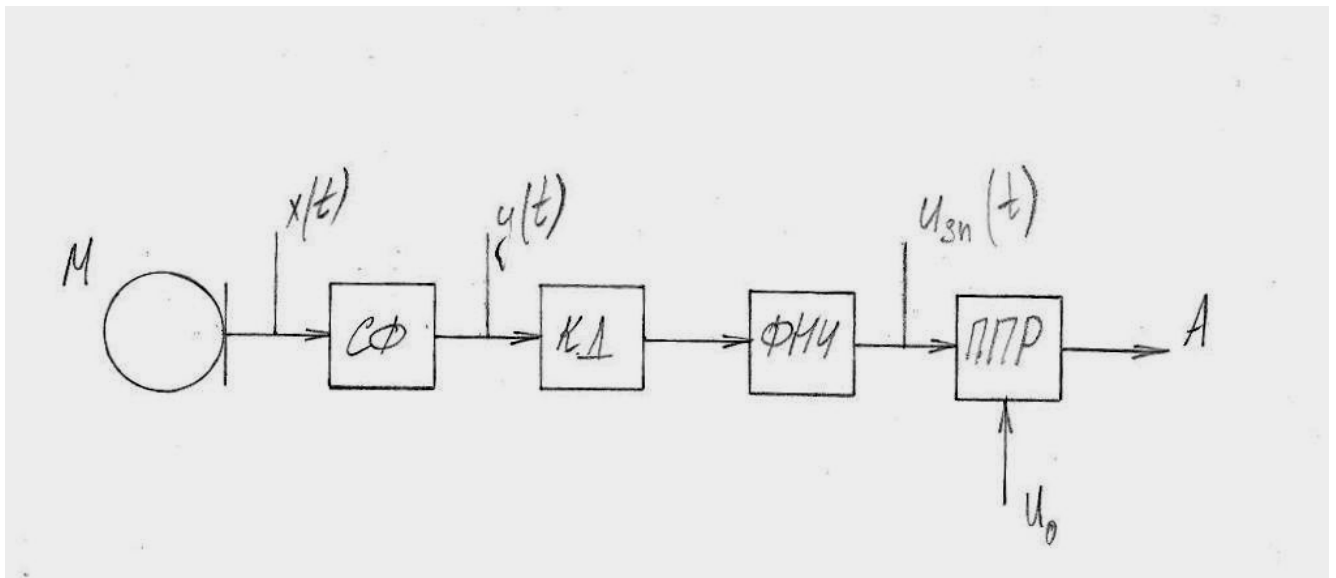


Рис.2.1. Схема каналу виявлення.

Сигнал звукового випромінювання $s(t)$ та акустичної завади $n(t)$ у вигляді адитивної суміші $x(t) = s(t) + n(t)$ з мікрофону (М) поступає на вхід смугового фільтру (СФ), а звідти до квадратичного детектора (КД). Процес $u_{sn}(t)$ на виході фільтру нижніх частот (ФНЧ) пропорційний потужностям випромінювання та завади. Величина $u_{sn}(t)$ порівнюється з пороговим значенням U_0 за допомогою пристрою прийняття рішення (ППР). На виході ППР $A = "0"$, за умови того, що на вході КВ звукового сигналу дрона нема, а отже $u_{sn}(t) < U_0$. На виході ППР формується логічна $A = "1"$ при виконанні умови $u_{sn}(t) \geq U_0$. Визначення параметру U_0 відбувається за допомогою критерію Неймана-Пірсона.

$$U_0 = U_n \cdot \Phi^{-1}(1 - F), \quad (21)$$

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

$$\Phi(l) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^l e^{-\frac{l^2}{2}} dl \quad (2.2)$$

Відношення сигналу до завади (С/З) q_2 на виході ФНЧ за час інтегрування T визначається приростом середнього значення $\Delta U_{sn}(T)$ до середньоквадратичного значення $U_{\sigma}(T)$ вихідної напруги $u_{sn}(t)$:

$$q_2 = \frac{\Delta U_{sn}(T)}{U_{\sigma}(T)} = \frac{q_1^2}{1 + q_1^2} \sqrt{\Delta f T}, \Delta f T \gg 1, q_1^2 = \frac{\sigma_s^2}{\sigma_n^2}. \quad (2.3)$$

де q_1^2 - відношення дисперсій сигналу до завади на виході СФ.

2.2 Розрахунок максимальної дальності виявлення

Малий літальний апарат може бути розглянутий як джерело сферичних хвиль, оскільки у обраному діапазоні випромінює хвилі у всі сторони. Через поглинання повітря відбувається розходження хвильового фронту і послаблення

сферичних хвиль, що розповсюджуються. За допомогою співвідношень можна визначити звуковий тиск p_r , а також інтенсивність I_r що знаходяться на вході приймача, розташування якого від приймача складає відстань r :

$$p_r = p_s e^{-\alpha r} \frac{r_s}{r}, \quad I_r = \frac{p^2}{\rho c} e^{-2\alpha r} \left(\frac{r_s}{r} \right)^2, \quad (2.4)$$

для відстані r_s був визначений звуковий тиск випромінювання p_s , а також питомий хвильовий опір повітря ρc і коефіцієнт поглинання звуку у повітрі α .

Тиск p_n і інтенсивність I_n є характеристиками акустичної завади, що знаходиться в зоні прийому. Співвідношення, що визначає відношення $C/3$ стосовно тиску q та інтенсивності q^2 (параметр виявлення):

$$q = \frac{p_r}{p_n}, \quad q^2 = \left(\frac{p_r}{p_n} \right)^2 = \frac{I_r}{I_n}. \quad (2.5)$$

Величина коефіцієнта поглинання для частот нижчих 2 кГц перевищує 0,01 дБ/м, тому для нижчих частот випромінювання нема потреби його враховувати. Для забезпечення зручного використання шукається максимальна відстань виявлення як функція параметру виявлення:

$$r = \sqrt{\frac{I_s}{q^2 I_n}} r_s. \quad (2.6)$$

Залежності максимальної відстані виявлення від q^2 для різниці рівнів

$$L = 10 \lg \frac{I_s}{I_n} = L_s - L_n \quad (7) \text{ випромінювання об'єкту } L_s \text{ і завади } L_n \text{ за умови } r_s = 1$$

представлені у вигляді графіків на рисунку 2.2.

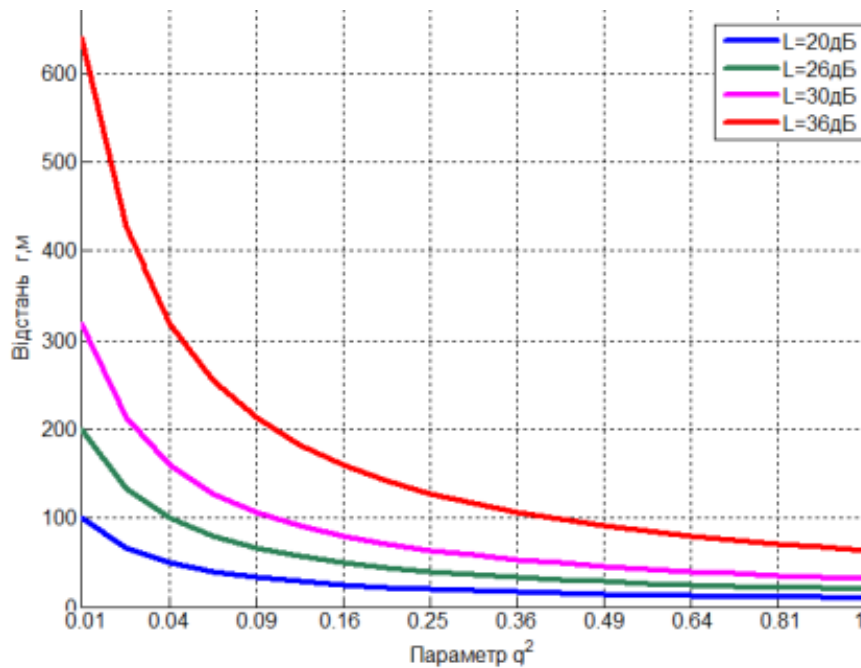


Рис 2.2. Залежність максимальної відстані виявлення від параметра виявлення

З аналізу графіків можна стверджувати, що дальність виявлення тим більша чим меншу величину сигналу можна детектувати, тобто чим менше значення С/З (параметр виявлення) на вході приймача.

Взявши до уваги алгоритм обробки шумового сигналу і акустичної завади ТКВ, що були розглянути вище, та поклавши коефіцієнт трансформації мікрофоном акустичних хвиль в електричні рівним одиниці, можна записати рівність:

$$q_1^2 = \frac{\sigma_s^2}{\sigma_n^2} = \frac{p_s^2}{p_n^2} = q^2. \quad (2.8)$$

Співвідношення (2.8) дає можливість встановити зв'язок параметра виявлення з заданими ХВ (характеристики виявлення) та налаштуванням схеми ТКВ (типового каналу виявлення) і прогнозувати МВВ (максимальну відстань виявлення).

Наприклад, визначимо максимальну відстань виявлення МЛА з рівнем випромінювання 70 дБ . Рівень шуму(завади) в зоні прийому 40 дБ. Різниця рівнів L=30 дБ. По графіку (рис.2.2) максимальна дальність виявлення дорівнює 100м для відношення С/З на вході приймача 0.09.

2.3 Комп'ютерне моделювання процесу детектування типовим каналом виявлення

Мета - моделювання ТКВ в режимі виявлення малих шумових сигналів замаскованих завадою. Візуалізувати процеси обробки шумових сигналів в ТКВ. Визначити параметри налаштування блоків, знайти відношення С/З на вході і виході ТКВ при яких відбувається надійне детектування.

2.3.1 Побудова імітаційної моделі

Імітаційна модель побудована з використанням блоків бібліотеки Simulink. Блоки «Завада» та «Шумовий сигнал» генерують випадкові процеси які після складання поступають на блоки «СФ», «КД», «ФНЧ». З виходу останнього результат подається на блок порівняння «Компаратор», який виконує функцію пристрою прийняття рішення. Для спостереження та вимірювання результатів обробки використовуються віртуальні блоки «Осцилограф» та вимірювачі ефективного і середнього значень процесу.

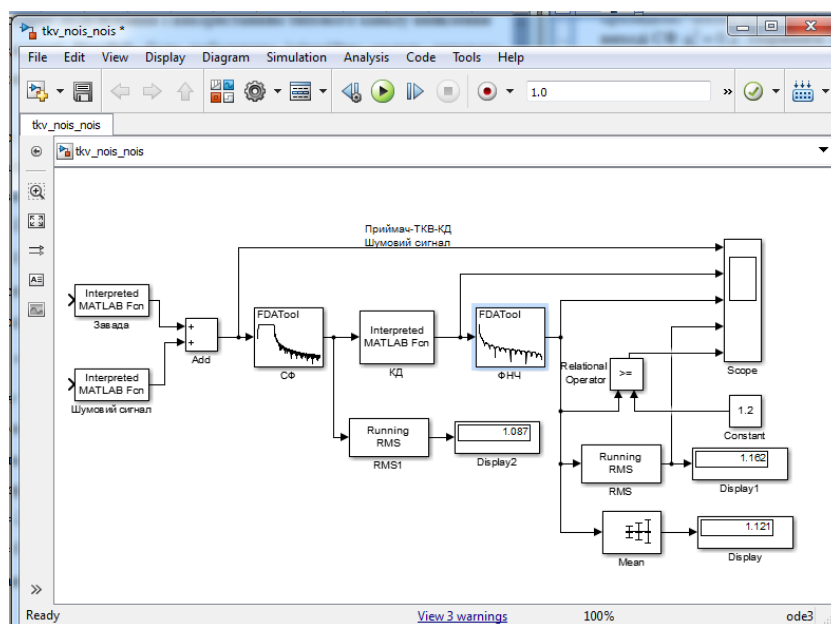


Рис 2.3 Імітаційна модель типового каналу виявлення.

Модель типового каналу виявлення складається з блоків:

1. Блок «Завада» імітує «білий» шум завади. Налаштування блоку представлені на рис 2.4.а

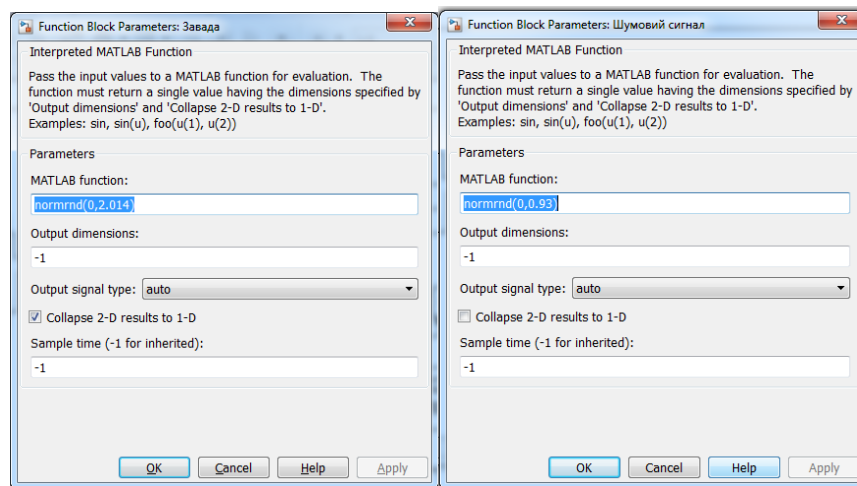


Рис.2.4. Налаштування блоків

2. Блок «Шумовий сигнал» імітує «білий» шум випромінювання. Налаштування блоку представлені на рис 2.4.б
3. Смуговий фільтр (СФ) пропускає сигнали завади і шумового сигналу в певному діапазоні частот, при цьому послаблює сигнали частот, що знаходяться поза межами цього діапазону. Для задачі детектування МЛА виберемо смугу частот СФ яка дорівнює смузі випромінювання МЛА, тобто 100-1300 Гц.

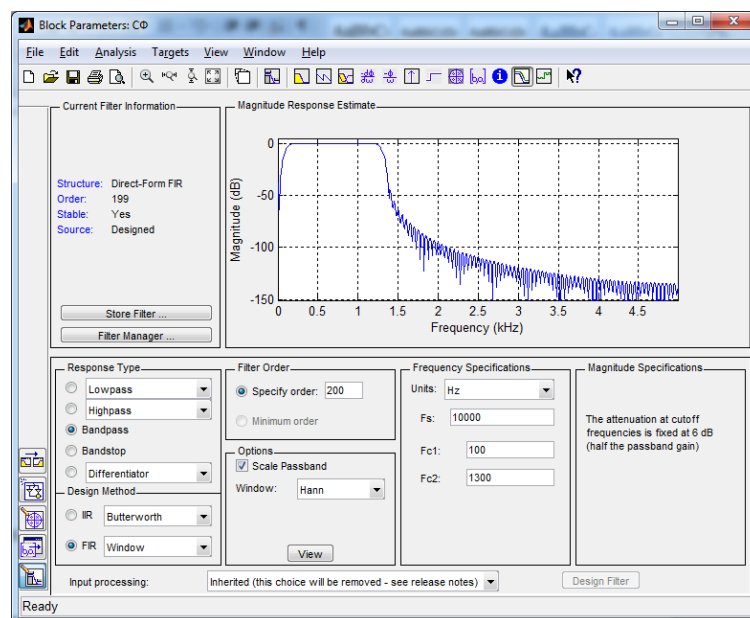


Рис. 2.5. Налаштування смугового фільтра.

4. Квадратичний детектор (КД) призначений для детектування вхідного процесу з одночасним піднесенням в квадрат. Результат на виході КД – змінна напруга пропорційна потужності вхідного процесу.

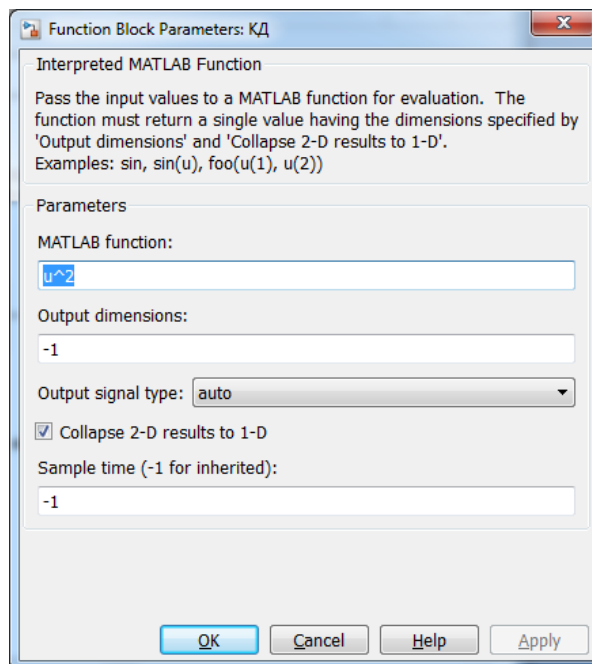


Рис. 2.6. Налаштування КД.

5. Фільтр низьких частот (ФНЧ) призначений для згладжування пульсацій

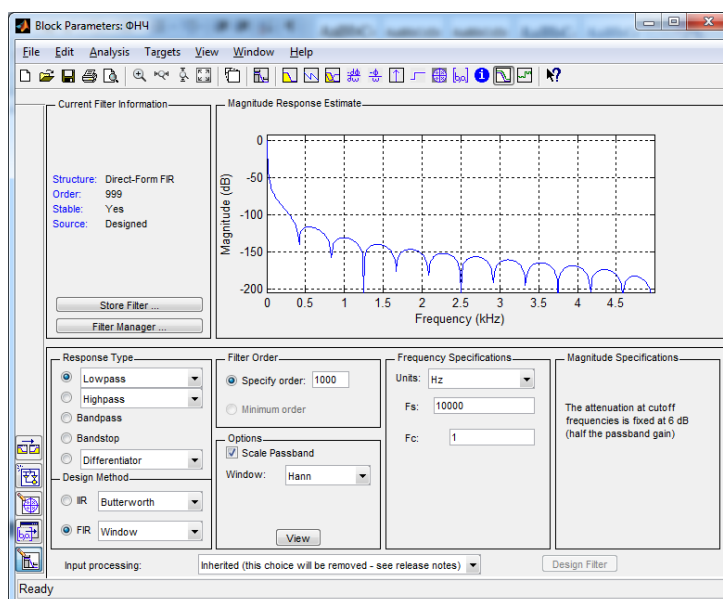


Рис. 2.7. Налаштування фільтра низьких частот

2.3.2 Проведення модельного експеримента

1. Налаштуємо параметри блоків ТКВ відповідно до умов задачі. Встановимо смугу частот пропускання «СФ» $\Delta f = (1300 - 100) \text{ Гц} = 1200 \text{ Гц}$, частоту зрізу «ФНЧ» взяти 1 Гц.

2. Задавшись параметром виявлення розрахувати параметри блоків «Завада» і «Шумовий сигнал». Наприклад, поклавши $q_1^2 = (U_s / U_n)^2 = 0.2$, отримаємо $U_n = 1; U_s = 0.45$ відповідно.

3. Розрахуємо параметри процесів на виході СФ ($U_{\text{СФ}}$) і ФНЧ ($U_{\text{ФНЧ}}$):

$$\begin{aligned} U_{\text{СФ}} &= U \sqrt{\Delta f / f_B}, \dots de \dots f_B = 0.5 f_d; f_d = \text{частота} \dots \text{дискрет}; \\ U_{\text{ФНЧ}} &= U^2 \Delta f / f_B \end{aligned} \quad (2.9)$$

4. Проведемо модельний експеримент спочатку тільки для завади встановивши параметри блоків «Завада» і «Шумовий сигнал» - $U_n = 1; U_s = 0$ відповідно. Визначити по віртуальним приладам ефективні значення напруг після СФ та ФНЧ. Встановити порогове значення «Компаратора» $U_0 = (1 + q_1^2) U_n^{\text{ФНЧ}}$. Провести експеримент на хибні спрацювання методом простої випадкової вибірки. Метод полягає в тому, що число прогонів моделі по кожному з рівнів діючих факторів проводяться до тих пір, поки буде отримана необхідна точність. По приладу «RMS» знаходимо $U_n^{\text{ФНЧ}} = 0.235$ тоді знайдемо поріг $U_0 = (1 + q_1^2) U_n^{\text{ФНЧ}}$ для різних значень q_1^2 . Наприклад для $q_1^2 = 0.7$ $U_0 = (1 + q_1^2) U_n^{\text{ФНЧ}} = 0.4$

Встановимо в «Компараторі» $U_0 = 0.4$ та проведемо експеримент на хибні спрацювання методом простої випадкової вибірки. Один з експериментів приведено на рис. 2.8. З останньої осцилограми, видно що спрацювань нема.

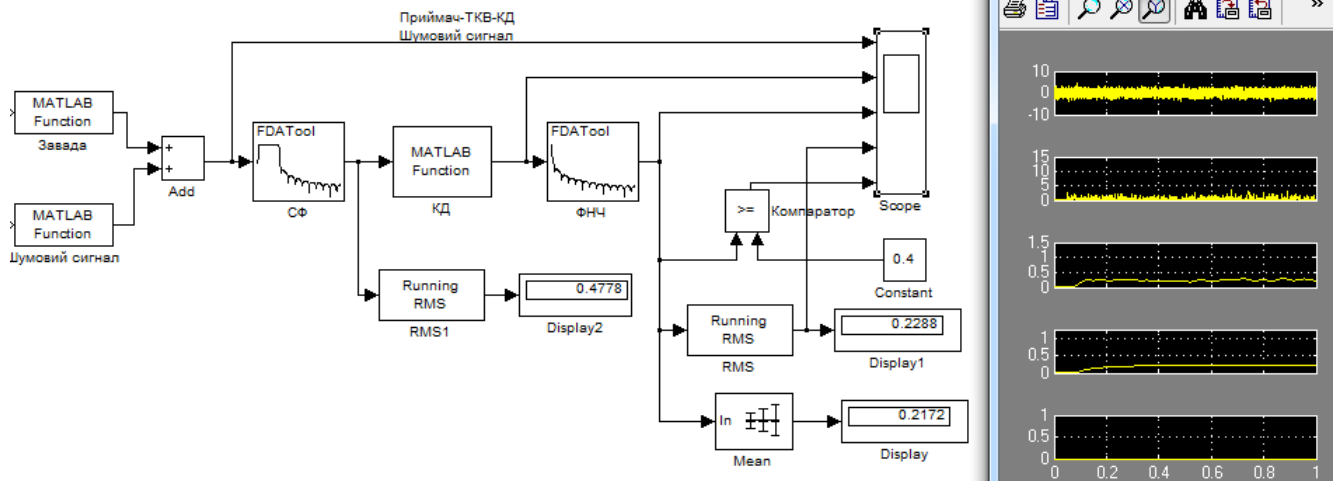


Рис. 2.8. Діаграма моделі в експерименті на хибні спрацювання

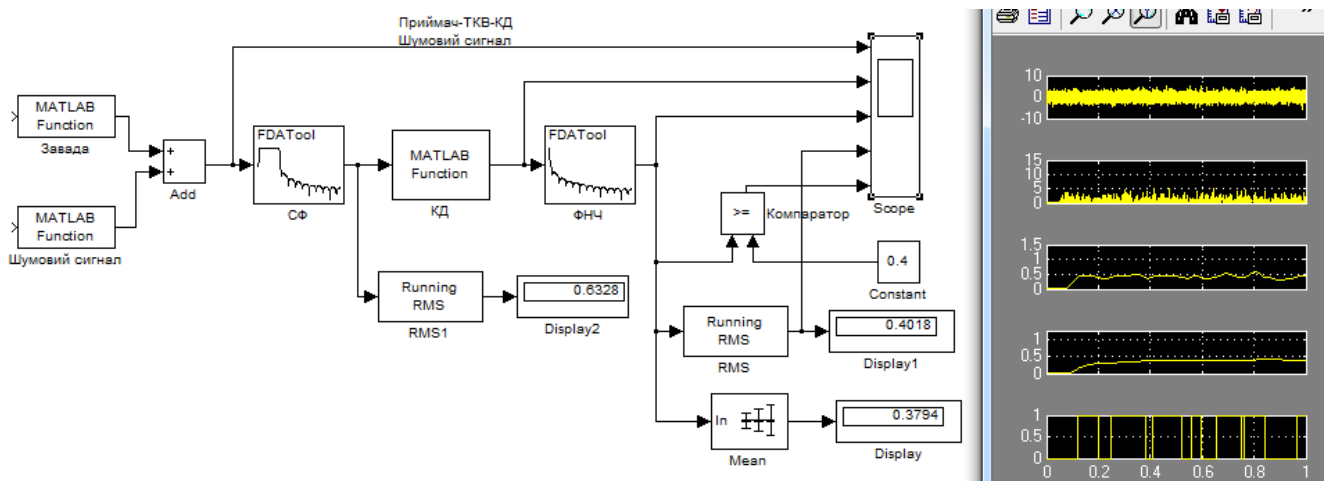


Рис. 2.9. Діаграма моделі в експерименті на виявлення для сигнал/завад 0.7.

5. Проведемо модельний експеримент для суміші завади та сигналу змінюючи параметр виявлення до $q_1^2 = 0.2, 0.4, 0.7$ та встановивши параметри блоків «Завода» і «Шумовий сигнал» - $U_n = 1; U_s = 0.45, 0.65, 0.85$ відповідно. Встановимо в «Компараторі» $U_0 = 0.4$ Дати оцінку достовірності виявлення сигналу. Порівняти з розрахунковими.

Діаграма моделі в експерименті на виявлення для сигнал/завад 0.7 та осцилограми приведені на рис.2.9. Багатократні експерименти методом простої випадкової вибірки показали високу достовірність виявлення для відношення сигнал/завад=0.7

2.4 Висновки по моделюванню

В ході комп'ютерного моделювання ТКВ було проведено дослідження виявлення шумових сигналів, із смугою частот яка відповідала смузі випромінювання МЛА, замаскованих завадою - іншим шумовим сигналом.

Модель ТКВ побудована у програмному середовищі Simulink, з використанням віртуальних імітаційних блоків з його бібліотеки.

В результаті експерименту встановлено надійне виявлення шумового сигналу з відношенням $C/Z = 0.7$ для наступних налаштувань ТКВ:

Смуга частот СФ (100-1300)Гц. Поріг компаратора $U_0 = 0.4$

ВИСНОВКИ

1. У роботі був проведений аналітичний огляд інформації по проблемі детектування МЛА.
2. Встановлені акустичні характеристики МЛА, а саме:
 - ефективна смуга частот випромінювання –(100-1300) Гц;
 - рівень випромінювання – (50-70) дБА.
3. Для детектування був запропонований приймач по схемі ТКВ. Дано опис його функціонування та проведені необхідні розрахунки по встановленню параметрів налаштування ТКВ.
4. Приведені розрахунки та графіки визначення максимальної дальності виявлення в залежності від рівня випромінювання МЛА, рівня завад, та рівня С/З на вході приймача.
5. Проведено комп'ютерний експеримент по виявленню слабого шумового сигналу замаскованого завадою. Встановлені параметри налаштування блоків ТКВ які забезпечать високу достовірність виявлення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Класифікація малих літальних апаратів / Каршов Р. С. – 2014. 2-3.
2. Mavic Mini – The everyday FlyCam - DJI [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.dji.com/mavic-mini>
3. Factsheets: MQ-9 Reaper [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://archive.is/20120629221356/http://www.af.mil/information/factsheets/factsheet.asp?fsID=6405#selection-443.0-443.11>
4. А. Г. Корченко, О. С. Іл'яш. Обобщённая классификация беспилотных летательных аппаратов // "Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил", випуск 4 (33), 2012..27-36
5. Cabell R. Measured Noise from Small Unmanned Aerial Vehicles / R. Cabell, F. Grosveld, R. McSwain // INTERNOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings, NoiseCon16. – pp. 345-354.
6. Finn A. Acoustic Sense & Avoid for UAV's / A. Finn, S. Franklin // 2011 Seventh International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing, Adelaide, SA. - 2011. - pp. 586-589.
7. Case E.E. Low-Cost Acoustic Array for Small UAV Detection and Tracking / E.E. Case, A.M. Zelnio, B.D. Rigling // 2008 IEEE National Aerospace and Electronics Conference. - 2008.
8. Pham T. Acoustic Data Collection of Tactical Unmanned Air Vehicles (TUAVs) / T. Pham, L. Sim. - 2002.
9. Виявлення малих літальних апаратів за акустичним випромінюванням / Козерук С. О., Коржик О. В. – 2019.