

Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова
Національна академія наук України
Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова
Національна академія наук України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ЦЮПАК ДМИТРО ОЛЕГОВИЧ

УДК 537.86(53.02)

ДИСЕРТАЦІЯ

АНАЛІЗ ВЗАЄМОДІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ЗРУХОМИМ БПЛА З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ НЕЛІНІЙНОЇ ДИНАМІКИ

104 – Фізика та астрономія

10 – Природничі науки

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результа-
тів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Д. О. Цюпак

Науковий керівник: Пащенко Руслан Едуардович,
доктор технічних наук, професор

Харків – 2021

АНОТАЦІЯ

Цюпак Д.О. Аналіз взаємодії електромагнітного випромінювання з рухомих БПЛА з використанням методів нелінійної динаміки. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 – Фізика та астрономія (10 – Природничі науки). - Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України, 2021.

Робота присвячена розв'язанню *актуальної науково-прикладної задачі* розробки методів аналізу взаємодії електромагнітного випромінювання з обертовими роторами БПЛА та визначення взаємозв'язків між параметрами ДС і кінематичними параметрами БПЛА.

Мета роботи – визначення нових ознак розпізнавання БПЛА мультироторного типу за рахунок виявлення особливостей взаємодії електромагнітного випромінювання з обертовими роторами БПЛА з використанням методів нелінійної динаміки.

Для досягнення мети розв'язані наступні *науково-технічні завдання*:

проведено аналіз існуючих методів дослідження електромагнітних сигналів, відбитих від рухомого БПЛА;

експериментально досліджено доплерівські сигнали, відбиті від обертових роторів БПЛА, та під час його руху;

оцінено частотно-часові характеристики сигналів доплерівської РЛС при зондуванні різної кількості роторів БПЛА і швидкості їх обертання;

розроблено модель доплерівського сигналу, відбитого від обертових роторів БПЛА, що враховує особливості форми сигналу;

розроблено нові методи аналізу сигналів, відбитих від мультироторного БПЛА, які дозволяють виявляти особливості їх форми і оцінювати їх складність;

розроблено методику розпізнавання типу рухомого БПЛА з використанням нових ознак розпізнавання;

оцінено можливість практичної реалізації розроблених методів для розпізнавання БПЛА мультироторного типу.

В роботі отримані наступні *нові наукові* результати:

вперше розроблено модель доплерівського сигналу, відбитого від обертових роторів БПЛА, яка відрізняється від відомих використанням фрактальних недиференційованих функцій, що забезпечує моделювання особливостей форм відбитих сигналів;

вперше розроблено метод аналізу сигналів, відбитих від мультироторного БПЛА, який відрізняється від відомих використанням серії фазових портретів, побудованих на псевдофазовій площині з різною часовою затримкою, що дозволяє досліджувати особливості форм доплерівських сигналів, обумовлених різною кількістю і швидкістю обертових роторів БПЛА;

удосконалено метод аналізу доплерівських сигналів, відбитих від мультироторного БПЛА, який відрізняється від відомих використанням фрактального аналізу фазових портретів, побудованих з різною часовою затримкою, що дозволяє кількісно оцінити їх складність та виявити періодичність появи схожих фазових портретів;

запропоновано методику розпізнавання типу рухомого БПЛА, яка відрізняється від відомих використанням нових ознак розпізнавання – форми фазового портрету і величини фрактальної розмірності, що дозволяє підвищити якість розпізнавання БПЛА мультироторного типу.

В роботі одержані наступні *нові практичні* результати:

проведені експериментальні дослідження структури та форми доплерівських сигналів, відбитих від обертових роторів БПЛА, можуть бути використані для визначення характеру руху мультироторного БПЛА, що визначаються особливостями поведінки відбитих сигналів;

розроблена модель доплерівського сигналу, відбитого від обертових роторів БПЛА, з використанням фрактальних недиференційованих функцій може бути використана для отримання додаткових нових ознак розпізнавання БПЛА мультироторного типу;

розроблені нові методи аналізу доплерівських сигналів, відбитих від обертових роторів БПЛА, та методика розпізнавання типу рухомого БПЛА можуть бути використані для розробки нових та удосконалення існуючих систем розпізнавання радіолокаційних засобів спостереження.

Наукові та практичні результати роботи використані в Інституті радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова Національної академії наук України та в навчальному процесі Національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського «ХАІ».

Ключові слова: доплерівська РЛС, безпілотний літальний апарат, доплерівський сигнал, часова реалізація сигналу, спектр сигналу, модель доплерівського сигналу, фрактальний сигнал, фрактальна недиференційована функція, розпізнавання БПЛА, псевдофазова площа, фазовий портрет.

ABSTRACT

Tsyurak D.O. Analysis of the interaction of electromagnetic radiation with a moving UAV using the methods of nonlinear dynamics. - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of Doctor of Philosophy on a specialty 104 – Physics and astronomy (10- Natural Sciences). - O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics Kharkiv, Ukraine, 2021.

The work is devoted to solving the current scientific and applied problem of developing methods for analyzing the interaction of electromagnetic radiation with rotating unmanned aerial vehicle (UAV) rotors and determining the relationships between the parameters of the DS and the kinematic parameters of the UAV.

The purpose of the work is to determine new features of UAV recognition of multi-rotor type by identifying the peculiarities of the interaction of electromagnetic radiation with the rotating rotors of the UAV using the methods of nonlinear dynamics.

To achieve this goal, the following scientific and technical tasks are solved:

the analysis of existing research methods of electromagnetic signals reflected from a moving UAV;

doppler signals reflected from the rotating rotors of the UAV and during its movement were experimentally studied;

the frequency-time characteristics of Doppler radar signals when probing different numbers of UAV rotors and their rotation speed are estimated;

developed a model of Doppler signal reflected from the rotating rotors of the UAV, which takes into account the peculiarities of the signal shape;

developed new methods of analysis of signals reflected from a multirotor UAV, which allow to identify features of their shape and assess their complexity;

developed a method of recognizing the type of moving UAV using new features of recognition;

the possibility of practical realization of the developed methods for recognition of UAV of multirotor type is estimated.

The following **new scientific results** are obtained in the work:

for the first time a model of Doppler signal reflected from the rotating rotors of the UAV, which differs from the known use of fractal non-differentiating functions, which provides modeling of the features of the shapes of the reflected signals;

for the first time a method of analysis of signals reflected from a multirotor UAV was developed, which differs from the known ones by using a series of phase portraits built on a pseudophase plane with different time delay, which allows to study the features of Doppler signal shapes due to different number and speed of rotating rotors;

improved method of analysis of Doppler signals reflected from a multirotor UAV, which differs from the known use of fractal analysis of phase portraits, constructed with different time delay, which allows to quantify their complexity and identify the frequency of similar phase portraits;

proposed a method of recognizing the type of moving UAV, which differs from the known use of new features of recognition - the shape of the phase portrait and the

size of the fractal dimension, which improves the quality of recognition of UAV multi-rotor type.

The following **new practical results** are obtained in the work:

conducted experimental studies of the structure and shape of Doppler signals reflected from the rotating UAV rotors, can be used to determine the nature of the movement of the multirotor UAV, which are determined by the behavior of the reflected signals;

the developed model of the Doppler signal reflected from the rotating rotors of the UAV, using fractal non-differentiating functions can be used to obtain additional new features of UAV recognition of the multirotor type;

developed new methods of analysis of Doppler signals reflected from the rotating rotors of the UAV, and the method of recognizing the type of moving UAV can be used to develop new and improve existing systems for recognizing radar surveillance.

Scientific and practical results of robots victorian at the O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of the National Academy of Sciences of Ukraine and in the initial process of the National Aerospace University H.E. Zhukovsky "Kharkiv Aviation Institute".

Keywords: Doppler radar, unmanned aerial vehicle, Doppler signal, signal time realization, signal spectrum, Doppler signal model, fractal signal, fractal nondifferentiation function, UAV recognition, pseudophase plane, phase portrait.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Частотно–временной анализ радиолокационных отражений от мульти-роторного БПЛА / Пашенко Р.Э., Иванов В.К., Цюпак Д.О., Левадный Ю.В. // Радиофизика и электроника. – 2019. – Т. 24, № 4. – С. 35 – 45.
2. Цюпак Д.О. Моделювання доплерівського сигналу, відбитого від безпілотного літального апарату, з використанням фрактальних недиференційовних функцій / Пашенко Р.Е., Иванов В.К., Цюпак Д.О. // Радиофизика и электроника. – 2020. – Т. 25, № 3. – С. 16 – 25.

3. Цюпак Д.О. Аналіз доплерівських сигналів, відбитих від роторів БПЛА, з використанням фазових портретів / Пащенко Р.Е., Іванов В.К., Цюпак Д.О. // *Радиофизика и электроника*. – 2020. – Т. 25, № 4. – С. 18 – 29.

4. Tsyupak D. Doppler signal analysis of drone rotors reflection with fractal dimensions / Pashchenko R., Ivanov V., Tsyupak D. // *Telecommunications and Radio Engineering*. – 2020. – Vol. 79, Is. 16. – P. 1425 – 1440. (Scopus, Q3).

5. Tsyupak D. On radar signals analysis using the fractal dimension / Pashchenko R., Ivanov V., Tsyupak D. // 4th International Scientific and Practical Conference “Problems of Infocommunications. Science and Technology” (PICS&T-2017). – Ukraine, Kharkov, 2017. – paper 84.

6. Tsyupak D. The Use of Fractal Signals in Information and Communication Systems / Pashchenko R., Ivanov V., Tsyupak D. // 6th International Scientific and Practical Conference “Problems of Infocommunications. Science and Technology” (PICS&T-2019). – Ukraine, Kjev, 2019. – picst19_780.pdf.

7. Tsyupak D. Doppler radar signal model for sensing rotary drone rotors / Pashchenko R., Ivanov V., Tsyupak D. // The 6th Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium (MRRS-2020). – Ukraine, Kharkiv. 2020. – DOI: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252782.

8. Цюпак Д.О. Распознавание БПЛА мультироторного типа с использованием фазовых портретов / Пащенко Р.Э., Барданова О.А., Цюпак Д.О. // Тези доповідей одинадцятої НК ХУПС. – Х.: ХУ ПС, 2015. – С. 152.

9. Распознавание БПЛА мультироторного типа с использованием фрактальных размерностей / Пащенко Р.Э., Иванов В.К., Барданова О.А., Цюпак Д.О. // Матеріали п'ятої міжнародної НТК “Сучасні напрямки розвитку ІКТ та ЗУ”. – Полтава: ПНТУ, Баку; ВА ЗС АР, Кіровоград: КЛІА НАУ, Харків: “ДП ХНДІ ТМ”. – 2015. – С. 6, 7.

10. Цюпак Д.О. Метод распознавания БПЛА мультироторного типа с использованием фрактальных размерностей / Пащенко Р.Э., Цюпак Д.О. // Тези доповідей тринадцятої НК ХУПС. – Х.: ХУ ПС, 2017. – С. 209.

11. Распознавание БПЛА мультироторного типа с использованием фазовых портретов / Пащенко Р.Э., КОРТУНОВ В.И., ЦЮПАК Д.О., Барданова О.А. // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2013. – № 4(13). – С. 68 – 72.
12. Распознавание БПЛА мультироторного типа с использованием фрактальных размерностей / Пащенко Р.Э., Илюшко В.М., Фатеев А.С., Цюпак Д.О. // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2014. – № 1(14). – С. 156 – 160.
13. Анализ формы фазовых портретов при изменении времени задержки для распознавания БПЛА мультироторного типа / Пащенко Р.Э., Цюпак Д.О., Ратайчук И.А, Барданова О.А. // Збірник наукових праць “Системи обробки інформації”. – Х.: ХУ ПС. – 2015. – Вип. 1(126). – С. 44 – 49.
14. Анализ величин фрактальных размерностей фазовых портретов для распознавания БПЛА мультироторного типа / Пащенко Р.Э., Фатеев А.С., Цюпак Д.О., Романцов А.А. // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2016. – № 1(22). – С. 83 – 87. (Google Scholar).
15. Распознавание типа мультироторного БПЛА с использованием формы фазовых портретов / Пащенко Р.Э., Иванов В.К., Цюпак Д.О., Гергель И.А. // Системи озброєння і військова техніка. – 2017. – № 1(49). – С. 143 – 147.
16. Распознавание типа мультироторного БПЛА с использованием фрактальных размерностей фазовых портретов / Пащенко Р.Э., Иванов В.К., Цюпак Д.О., Молчанов А.А. // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2017. – № 2(27). – С. 99 – 104.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ.....	12
ВСТУП.....	13
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ СИГНАЛІВ ВІДБИТИХ ВІД РУХОМОГО БПЛА.....	22
1.1 Огляд методів аналізу сигналів, відбитих від БПЛА.....	22
1.1.1 Дослідження сигналів, відбитих від БПЛА, в оптичному та інфрачервоному діапазонах електромагнітних хвиль.....	23
1.1.2 Акустичне спостереження за рухом БПЛА.....	27
1.1.3 Методи аналізу сигналів радіолокаційних засобів та радіомоніторингу для виявлення БПЛА.....	29
1.1.4 Розпізнавання БПЛА за даними радіолокаційних засобів	33
1.2 Особливості взаємодії електромагнітного випромінювання з рухомим БПЛА.....	39
1.3 Аналіз методів нелінійної динаміки для аналізу сигналів радіолокаційних засобів.....	44
1.3.1 Особливості побудови фазових портретів радіолокаційних сигналів на псевдофазовій площині.....	44
1.3.2 Аналіз складності сигналів радіолокаційних засобів з використанням фрактальних розмірностей.....	50
Висновки до розділу 1 та постановка задачі досліджень.....	55
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА МОДЕЛІ ДОПЛЕРІВСЬКОГО СИГНАЛУ, ВІДБИТОГО ВІД БПЛА, З ВИКОРИСТАННЯМ ФРАКТАЛЬНИХ НЕДИФЕРЕНЦІЙОВНИХ ФУНКЦІЙ.....	57
2.1 Експериментальне дослідження електромагнітних сигналів відбитих від мультироторного БПЛА.....	57
2.1.1 Експериментальне дослідження доплерівських сигналів відбитих від обертових роторів БПЛА.....	58

2.1.2 Експериментальне дослідження сигналів з виходу каналу фазового детектування, відбитих від рухомих БПЛА.....	62
2.2 Частотно-часовий аналіз доплерівських сигналів, відбитих від обертових роторів БПЛА.....	66
2.2.1 Аналіз часових реалізацій доплерівських сигналів при різному числі роторів БПЛА і швидкостях їх обертання.....	66
2.2.2 Спектральний аналіз доплерівських сигналів, відбитих від обертових роторів БПЛА.....	74
2.3 Моделювання доплерівського сигналу, відбитого від БПЛА, з використанням фрактальних недиференційованих функцій.....	80
2.3.1. Вибір структури моделі (виду моделюючої функції).....	81
2.3.2 Вибір (розрахунок) параметрів моделі доплеровського сигналу.....	89
Висновки до розділу 2.....	96
РОЗДІЛ 3 МЕТОД АНАЛІЗУ СИГНАЛІВ, ВІДБИТИХ ВІД МУЛЬТИРОТОРНОГО БПЛА, З ВИКОРИСТАННЯМ ФАЗОВИХ ПОРТРЕТІВ.....	98
3.1 Аналіз сигналів, відбитих від обертових роторів БПЛА, з використанням фазових портретів.....	98
3.2 Розпізнавання характеру руху мультироторного БПЛА з використанням фазових портретів.....	115
3.2.1 Побудова фазових портретів доплерівських сигналів, відбитих від мультироторних БПЛА, без зміни часової затримки.....	115
3.2.2 Аналіз змін форм фазових портретів із зміною часової затримки для розпізнавання характеру руху БПЛА.....	122
3.3 Дослідження форм фазових портретів доплерівських сигналів для розпізнавання БПЛА з різною кількістю роторів.....	129
Висновки до розділу 3.....	128
РОЗДІЛ 4 ФРАКТАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ДОПЛЕРІВСЬКИХ СИГНАЛІВ, ВІДБИТИХ ВІД МУЛЬТИРОТОРНОГО БПЛА.....	140

4.1 Дослідження доплерівських сигналів, відбитих від обертових роторів БПЛА, з використанням фрактальної розмірності.....	140
4.2 Метод фрактального аналізу складності фазових портретів доплерівських сигналів, відбитих від мультироторного БПЛА.....	148
4.2.1 Аналіз величин фрактальних розмірностей фазових портретів сигналів, відбитих від обертових роторів БПЛА, під час зміни часової затримки.....	148
4.2.2 Дослідження характеру руху мультироторного БПЛА з використанням фрактальних розмірностей фазових портретів..	159
4.3 Розпізнавання типу мультироторного БПЛА з використанням величин фрактальних розмірностей фазових портретів доплерівських сигналів.....	165
4.4. Оцінка ефективності розпізнавання типу мультироторного БПЛА з використанням фрактального методу аналізу фазових портретів.....	172
Висновки до розділу 4.....	177
ВИСНОВКИ.....	179
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	184
ДОДАТОК А СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ.....	200
ДОДАТОК Б ВИЗНАЧЕННЯ ДАЛЬНОСТІ ДІЇ ЗАСОБІВ СПОСТЕРЕЖЕННЯ ЗА БПЛА.....	205
Б. 1 Дальність виявлення БПЛА оптико-електронними засобами.	205
Б. 2 Дальність виявлення БПЛА акустичними засобами спостереження.....	207
ДОДАТОК В ІНФОРМАЦІЙНА І КОРЕЛЯЦІЙНА РОЗМІРНОСТІ.....	209
ДОДАТОК Г АКТИ ПРО РЕАЛІЗАЦІЮ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	211

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

- АЦП – аналогово-цифровий перетворювач;
БПЛА – безпілотний літальний апарат;
ДС – доплерівський сигнал;
ІВС – інформаційно-вимірювальна система;
ІЧ – інфрачервоний;
ЕМП – електромагнітне поле;
ЕПР – ефективна площа розсіювання;
МНК – метод найменших квадратів;
ОЕЗ – оптико-електронний засіб;
ПЗЗ – прилад з зарядовим зв'язком;
ПЕОМ – персональна електронно-обчислювальна машина;
ПО – повітряний об'єкт;
ПФП – псевдофазова площина;
РЛДП – радіолокаційний дальнісний портрет;
РЛС – радіолокаційна станція;
РМ – роторна модуляція;
РТР – радіотехнічна розвідка;
ШПФ – швидке перетворення Фур'є;
ФД – фазовий детектор;
ФП – фазовий портрет;
ФПВСШ – фазовий портрет з різним відношенням сигнал/шум;
ФР – фрактальна розмірність;
ФС – фрактальний сигнал;
ФНФ – фрактальна недиференційовна функція;
ФТ – фазова траєкторія;
PTZ-камера – Pan-tilt-zoom-камера;
UAV – Unmanned aerial vehicle (БПЛА).

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. У останні десятиліття стрімко розвивається і розширюється парк безпілотних літальних апаратів (БПЛА), особливо БПЛА мультироторного типу, так званих мультикоптерів [1, 2]. Безпілотний літальний апарат (БПЛА, англійський термін: Unmanned aerial vehicle – UAV) – багаторазово реалізовує своє функціональне призначення без безпосереднього розміщення людини на борту з метою управління [3]. З їх допомогою вирішуються різноманітні завдання, як у військовій [4], так і в цивільній сфері [5]. Такі БПЛА мають малі габарити, а при їх конструюванні широко використовуються матеріали, що слабо відбивають електромагнітні хвилі (пластмаса, скловолокно, картон, пінопласт і т. д.). За рахунок цього вони мають невелику ефективну відбивну здатність [6], що значно ускладнює їх виявлення та розпізнавання. Основною конструктивною особливістю таких БПЛА є наявність роторів, які забезпечують їх рух, число яких може змінюватися залежно від конструкції. Найбільшого поширення набули БПЛА з трьома, чотирма та шістьма роторами. Також існують БПЛА з вісьмома, дванадцятьма і більшою кількістю роторів [7].

Збільшення кількості типів таких БПЛА привело до необхідності впорядкування їх польотів і забезпечення контролю за виконанням правил їх експлуатації. У зв'язку з цим актуальним завданням стає створення системи виявлення та розпізнавання мультироторних БПЛА не тільки візуально, а і з використанням технічних засобів, зокрема радіолокаційних. В європейських країнах вже розроблені правила з їх експлуатації, а в США всі власники малих БПЛА повинні їх реєструвати у Федеральній авіаційній адміністрації (FAA) [8]. З 1 червня 2018 року Державна авіаційна служба України ввела Тимчасовий порядок використання повітряного простору України, в якому визначені правила й обмеження на польоти дистанційно пілотованих повітряних суден без попереднього узгодження [9]. Вага таких повітряних суден визначена до 20 кг, дозволена висота польотів до 120 м, дальність польотів «в зоні видимості» без обмежень. Крім того, польоти заборонені над об'єктами, які визначені МВС, Державною пограничною службою, СБУ,

Національною поліцією, Нацгвардією, Управлінням державної охорони та іншими військовими формуваннями та правоохоронними структурами [9].

Для здійснення контролю за дотриманням цих правил необхідно створити систему виявлення і розпізнавання мультироторних БПЛА. При цьому доцільно використовувати не тільки оптико-електронні й акустичні засоби спостереження, але й радіолокаційні [10], зокрема доплерівські радіолокаційні станції (РЛС).

В даний час активно проводяться дослідження з виявлення та розпізнавання БПЛА у різних діапазонах спектра: видимому, інфрачервоному (ІЧ) і радіочастотному, а також в акустичному. Принципи та основи виявлення повітряних об'єктів (ПО) за допомогою оптико-електронних засобів (ОЕЗ) наведено у роботах Мірошникова М.М. [11], Годунова А.І. [12, 13], Соловьева В.А. [14], Ананенкова А.Є. [15], Тарасова В.В. [16] та інших дослідників, у роботах [17, 18] розглянуто методи та пристрої стереоскопічного спостереження. Перевагою ОЕЗ є те, що вони працюють в пасивному режимі, і це підвищує прихованість їх роботи та безпеки обслуговуючого персоналу. Але хвилі в видимому та ІЧ діапазонах значно поглинаються атмосферою, що знижує дальність дії ОЕЗ, а ефективність розпізнавання ПО значно залежить від їх розміру, форми та кутової швидкості. Можливості виявлення ПО за допомогою радіолокаційних засобів та аналізу характеристик розсіювання ПО досліджено у роботах Сухаревського О.І. [19, 20], Філіна Є.Д. [21], Воробьева Є.М. [22], Купріянова А.І. [23] та інших дослідників. Дальність виявлення ПО радіолокаційними засобами значно перевищує дальність виявлення ОЕЗ, але виявлення значно залежить від величини ефективної площі розсіювання (ЕПР) ПО, для визначення якої потребує проведення великого обсягу експериментальних досліджень, а також складного та трудомісткого моделювання. Виявлення ПО засобами радіотехнічної розвідки (РТР) дозволяє швидко визначити пеленг на ПО (напрямок польоту), але у разі автономного польоту ПО зникає можливість його виявлення. Акустична помітність ПО обумовлена тим, що він у польоті генерує звукові (акустичні) хвилі, а спеціальні акустичні мікрофони їх приймають. Методи і методики виявлення ПО за їх акустичним випромінюванням досліджується у роботах Карташова В.М. [24], Луценка В.І. [25, 26], Гордієнка Ю.О.

[27], Даника Ю.Г. [28] та інших дослідників. Застосування акустичних систем виявлення ПО забезпечує визначення його пеленга та за особливостями звукової хвилі його типу, але виявлення та розпізнавання ПО у значній мірі залежить від стану атмосфери, а також від структури, складу та стану поверхневого шару землі.

Велика кількість робіт присвячена розпізнаванню ПО за даними радіолокаційних засобів [29-32]. У роботах Лещенка С.П. [33-35], Тоцького О.В. [36], Філімонова О.Б. [37, 38], Hudson S. [39] та інших дослідників розглянуто можливості розпізнавання ПО за допомогою їх радіолокаційних дальнісних портретів (РЛДП), але ця ознака розпізнавання вимагає широкої смуги частот зондуючих сигналів і обчислювальних можливостей РЛС і залежить від ракурсу зондування ПО. У роботах Слюсаря М.М. [40], Залевського Г.С. [41, 42] та інших дослідників розглянуто характеристики роторної модуляції (РМ) радіолокаційних сигналів та методи чисельного моделювання спектрів РМ для розпізнавання ПО, але застосування РМ, як ознаки розпізнавання ПО, необхідно попередньо знати закони змін РМ сигналів для всіх типів ПО. У роботах Євдокимової Є.О. [43], Chen V.C. [44, 45], Brooks D.A. [46] та інших дослідників проаналізовано можливість застосування мікродоплерівських сигналів для розпізнавання і класифікації рухомих об'єктів, але відбитий ДС має складну багатокомпонентну структуру, а його обробка потребує великих обчислювальних витрат.

Таким чином, сучасні методи розпізнавання сигналів, відбитих від рухомих ПО, за даними радіолокаційних засобів використовують різноманітні ознаки, але завдання аналізу взаємодії електромагнітного випромінювання з обертовими роторами БПЛА залишається не вирішеним. Для його вирішення необхідно виявити особливості такої взаємодії з використанням нових методів, зокрема методів нелінійної динаміки.

Виходячи з цього, роботу присвячено розв'язанню актуальної науково-прикладної задачі розробки методів аналізу взаємодії електромагнітного випромінювання з обертовими роторами БПЛА та визначення взаємозв'язків між параметрами ДС і кінематичними параметрами БПЛА.

Саме це визначило тему дисертаційної роботи, яка присвячена аналізу взаємодії електромагнітного випромінювання з рухомим БПЛА з використанням методів нелінійної динаміки.

Об'єкт дослідження – процес взаємодії електромагнітного випромінювання з обертовими роторами БПЛА мультироторного типу.

Предмет дослідження – перетворення доплерівських сигналів, відбитих від БПЛА, методами нелінійної динаміки для дослідження їх особливостей.

Мета і завдання досліджень. *Мета досліджень* – визначення нових ознак розпізнавання БПЛА мультироторного типу за рахунок виявлення особливостей взаємодії електромагнітного випромінювання з обертовими роторами БПЛА з використанням методів нелінійної динаміки.

Досягнення цієї загальної мети вимагає вирішення низки взаємопов'язаних науково-технічних завдань:

провести аналіз існуючих методів дослідження електромагнітних сигналів, відбитих від рухомого БПЛА;

експериментально дослідити доплерівські сигнали, відбиті від обертових роторів БПЛА, та під час його руху;

оцінити частотно-часові характеристики сигналів доплерівської РЛС при зондуванні різної кількості роторів БПЛА та швидкості їх обертання;

розробити модель доплерівського сигналу, відбитого від обертових роторів БПЛА, що враховує особливості форми сигналу;

розробити нові методи аналізу сигналів, відбитих від мультироторного БПЛА, які дозволяють виявляти особливості їх форми і оцінювати їх складність;

розробити методику розпізнавання типу рухомого БПЛА з використанням нових ознак розпізнавання.

Ці завдання вирішуються у 4 розділах роботи.

У першому розділі розглянуто основні методи аналізу сигналів, відбитих від рухомих повітряних об'єктів, із застосуванням технічних засобів, що працюють в оптичному, інфрачервоному та радіочастотному діапазонах, а також із застосуванням радіомоніторингу та акустичних засобів. Проаналізовано переваги та не-

доліки методів розпізнавання БПЛА за даними радіолокаційних засобів. На основі проведеного аналізу літератури визначено основні задачі досліджень. Розглянуто найбільш інформативні методи нелінійної динаміки для аналізу форм радіолокаційних сигналів – метод псевдофазової площини та фрактальний метод.

У другому розділі на підставі проведеного частотно-часового аналізу сигналів доплерівської РЛС при зондуванні БПЛА мультироторного типу розроблено математичну модель доплерівського сигналу, відбитого від обертових роторів БПЛА з використанням емпіричного моделювання. Запропонована модель ДС, відбитого від обертових роторів БПЛА, представляє суму фрактального сигналу (моделювання низькочастотної складової ДС) та модифікованої функції Вейерштрасса-Мандельброта (моделювання високочастотної складової ДС). Розглянуто методику вибору параметрів моделі при різній швидкості та кількості обертових роторів БПЛА. Якісний і кількісний аналіз реальних ДС і ДС, отриманих з використанням розробленої моделі, показав, що модель забезпечує добре узгодження особливостей форми цих сигналів.

Третій розділ присвячено розробці методу аналізу ДС, відбитих від БПЛА, з використанням фазових портретів (ФП), побудованих при різних часових затримках. Проведено аналіз зміни форми ФП сигналів, отриманих при зондуванні БПЛА, та встановлено, що вона відрізняється від форми ФП фонових сигналів. Проаналізовано зміни форм ФП при їх побудові з різними часовими затримками. Розглянуто можливість використання зміни форми ФП для розпізнавання БПЛА з різною кількістю роторів (з трьома або шістьма) та різним характером їх руху. Запропоновано методику розпізнавання типу мультироторного БПЛА з використанням аналізу форм ФП сигналів, побудованих при різних часових затримках.

В четвертому розділі удосконалено метод аналізу ДС, відбитих від БПЛА, з використанням фрактальної розмірності ФП, побудованих при різних часових затримках. Проведено аналіз складності ДС при різній швидкості та кількості обертових роторів БПЛА з використанням фрактальної розмірності (ФР). Проаналізовано зміни ФР фазових портретів при їх побудові з різними часовими затримками. Різні величини фрактальної розмірності ДС і його ФП можуть бути використані,

як ознаки розпізнавання типу мультироторного БПЛА. Запропоновано методику розпізнавання БПЛА мультироторного типу з використанням форми ФП, побудованих при різних часових затримках, і величин їх ФР, який дозволяє підвищити якість розпізнавання БПЛА і визначення характеру його руху.

Методи дослідження. Основні положення, висновки і рекомендації роботи базуються на коректному використанні апробованих методів теорії нелінійної динаміки, теорії множин, теорії коливань, теорії фракталів, а також методів проведення експериментів і часового та спектрального аналізу сигналів. Оцінка ефективності розроблених методів базується на математичному моделюванні з використанням експериментальних даних.

Наукова новизна отриманих результатів. В дисертаційній роботі здобувачем особисто отримані наступні **нові наукові результати**:

вперше розроблено модель доплерівського сигналу, відбитого від обертових роторів БПЛА, яка відрізняється від відомих використанням фрактальних недиференційованих функцій, що забезпечує моделювання особливостей форм відбитих сигналів;

вперше розроблено метод аналізу сигналів, відбитих від мультироторного БПЛА, який відрізняється від відомих використанням серії фазових портретів, побудованих на псевдофазовій площині з різною часовою затримкою, що дозволяє досліджувати особливості форм доплерівських сигналів, обумовлені різною кількістю та швидкістю обертових роторів БПЛА;

удосконалено метод аналізу доплерівських сигналів, відбитих від мультироторного БПЛА, який відрізняється від відомих використанням фрактального аналізу фазових портретів, побудованих із різною часовою затримкою, що дозволяє кількісно оцінити їх складність та виявити періодичність появи схожих фазових портретів;

запропоновано методику розпізнавання типу рухомого БПЛА, яка відрізняється від відомих використанням нових ознак розпізнавання – форми фазового портрету та величини фрактальної розмірності, що дозволяє підвищити якість розпізнавання БПЛА мультироторного типу.

Отримані результати дозволяють вважати мету роботи досягнутою.

Практичне значення отриманих результатів

1. Проведені експериментальні дослідження структури та форми доплерівських сигналів, відбитих від обертових роторів БПЛА, можуть бути використані для визначення характеру руху мультироторного БПЛА, що визначаються особливостями поведінки відбитих сигналів.

2. Розроблена модель доплерівського сигналу, відбитого від обертових роторів БПЛА, з використанням фрактальних недиференційованих функцій може бути використана для отримання додаткових нових ознак розпізнавання БПЛА мультироторного типу.

3. Розроблені нові методи аналізу доплерівських сигналів, відбитих від обертових роторів БПЛА, та методика розпізнавання типу рухомого БПЛА можуть бути використані для розробки нових та удосконалення існуючих систем розпізнавання радіолокаційних засобів спостереження.

Основні результати роботи реалізовано в Інституті радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова Національної академії наук України та в навчальному процесі Національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського «ХАІ». Відповідні акти про реалізацію наведено у Додатку В. Вони також можуть бути корисними іншим установам та підприємствам, які розробляють сучасні радіолокаційні системи.

Особистий внесок здобувача. Усі наукові узагальнення, положення, результати, висновки та рекомендації, викладені у дисертації, виконані автором особисто. Основні положення та результати роботи повною мірою викладені в публікаціях у співавторстві [47-62]. У наукових працях, написаних у співавторстві, здобувачу належить наступне. В роботі [47] автором проведено частотно-часовий аналіз сигналів доплерівської РЛС при зондуванні БПЛА мультироторного типу, у роботі [48] – запропонована модель доплерівського сигналу, відбитого від обертових роторів БПЛА, яка представляє суму фрактального сигналу та модифікованої функції Вейерштрасса–Мандельброта, у роботі [49] – запропоновано метод аналізу доплерівських сигналів, відбитих від обертових роторів БПЛА з ви-

користанням фазових портретів, у роботі [50] – запропоновано метод аналізу складності форми ДС, відбитих від обертових роторів БПЛА з використанням фрактальних розмірностей, у роботі [51] – досліджено форми фазових портретів сигналів, отриманих при зондуванні БПЛА, і фонових сигналів, у роботі [52] – проведено розрахунок величин фрактальних розмірностей сигналів з виходу каналу фазового детектування РЛС, що дозволило кількісно оцінити складність форми сигналів, у роботі [53] – проведено аналіз зміни форми фазових портретів при їх побудові з різними часовими затримками, у роботі [54] – розглянуто можливість використання величини фрактальної розмірності фазових портретів як ознаки розпізнавання БПЛА мультироторного типу, у роботі [55] – проведено аналіз форм фазових портретів сигналів при зондуванні БПЛА з трьома і шістьма роторами, у роботі [56] – проведено розрахунок величин фрактальних розмірностей фазових портретів сигналів, побудованих з різними часовими затримками. В роботі [57] автором оцінено можливість аналізу характеристик сигналів радіолокаційних засобів з фрактального методу, у роботі [58] – проведено аналіз параметрів і властивостей фрактальних сигналів із використанням фазових портретів, у роботі [59] – проведено аналіз форми доплерівських сигналів, отриманих експериментально при зондуванні БПЛА мультироторного типу, у роботах [60-62] – запропоновано використання форм фазових портретів сигналів, фрактальних розмірностей і величин фрактальних розмірностей фазових портретів, відповідно, як ознак розпізнавання БПЛА мультироторного типу.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертаційної роботи апробовано на 6 міжнародних і всеукраїнських науково-технічних конференціях і симпозиумах: 4th and 6th International Scientific and Practical Conference “Problems of Infocommunications. Science and Technology”, PICS&T-2017, -2019 (Ukraine, Kharkov, 2017, Kiev, 2019); The 6th Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium, MRRS-2020 (Ukraine, Kharkov, 2020); Одинадцятій і тринадцятій наукових конференціях ХУПС “Новітні технології – для захисту повітряного простору” (Україна, Харків, 2015, 2017); П’ятій міжнародній науково-технічній конференції

“Сучасні напрямки розвитку ІКТ та ЗУ” (Україна, Полтава: ПНТУ, Кіровоград: КЛА НАУ, Харків: “ДП ХНДІ ТМ”, Азербайджан, Баку, ВА ЗС АР, 2015).

Публікації. Основні результати дисертації опубліковано у 10 статтях, з них 3 – в журналі, який включено до переліку наукових фахових видань України [47-49], 1 – в іноземному журналі [50], який індексується наукометричною базою **Scopus**, і 6 статей, які додатково відображають наукові результати дисертації. Результати роботи опубліковано також в 6 збірниках праць наукових конференцій [57-62].

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження, представлені в дисертаційній роботі, проводилися у відділі дистанційного зондування Землі Інституту радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова Національної академії наук України та безпосередньо пов'язані з планами держбюджетних НДР «Розробка і удосконалення радіофізичних методів зондування поверхні і атмосфери Землі та біологічних об'єктів», шифр «Індекс», № 0111U010477 та НДР «Розробка та застосування нових радіофізичних методів дистанційного зондування довкілля та біологічних об'єктів», шифр «Інверсія», № 0117U004040.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, 4 розділів, загальних висновків, 4 додатків, списку використаних джерел із 164 найменувань. Обсяг загального тексту дисертації складає 212 сторінок, з них основного тексту 146 сторінок. Робота ілюстрована 85 рисунками та 14 таблицями.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ СИГНАЛІВ ВІДБИТИХ ВІД РУХОМОГО БПЛА

В даному розділі розглянуто основні методи аналізу сигналів, відбитих від рухомих повітряних об'єктів (зокрема БПЛА), із застосуванням технічних засобів, що працюють в різних діапазонах спектру електромагнітних хвиль (оптичному, інфрачервоному та радіочастотному), а також із застосуванням радіомоніторингу та акустичних засобів. Розглянуті методи розпізнавання БПЛА за даними радіолокаційних засобів. Представлені приклади відбитих доплерівських сигналів від фону і під час обертання різної кількості роторів БПЛА, а також рухомих БПЛА з трьома і шістьма роторами. Розглянуті найбільш інформативні методи нелінійної динаміки для аналізу форм радіолокаційних сигналів – метод псевдофазової площини і фрактальний метод.

1.1 Огляд методів аналізу сигналів, відбитих від мультироторного БПЛА

В даний час малі безпілотні літальні апарати мультироторного типу (так звані мультикоптери) все ширше використовуються для вирішення різноманітних завдань в цивільній і військовій сферах [2-5]. Це обумовлено їх невисокою вартістю і розвитком сучасних технологій виробництва. Розширення парку БПЛА мультироторного типу, а також кола задач, що вони вирішують, приводить до необхідності впорядкування їх польотів і контролю за використанням. При створенні системи контролю за виконанням правил експлуатації мультироторних БПЛА доцільно використовувати різноманітні технічні засоби. Під час руху у навколишньому середовищі БПЛА мають певні характерні ознаки у різних діапазонах спектра: видимому, інфрачервоному (ІЧ) і радіочастотному, а також в акустичному. Тому спостереження за малорозмірними БПЛА може здійснюватися різними за фізичною природою засобами: оптичними, акустичними та радіолокаційними

[2, 21, 65-67]. При цьому технічні засоби повинні не тільки виявляти БПЛА в контрольованому просторі, а і здійснювати розпізнавання його типу і визначення параметрів руху: висоти, швидкості, напрямку польоту та ін. Коротко розглянемо основні методи дослідження характеристик рухомих БПЛА, що застосовують різні фізичні принципи.

1.1.1 Дослідження сигналів, відбитих від БПЛА, в оптичному та інфрачервоному діапазонах електромагнітних хвиль

Найбільш поширеними засобами виявлення мультироторних БПЛА є засоби, які використовують методи спостереження за малорозмірними і малошвидкісними повітряними об'єктами в оптичному діапазоні довжин хвиль [12-16]. Ці методи можуть бути активними і пасивними. До активних методів відносять метод анагліфів (метод отримання стереоефекту для стереопари звичайних зображень за допомогою колірного кодування зображень, призначених для лівого і правого ока) [13] і метод визначення координат БПЛА в просторі (лазерні далекоміри) [68]. Метод візуального спостереження [69] і метод комбінованого стереоефекту [18] відносять до пасивних методів [13]. Для реалізації цих методів використовують різноманітні оптичні пристрої, які забезпечують виявлення БПЛА.

Виявлення БПЛА з використанням анагліфічного методу може бути здійснено за допомогою джерела підсвічування і декількох камер спостереження (фотоприймачів у вигляді ПЗЗ-матриць, ПЗЗ – прилад з зарядовим зв'язком). Але у разі великої відстані між двома об'єктами по фронту або по глибині зображення починають двоїтися і стереоефект порушується (об'єкти двояться) [13].

Для виявлення і визначення місцеположення БПЛА у просторі використовуються лазерні далекоміри [68], принцип роботи яких зводиться до вимірювання відповідного інтервалу часу між зондуючим сигналом і сигналом, відбитим від БПЛА. У залежності від характеру модуляції лазерного випромінювання, що використовується, розрізняють три методи вимірювання дальності в далекомірі: імпульсний, фазовий або фазо-імпульсний [68].

Під час реалізації імпульсного методу об'єкт опромінюється зондуючим імпульсом і за часом затримки відбитого імпульсу визначається відстань до об'єкту. При фазовому (фазо-імпульсному) методі сигнал, що випромінюється, модулюється за синусоїдальним законом. Відбитий сигнал надходить на приймальну оптику та у фотоприймач, де виділяється модулюючий сигнал. Далі вимірюється різниця фаз між сигналом у модуляторі і прийнятим сигналом, яка залежить від дальності до об'єкту. За величиною різниці фаз визначають відстань до об'єкта [68].

Пасивний метод візуального спостереження базується на використанні камер виявлення з високим просторовим розрізненням, а також PTZ-камери з кутом огляду 360° [70]. Під час виявлення БПЛА камера з високим просторовим розрізненням безперервно сканує визначену зону контролю і у разі виявлення БПЛА його координати надаються для направлення PTZ-камери, яка здійснює його супроводження. Такий принцип роботи реалізований у системі оптичного виявлення БПЛА – Skypatriot [70]. Для визначення типу БПЛА використовується база зображень БПЛА з якими порівнюється отримане зображення і визначається його тип.

Метод комбінованого стереоефекту використовує різні види стереоефекту – прямий (здатність з двох зображень створювати одне), зворотній (правим оком розглядають те, що повинно бачити ліве, а лівим оком те, що повинно бачити праве) або прямий і зворотний [18]. Для реалізації цього методу використовують рознесені по базі приймальні дзеркала, а також дзеркала передачі сформованого зображення в оптичну систему приладу [18]. Але якість стереоефекту значно залежить від величини відстані між візирними осями об'єктивів стереоприладу (його бази) [18]. Стереоефект значно зростає за рахунок збільшеної бази але створити велику базу дуже важко, тому ефективність таких приладів є невисокою.

Поряд з перевагами застосування оптичних методів спостереження за БПЛА, їх оптичне виявлення БПЛА дуже сильно залежить від стану навколишнього середовища, зокрема стану атмосфери [71]. Вологість повітря (водяний пар), серпанок або забруднення атмосфері призводять до істотного зниження її прозорості на ділянках спектру в яких працюють оптичні приймачі. Це приводить до проблем застосування оптико-електронних засобів (ОЕЗ) під час виявлення

БПЛА. Крім погіршення видимості також підвищується рівень освітленості об'єкта внаслідок відбиття вгору сонячних променів від блискучих поверхонь, особливо із скляним покриттям [71]. Також на здатність ОЕЗ виявляти БПЛА в чистому небі або на фоні хмар впливають невеликі розміри БПЛА у порівнянні з пілотованими засобами та їх форма з меншою поверхнею відбиття, а також меншою контрастністю БПЛА на фоні хмар через відсутність світлових маяків [71].

Контрастність C визначають як відношення різниці освітленості між об'єктом та фоном до освітленості фону [66]

$$C = (B - B_1)/B_1 = \Delta B/B_1, \quad (1.1)$$

де B – освітленість об'єкта;

B_1 – освітленість фону в кд/м².

У разі рівності освітленості фону і БПЛА, то його виявити буде неможливо. Освітленість БПЛА залежить від його форми та текстури поверхні (матеріалу з якого він виготовлений) і випадковості відбитого атмосферою світла. У той же час ймовірність виявлення БПЛА, що знаходиться всередині миттєвого поля зору, більше залежить від контрасту та його розмірів, і менше залежить від його форми [66]. У додатку А. 1 зазначено, що збільшити дальність виявлення БПЛА можна за рахунок збільшення ефективної площини об'єктива, розширення смуги пропускання оптичного фільтра і збільшення коефіцієнта пропускання приймального пристрою, а також зменшення порогової чутливості приймального пристрою. Також покращення ефективності пошуку БПЛА досягається за рахунок звуження поля зору, зменшення зони огляду і збільшення часу пошуку [65].

Таким чином, виявлення БПЛА за допомогою оптичних засобів є дуже складним завданням, вирішення якого залежить від розміру, форми і кутової швидкості БПЛА відносно точки спостереження на землі, тому візуальне виявлення БПЛА є не дуже ефективним.

Ще одним можливим ОЕЗ, що працює в інфрачервоному діапазоні, який може використовуватися для вирішення задачі виявлення БПЛА є тепловізор.

Принцип дії тепловізорів заснований на тому, що променистий потік, який створюється повітряним об'єктом, фокусується за допомогою оптичної системи (об'єктиву) на світлочутливу матрицю приймача променистої енергії (лінійну, або прямокутну), і після обробки і відображається на екрані монітора у вигляді відміток яскравості [16]. Працюють тепловізори в діапазоні довжин хвиль 8 – 14 мкм та мають високе просторове розрізнення, що становить 0,33 – 2,5 міллірадіан (1,1 – 8,25 кутових хвилин) [16].

Джерелам теплового випромінювання у БПЛА, в основному, є двигуни, що забезпечують обертання роторів, а також електронними компонентами блока управління. Для зменшення ІЧ випромінювання під час створення БПЛА використовують матеріали з малою випромінювальною здатністю, такі як срібло і алюміній [14], а також розробляють конструкції, які спрямовують це випромінювання у бік неба [14, 16]. У додатку А. 1 наведено, що дальність виявлення БПЛА за допомогою ІЧ засобів визначається його випромінювальною здатністю (інтенсивністю випромінювання), контрастом і площею випромінювання. За даними, наведеними в [16], дальність виявлення за допомогою сучасних ІЧ засобів складає: людини – 1,9 км; автомобіля – 3,0 км; літака – 7,7 км. Але, як показують дослідження, ІЧ випромінювання поглинається атмосферою краще за світло, особливо парами води та молекулами вуглекислого газу. Основні вікна в атмосфері для ІЧ діапазону хвиль знаходяться в межах 3 – 4 і 8 – 12 мм, тому ІЧ пристрої розробляються так, щоб приймати в одному з цих діапазонів [72].

Таким чином, виявлення та розпізнавання мультироторних БПЛА може здійснюватися за допомогою оптико-електронних засобів, як у видимому, так і інфрачервоного діапазону хвиль. Перевагою таких ОЕЗ є те, що вони працюють в пасивному режимі (без випромінювання електромагнітної енергії у простір). Це забезпечує скритність роботи, але значне поглинання атмосферою хвиль в цих діапазонах електромагнітного спектру приводить до невеликих значень дальності їх дії. Крім того ефективність розпізнавання мультироторних БПЛА значно залежить від їх розміру, форми і кутової швидкості. Розглянемо можливість виявлення та розпізнавання мультироторних БПЛА в інших діапазонах хвиль.

1.1.2 Акустичне спостереження за рухом БПЛА

Для підвищення надійності виявлення БПЛА крім оптико-електронних засобів використовують акустичні [24-28, 73-77]. Акустична помітність БПЛА обумовлена тим, що він у польоті генерує звукові хвилі, а спеціальні акустичні мікрофони їх приймають. У подальшому прийнятий акустичний тиск перетворюється в електричний сигнал, який подається на вхід динаміків або навушники.

Джерелами звукових хвиль БПЛА, в основному, є його працюючі двигуни і обертові ротори. Шум ротора БПЛА утворюється в результаті силової взаємодії лопатей ротора з оточуючим середовищем в процесі створення тяги і при витісненні повітря з фіксованого об'єму середовища лопатями [78]. Також акустичне випромінювання може виникати під час аеродинамічної взаємодії лопатей з турбулентними утвореннями повітряного потоку. Сумарний спектр акустичного випромінювання БПЛА складається з гармонійної (шум обертання роторів) і широкосмугової (високочастотний і низькочастотний шум двигуна) складових [78].

Оскільки шум обертання роторів має визначену частоту, то аналіз акустичного сигналу повітряного ротора, що має N лопатей і обертається з кутовою швидкістю Ω , проводять з точки зору періодичних динамічних систем [27]. Для однієї лопаті період складає $T = 2\pi/\Omega$, а для ротора у цілому період складатиме $T = 2\pi/N\Omega$. У роботі [27] також запропонована математична модель акустичного випромінювання БПЛА за відсутності шумів у наступному вигляді

$$x(t) = \sum_{m=1}^M A_m \cos(2\pi \cdot N \cdot F_m \cdot t + \varphi_m), \quad (1.2)$$

де M – кількість гармонік акустичного випромінювання;

A_m – амплітуда m -ої гармоніки;

N – кількість лопатей ротора;

F_m – частота m -ої гармоніки;

φ_m – фаза m -ої гармоніки.

Як видно з виразу (1.2), акустичний сигнал БПЛА представляє собою суму гармонік з частотами, кратними частоті обертання ротора F . Амплітуди гармонік зменшуються із збільшенням частоти. Причому в режимі стаціонарного польоту (двигун працює в одному режимі) амплітуда кожної наступної гармоніки при збільшенні її частоти менша за амплітуду попередньої гармоніки [27]. Під час зміни режиму роботи двигуна або під час виконання маневру відбувається зміна частоти акустичного випромінювання, яка обумовлена ефектом Доплера. Таким чином, частота акустичного випромінювання кратна частоті обертання ротора, а також залежить від кількості лопатей обертового ротора та їх кількості на БПЛА. Інтенсивність акустичного сигналу залежить від швидкості обтікання роторів.

У роботах [25, 26, 74] розроблені методики виявлення набору характерних ознак – сигнатур акустичних і вторинних електромагнітних полів антропогенних об'єктів і оцінки дальності виявлення джерел акустичного випромінювання в умовах впливу його загасання в атмосфері та інтерференційного ослаблення земною поверхнею. З використанням розроблених методик визначено, що частоти модуляції відбитого сигналу, які обумовлені несучим і рульовим гвинтами гелікоптерів, відрізняються для різних типів гелікоптерів з різними габаритними розмірами та різними акустичними шумами. У роботі [74] більш докладно розглянуто результати експериментальних досліджень акустичних шумів об'єктів техніки, впливу на них атмосфери і підстильної поверхні, а також спектри акустичних сигналів гелікоптера Мі-2, літака FALCON, БПЛА літакового типу, БПЛА мультироторного типу (квадрокоптеру) та роботи двигунів наземної техніки на різних відстанях від джерел шуму.

Використання тільки одного окремого мікрофона дає лише грубу оцінку акустичного сигналу. Для детального аналізу акустичних сигналів використовують решітки з мікрофонів [79]. Акустична решітка дозволяє крім просторового накопичення сигналів оцінювати час надходження фронту хвилі в різні точки простору, що сприяє оцінюванню кута поширення хвилі відносно решітки (обчислити пеленг) [79]. Але акустичні антенні решітки можуть ефективно використовуватися для виявлення БПЛА тільки на невеликих відстанях [75, 76]. Необхідно за-

значити, що у реальних середовищах акустичні (звукові) хвилі затухають унаслідок в'язкості повітряного середовища і молекулярного загасання [80]. Під час розповсюдження акустичних хвиль уздовж поглинаючої поверхні вони додатково затухають. При цьому, чим вище коефіцієнт поглинання поверхні над якою рухається акустична хвиля, тим більше загасання вона вносить до хвилі. Також значно впливає на загасання акустичних хвиль відіграє турбулентність повітря, високо-частотні складові хвилі на відстанях більше 4 км практично не чутно [80].

У додатку А. 2 зазначено, що дальність виявлення БПЛА залежить від величини акустичного тиску, створеного джерелом сигналу, ефективної поверхні прийому акустичної хвилі засобом спостереження і коефіцієнту спрямованої дії джерела сигналу, а також порогового значення акустичного тиску і коефіцієнта загасання акустичних коливань внаслідок релаксаційних процесів. Геометрична дальність виявлення акустичних сигналів БПЛА визначається за допомогою побудови променевої картини місцевості, яку називають геометричною зоною акустичної освітленості [66].

Таким чином, виявлення і розпізнавання БПЛА у значній мірі залежить від стану атмосфери, яка впливає на розповсюдження акустичних хвиль, а також від структури, складу і стану поверхневого шару Землі. Основною перевагою застосування акустичних засобів виявлення БПЛА є їх робота в пасивному режимі та в умовах поганої оптичної видимості. Але якість розпізнавання і дальність виявлення (рубежі виявлення по дальності до 1,5 – 2,0 км, по висоті до 1 км) не задовольняє вимогам під час їх застосування у зашумлених умовах, також низька точність визначення координат не дозволяє створювати ефективні засоби боротьби з БПЛА.

1.1.3 Методи аналізу сигналів радіолокаційних засобів та радіомоніторингу для виявлення БПЛА

Як альтернатива оптико-електронним та акустичним засобам виявлення і розпізнавання БПЛА в даний час все частіше використовують радіолокаційні за-

соби (радіолокаційні станції) і засоби радіомоніторингу (радіоелектронної боротьби). Пошук БПЛА за допомогою активних радіолокаційних станцій є достатньо ефективним, оскільки вони мають відносно великий імпульсний об'єм пошуку і значну дальність виявлення [81]. Але радіолокаційне виявлення БПЛА може бути прийнятним тільки тоді, коли не ставляться вимоги до скритності роботи або високої мобільності [23]. Як вже наголошувалося, більшість БПЛА виготовляють з композитних матеріалів, які достатньо погано відбивають електромагнітні хвилі. Радіохвилі проникають через поверхню БПЛА і лише частково відбиваються від неї [21]. Коефіцієнт відбиття радіохвиль від діелектрика, з якого виготовляються елементи сучасних БПЛА, визначається за формулою [82]

$$k = \frac{\sqrt{\varepsilon} - 1}{\sqrt{\varepsilon} + 1}, \quad (1.3)$$

де ε – діелектрична проникність матеріалу поверхні об'єкта.

Контроль повітряного простору за допомогою РЛС є достатньо ефективним у тому випадку, коли ефективна площа розсіювання (ЕПР) БПЛА в діапазоні радіохвиль відповідає розрізнявальній здатності РЛС.

Ефективна площа розсіювання ПО може бути визначена за формулою [65]

$$\sigma = \frac{\xi P_{\text{відб}}}{E_1} = \frac{\xi D_0 P_{\text{роз}}}{E_1} = \xi S D_0, \quad (1.4)$$

де ξ – коефіцієнт деполаризації вторинного поля ($0 \leq \xi \leq 1$);

$P_{\text{відб}}$ – потужність відбитого сигналу;

E_1 – щільність потоку енергії радіолокаційного сигналу на сфері радіусом, що дорівнює дальності до ПО;

D_0 – значення діаграми зворотного розсіювання в напрямі на РЛС;

$P_{\text{роз}}$ – потужність розсіяного сигналу;

S – повна площа розсіювання ПО.

Таким чином, ефективна площа розсіяння БПЛА буде залежати від його відбиваючих властивостей і конфігурації, а також від електричних властивостей матеріалу з якого він створений і ракурсу під яким здійснюється зондування. Визначення дійсних ЕПР є доволі складним завданням і вимагають проведення великого обсягу експериментальних досліджень, а також складного моделювання.

У роботах [19, 20, 41, 42, 83-86] розглянуті методи і методики оцінки радіолокаційних характеристик різноманітних ПО з використанням математичного моделювання, зокрема гелікоптерів та БПЛА. У першу чергу здійснювалося моделювання їх ЕПР та оцінювалися їх середні і медіанні значення. Під час моделювання поверхні гелікоптера Мі-8МТ у роботі [42] вказано, що апроксимація гладкої частини поверхні фюзеляжу здійснювалася за допомогою ділянок 96 трьохвісних еліпсоїдів, а зломи поверхні моделювалися за допомогою 11 прямих кромкових ділянок розсіяння. На підставі побудованої моделі гелікоптера Мі-8МТ проводився розрахунок його радіолокаційних характеристик, зокрема його ЕПР. Розраховані за цією моделлю середні ЕПР гелікоптера Мі-8МТ знаходяться в діапазоні $19...40 \text{ м}^2$ у залежності від частоти зондуючого сигналу [42]. У роботі [41] запропоновано комбінований метод, який дозволяє розраховувати характеристики розсіяння повітряних об'єктів складної форми. У цьому методі ПО представляється у вигляді сукупності електрично великих розсіювачів і елементів резонансних розмірів. Для обчислення електромагнітного поля (ЕМП), розсіяного електрично великим фюзеляжем пропонується застосовувати асимптотичний високочастотний метод розрахунку характеристик розсіяння ПО складної форми, зокрема з неідеальною відбиваючою поверхнею [41]. Для моделювання елементів конструкції резонансних розмірів застосовується метод інтегральних рівнянь Фока В.А. [87] для щільності електричного струму на поверхні ідеально провідного об'єкту [88]. Сумарне розсіяне поле може бути знайденим як сума полів, розсіяних електрично великими і резонансними елементами ПО.

У роботі [20] на підставі методики розрахунку ЕПР антенної системи з носовим діелектричним обтічником запропоновано метод розрахунку вторинного випромінювання (ЕПР) моделі фюзеляжу БПЛА, який є ідеально провідним об'єк-

том. При цьому передбачається, що поверхня БПЛА має елементи, які виконані з діелектричних матеріалів і не мають усередині ідеально провідних розсіювачів (наприклад, крило і хвостове оперення). Для врахування величини внеску таких елементів БПЛА в загальне розсіяне поле використовується високочастотний метод розрахунку вторинного випромінювання діелектричних частин моделі БПЛА [89]. За допомогою цього методу і математичного моделювання проведено аналіз характеристик розсіяння БПЛА RQ-4B Global Hawk [20].

Як показують експериментальні дослідження [65] малі БПЛА характеризуються значенням ЕПР близькими до $0,05 - 0,5 \text{ м}^2$. При цьому, в більшості робіт для таких БПЛА приймається значення ЕПР, що дорівнює $0,1 \text{ м}^2$, яке, як показано в роботі [65], є цілком достатнім значенням, що характеризує сигнатури БПЛА. Від величини ЕПР БПЛА залежить дальність його виявлення активними радіолокаційними засобами. У роботі [65] вказано, що розраховані дальності виявлення малих БПЛА складають: для РЛС метрового діапазону – до 8-14 км для БПЛА з ЕПР $0,1 \text{ м}^2$ і до 0,1-1,5 км для ЕПР $0,01 \text{ м}^2$; для РЛС дециметрового діапазону – до 9-16 км для БПЛА з ЕПР $0,1 \text{ м}^2$ і до 0,8-2 км для ЕПР $0,01 \text{ м}^2$; для РЛС сантиметрового діапазону – до 12-25 км для БПЛА з ЕПР $0,1 \text{ м}^2$; і до 1,4-2,8 км для ЕПР $0,01 \text{ м}^2$. У додатку А. 2 показано, що на дальність виявлення БПЛА, крім ЕПР, впливають характеристики РЛС (потужність передавача, коефіцієнти підсилення передавальної і приймальної антен, порогова потужність сигналу на вході приймача).

Таким чином, дальність виявлення БПЛА радіолокаційними засобами значно перевищує дальність виявлення оптико-електронними та акустичними засобами. Але виявлення БПЛА залежить від величини ЕПР БПЛА, яка обумовлюється його конфігурацією та електричними властивостями матеріалу з якого він створений, а також енергетичними характеристиками РЛС. Також необхідно зазначити, що визначення величини ЕПР БПЛА вимагає проведення великого обсягу експериментальних досліджень, а також складного і трудомісткого моделювання.

Під час польоту БПЛА його керування здійснюється за радіоканалами, а положення у просторі визначається за допомогою GPS навігаторів. Всі сигнали, що

приймаються або відправляються радіоелектронними засобами БПЛА, можна перехоплювати і підміняти, а при необхідності електронні пристрої можна вивести з ладу. Крім того, за радіоелектронними сигналами, що випромінюють БПЛА, можна здійснювати їх виявлення засобами радіотехнічної розвідки [23, 90]. Такі засоби приймають та аналізують радіосигнали ліній зв'язку й управління, а також сигнали радіолокаційних альтиметрів і бортових РЛС. За отриманими даними встановлюється напрямок на БПЛА (пеленг об'єкту), точність визначення якого підвищується із збільшенням часу спостереження. Але виявлення ліній зв'язку БПЛА з пунктом управління буде неефективним у разі автономного польоту або використання оптико-волоконних ліній зв'язку. У додатку Б. 2 наведено, що дальність виявлення БПЛА може бути значною, якщо потужність випромінювання передавачів і коефіцієнт підсилення антени його радіоелектронних засобів велика.

Таким чином, БПЛА можуть бути виявленими засобами радіотехнічної розвідки шляхом прийому і аналізу радіосигналів ліній зв'язку і управління, сигналів радіолокаційних висотомірів і бортових РЛС. При цьому застосування засобів РТР дозволяє визначити пеленг на БПЛА та забезпечити цілевказання для оптико-електронних та акустичних засобів спостереження. Але у разі автономного польоту БПЛА зникає можливість виявлення ліній зв'язку з пунктом управління, а режим радіомовчання не дозволяє відстежувати сигнали бортових РЛС.

1.1.4 Розпізнавання БПЛА за даними радіолокаційних засобів

Як зазначалося вище ЕПР БПЛА залежить від його просторової конфігурації та електричних властивостей матеріалу з якого він виготовлений та впливає на дальність виявлення БПЛА. Поряд з цим, ЕПР БПЛА може використовуватися для його розпізнавання і класифікації. Під час вирішення цих задач, як правило, використовують радіолокаційні дальнісні портрети (РЛДП) ПО, так звані сигнатури [33], які отримуються при використанні ширококутових радіолокаційних сигналів, та забезпечують розрізнення окремих елементів ПО за дальністю [35]. Форма РЛДП ПО пов'язана з його геометричними, фізичними і кінематичними

властивостями. На кожному дальнісному відліку РЛДП амплітуда отриманого сигналу представляє потужність відбитого сигналу. Залежно від співвідношення між лінійним розміром ПО та елементом розрізнення РЛС по дальності в радіальному і поперечному напрямках, ПО поділяють на точкові і протяжні (розподілені) [35].

У роботах [33-38, 91-95] розглянуто порядок побудови РЛДП та їх використання для розпізнавання ПО. Радіолокаційний дальнісний портрет характеризується унікальним набором внесків в нього різних частин ПО, які залежать від курсового кута. Під час прийняття рішень про розпізнавання ПО використовуються різноманітні алгоритми, серед яких найбільш часто використовуються кореляційні [39, 91] або на основі нейронних мереж [92-95]. При цьому формуються характеристики РЛДП ПО і вирішується завдання радіолокаційного розпізнавання.

Роздільно спостерігати елементи конструкції ПО можливо, якщо використовуються зондуєчі сигнали з великою смугою частот (з суцільним спектром). При цьому у разі застосування тривалої когерентної обробки сигналів можлива побудова двовимірних портретів ПО, які в процесі розпізнавання порівнюються з еталонами [96]. Але під час застосування цього методу висуваються особливі вимоги до смуги частот і обчислювальних можливостей РЛС, а також існує велика залежність структури РЛДП від ракурсу ПО. У роботі [37] досліджуються питання конструювання морфологічних, геометричних і вейвлетних характеристик РЛДП. У якості найпростішої морфологічної ознаки РЛДП у цій роботі розглядається кількість піків в його структурі. До геометричних ознак відносяться глибина РЛДП (відстань між крайніми відліками у відбитому радіосигналі) і його моментні характеристики (моменти нульового та інших порядків, а також положення центру тяжіння РЛДП) [37]. Застосування вейвлет-аналізу дозволяє здійснити багаторівневу декомпозицію сигналів за допомогою двох груп функцій (апроксимуючої і деталізуючої). Перша група функцій забезпечує грубий опис сигналів і виділяє в них частини з достатньо повільною динамікою, а друга описує складові з локальною і швидкою динамікою з подальшою їх деталізацією [37].

Крім побудови РЛДП під час радіолокаційного розпізнавання ПО використовують інші різноманітні ознаки, наприклад, траєкторні, амплітудні (сигнальні),

поляризаційні, спектри роторної (вторинної, пропелерної, турбінної) модуляції [97]. До траєкторних ознак, як правило, відносять координатні ознаки – дальність, висота і кутове положення ПО. Всі вони характеризують просторове положення ПО і швидкість його руху [32]. Але ефективність оцінки цих параметрів значно залежить від завадової обстановки та ЕПР ПО. Результати досліджень [98] показали, що траєкторні ознаки при їх самостійному використанні не забезпечують прийнятної достовірності розпізнавання на заданій дальності. Сигнальні ознаки формуються при використанні частотно-часових параметрів сигналів відбитих від ПО. У якості сигнальної ознаки може бути використане значення ЕПР ПО [32]. Інформація про поляризаційні властивості ПО міститься в поляризаційній матриці вторинного випромінювання [31]. Але вимірювання її елементів припускає прийом відбитого сигналу на двох ортогональних лінійних або кругових поляризаціях. Все це приводить до збільшення маси і геометричних розмірів антен РЛС.

Що однією інформативною ознакою радіолокаційного розпізнавання вважають роторну модуляцію (РМ) [40-42, 89, 99]. Ефект виникнення РМ радіолокаційних сигналів обумовлюється обертанням лопатей (лопаток) двигунів ПО. У роботах [40, 99] наведено дослідження фізичних основ РМ та показано високі потенційні можливості методів, що використовують ефект РМ, для вирішення задач радіолокаційного спостереження. Основні результати, отримані у цих роботах, пов'язані із фізичними експериментами. Але проведення фізичних досліджень пов'язано із значними фінансовими і технічними витратами, а дослідження зарубіжних ПО є практично неможливими. Сучасна комп'ютерна техніка дозволяє реалізовувати складні методи математичного моделювання вторинної модуляції ПО, що дають можливість оцінювати їх характеристики розсіяння.

Результати математичного моделювання параметрів вторинної модуляції реальних ПО наведено у роботах [33, 41, 42, 86]. Так у роботі [42] за допомогою математичної моделі обґрунтовано умови отримання спектрів вторинної модуляції обертових структур ПО, а у роботі [33] досліджено вплив вторинної модуляції сигналів на форму РЛДП. Результати розробки методу розрахунку розсіяння електромагнітних хвиль пропелером ПО наведено у [86], а у роботі [41] описано

комбінований метод моделювання, який застосовується для розрахунку спектрів РМ сигналів, відбитих від обертових гвинтів гелікоптера. Визначені параметри спектрів РМ та їх закономірності можуть бути використані для розпізнавання різних ПО і для визначення характеру їх руху (виявлення маневру). Для підвищення якості розпізнавання використовують одразу декілька ознак розпізнавання. У роботі [35] запропоновано метод та алгоритм радіолокаційного розпізнавання ПО, які використовують в якості основної ознаки РЛДП, а в якості допоміжних – РМ та траєкторну ознаку. Показано, що застосування траєкторних ознак дає більший ефект, ніж застосування РМ та вказано, що це пов'язано з тим, що умови отримання РЛДП не дозволяють прямими методами отримувати спектр РМ.

До недоліків застосування РМ, як ознаки розпізнавання ПО, відносять необхідність знання закону зміни РМ сигналу для всіх типів ПО з урахуванням можливого затінювання лопаток різними елементами ПО та залежність РМ від ракурсу руху ПО [91]. Поява нових типів ПО або відсутність інформації про існуючі ПО (зарубіжні) приводить до помилкових рішень розпізнавання. Також під час застосування РМ для розпізнавання знижується дальність спостереження ПО відносно до його дальності виявлення унаслідок меншої інтенсивності комбінаційних складових двигуна по відношенню до планерної складової [41, 96].

Розглянемо підходи до розпізнавання ПО, які використовують частотно-часові представлення сигналів. За допомогою частотно-часового аналізу формуються інформативні ознаки для оцінки і розпізнавання кінематичних параметрів руху ПО. Оскільки інформація про рух ПО міститься у законі частотної модуляції відбитого сигналу, то для його дослідження використовують методи частотно-часового аналізу, які реалізовані у різних математичних пакетах та мовах програмування, наприклад, Matlab або Python. Деякі дослідження перетворення сигналів у частотно-часову область наведено у роботах [100, 101].

У теперішній час існують роботи, які присвячені аналізу мікродоплерівських сигналів для розпізнавання і класифікації рухомих об'єктів [43-45, 102-107]. Основи ефекту мікро-Доплера, а також його ключові поняття наведено у роботах [44, 45]. У цих роботах вказано, що ефект мікро-Доплера полягає у зміні спектру

відбитого сигналу за рахунок мікрорухів ПО, а мікрорухи – це вібрації та обертання складових частин ПО (наприклад, обертові лопаті гелікоптерів або турбін літаків), які супутні його глобальному поступальному руху. Також у роботах [44, 45] визначено, що мікродоплерівський сигнал містить в собі доплерівські зсуви частоти, викликані мікрорухами ПО, а сигнатура мікро-Доплера – це унікальна характеристика руху ПО, яка полягає у складній модуляції доплерівської частоти відбитого сигналу і представлена у частотно-часовій області.

Одним з напрямків аналізу мікродоплерівських сигналів є розробка алгоритмів декомпозиції багатокомпонентних сигналів, які розглянуто у роботах [43, 102]. Декомпозиція багатокомпонентних ДС полягає у виділенні окремих компонент, які характеризують мікрорухи об'єктів, тобто інформація, яка є у початковому сигналі, представляється сукупністю параметрів часткових компонент. В результаті цього складна структура ДС представляється набором коефіцієнтів розкладання в базисі. Форма компонент базису вибирається на підставі апріорної інформації про сигнали, що приймаються, і спостережувані ПО [102].

У роботі [103] наведено результати застосування методів розріджених уявлень для представлення ДС суперпозицією функцій словника. При цьому, під словником розуміється матриця, стовпці якої містять компоненти розкладання, що називають атомами словника. У роботі [104] представлена модель однокомпонентного ДС на підставі якої формується словник, який використовується під час декомпозиції. Але, запропоновані методи декомпозиції багатокомпонентних ДС дуже чутливі до впливу різних видів завад, а також виникають труднощі під час створення словників та його властивостями, наприклад, із ступенем взаємозалежності словникових функцій.

У роботі [105] показано можливість застосування мікродоплерівської сигнатури гелікоптера, яка представляється у вигляді розподілу в частотній і часовій областях, для його розпізнавання. У цій роботі наголошується, що найбільш корисним для розпізнавання сигналом є сигнал, що відбитий від лопатей обертових гвинтів гелікоптера (несучого і рульового). Також вказується, що сигнал в часовій області складається з періодичних модуляційних складових (характерних піків),

що обумовлені обертанням лопатей гвинтів в моменти часу, коли лопать перпендикулярна напрямку опромінювання. Характерні піки з великим періодом повторення відповідають відбиттям від лопатей несучого гвинта, а з меншим періодом – від лопатей рульового гвинта гелікоптера. У той же час, сигнал, відбитий від літака з одним гвинтом, в часовій області містить один набір періодичних складових з однаковим періодом [105].

Необхідно зазначити, що основною проблемою під час дослідження рухомих ПО за допомогою ефекту мікро-Доплера є те, що відбитий ДС має складну багатокомпонентну структуру. Обробка таких складних сигналів потребує великих обчислювальних витрат, що, у свою чергу, приводить до зниження швидкості обробки, яка потрібна під час вирішення термінових задач безпеки за допомогою доплерівських РЛС [106]. Крім того, мікрорухи в основному формуються складовими частинами ПО, які мають невеликі ЕПР, і це вимагає застосування РЛС з високою чутливістю, або використання під час зондування ПО протяжних у часі сигналів. Також процес аналізу параметрів ДС (руху ПО) має низку обмежень. До них можна віднести, те, що потенційна розрізнявальна здатність ДС за частотою визначається часом накопичення відліків відбитого сигналу, а також складність аналізу особливостей структури ДС, які характеризують рух ПО. Ці особливості обумовлені, тим, що відбитий від ПО радіолокаційний сигнал є суперпозицією відбиття від всіх об'єктів у межах елемента розрізнення РЛС, а за рахунок цього ДС є суперпозицією компонент з частотною модуляцією, які обумовлюються різноманітними рухами ПО, наприклад, наявністю декількох (більше двох) обертових роторів БПЛА [107]. У зв'язку з тим, що параметри частотної модуляції сигналів, відбитих від ПО, та кількість таких сигналів у сумарному ДС невідомі, то складність ДС та їх інформативність на етапі первинної обробки також є невідомими.

Взагалі розвиток доплерівських РЛС і розширення областей їх застосування у різних сферах вимагає розробки нових методів аналізу взаємодії електромагнітного випромінювання з рухомими ПО, які дозволять досліджувати різноманітну інформацію про ПО. Ці методи повинні мати невелику обчислювальну складність та дозволяти визначати нові інформативні ознаки для розпізнавання складних ру-

хів ПО та їх складових частин. Для цього необхідно вивчити структуру сигналів та розробити моделі ДС, що ґрунтуються на експериментальних даних.

У ряді робіт розроблені математичні моделі ПО на підставі їх структурних та кінематичних особливостей. Так у роботах [108, 109] запропоновані моделі руху квадрокоптерів (БПЛА з чотирма роторами), що враховують кінематичні і динамічні характеристики, механічні процеси в системі обертових роторів квадрокоптера, а також алгоритми формування керуючих дій. Але, в даний час практично відсутні роботи, присвячені побудові моделей ДС, відбитих від мультироторних БПЛА, які дозволяють оцінити особливості ДС, що обумовлені різною швидкістю та кількістю обертових роторів.

Таким чином, не дивлячись на те, що в останні роки була проведена велика кількість досліджень щодо виявлення та розпізнавання БПЛА, завдання визначення відповідних інформативних ознак розпізнавання мультироторних БПЛА залишається не вирішеним. Тому сьогодні актуальною науково-прикладною задачею є розробка методів аналізу взаємодії електромагнітного випромінювання з обертовими роторами БПЛА та визначення взаємозв'язків між параметрами ДС і кінематичними параметрами БПЛА. Для вирішення цієї задачі доцільно експериментально отримати ДС, відбиті від обертових роторів БПЛА, та ДС, відбиті від рухомих БПЛА різних типів. На підставі цих даних необхідно розробити модель ДС та нові методи аналізу їх структури. Останнім часом для аналізу сигналів, що мають складну форму, використовують методи нелінійної динаміки [110-116].

1.2 Особливості взаємодії електромагнітного випромінювання з рухомих БПЛА

Дослідження сигналів відбитих від рухомих об'єктів показує, що різна складність руху приводить до різних форм сигналу, тобто аналізований сигнал має флуктуації за рахунок зміни частоти, фази і амплітуди відбитого сигналу [116, 117]. Для дослідження особливостей взаємодії електромагнітного випромінювання з рухомих БПЛА необхідно отримати їх реальні часові реалізації відби-

тих ДС. Для цього було проведено низку експериментальних досліджень, яка містила лабораторні (статичні) [47] та натурні (динамічні) дослідження [51, 52]. Під час лабораторних досліджень БПЛА фіксувався на одному місці (не злітав і не рухався), а оберталися лише його ротори, кількість і швидкість яких змінювалася. В лабораторних умовах для отримання відбитих ДС використовувалася малопотужна доплерівська РЛС IPS-154. Під час проведення динамічних експериментів зондувалися два типи БПЛА (з трьома і шістьма роторами), які рухалися у реальних умовах обстановки (у повітрі) на різних висотах і у різних напрямках. При цьому відбиті ДС отримувалися за допомогою РЛС розвідки наземних і надводних цілей 1РЛ133 «Кредо». Докладний опис складу експериментальних установок, об'єкти досліджень і умови проведення експериментів наведено у підрозділі 2.1.

На рис. 1.1 показано часові реалізації записаного під час статичного експерименту сигналу (вибірка розміром $2^{13} = 8192$ точок, нормування ДС проводилося щодо його середнього значення) при зондуванні: фону (а), одного (б), двох (в) і трьох (г) роторів БПЛА, що оберталися з швидкістю 750 об/хв. По осі абсцис (x) відкладено номери точок записаного сигналу, а по осі ординат (Y) – амплітуда ДС (кількість рівнів дискретизації). На рис. 1.2 показано спектри ДС під час зондування об'єктів зазначених на рис. 1.1.

Аналіз часових реалізацій ДС, показаних на рис. 1.1, дозволяє оцінити деякі особливості відбитих сигналів. На рис. 1.1, а видно, що ДС, обумовлений фоном, має більшу високочастотну складову у порівнянні з ДС, обумовленими обертанням роторів БПЛА, але у цьому сигналі також присутня низькочастотна складова, яка проявляється в його амплітудній модуляції. Часовий аналіз ДС під час зондування різної кількості обертових роторів БПЛА (рис. 1.1, б-г) дозволяє спостерігати загальну поведінку відбитого сигналу, визначити наявність низькочастотної і високочастотної складових. Але такий аналіз не дозволяє оцінити кількісні і якісні особливості взаємодії електромагнітного випромінювання з різною кількістю обертових роторів БПЛА.

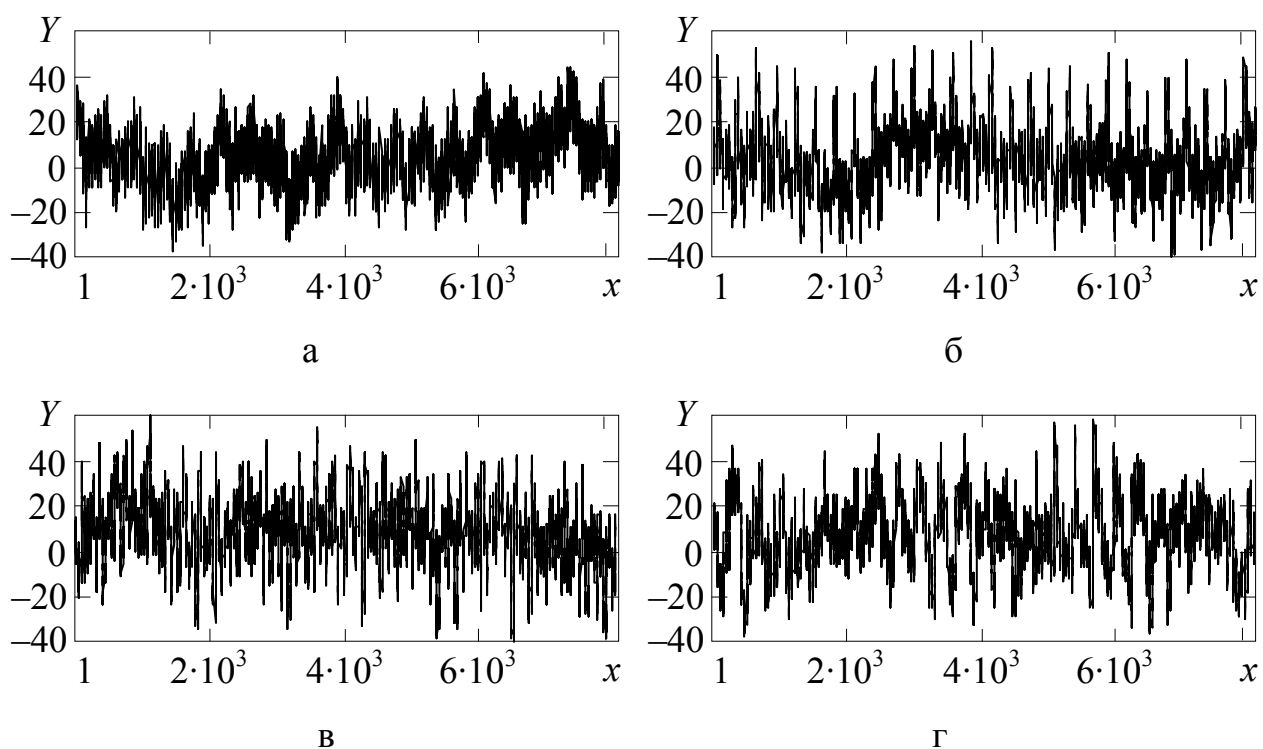


Рисунок 1.1 – Часові реалізації доплерівського сигналу при зондуванні:
фону (а), одного (б), двох (в) і трьох (г) обертових роторів БПЛА

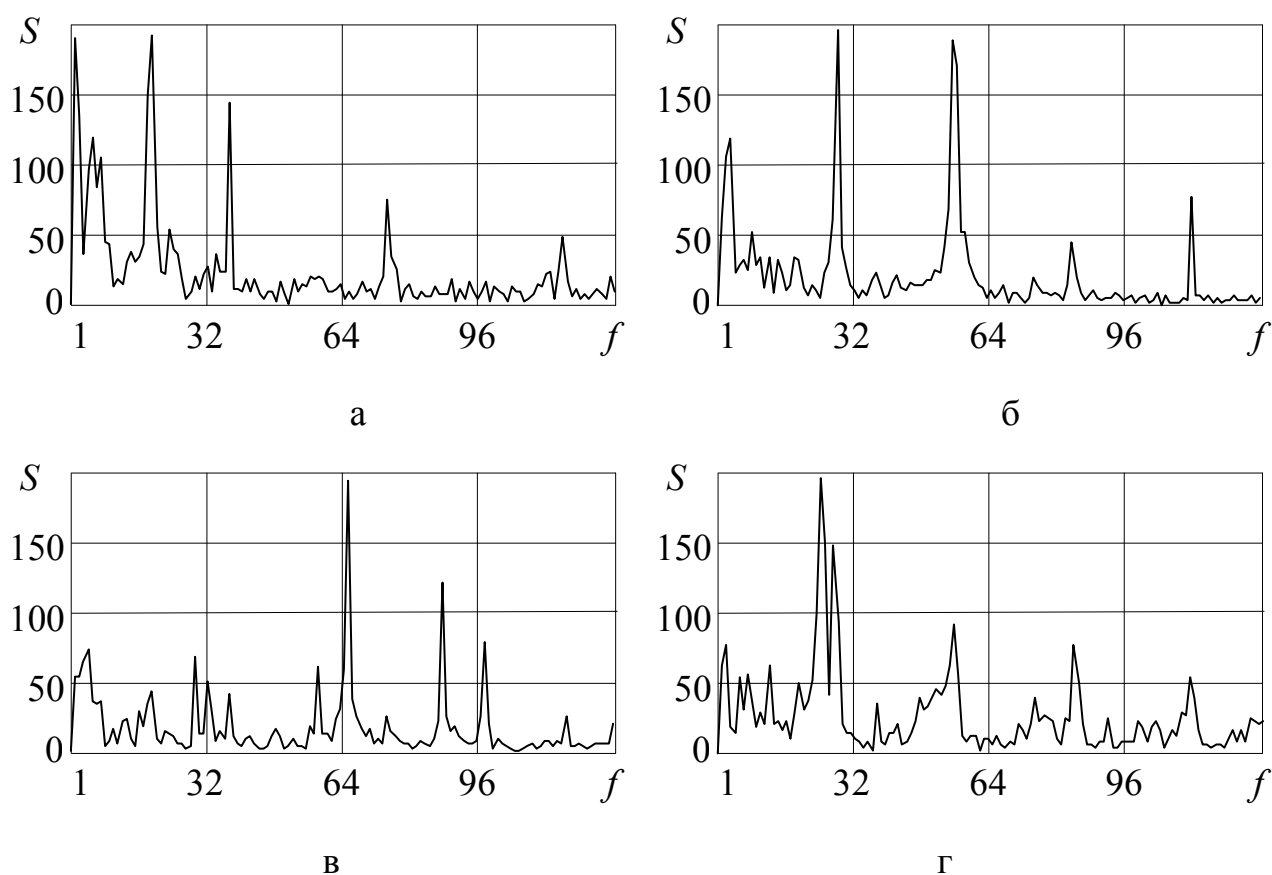


Рисунок 1.2 – Спектри доплерівського сигналу при зондуванні:
фону (а), одного (б), двох (в) і трьох (г) обертових роторів БПЛА

Спектральний аналіз отриманих сигналів показує, що спектри ДС, обумовлені як фоном на трасі зондування (рис. 1.2, а), так і обертанням роторів БПЛА (рис. 1.2, в-г), мають декілька спектральних складових приблизно на однакових частотах, що не дозволяє за цією ознакою розрізнити кількість обертових роторів БПЛА. За формою спектру різниця спостерігається тільки під час зондування трьох роторів БПЛА (рис. 1.2, г). Докладний спектрально-часовий аналіз сигналів, відбитих від обертових роторів БПЛА, буде проведено у підрозділі 2.2.

На рис. 1.3 показано часові реалізації записаного під час динамічного експерименту сигналу при зондуванні: фону на трасі зондування (а), завислого БПЛА з 6 роторами (б), рухомого БПЛА з 3 роторами (в) і рухомого БПЛА з 6 роторами (г), а на рис. 1.4 – спектри ДС під час зондування зазначених об'єктів.

Аналіз часових реалізацій ДС, показаних на рис. 1.3, дозволяє визначити синусоїдальний характер відбитих сигналів, але визначити особливості таких сигналів тільки за часовою реалізацією практично не можливо. Форма сигналів під час зондування фону (рис. 1.3, а), а також завислих і рухомих БПЛА (рис. 1.3, в-г) практично не розрізняються. Докладний аналіз таких сигналів наведено у [51, 52]. Спектри відбитих ДС (рис. 1.4) також не дозволяють проводити аналіз їх особливостей, які обумовлені різним рухом і кількістю роторів БПЛА.

Таким чином, аналіз особливостей взаємодії електромагнітного випромінювання з рухомих БПЛА показує, що відбиті сигнали мають складну форму, оцінити особливості якої за допомогою частотно-часових характеристик дуже важко.

Для аналізу особливостей взаємодії електромагнітного випромінювання з рухомих БПЛА необхідно розробити нові методи, які дозволяють оцінити характерні форми сигналів відбитих від обертових роторів БПЛА та під час їх руху. Якісний аналіз таких сигналів доцільно проводити з використанням методу псевдофазової площини [51], а кількісний – з використанням фрактального методу [52]. Коротко розглянемо сутність цих методів нелінійної динаміки.

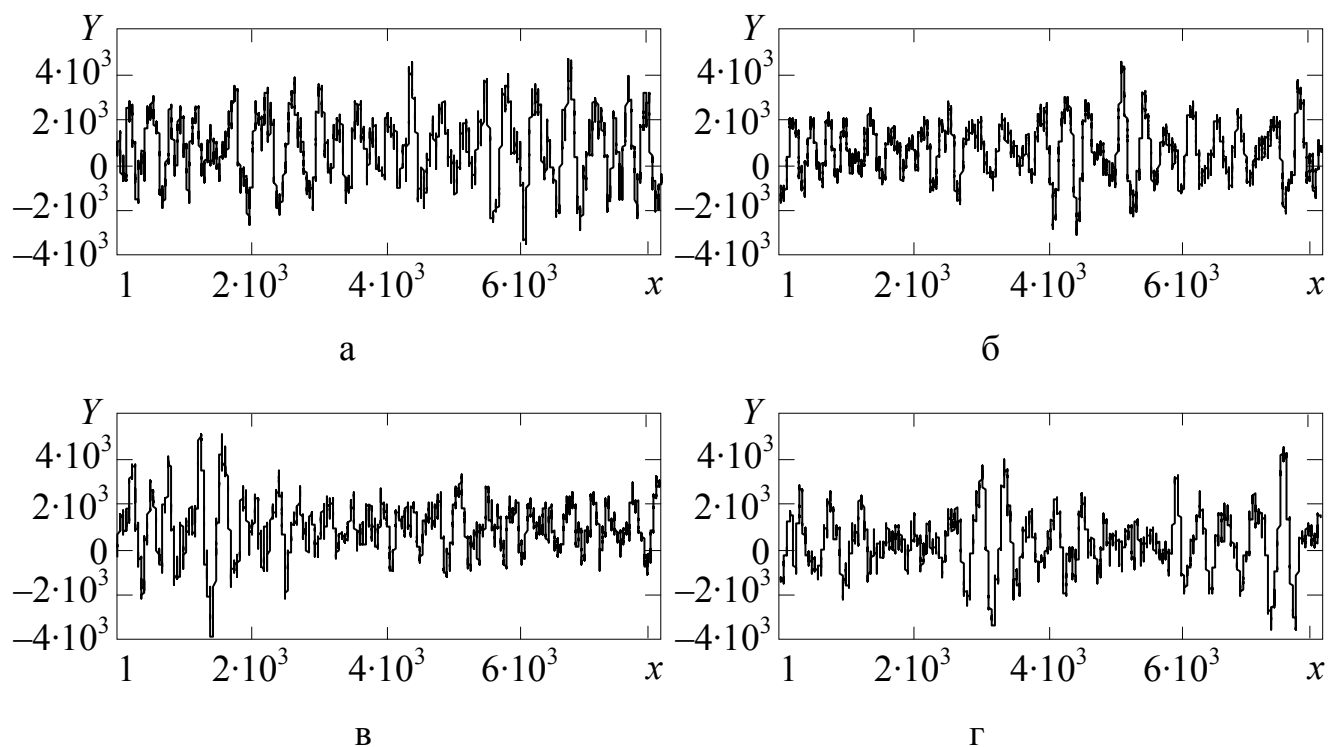


Рисунок 1.3 – Часові реалізації ДС при зондуванні: фону (а), завислого БПЛА з 6 роторами (б), рухомого БПЛА з 3 (в) і 6 (г) роторами

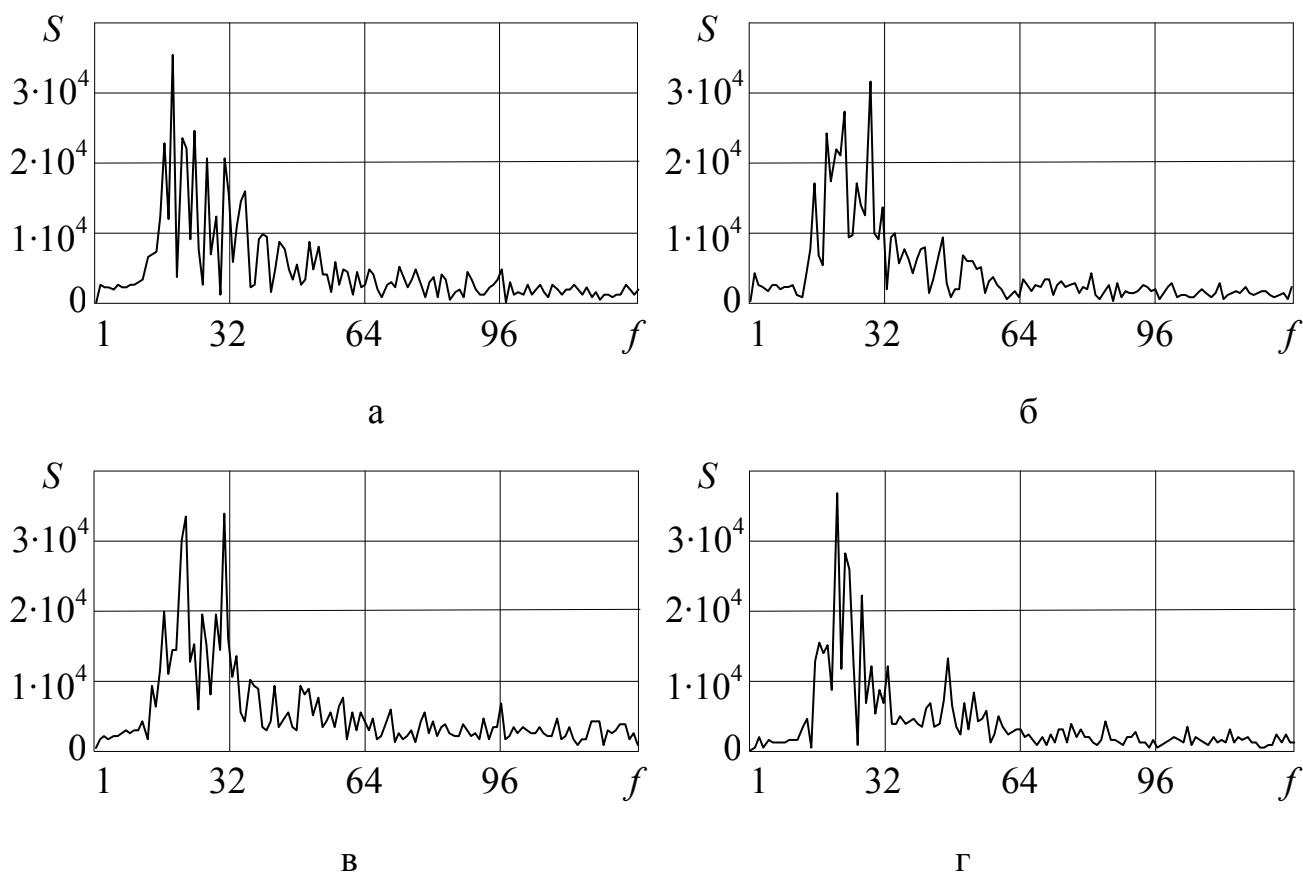


Рисунок 1.4 – Спектри ДС при зондуванні: фону (а), завислого БПЛА з 6 роторами (б), рухомого БПЛА з 3 (в) і 6 (г) роторами

1.3 Аналіз методів нелінійної динаміки для аналізу сигналів радіолокаційних засобів

Нелінійна динаміка – розділ сучасної математики (міждисциплінарна наука), що займається дослідженням нелінійних динамічних систем. Нелінійна динаміка використовує для опису систем нелінійні моделі, що зазвичай описуються диференціальними рівняннями і дискретними відображеннями [110]. Геометричний образ нелінійної функції – крива на площині, викривлена поверхня або гіперповерхня в просторі три або більшого числа вимірювань [111]. На однакові прирости незалежної змінної одна і та ж нелінійна функція відгукується по-різному залежно від того, якому значенню незалежної змінної додається приріст. Майже повною не залежить від зміни одних і сильно залежить (підвищено чутлива) від зміни інших значень змінної нелінійної функції.

Під динамічною системою умовилися розуміти систему будь-якої природи (фізичну, хімічну, біологічну, соціальну, економічну і т. д.), стан якої змінюється (дискретно або безперервно) у часі [112].

Основними методами нелінійної динаміки є: фрактальний метод [123-137]; метод псевдофазової площини (реконструкції атрактору) [138-147]; метод відображень (перетинів) Пуанкаре [138-140]; метод стійкості динамічних систем (показників Ляпунова) [148-150]; метод біфуркації нерухомих точок [150, 151]. Для аналізу форм радіолокаційних сигналів найбільш інформативними є метод псевдофазової площини і фрактальний метод [115, 116].

1.3.1 Особливості побудови фазових портретів радіолокаційних сигналів на псевдофазовій площині

Метод фазової (псевдофазової) площини є графоаналітичним методом дослідження динамічних систем. Поняття фазового простору виникло по аналогії з фазовим простором, що використовується в класичній і статистичній механіці. У

загальному випадку фазовий простір можна визначити як абстрактний математичний простір, в якому осями координат є стан системи та її похідні [152].

Використання фазової площини дозволяє отримати рішення диференціального рівняння не з використанням інтегрування, а його представленням на площині з прямокутною системою координат. Під фазовою площиною мається на увазі площина, кожна точка якої однозначно визначає стан (фазу) системи [152]. При такому представленні кожному стану динамічної системи однозначно відповідає точка на площині з координатами x, y і, навпаки, кожній точці площини відповідає один, і лише один стан досліджуваної динамічної системи. Площина Oxy називається фазовою площиною. Як змінна y може бути вибрана швидкість зміни координати x , тобто $y = \frac{dx}{dt} = \dot{x}$.

Зміна стану системи зображується на фазовій площині рухом точки, яку називають фазовою (зображаючою, представляючою) точкою. Траєкторія, по якій рухається зображаюча точка називається фазовою траєкторією (ФТ). Через кожну точку фазової площини проходить тільки одна фазова траєкторія [140]. Сукупність фазових траєкторій називається фазовим портретом системи і відображає сукупність всіх можливих поєднань системи і типи можливих рухів в ній [140].

Метод фазової (псевдофазової) площини дає можливість за виглядом фазових траєкторій наочно представити всю сукупність рухів, що виникають в динамічній системі за будь-яких початкових умов. Суть методу полягає у побудові фазових портретів (ФП) і дослідженні та аналізі особливостей форм ФП. Для побудови ФП портретів до появи комп'ютерів використовували три основні способи: метод ізоклін; побудова Льєнара; дельта-метод [153], але вони є трудомісткими і на сьогодні практично не використовуються.

В останні десятиліття в рамках нелінійної динаміки отримано ряд фундаментальних теоретичних результатів і розроблені методики, що обґрунтовують принципову можливість прогнозування фізичних процесів на базі їх часових рядів [112, 139, 140, 143, 144]. Однією з основоположних ідей є те, що при побудові емпіричних моделей за часовим рядом, в яких не достає змінних, можна використо-

увати або послідовні значення доступної спостережуваної величини, або її послідовні похідні. Було доведено, що при реконструкції за скалярною часовою реалізацією динамічної системи метод часових затримок гарантує, що в нових змінних буде отримано еквівалентний опис початкової динамічної системи при достатньо великій розмірності відновлених векторів D . А саме, повинна виконуватися умова $D > 2d$, де d – розмірність множини фазовому просторі початкової системи, на якому відбувається модельований рух. Ці твердження і складають зміст теорем Такенса [142].

Для системи, в якій зміряна тільки одна величина, будується залежність сигналу від цієї ж величини в інший момент часу, відстаючий або випереджаючий даний момент часу на постійну величину: $[x(t), x(t + T)]$. Сигнал $x(t + T)$ пов'язаний з $\dot{x}(t)$ і результат має ті ж властивості, що і при використанні дійсної фазової площини [140]. Побудова ФП на псевдофазовій площині (ПФП) не вимагає великого часу для вирішення диференціальних рівнянь, а використання ПЕОМ дозволяє будувати ФП складних динамічних систем практично в реальному масштабі часу. Для задач, що моделюються на обчислювальних машинах, зручно отримати рішення у вигляді $x(t)$ і $y(t)$, а потім побудувати криву $y = f(x)$, виключивши t .

На рис. 1.5 показано часову реалізацію періодичного сигналу $x(t)$ з одиничною амплітудою і його фазовий портрет на фазовій площині $y(x)$, який побудований з використанням комп'ютера. Як видно на рис. 1.5, ФП періодичного сигналу є колом. Збільшення частоти (зменшення періоду) сигналу не приводить до зміни форми ФП, а приводить до накладення кіл одне на одне.

На рис. 1.6 показано ФП гармонічного сигналу, побудовані на ПФП при різних часових затримках ($T_1 < T_2 < T_3$). Як видно на рис. 1.6, б можна підібрати таке значення часової затримки, при якому ФП на ПФП відповідатиме ФП на реальній фазовій площині (див. рис. 1.5, б і рис. 1.6, б). Найбільш важким завданням під час побудови ФП на ПФП є вибір правильної величини часової затримки T .

Простий спосіб – це вибрати T близьким до першого нуля автокореляційної функції (АКФ) для ряду x_i [112]

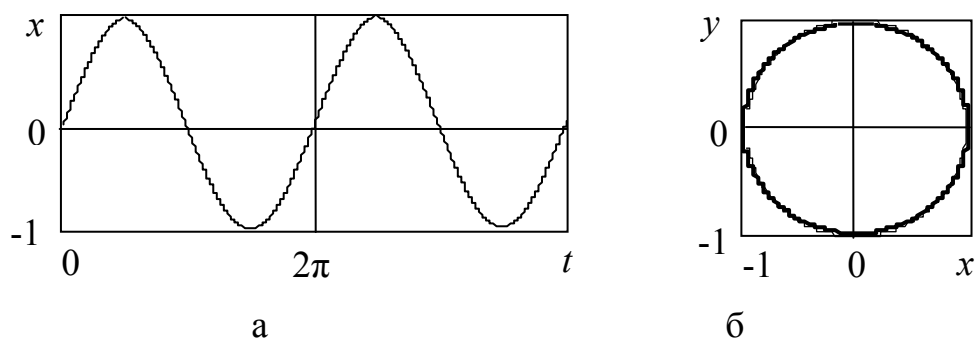


Рисунок 1.5 – Часова реалізація (а) і ФП (б) періодичного сигналу

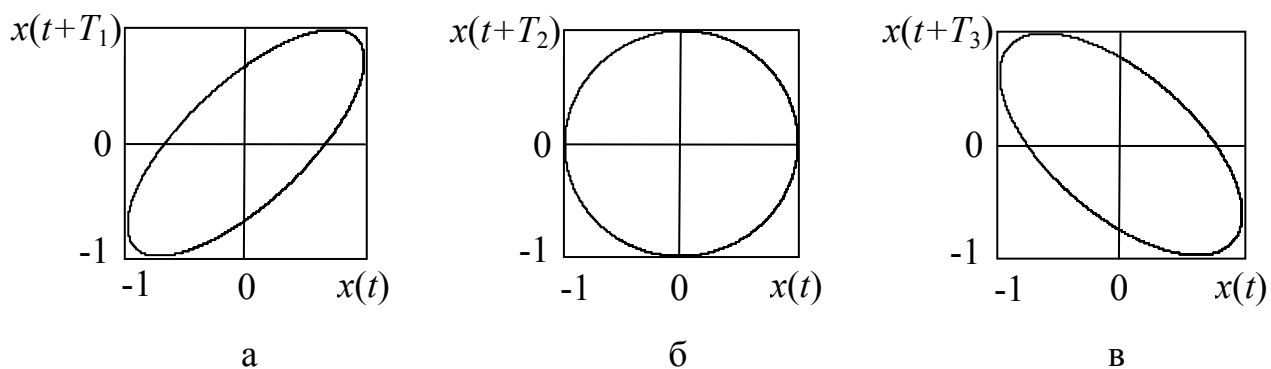


Рисунок 1.6 – Фазові портрети гармонічного сигналу, побудовані на псевдофазовій площині: часова затримка T_1 (а); T_2 (б); T_3 (в)

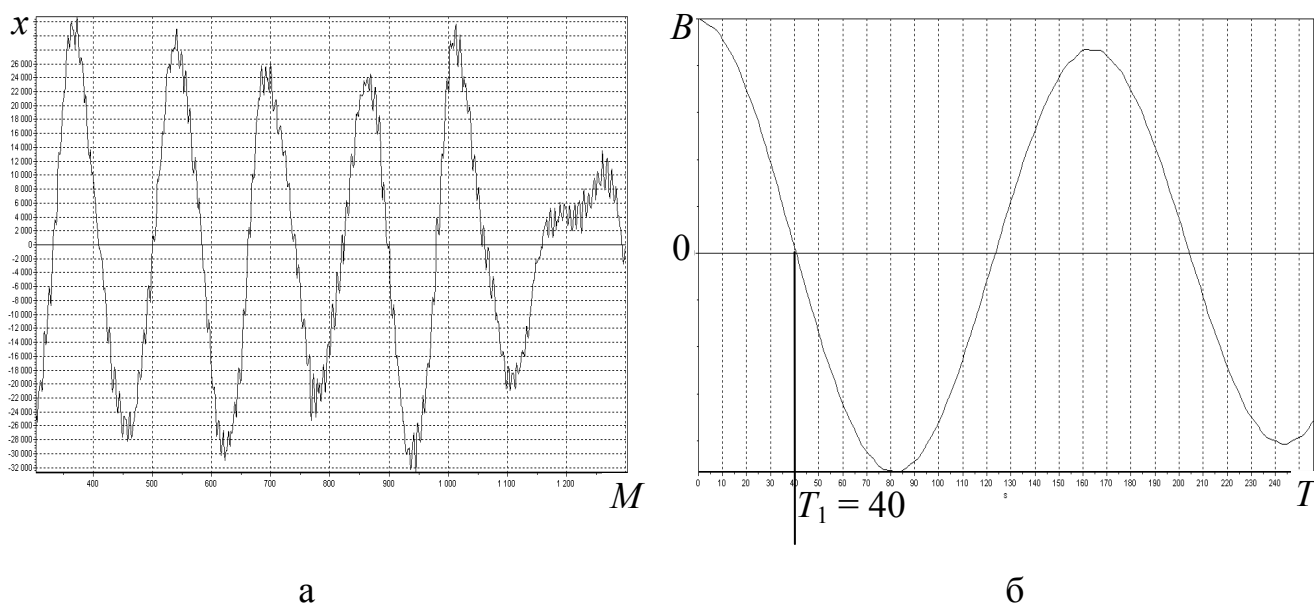


Рисунок 1.7 – Приклад часового ряду (а) та його автокореляційна функція (б)

$$B(T) = \frac{1}{m} \sum_{i=0}^{m-1} (x_i - \bar{x})(x_{i+T} - \bar{x}), \quad m = M - T, \quad (1.5)$$

де \bar{x} – середнє значення часового ряду;

M – довжина часового ряду.

Приклад часового ряду показано на рис. 1.7, а, а відповідна йому АКФ – на рис. 1.7, б. АКФ розрахована з використанням програми FRACTAN [154].

Інший спосіб заснований на обчисленні середньої взаємної інформації (СВІ) між двома вимірюваннями [112]. Нехай дано дві множини вимірювань A і B . Взаємна інформація між елементом a_i множини A і елементом b_j множини B визначається, як кількість інформації, яку мають вимірювання a_i і b_j по відношенню один до одного. Усреднюючи по всіх вимірюваннях, отримуємо

$$I_{A,B} = \sum_{a_i, b_j} P_{AB}(a_i, b_j) \ln \left[\frac{P_{AB}(a_i, b_j)}{P_A(a_i)P_B(b_j)} \right]. \quad (1.6)$$

Замінюючи a_i і b_j на x_i і x_{i+T} відповідно, отримуємо середню взаємну інформацію, як функцію часової затримки T . Затримка T вибирається рівною часу першого мінімуму СВІ. На рис. 1.8 показано графік СВІ, як функції часової затримки, що відповідає часовому ряду, який показано на рис. 1.7, а. СВІ розрахована з використанням програми FRACTAN [154].

Перший нуль АКФ, яка відповідає часовому ряду, показаному на рис. 1.7 а, дорівнює $T_1 = 40$ (див. рис. 1.7, б), а перший мінімум СВІ – $T_2 = 26$ (див. рис. 1.8). Фазові портрети, побудовані при таких часових затримках показано на рис. 1.9, а і б, відповідно, за допомогою програми FRACTAN [154].

Таким чином, побудову ФП на ПФП площині можна використовувати для наочного уявлення та якісного дослідження властивостей динамічних систем, які неможливо або скрутно досліджувати аналітично. Використання ЕОМ дозволяє будувати ФП складних динамічних систем практично в реальному масштабі часу. Також необхідно зазначити, що форма ФП залежить від величини часової затримки T .

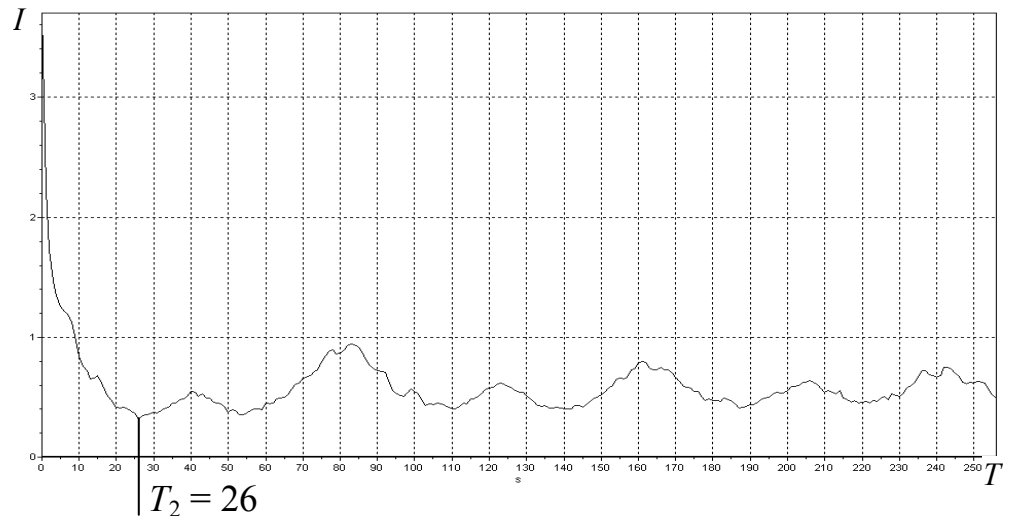
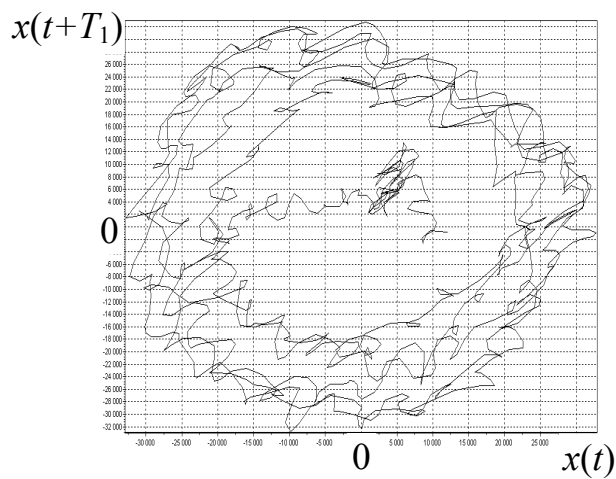
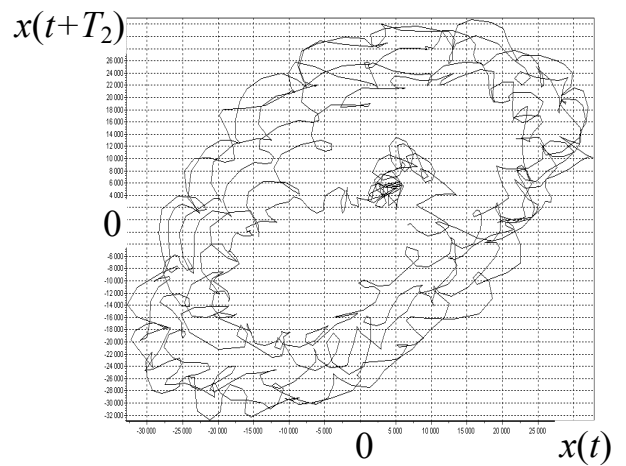


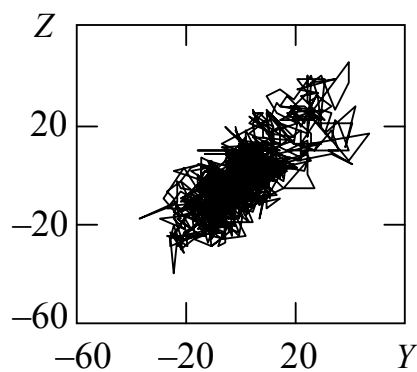
Рисунок 1.8 – Графік середньої взаємної інформації



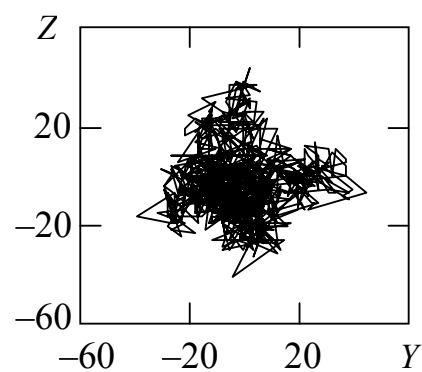
а



б

Рисунок 1.9 – Фазові портрети, побудовані при $T_1 = 40$ (а) і $T_2 = 26$ (б)

а



б

Рисунок 1.10 – Фазові портрети ДС при обертанні одного ротора з швидкістю 750 об/хв, побудовані з часовими затримками: $T_2 = 10$ (а) і $T_1 = 47$ (б)

Розглянемо особливості побудови ФП на ПФП (перетворення вихідного часового ряду на нову площину аналізу) ДС, відбитих від обертових роторів БПЛА [49]. Спочатку розраховуються графіки АКФ і СВІ ДС та знаходяться перший нуль АКФ і перший мінімум СВІ. Наприклад, для ДС, наведеного на рис. 1.1, б перший нуль АКФ досягає при $T_1 = 47$, а перший мінімум СВІ – при $T_2 = 10$. Далі будуються ФП при таких часових затримках.

На рис. 1.10 показані ФП ДС при обертанні одного ротора з швидкістю 750 об/хв, побудовані з часовими затримками: $T_2 = 10$ (а) і $T_1 = 47$ (б). На зображеннях ФП по осі абсцис відкладені значення записаного сигналу (Y), а по осі ординат зрушені на T точок значення цього ж сигналу (Z). Як видно на рис. 1.10, форма ФП значно залежить від величини часової затримки T . Якщо T вибрати близьким до першого мінімуму СВІ, то ФП матиме витягнуту по діагоналі форму і аналізувати особливості ДС в цьому випадку скрутно. Єдина особливість такого ФП проявляється у верхній частині у вигляді деякого відділення фазової траєкторії від основної частини ФП. Збільшення часової затримки до величини близької до першого нуля АКФ дозволяє досліджувати особливості ДС на ПФП.

Таким чином, побудова ФП ДС дозволяє проводити аналіз особливостей сигналу, а форма ФП ДС, відбитого від обертових роторів БПЛА залежить від величини часової затримки. Для налізу ФП ДС доцільно вибирати часові затримки близькі до першого нуля АКФ ДС і більше, а вибір часових затримок близьких до першого мінімуму СВІ є не інформативним.

1.3.2 Аналіз складності сигналів радіолокаційних засобів з використанням фрактальних розмірностей

Як зазначалося у підрозділі 1.2, сигнали з виходу доплерівської РЛС і каналу фазового детектора когерентно-імпульсної РЛС мають складну форму. Зміна форми сигналу визначається характером руху об'єкту зондування. В останнє десятиліття все частіше для аналізу сигналів, що мають складну форму, використовують фрактальний метод аналізу часових рядів [57, 116, 123-126, 155]. При викори-

станні даного методу ступінь складності (порізаності) сигналу може бути описана за допомогою характеристичного коефіцієнта – фрактальної розмірності D . Фрактальна розмірність (ФР), як правило, є позитивним нецілим числом, яке відображає, деяким чином, складність форми сигналу [124]. При двовимірному представленні радіолокаційного сигналу величина ФР лежить у межах $1,0 < D < 2,0$ [124]. Більшому значенню ФР відповідає більша ступінь заповнення площини. Таким чином, кількісною характеристикою складності форми ДС та їх фазових портретів може служити величина ФР. Відмінність форм ДС і ФП ДС у свою чергу приведе до різних величин ФР. Така поведінка величин ФР може використовуватися для аналізу особливостей форм ДС, а також дозволяє використовувати величину ФР, як відмітну ознаку при розпізнаванні рухомих об'єктів [116]. Суть фрактального методу аналізу ДС полягає у розрахунку ФР цифрових сигналів, побудові графіка змін величин ФР та аналізі областей змін ФР [57]. Основою даного методу є розрахунок ФР.

Розмірність Хаусдорфа-Безіковича (РХБ) (ємкісна розмірність) найбільш часто використовувана розмірність, яка дозволяє оцінити фрактальні характеристики різних структур [125, 127]. Стосовно ідеальних об'єктів класичної евклідової геометрії вона дає ті ж чисельні значення, що і відома, так звана, топологічна розмірність (дорівнює нулю для точки, одиниці – для гладкої плавної лінії, двом – для фігури і поверхні, трьом – для тіла і простору). Але РХБ має чутливість до всякого роду недосконалості реальних об'єктів, дозволяючи розрізняти і індивідуалізувати те, що раніше було безлике і невиразне [130]. Так, відрізок прямої, відрізок синусоїди і меандр не відрізняються з погляду топологічної розмірності (топологічну розмірність дорівнює одиниці), тоді як їх РХБ різні і дозволяє числом вимірювати ступінь порізаності. Так величина РХБ стає рівною 1,02 для злегка порізаної лінії, 1,5 – для більш порізаної і 1,9 – для дуже порізаної.

Розмірність Хаусдорфа-Безіковича розраховують за допомогою співвідношення [123]

$$D_H = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\log N(\varepsilon)}{\log(1/\varepsilon)}, \quad (1.7)$$

де ε – довжина сторони квадратів, якими покривають множину точок лінії;
 $N(\varepsilon)$ – кількість квадратів, в яких є точки лінії.

Також на практиці часто використовуються інформаційна і кореляційна розмірності, які наведені у додатку Б.

Розмірність сильно залежить від того, як її вимірювати. Це означає, що окрім формул для підрахунку розмірності необхідно точно задати і спосіб вимірювання. Ці особливості можуть утворювати не тільки різні види розмірностей, але і різні поняття, різні підходи до вимірювання [112].

Найбільш поширеним способом визначення ФР є метод покриття сигналів квадратами [126], який містить наступні кроки.

1. Задається деяке значення ε_1 , а часова область існування початкових даних розбивається на квадрати з стороною ε_1 (рис. 1.11) і підраховується, скільки квадратів накривають всі відомі точки. Виходить одне значення $N(\varepsilon_1)$.

2. Припустимо, що були проведені обчислення $N(\varepsilon)$ для різних довжин сторони ε (на рис. 1.11 це значення ε_1 , $\varepsilon_2 = \varepsilon_1/2$, $\varepsilon_3 = \varepsilon_1/4$). Як впливає з визначення фрактальної розмірності, при малих ε число елементів покриття $N(\varepsilon)$ повинне поводитися як $\sim \varepsilon^{-D}$, а у такому разі $\log N(\varepsilon) = -D \cdot \log \varepsilon$. Тепер за отриманими даними будується залежність $\log N(\varepsilon)$ від $\log 1/\varepsilon$, яку показано на рис. 1.12. Графік побудовано у середовищі MatLab [156].

3. Оцінювання ФР за отриманими даними зводиться до пошуку найбільш лінійної ділянки залежності $\log N(\varepsilon)$ від $\log 1/\varepsilon$. Далі побудові на цій ділянці лінійної апроксимації виду $\log N(\varepsilon) = b \cdot \log \varepsilon + C$, наприклад, за методом найменших квадратів (МНК). Як оцінка фрактальної розмірності береться $D = b$, тобто тангенс кута нахилу прямої МНК.

Найважче формалізувати в цьому способі вибір лінійної ділянки, за якою необхідно оцінювати розмірність. Використання апроксимації методом МНК дозволяє автоматизувати процес аналізу кутів нахилу (визначення ФР) для різних вхідних даних. Але, дана апроксимація при великій кількості точок може приводити до не точного опису характеру розподілу таких точок.

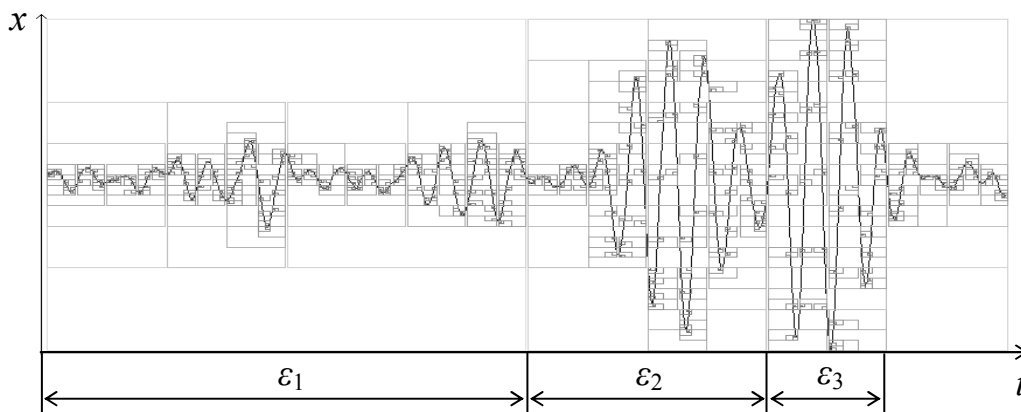


Рисунок 1.11 – Організація покриття початкової вибірки

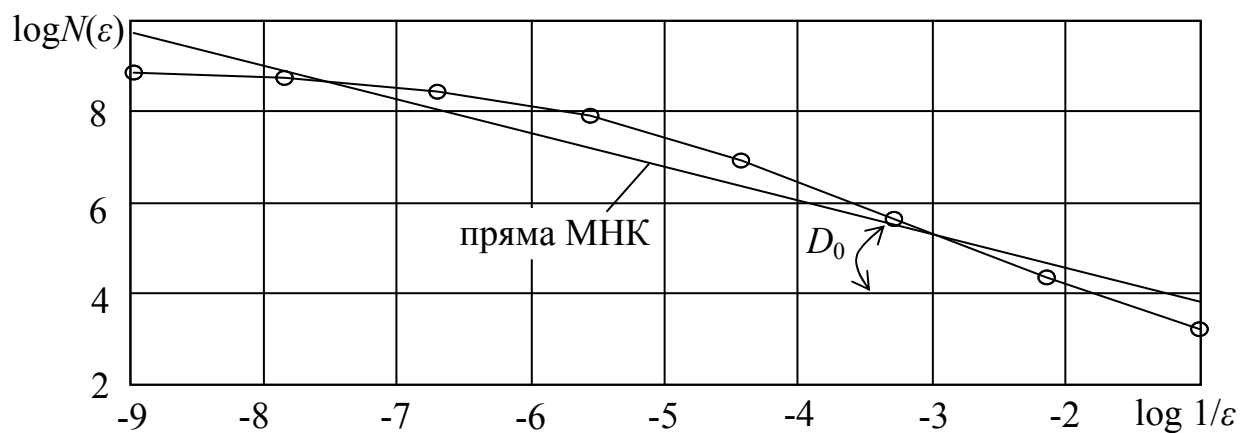


Рисунок 1.12 – Визначення фрактальної розмірності з використанням методу покриття

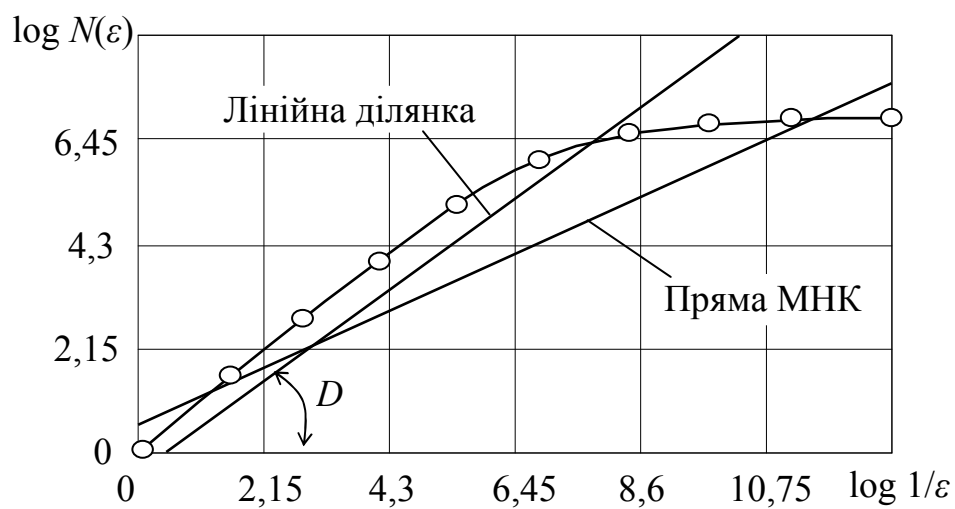


Рисунок 1.13 – Визначення фрактальної розмірності

На рис. 1.13 наведено залежність розподілу точок на площині $\log N(\varepsilon)$, $\log 1/\varepsilon$ при виборі 10 точок графіка, а також прямі їх апроксимації МНК і на лінійній ділянці під час визначення ФР ДС при обертанні одного ротора з швидкістю 750 об/хв [50]. При збільшенні числа точок друга частина графіка подовжується паралельно осі абсцис. На рис. 1.13 видно, що пряма МНК проходить тільки через дві точки залежності і не описує дійсний характер їх розподілу, тобто ФР визначається з помилкою, а ФР дорівнює $D_{\text{МНК}} = 1,57$. При збільшенні числа точок пряма МНК буде ще з більшою помилкою описувати розподіл точок. Для точнішого визначення ФР рекомендується вибирати найбільш лінійну ділянку розподілу початкових точок [50]. Пряма, побудована на лінійній ділянці, як видно на рис. 1.13, апроксимує більшу кількість точок (7 точок) і краще описує характер їх розподілу, а ФР, одержана на лінійній ділянці, дорівнює $D_{\text{ЛД}} = 1,788$.

Крім того, аналіз часових реалізацій ДС (див. рис. 1.1), показує, що вихідні сигнали за формою відрізняються не значно. Тому, для всіх ДС розподіл точок на площині $\log N(\varepsilon)$, $\log 1/\varepsilon$ буде відрізнятися тільки на перших семи точках, а після цього графік згинається і переходить у сталий режим. У зв'язку з цим ФР, розраховані за прямою МНК, будуть відрізнятися не значно. Для підвищення точності визначення ФР і збільшення чутливості методу до змін ФР доцільно проводити апроксимацію точок на лінійній (початковій) ділянці графіка.

Для можливості використання апроксимації МНК пропонується застосувати двохкрокову процедуру визначення ФР. Якщо сигнали отримуються від одного радіолокаційного засобу, то на першому кроці на початку розрахунку ФР один раз будується графік залежності $\log N(\varepsilon)$ від $\log (1/\varepsilon)$ при великій кількості точок, наприклад, 14 точок. За побудованим графіком визначається кількість точок коли графік змінюється до досягнення сталого стану, наприклад, це перші 7 точок. На другому кроці графік залежності $\log N(\varepsilon)$ від $\log (1/\varepsilon)$ будується тільки для 7 точок і апроксимація цих точок здійснюється МНК. Побудова прямої МНК в цьому випадку дозволить якісно апроксимувати всі 7 точок і ФР буде визначатися з невеликою помилкою. Крім того, така процедура дозволить автоматизувати процес визначення ФР і зменшити час на її обчислення для типових сигналів.

На практиці для визначення ФР також застосовують метод визначення довжини лінії [134]. На першому етапі цього методу також задається деяка величина ε_1 – це довжина первинного відрізка, яким буде вимірюватися довжина сигналу. На другому етапі сигнал покривається відрізками завдовжки ε_1 і підраховується число відрізків N , необхідних для вимірювання всього сигналу. При цьому закінчення одного відрізка є початком іншого. В результаті цих перетворень визначається перше (одне) значення $N(\varepsilon_1)$. Далі проводяться такі ж самі обчислення, що і у методі покриття.

Під час подальшого аналізу ДС фрактальні розмірності будуть розраховуватися методом покриття і методом довжини лінії при апроксимації точок на лінійній ділянці МНК.

Таким чином, величина ФР є чисельною характеристикою форми сигналів, відбитих від обертових роторів БПЛА. Відмінність форм відбитих сигналів приводить до різних величин фрактальної розмірності, що дозволяє використовувати величину ФР як ознаку розпізнавання рухомих об'єктів. Для підвищення точності визначення ФР і збільшення чутливості методу доцільно проводити апроксимацію точок на лінійній (початковій) ділянці графіка залежності $\log N(\varepsilon)$ від $\log 1/\varepsilon$.

Висновки до розділу 1 та постановка задачі досліджень

1. Малі габарити і сучасний рівень технології виробництва БПЛА ускладнює їх виявлення і розпізнавання з використанням радіолокаційних засобів. Основні методи аналізу сигналів, відбитих від рухомих повітряних об'єктів, реалізуються у різних діапазонах спектру електромагнітних хвиль (оптичному, інфрачервоному та радіочастотному), а також із застосуванням радіомоніторингу та акустичних засобів, але завдання аналізу сигналів, відбитих від БПЛА залишається не вирішеним. Тому актуальною науково-прикладною задачею є розробки методів аналізу взаємодії електромагнітного випромінювання з обертовими роторами БПЛА та визначення взаємозв'язків між параметрами ДС і кінематичними параметрами БПЛА.

2. Загальною метою дослідження є визначення нових ознак розпізнавання БПЛА мультироторного типу за рахунок виявлення особливостей взаємодії електромагнітного випромінювання з обертовими роторами БПЛА із використанням методів нелінійної динаміки. Для досягнення цієї мети необхідно вирішити часткові науково-технічні завдання:

аналіз існуючих методів дослідження електромагнітних сигналів відбитих від рухомого БПЛА;

експериментальне дослідження доплерівських сигналів, відбитих від обертових роторів БПЛА, та під час його руху;

оцінка частотно-часових характеристик сигналів доплерівської РЛС при зондуванні різної кількості роторів БПЛА і швидкості їх обертання;

розробка моделі доплерівського сигналу, відбитого від обертових роторів БПЛА, що враховує особливості форми сигналу;

розробка нових методів аналізу сигналів, відбитих від мультироторного БПЛА, які дозволяють виявляти особливості їх форми та оцінювати їх складність;

розробка методики розпізнавання типу рухомого БПЛА з використанням нових ознак розпізнавання.

3. Аналіз особливостей взаємодії електромагнітного випромінювання з рухомим БПЛА показує, що відбиті сигнали мають складну форму, оцінити особливості якої за допомогою частотно-часових характеристик дуже важко. Особливості форм ДС, відбитих від БПЛА, які неможливо або важко досліджувати аналітично, піддаються наочному уявленню та якісному дослідженню за допомогою перетворення ДС в іншу площину аналізу – у фазову (псевдофазову) площину. Для кількісної оцінки форми ДС пропонується використовувати фрактальний метод аналізу сигналів. Відмінність форм відбитих ДС та їх ФП приводить до різних величин ФР, що дозволяє використовувати величину ФР як ознаку розпізнавання БПЛА. Для підвищення точності визначення ФР і збільшення чутливості методу доцільно проводити апроксимацію точок на лінійній (початковій) ділянці графіка.

Результати досліджень даного розділу опубліковано у наукових працях [47, 49 – 52, 57].

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА МОДЕЛІ ДОПЛЕРІВСЬКОГО СИГНАЛУ, ВІДБИТОГО ВІД БПЛА, З ВИКОРИСТАННЯМ ФРАКТАЛЬНИХ НЕДИФЕРЕНЦІЙОВНИХ ФУНКЦІЙ

Розділ присвячено розробці моделі доплерівського сигналу, відбитого від обертових роторів БПЛА. Наведено методики проведення та результати експериментальних досліджень (лабораторних і натурних) мультироторних БПЛА. На підставі експериментальних досліджень обертання роторів БПЛА з використанням доплерівської РЛС проведений частотно-часовий аналіз відбитих сигналів. За результатами аналізу запропонована модель ДС, відбитого від обертових роторів БПЛА, яка представляє суму фрактального сигналу (моделювання низькочастотної складової ДС) і модифікованої функції Вейерштрасса-Мандельброта (моделювання високочастотної складової ДС). Розглянута методика вибору параметрів моделі при різній швидкості і кількості обертових роторів БПЛА.

2.1 Експериментальне дослідження електромагнітних сигналів відбитих від мультироторного БПЛА

Для аналізу сигналів відбитих від рухомих БПЛА були проведені лабораторні і натурні експериментальні дослідження. У лабораторних умовах БПЛА фіксувався на одному місці, при цьому його ротори оберталися з різною швидкістю, також змінювалась їх кількість. Для отримання відбитих сигналів використовувалася малопотужна доплерівська РЛС. У реальних умовах натурних експериментів досліджувалися два типи рухомих мультироторних БПЛА (з трьома і шістьма роторами). Для отримання відбитих сигналів використовувалася РЛС 1РЛ133 «Кредо». Коротко розглянемо склад експериментальних установок, об'єкти досліджень і умови проведення експериментів.

2.1.1 Експериментальне дослідження доплерівських сигналів відбитих від обертових роторів БПЛА

Під час проведення статичних (лабораторних) експериментальних досліджень ДС використовувалася створена інформаційно-вимірювальна система (ІВС), фотографія якої показана на рис. 2.1. Основу ІВС складала доплерівська РЛС IPS-154, яка розроблена фірмою InnoSenT [118]. Інформаційно-вимірювальна система також містила персональний комп'ютер типу Notebook Samsung P29 і вимірювач дальності Laser Distance Meter китайського виробництва.

РЛС IPS-154 представляє детектор руху або так звану доплерівську РЛС. Конструктивно РЛС має рознесені на площинні передавальну і приймальну антенні решітки, що дозволяє забезпечити безперервне випромінювання сигналу. Ширина діаграми спрямованості в горизонтальній (азимутальній) площині складає 45 град, а у вертикальній (кутомісцевій) – 38 град. Придушення бічних пелюсток складає 13 дБ. Сигнал випромінюється на несучій частоті $f_n = 24$ ГГц (довжина хвилі $\lambda \approx 12$ мм). РЛС має наступні характеристики, вказані виробником [118]: напруга живлення 5,5 В (можна забезпечити живлення РЛС через порт USB комп'ютера), пікова потужність передавача – до 100 мВт, смуга пропускання приймача – до 50 кГц, габаритні розміри РЛС 44×30×8,3 мм.

Типовий вимірник дальності Laser Distance Meter використовувався для визначення відстані від РЛС до об'єкту дослідження (до БПЛА). Відстань траси зондування «РЛС – БПЛА» складала 5 м і не змінювалося в ході експериментів. Необхідно зазначити, що експерименти проводилися у приміщенні і фон складався з шуму РЛС та мережі живлення.

Як об'єкт досліджень використовувався БПЛА з трьома роторами, розроблений в ООО «КБ АВІА» Національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського «ХАІ» [119], фотографія якого показана на рис. 2.2. Відстань між роторами даного БПЛА була однаковою і складала 975 мм. На БПЛА встановлені дволопатеві ротори (пропелери) з пластика з кутом нахилу 4,7" і довжиною 320 мм.

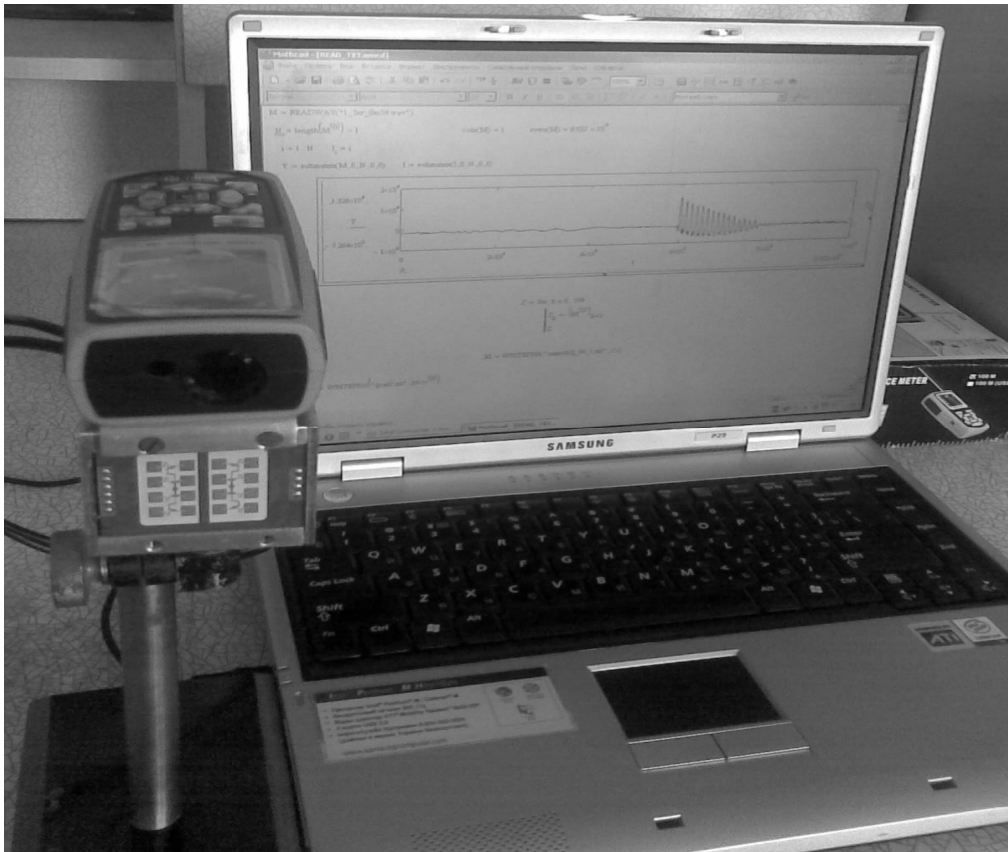


Рисунок 2.1 – Фотографія інформаційно-вимірювальної системи

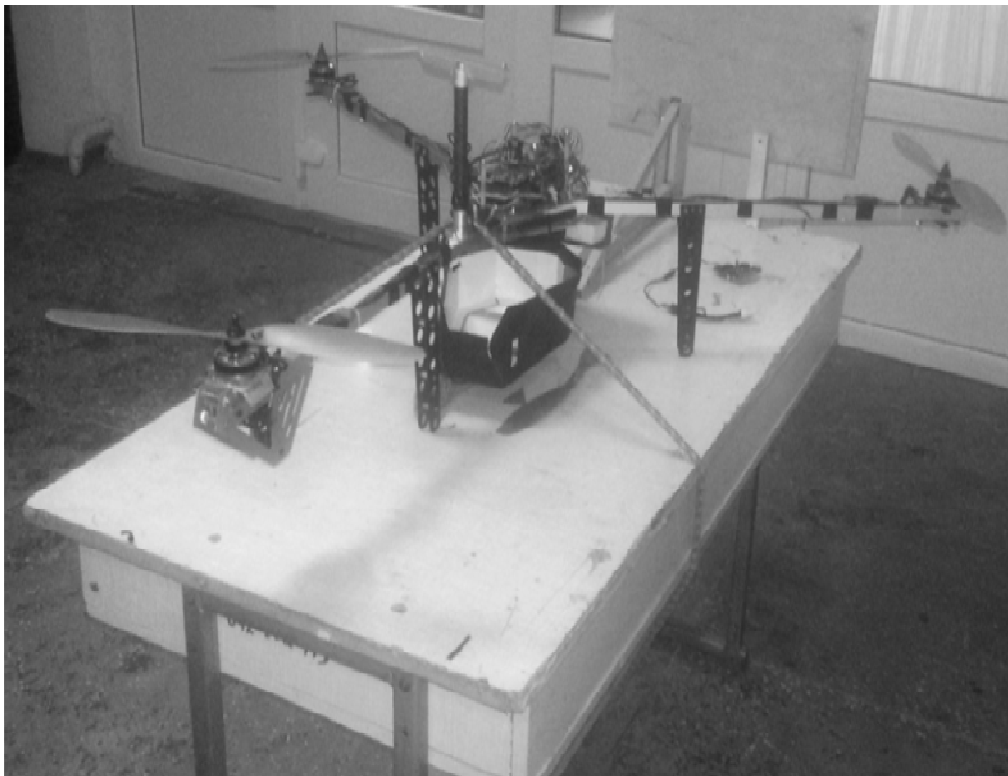


Рисунок 2.2 – Об'єкт дослідження – БПЛА з трьома роторами

В процесі проведення експериментів ІВС фіксувала ДС з виходу РЛС в цифровій формі за допомогою аналогово-цифрового перетворювача (АЦП) вбудованої звукової карти персонального комп'ютера Notebook Samsung P29. Частота дискретизації АЦП складала $f_{\text{дискр}} = 22,050$ кГц ($t_{\text{дискр}} = 1/f_{\text{дискр}} \approx 45,4$ мкс). Запис здійснювався при 16 бітовому квантуванні по рівню (динамічний діапазон 96,33 дБ, що відповідає 65 536 рівням, 1 рівень $\approx 0,00147$ дБ). З виходу звукової карти ДС представлялися у вигляді табличних цифрових даних (рівнях сигналу) і записувалися в постійну пам'ять комп'ютера у вигляді wav-файла. Також здійснювалося перетворення файлу даного формату в txt-файл.

При проведенні експериментів досліджувалися ДС, отримані при обертанні одного, двох (при різній геометричній конфігурації) і трьох роторів [47]. Змінювалася потужність роботи двигунів БПЛА, яка складала 15%, 30%, 45% і 60% від максимальної. Дані потужності відповідали частотам (швидкостям) обертання роторів: $f_{P1} = 750$ об/хв (12,5 об/с), $f_{P2} = 1500$ об/хв (25 об/с), $f_{P3} = 2250$ об/хв (37,5 об/с), $f_{P4} = 3000$ об/хв (50 об/с). Управління потужністю роботи двигунів здійснювалося за допомогою пульта дистанційного керування БПЛА. Розглянуті вище частоти (швидкості) відповідають наступним кутовим частотам (швидкостям) обертання роторів: $\omega_{P1} \approx 75$ рад/с, $\omega_{P2} \approx 150$ рад/с, $\omega_{P3} \approx 225$ рад/с і $\omega_{P4} \approx 300$ рад/с (1 об/хв $\approx 1/10$ рад/с) [120].

На рис. 2.3 показано структурну схему проведення експерименту. Необхідно зазначити, що ротори № 1 і № 2 обертались в один бік, а ротор № 3 у протилежний.

На рис. 2.4 показаний приклад записаного сигналу при зондуванні одного обертового ротора № 1 з частотою 750 об/хв ($\omega_{P1} \approx 75$ рад/с). По осі абсцис (x) відкладено номери точок записаного сигналу, а по осі ординат (Y) – амплітуда ДС (кількість рівнів дискретизації). Запис за часом складав $t_{\text{зап}} = 5,75$ с, що при вказаній частоті дискретизації складав $N = 126\,799$ точок ($t_{\text{дискр}} = t_{\text{зап}}/N \approx 45,4$ мкс).

Як видно на рис. 2.4, провести аналіз особливостей отриманого ДС не представляється можливим, тому при подальшому аналізі ДС використовувалася «віконна» обробка довгого початкового часового ряду. Крім того, проводилося нор-

мування вихідного ДС щодо його середнього значення. Така попередня обробка ДС (нормування сигналу і вибір розміру «вікна») проводилася з міркувань необхідності його подальшого часового і спектрального аналізу з використання швидкого перетворення Фур'є (ШПФ).

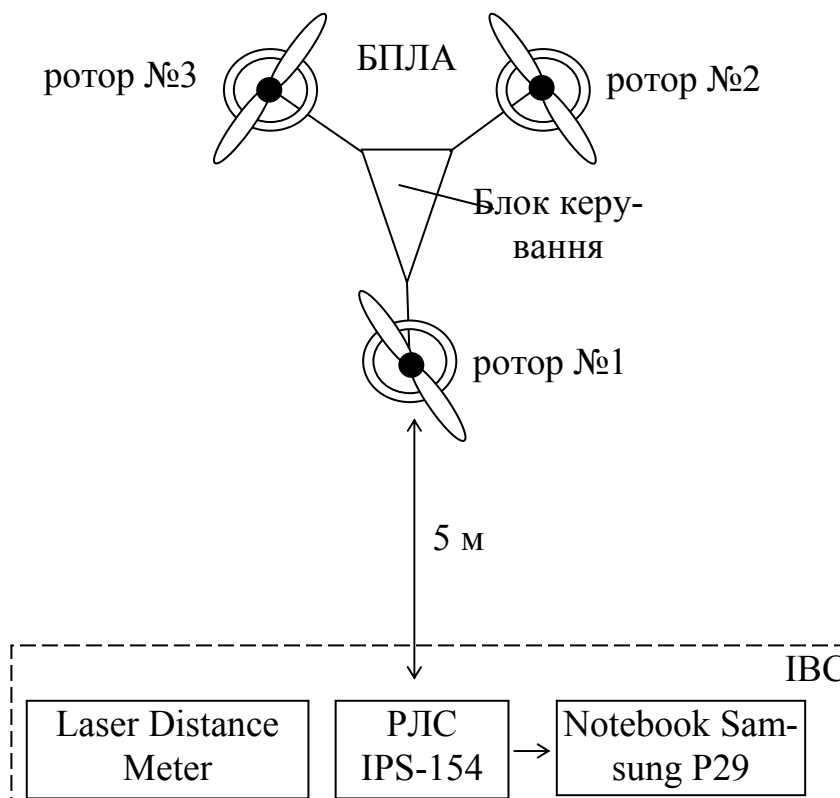


Рисунок 2.3 – Структурна схема проведення експерименту

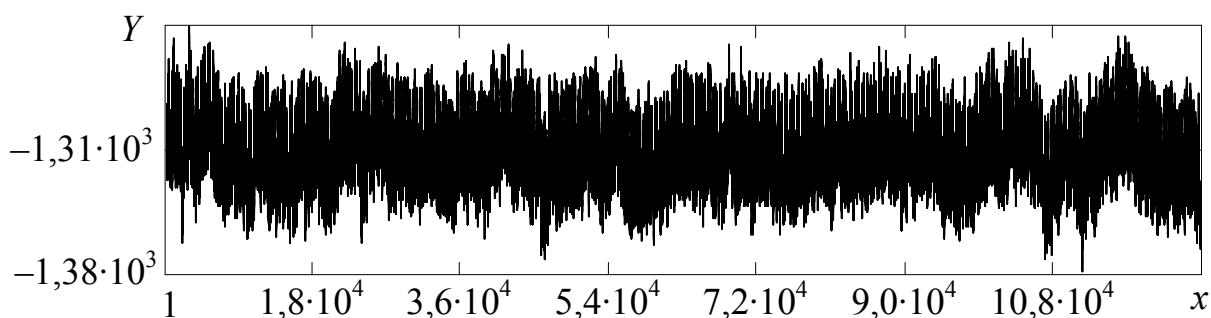


Рисунок 2.4 – Приклад записаного доплерівського сигналу

Як зазначалося у підрозділі 1.2, аналіз часових реалізацій ДС дозволяє оцінити деякі особливості форми відбитих сигналів. Наприклад, видно, що ДС є періодичним (див. рис. 1.1). Це обумовлено тим, що ротор обертається деякий час і при наближенні передньої (першої) лопаті ротора до РЛС частота випромінюва-

ного сигналу збільшується і виходить максимальне значення ДС. При віддаленні передньої лопаті ротора від РЛС частота сигналу зменшується, і виходить мінімальне значення ДС. Оскільки ротор має дві лопаті, то процес, описаний для передньої лопаті, повинен повторюватися і для задньої (другої) лопаті, але з меншою амплітудою, оскільки вона знаходиться далі. Також, необхідно зазначити, що в сигналах, одержаних експериментально, добре видно низькочастотну (обумовлену швидкістю обертання і кількістю роторів) і високочастотну (обумовлену впливом фону і вібраціями роторів при обертанні) складові. Але, аналіз ДС показав, що визначити кількісні і якісні особливості таких сигналів тільки за часовою реалізацією практично не можливо. Докладний спектрально-часовий аналіз сигналів, відбитих від обертових роторів БПЛА, що були отримані експериментально, буде проведено у підрозділі 2.2.

Таким чином, аналіз ДС при зондуванні обертових роторів статичного БПЛА показує, що вони мають складну форму, оцінити особливості якої за допомогою часових характеристик дуже важко.

2.1.2 Експериментальне дослідження сигналів з виходу каналу фазового детектування, відбитих від рухомих БПЛА

Під час проведення динамічних (натурних) досліджень застосовувалися два БПЛА мультироторного типу: з трьома і шістьма роторами, а також РЛС розвідки наземних і надводних цілей 1РЛ133 «Кредо». На рис. 2.5 показана структурна схема експериментальної установки, основу якої складала когерентно-імпульсна РЛС 1РЛ133 «Кредо» сантиметрового діапазону ($\lambda = 1,8$ см, $\tau = 0,4$ мкс) [121, 122] і персональна електронно-обчислювальна машина (ПЕОМ) типу «Notebook».

Радіолокаційна станція 1РЛ133 «Кредо» [121] призначена для пошуку, виявлення, супроводження і вимірювання координат рухомих наземних об'єктів (людини, автомашини, групи людей або автомашин і т. д.). Дальність виявлення і супроводження техніки РЛС 1РЛ133 «Кредо» складає 12 км, людини – до 5 км. Сектор огляду досягає 180 градусів.

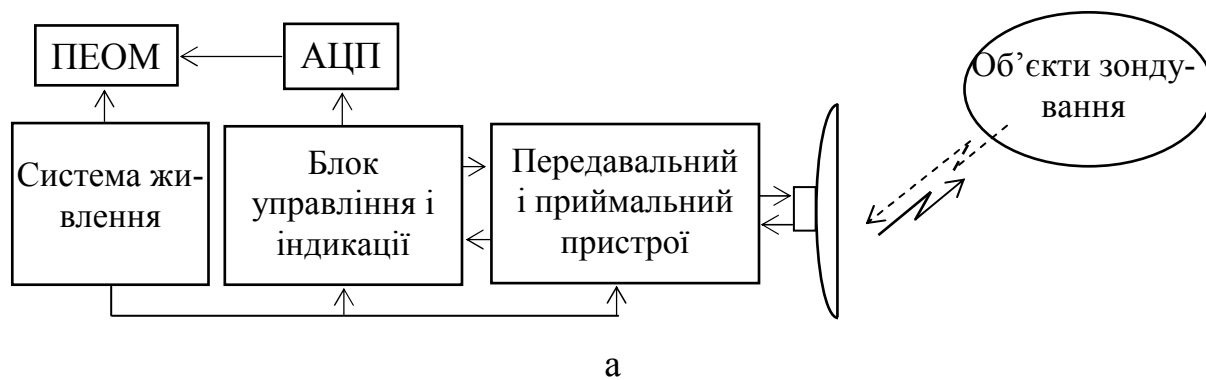


Рисунок 2.5 – Структурна схема (а) і фотографія (б) експериментальної установки

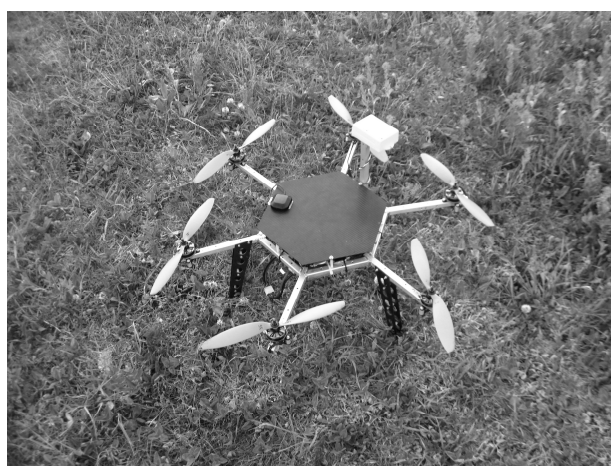
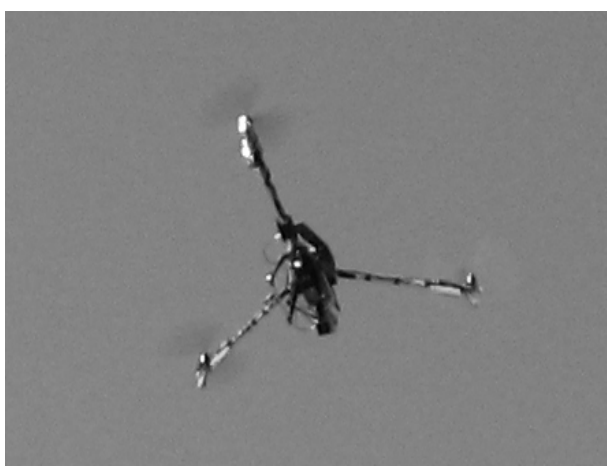


Рисунок 2.6 – БПЛА мультироторного типу з трьома роторами в польоті (а) та з шістьма роторами на землі (б)

Виявлення рухомих об'єктів в РЛС 1РЛ133 [121] можливе завдяки використанню ефекту Доплера. Відбитий від об'єкту сигнал приймається антеною і по хвилеводному тракту поступає на вхід змішувача, на який подається також сигнал від місцевого гетеродину. З виходу змішувача сигнали різницевої частоти посилюються у підсилювачі проміжної частоти і поступають на детектори: фазовий та амплітудний. На фазовий детектор (ФД) поступає також опорний сигнал з виходу когерентного гетеродину. На ФД відбувається порівняння фази відбитого сигналу з фазою опорного сигналу (на проміжній частоті). РЛС забезпечує роботу з звуковою індикацією рухомих об'єктів. При цьому відеосигнал з ФД поступає на головні телефони, в яких чутно звуковий сигнал, по якому відбувається виявлення і розпізнавання об'єкту.

РЛС складається з антено-хвилеводної системи, передавальної системи, приймальної системи, системи дальності; системи селекції рухомих цілей, індикаторної системи, системи управління антеною, системи електроживлення [122].

Як наголошувалося вище, в ході досліджень об'єктами зондування були БПЛА мультироторного типу – з трьома і шістьма роторами. На рис. 2.6, а показано БПЛА з трьома роторами у польоті, а на рис. 2.6, б – БПЛА з шістьма роторами на землі. Як видно на рис. 2.6 загальним в конструкції БПЛА є те, що система управління та обладнання розміщуються в центрі БПЛА, а ротори знаходяться на кінцях металевих штанг, які кріпляться до центральної частини БПЛА. Електричні двигуни, що обертають ротори, та дволопатеві ротори, що розміщені на двох БПЛА ідентичні. Відмінності полягали тільки в кількості роторів, а також в довжині і кількості металевих штанг, на кінцях яких розміщені електродвигуни.

Під час проведення експериментальних досліджень БПЛА обох типів рухалися на висотах 20 – 30 м, на дальності близько 350 м на фоні чистого неба [51, 52]. При цьому БПЛА рухалися в двох режимах: перший – зависання на заданій висоті; другий – рух БПЛА на заданій висоті в напрямі на РЛС і від неї. Дальність від РЛС до БПЛА при цьому змінювалася в межах 100 м. Дослідження проводилися в світлий час доби (з 09.00 до 10.00 за київським часом), швидкість вітру 2 – 4 м/с, сонячна погода.

Для виявлення БПЛА використовувалися штатні засоби РЛС – індикатор азимут-дальність і головні телефони. Також напрям на БПЛА по азимуту і куту місця визначався за допомогою штатного оптичного засобу РЛС – монокля. Після виявлення БПЛА положення діаграми спрямованості антени в азимутальній і кутомісцевій площинах фіксувалося (задавалася траса зондування) і проводилася настройка стробу дальності РЛС на відстань 350 м, де знаходились об'єкти зондування. Характер руху БПЛА оператор РЛС спостерігав по звуку в штатних головних телефонах. Опис експериментів і деякі вихідні часові реалізації наведено у [51, 52]. Сигнал з виходу фазового детектора (головних телефонів) записувався в пам'ять комп'ютера Notebook Samsung P29 в цифровій формі за допомогою АЦП вбудованої звукової карти (частота дискретизації $f_{\text{дискр}} = 22,050$ кГц). Одержаний цифровий код представлявся у вигляді текстового файлу, доступного різним комп'ютерним математичним пакетам. Далі проводилося нормування вихідного сигналу щодо його середнього значення. Зафіксовані реалізації сигналів надалі використовувалися для аналізу їх форми і розв'язування задачі розпізнавання типу мультиторторного БПЛА. Записаний сигнал з виходу головних телефонів при зондуванні фону показаний на рис. 2.7, довжина часового ряду дорівнює 330 800 точкам, що відповідає 15 сек.

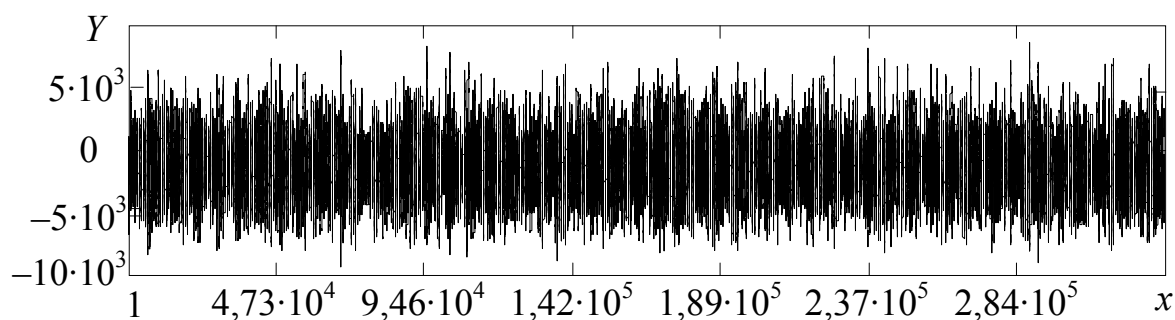


Рисунок 2.7 – Приклад сигналу з виходу головних телефонів, фон на трасі зондування

Візуальний аналіз часового ряду показує, що існують зміни в структурі сигналу, але неможливо здійснити аналіз структури сигналу. Тому під час обробки використовувалася «віконна» обробка довгого вихідного сигналу. У підрозділі 1.2

(див. рис. 1.3) було наведено приклади сигналів з виходу ФД. Також у підрозділі 1.2 зазначалося, що, аналіз часових реалізацій дозволяє визначити синусоїдальний характер відбитих сигналів, але визначити особливості таких сигналів тільки за часовою реалізацією практично не можливо. Докладний аналіз таких сигналів наведено у [51, 52].

Таким чином, аналіз ДС з виходу каналу ФД РЛС показує, що вони мають складну форму, оцінити особливості якої за допомогою частотно-часових характеристик дуже важко. Для аналізу ДС необхідно розробити нові методи, які дозволяють оцінити особливості форм сигналів відбитих від обертових роторів БПЛА та під час їх руху.

2.2 Частотно-часовий аналіз доплерівських сигналів, відбитих від обертових роторів БПЛА

Як зазначалося вище, основною конструктивною особливістю мультироторних БПЛА, яка дозволяє їх віднести до одного з типів, є кількість роторів. При зондуванні БПЛА з різним числом роторів виникають труднощі з вибором ознак розпізнавання типу БПЛА і аналізом доплерівських сигналів, відбитих від них. Для дослідження особливостей таких сигналів необхідно розробити модель відбитих ДС, яка дозволить виявити характерні ознаки розпізнавання типу БПЛА. Спочатку розглянемо особливості часових реалізацій ДС при різному числі роторів БПЛА і швидкостях їх обертання, а потім проведемо їх спектральний аналіз [47].

2.2.1 Аналіз часових реалізацій доплерівських сигналів при різному числі роторів БПЛА і швидкостях їх обертання

При проведенні аналізу обертання ротору БПЛА із часових рядів, отриманих експериментально, «вирізувалися» вибірки розміром $2^{10} = 1024$ точок ($1024 \times 45,4$ мкс $\sim 46,2$ мс). Розмір вибірки вибирався виходячи з необхідності подальшого розрахунку швидкого перетворення Фур'є (ШПФ). Також, для здійс-

нення розрахунку ШПФ проводилося нормування ДС щодо його середнього значення (обчислювалося середнє значення сигналу у «вікні» і потім воно віднімалося від значення сигналу в кожній точці) [47].

На рис. 2.8 показано нормований ДС при зондуванні одного ротора № 1, що обертався з частотою 750 об/хв ($\omega_{p1} \approx 75$ рад/с), який був «вирізаний» з довгого часового ряду вихідного сигналу (п'яте «вікно», точки з 4096 по 5120). По осі абсцис (x) відкладено число точок записаного сигналу, а по осі ординат (Y) – рівень ДС (число рівнів дискретизації).

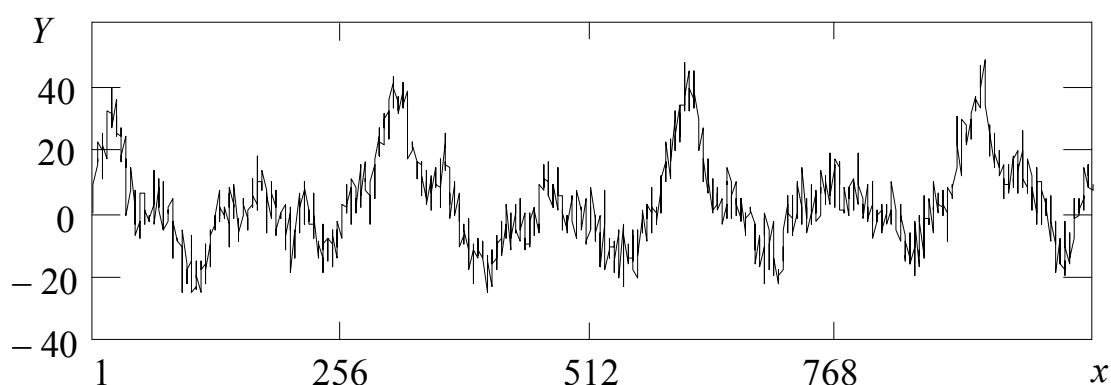


Рисунок 2.8 – Доплерівський сигнал, що відповідає четвертому «вікну» вихідного сигналу

Як видно на рис. 2.8, така попередня обробка дозволяє аналізувати часові реалізації ДС, а також здійснювати їх спектральний аналіз. Характер поведінки ДС показує, що при наближенні передньої (першою) лопаті ротора до РЛС частота випромінюваного сигналу збільшується, і спостерігається максимальне значення ДС. При видаленні передньої лопаті ротора від РЛС частота сигналу зменшується, і отримуємо мінімальне значення ДС. Оскільки ротор має дві лопаті, то процес, описаний для передньої лопаті, повинен повторюватися і для задньої (другої) лопаті, але з меншою амплітудою, оскільки вона знаходиться далі. При невеликих швидкостях обертання ротора даний ефект спостерігається на часовій реалізації ДС у вигляді двох послідовних максимальних і мінімальних значень сигналу. Також необхідно зазначити, що, оскільки ротор обертається деякий час, то і цей ефект повторюється декілька разів, тобто ДС є періодичним.

Період ДС, показаного на рис. 2.8, складає приблизно 300 точок часового ряду, що дорівнює $T_{ДС1} = 300 \times 45,4 \text{ мкс} \approx 13,62 \text{ мс}$. Такому періоду відповідає частота ДС, що дорівнює $f_{ДС1} = 1/T_{ДС1} \approx 73,42 \text{ 1/с}$. Отримане чисельне значення частоти ДС практично дорівнює чисельному значенню кутової частоти обертання ротора ($\omega_{р1} \approx 75 \text{ рад/с}$). Таким чином, частоту ДС, отриманого з допомогою РЛС, можна поставити у відповідність кутовій частоті обертання ротора. Також необхідно зазначити, що рівень максимальних значень ДС ($40 \times 0,00147 \approx 0,059 \text{ дБ}$) більший ніж мінімальних ($25 \times 0,00147 \approx -0,037 \text{ дБ}$). Але деякі мінімальні значення ДС також наближаються до $-0,059 \text{ дБ}$. Також, при проведенні експерименту був записаний ДС на трасі зондування (фоновий ДС), «віконна» обробка якого показана на рис. 2.9. Фоновий сигнал також нормувався.

Аналіз часової реалізації фонового ДС показує, що він відрізняється від ДС при зондуванні одного обертового ротора (див. рис. 2.8), і має в основному високочастотні складові, які характерні для шумового сигналу. Також на часовій реалізації фонового сигналу спостерігається наявність деякої низькочастотної складової. Таким чином, аналіз ДС, приведених на рис. 2.8 і 2.9, показує, що ДС при зондуванні одного обертового ротора № 1 містить високочастотні складові фонового ДС, тобто ДС фону накладається на досліджуваний ДС.

На рис. 2.10, а-в показані нормовані ДС, отримані у ході експериментальних досліджень, умови проведення яких наведені у підрозділі 2.1.1. При цьому рис. 2.10, а відповідає кутовій частоті обертання ротора, яка дорівнює 150 рад/с , рис. 2.10, б – 225 рад/с , а рис. 2.10, в – 300 рад/с . Аналіз часових реалізацій сигналів показує, що, як і очікувалося, із збільшенням частоти обертання ротора частота ДС $f_{ДС}$ збільшується (період зменшується). Так, при збільшенні кутової частоти в два рази з 75 рад/с до 150 рад/с число періодів в «вікні» також подвоюється з трьох (див. рис. 2.8) до шести (див. рис. 2.10, а). При цьому, період ДС, показаного на рис. 2.10, а, складає приблизно 180 точок часового ряду, що дорівнює $T_{ДС2} = 180 \times 45,4 \text{ мкс} \approx 8,17 \text{ мс}$. Отримане значення періоду ДС при обертанні ротора на частоті $\omega_{р2} \approx 150 \text{ рад/с}$, показує, що воно не строго у два рази менше періоду ДС на частоті $\omega_{р1} \approx 75 \text{ рад/с}$, а дещо більше.

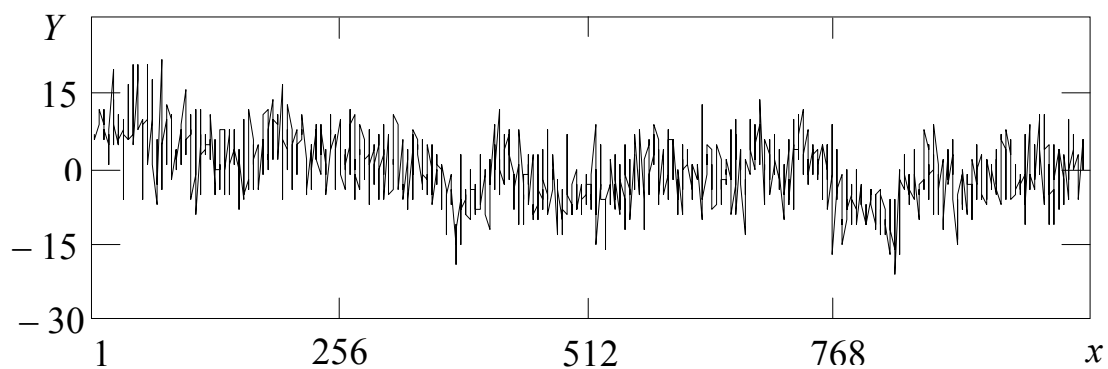


Рисунок 2.9 – Доплерівський сигнал, що відповідає фону на трасі зондування

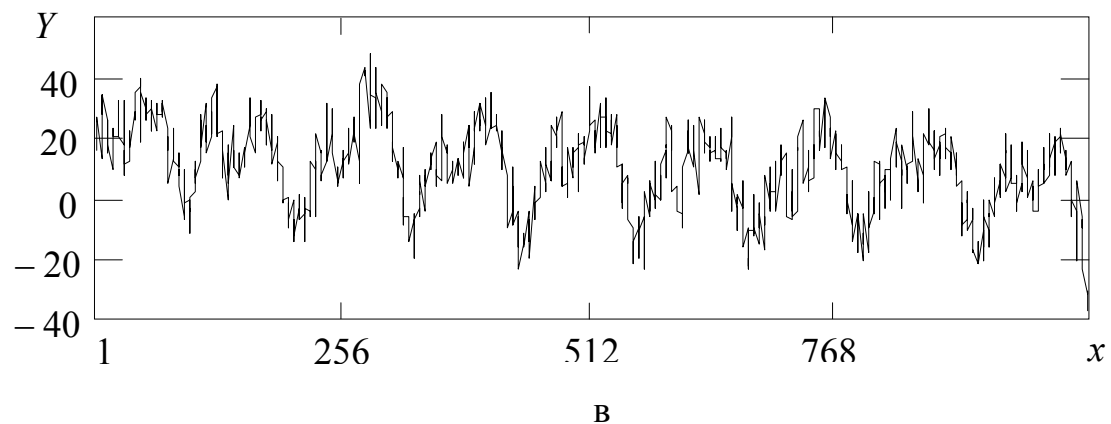
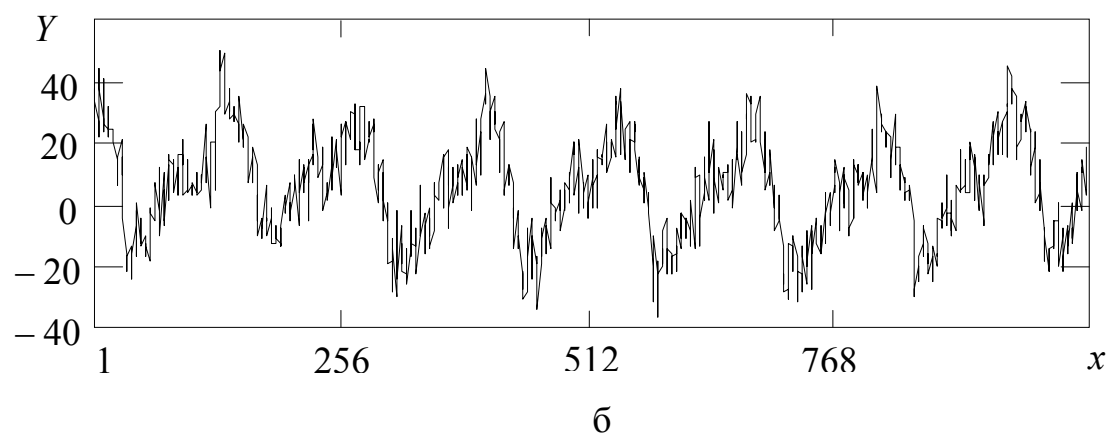
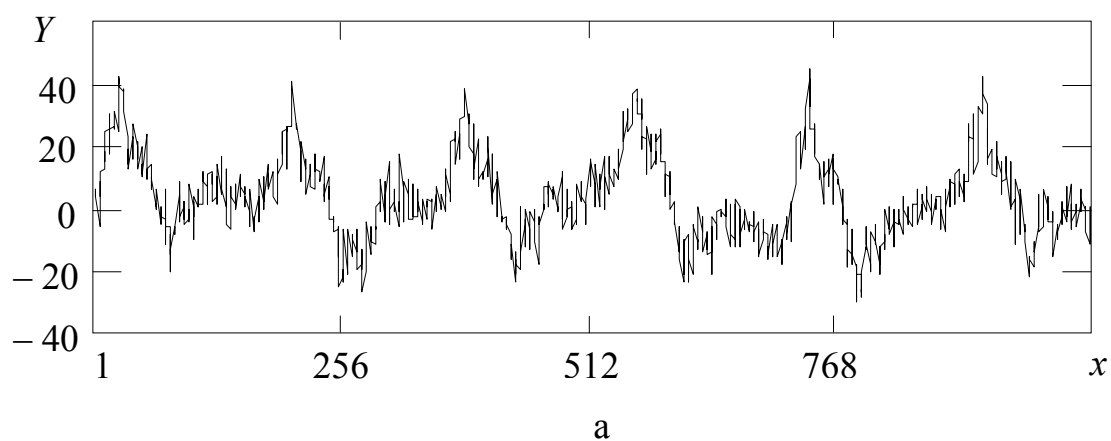


Рисунок 2.10 – Доплерівські сигнали, що відповідають обертанню одного ротора з кутовими частотами 150 рад/с (а), 225 рад/с (б) і 300 рад/с (в)

Частота ДС буде дорівнюватися $f_{ДС2} \approx 122,37$ 1/с. Це дозволяє зробити висновок про те, що кутова частота обертання ротора не завжди співпадає з частотою, яка показується на пульті управління БПЛА. При подальшому збільшенні частоти обертання ротора до $\omega_{P3} \approx 225$ рад/с число періодів ДС у «вікні» продовжує збільшуватися (див. рис. 2.10, б), але не у три рази порівняно із $\omega_{P1} \approx 75$ рад/с, і складає 7,5 періодів. Період ДС у цьому випадку складає приблизно 130 точок часового ряду, що дорівнює $T_{ДС3} = 130 \times 45,4$ мкс $\approx 5,902$ мс, а частота ДС – $f_{ДС3} \approx 169,44$ 1/с. Таке значення частоти ще більше не співпадає з кутовою частотою, яка задається з пульта управління БПЛА. Рівні максимальних і мінімальних значень ДС із збільшенням частоти обертання ($\omega_{P2} \approx 150$ рад/с і $\omega_{P3} \approx 225$ рад/с) не змінюються і дорівнюють відповідно $\approx 0,059$ дБ і $\approx -0,037$ дБ, за наявності мінімальних рівнів близьких до $-0,059$ дБ. Також із збільшенням частоти обертання ротора спостерігається зміна форми ДС, зокрема стає крутішим спад сигналу, а сигнал, обумовлений обертанням другої лопаті, зміщується вправо.

При збільшенні частоти обертання ротора до $\omega_{P4} \approx 300$ рад/с число періодів ДС у «вікні» збільшуватися до дев'яти (див. рис. 2.10, в), але це не у чотири рази більше порівняно із $\omega_{P1} \approx 75$ рад/с. При цьому, період ДС складає приблизно 115 точок часового ряду, що дорівнює $T_{ДС4} = 115 \times 45,4$ мкс $\approx 5,221$ мс, а частота ДС – $f_{ДС4} \approx 191,53$ 1/с. Таким чином, тенденція до збільшення розбіжності частоти ДС і кутової частоти обертання ротора, що задається з пульта управління БПЛА, зберігається. Із збільшенням частоти обертання ротора до $\omega_{P4} \approx 300$ рад/с також спостерігається трансформація форми ДС. В одному періоді з'являються приблизно два однакових за рівнем максимуми, обумовлені обертанням першої і другої лопаті ротора. При менших частотах обертання ці максимуми були не рівнозначні.

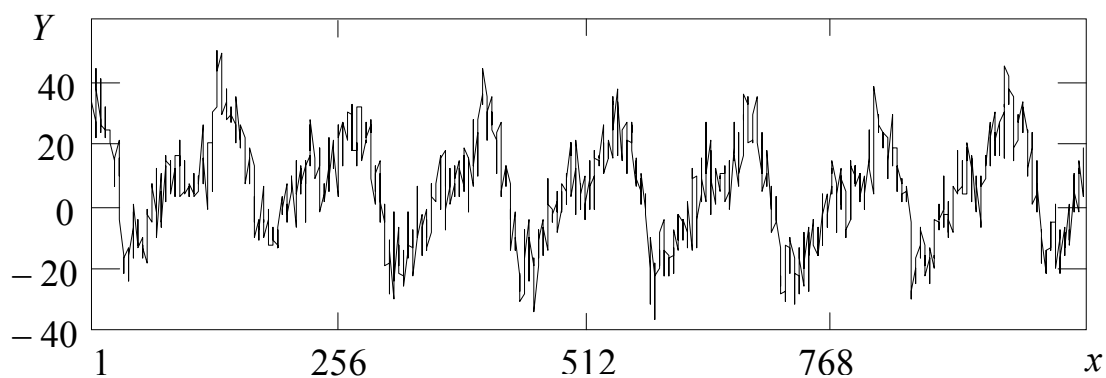
Таким чином, аналіз доплерівських сигналів показав, що із збільшенням кутової частоти обертання ротора період ДС зменшується (частота підвищується), але частота ДС, що фіксується, менше ніж кутова частота обертання, що задається з пульта управління БПЛА. При цьому, чим більше частота обертання, тим більше відмінності цих частот. При невеликих значеннях кутової частоти обертання ротора ($\omega_{P1} \approx 75$ рад/с) їй можна поставити у відповідність частоту ДС, отриманого з

допомогою РЛС. Особливий інтерес представляє форма ДС, так при збільшенні частоти обертання ротора спад сигналу стає крутішим, а сигнал, обумовлений обертанням другої лопаті, зміщується вправо. При дуже великих частотах обертання (більше 300 рад/с) в одному періоді сигналу з'являються приблизно два однакових за рівнем максимуми.

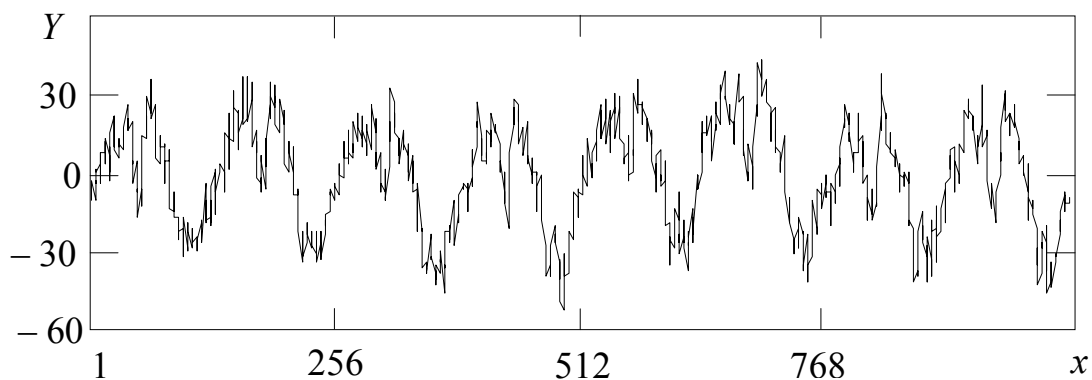
Розглянемо часові реалізації ДС сигналів при різному числі обертових роторів, на однаковій частоті обертання [47]. На рис. 2.11, а-д показані нормовані ДС, що відповідають обертання: одного ротора № 1 (а), двох роторів № 1, 2 (б), двох роторів № 1, 3 (в), двох роторів № 2, 3 (г) і трьох роторів (д) при частоті обертання 225 рад/с (позначення роторів наведено на рис. 2.3).

Аналіз часової реалізації ДС при зондуванні одного ротора № 1 був проведений вище. Доплерівський сигнал при зондуванні двох роторів № 1, 2 (рис. 2.11, б) відрізняється формою від ДС при зондуванні одного ротора № 1. Так, у кожному періоді ДС спостерігається розділення сигналу на два практично однакових максимуми. Але мінімуми ДС не мають такої характерної форми. При цьому періодичність ДС не змінюється $T_{\text{ДС}} \approx 6,0$ мс. Необхідно зазначити, що ротори № 1 і № 2 оберталися в один бік і поява двох максимумів, швидше за все, обумовлена їх різною відстанню до РЛС. Таким чином, появу двох максимумів ДС можна вважати природним внеском частоти обертання другого ротора № 2 у ДС ротора № 1 і може бути відмітною ознакою кількості роторів, які обертаються в одному напрямку. Період між двома максимумами складає 27 точок $T_{\text{макс}} = 1,23$ мс ($f_{\text{макс}} = 815,88$ Гц). При детальнішому вивченні форми кожного з максимумів, можна побачити, що вони також складаються з двох складових. Період між двома складовими дорівнює 16 точок $T_{\text{скл}} = 0,73$ мс ($f_{\text{скл}} = 1376,65$ Гц). Це, швидше за все, обумовлено наявністю двох лопатей ротора.

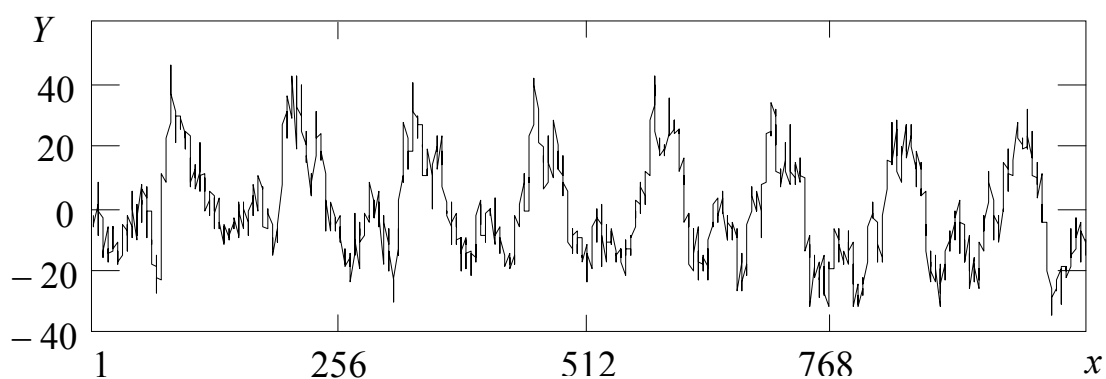
Доплерівський сигнал при зондуванні двох роторів № 1, 3 (рис. 2.11, в) відрізняється від ДС двох роторів № 1, 2 (рис. 2.11, б), оскільки ці ротори обертаються в різні сторони. За рахунок цього форма сигналу не має двох максимумів, які добре розділяються, а також відбувається зменшення («руйнування») одного з максимумів. Крім того, в цьому випадку така ж форма характерна для мінімумів ДС.



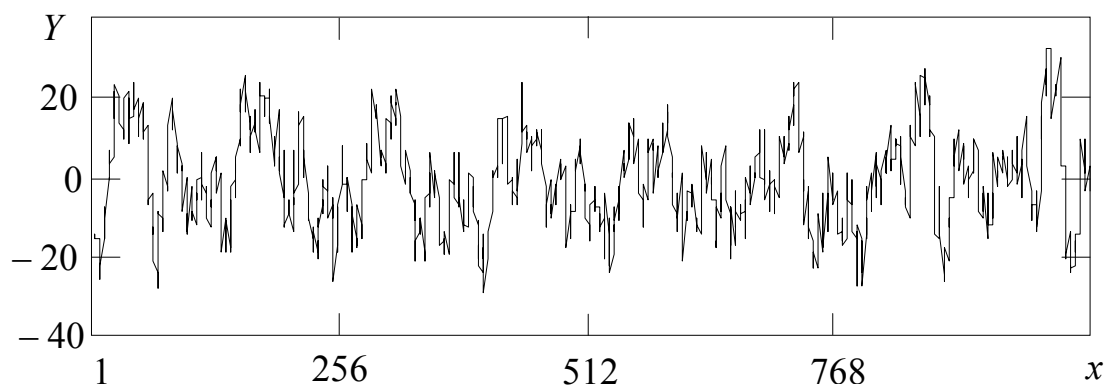
а



б

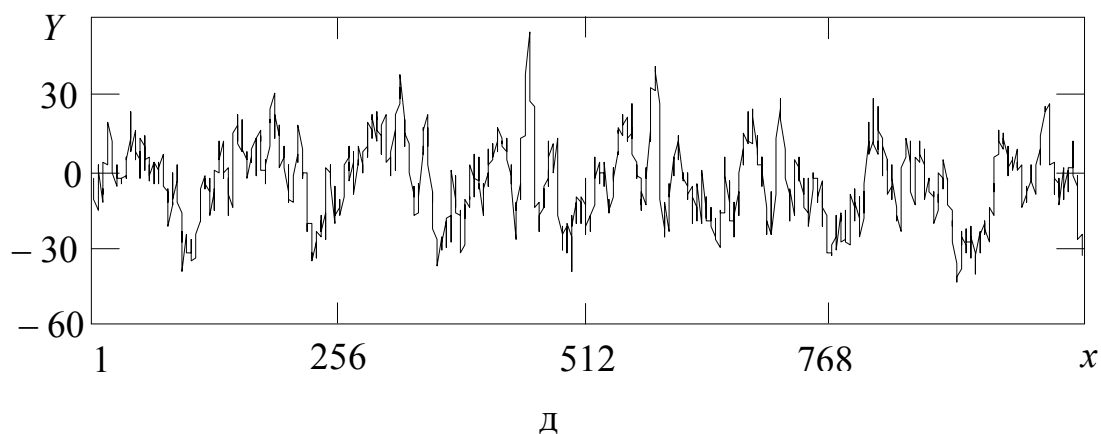


в



г

Рисунок 2.11 – Доплерівські сигнали, що відповідають обертанню: одного ротора № 1 (а), двох роторів № 1, 2 (б), двох роторів № 1, 3 (в), двох роторів № 2, 3 (г) і трьох роторів (д) з частотою 225 рад/с



Закінчення рисунку 2.11 – Доплерівські сигнали, що відповідають обертанню: одного ротора № 1 (а), двох роторів № 1, 2 (б), двох роторів № 1, 3 (в), двох роторів № 2, 3 (г) і трьох роторів (д) з частотою 225 рад/с

Періодичність ДС також не змінюється $T_{ДС} \approx 6,0$ мс. Але, за рахунок того, що змінилося поведінка мінімумів ДС, максимальні значення стають майже вдвічі вужчими за часом. Детальне вивчення форми мінімумів сигналу показує, що дві його складові знаходяться на відстані 36 точок $T_{\min} = 1,63$ мс ($f_{\min} = 611,85$ Гц). Таким чином, напрям обертання роторів (в одну сторону або у різні) при схожому їх геометричному розташуванні впливає на форму часової реалізації ДС.

На рис. 2.11, г показаний ДС при іншому геометричному розташуванні роторів. Ротори № 2 і № 3 були розташовані на однаковій відстані від РЛС, але під різними азимутами (див. рис. 2.3). Їх сумісне обертання в різні сторони приводить до того, що форма ДС і поведінка його максимальних і мінімальних рівнів схожа з формою ДС при обертанні роторів № 1, 3. Але існують відмінності, так два максимуми ДС практично однакові за рівнем («руйнування» одного з них не відбувається). Також обертання роторів в різні сторони приводить до складнішої структури (форми) мінімальних рівнів сигналу, при той же періодичності сигналу. Таким чином, різне геометричне розташування обертових роторів приводить до різних форм сигналу.

На рис. 2.11, д показано ДС при одночасному обертанні всіх трьох роторів. Часовий аналіз цього ДС показує, що структура сигналу має характерні особливості, у порівнянні з ДС при зондуванні одного і двох роторів. Так в максимумах сигналу з'являються три парні максимуми. При цьому центральний максимум, як

зазвичай, найбільший. Така поведінка ДС обумовлена кількістю роторів (три) та їх геометричним розташування по відношенню до РЛС (див. рис. 2.3, один ротор ближчий, два позаду). Періодичність сигналу не змінюється, оскільки частота обертання роторів не змінилася ($T_{ДС} \approx 6,0$ мс). Період між сусідніми максимумами складає 27 точок $T_{\max} = 1,23$ мс (так як і при обертанні двох роторів). Мінімальні складові мають таку ж структуру, але характер розподілу на три складові виявляється не так виразно, як при дослідженні максимумів.

Таким чином, аналіз часових реалізацій ДС відбитих від обертових роторів БПЛА показує, що структура (форма) сигналів залежить від числа роторів, напрямку їх обертання і геометричного розташування відносно РЛС. Виявлені відмінності у формі сигналу можуть бути використані під час моделювання ДС та для розпізнавання типу мультироторного БПЛА. Розглянемо спектральні характеристики таких ДС.

2.2.2 Спектральний аналіз доплерівських сигналів, відбитих від обертових роторів БПЛА

Швидке перетворення Фур'є дозволяє розрахувати дискретний спектр, в якому кожне значення амплітуди знаходиться на рівних проміжках по частоті щодо сусідніх. Величина цих проміжків між дискретами залежить від частоти дискретизації і кількості точок (відліків) у вибірці сигналу, тобто частота сигналу кратна кроку, який дорівнює відношенню частоти дискретизації до кількості точок (відліків). Для описаних вище умов проведення експериментів (див. підрозділ 2.1.1) частота дискретизації ДС складала $f_{\text{дискр}} = 22,050$ кГц, а кількість точок у вихідних даних ДС – $N = 1024$ [47]. Для таких умов крок між дискретами частоти на спектрах дорівнює:

$$\Delta f_c = f_{\text{дискр}}/N = 22050/1024 \approx 21,5 \text{ Гц},$$

тобто точність визначення частоти ДС (розрізнення за частотою) складає $\Delta f_c = 21,5$ Гц [47].

На рис. 2.12 показано спектр ДС на трасі зондування (фоновий ДС, див. рис. 2.9), на якому видно, що він містить один максимум (приблизно 50 рівнів) на 2 – 3 дискретах, що відповідає частоті приблизно 50 Гц. Цей максимум відповідає, швидше за все, частоті сигналу від електричної мережі на місці проведення експерименту. Надалі спектр займає весь частотний діапазон майже рівномірно (до 15 рівнів), що характерно для спектру шуму. Елементи спектру фоновий ДС будуть присутні і на спектрах ДС при зондуванні БПЛА.

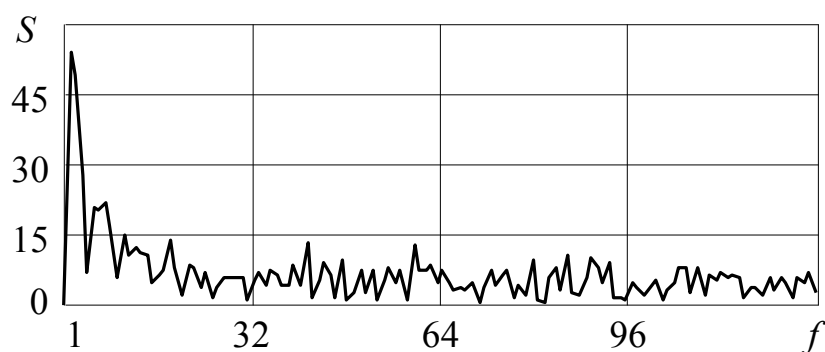
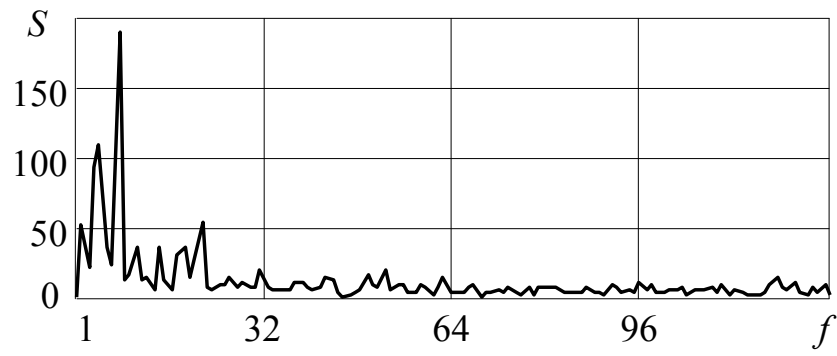
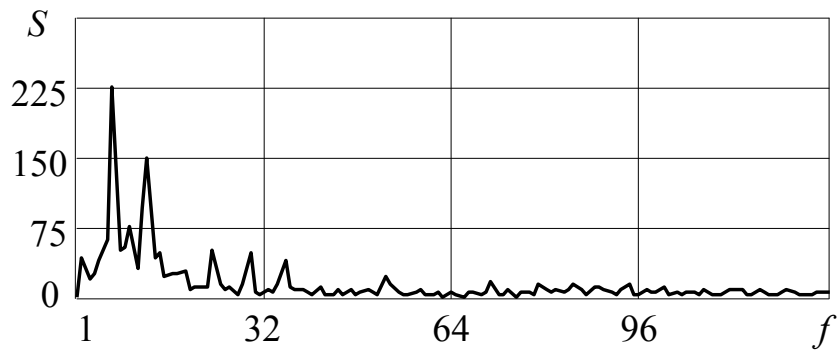


Рисунок 2.12 – Спектр ДС, що відповідає фону на трасі зондування

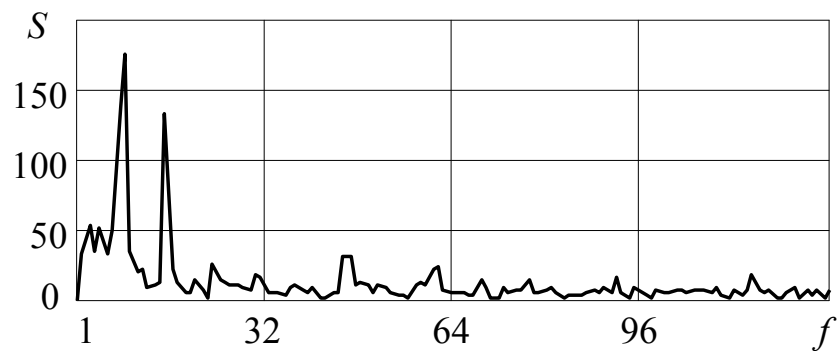
На рис. 2.13, а-г показані спектри ДС при зондуванні одного обертового ротора № 1 з кутовими частотами: 75 рад/с (а), 150 рад/с (б), 225 рад/с (в) і 300 рад/с (г). Як видно на рис. 2.13, на всіх спектрах присутні дві максимальні (основні) гармоніки, а також елементи фоновий спектру ліворуч і праворуч від них. При обертанні ротора з кутовою частотою $\omega_{p1} \approx 75$ рад/с (рис. 2.13, а) частота першої гармоніки ДС дорівнює $f_{ДС1} \approx 3,5 \times 21,5 = 75,25$ 1/с, а другої – вдвічі більше $f_{ДС2} \approx 7 \times 21,5 = 150,5$ 1/с. Це значення близьке до чисельного значення кутової частоти обертання ротора. Також як, і при аналізі часових реалізацій ДС, аналіз їх спектрів показує, що із збільшенням кутової частоти обертання ротора частоти перших гармонік збільшуються (рис. 2.13, б-г). Так, при обертанні ротора з кутовою частотою $\omega_{p2} \approx 150$ рад/с частоти основних гармонік ДС складають відповідно $f_{ДС1} \approx 129$ 1/с і $f_{ДС2} \approx 258$ 1/с, при $\omega_{p3} \approx 225$ рад/с – $f_{ДС1} \approx 172$ 1/с і $f_{ДС2} \approx 344$ 1/с, а при $\omega_{p4} \approx 300$ рад/с – $f_{ДС1} \approx 193,5$ 1/с і $f_{ДС2} \approx 387$ 1/с.



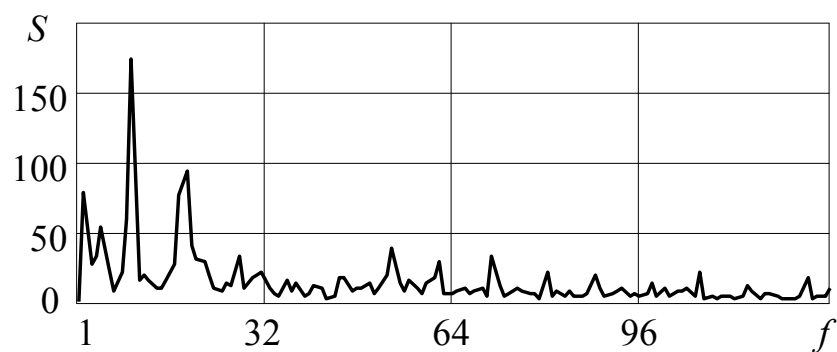
а



б



в



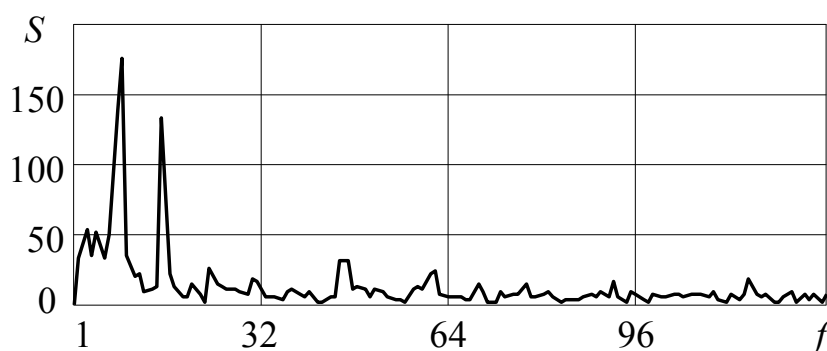
г

Рисунок 2.13 – Спектри доплерівських сигналів, що відповідають обертанню одного ротора № 1 з кутовими частотами: 75 рад/с (а), 150 рад/с (б), 225 рад/с (в) і 300 рад/с (г)

Як видно на рис. 2.13, б-г, частоти перших гармонік декілька менше кутових частот обертання роторів, також із збільшенням кутової частоти обертання ця різниця збільшується. Середні значення частот між першою і другою гармонікою наближаються до кутової частоти обертання ротора. Так, при обертанні ротора з $\omega_{P2} \approx 150$ рад/с середнє значення частоти основних гармонік складає $f_{ДСр} \approx (129 + 258)/2 = 193,5$ 1/с, при $\omega_{P3} \approx 225$ рад/с – $f_{ДСр} \approx 258$ 1/с, а при $\omega_{P4} \approx 300$ рад/с – $f_{ДСр} \approx 290,25$ 1/с. Також необхідно зазначити, що частоти других гармонік ДС практично при всіх кутових частотах обертання ротора вдвічі більше частот перших гармонік ДС.

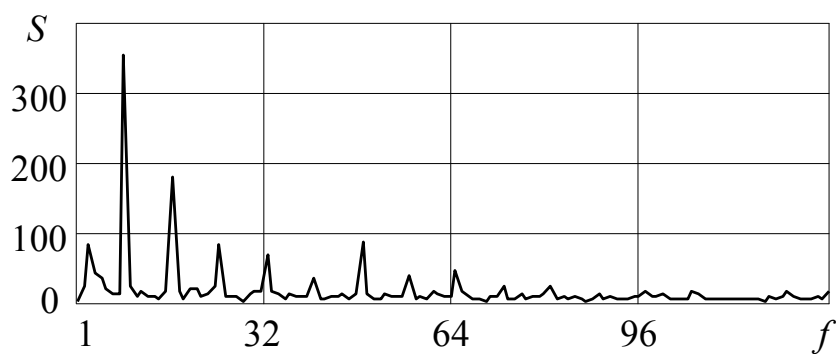
Таким чином, спектральний аналіз ДС при збільшенні кутової частоти обертання ротора показав, що спектр має дві основні гармоніки, частота яких збільшується. При цьому частоти других гармонік ДС в два раз більше частот перших. При невеликих значеннях кутової частоти обертання ротора (75 рад/с) їй можна поставити у відповідність частоту першої гармоніки ДС, а при великих (300 рад/с) – середнє значення частот першої і другої гармоніки.

Розглянемо спектри ДС при різній кількості обертових роторів [47]. На рис. 2.14, а-г показані спектри ДС при зондуванні одного ротора № 1 (а), двох роторів № 1, 2 (б), двох роторів № 1, 3 (в), двох роторів № 2, 3 (г) і трьох роторів (д), що обертаються з кутовою частотою 225 рад/с.

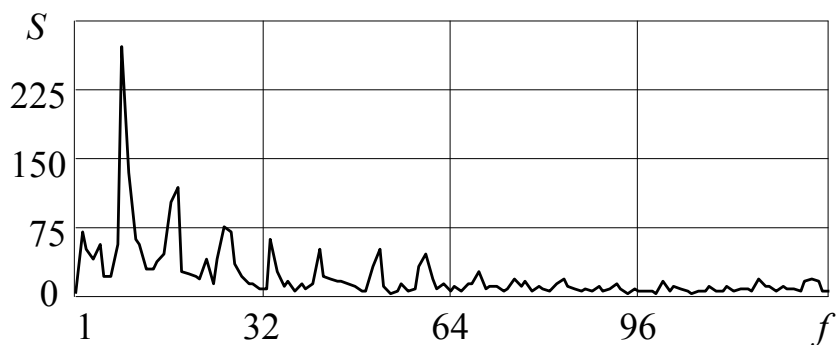


а

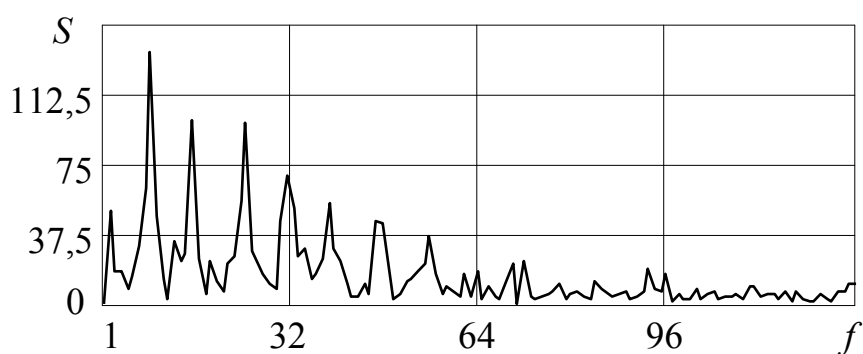
Рисунок 2.14 – Спектри доплерівських сигналів, що відповідають обертанню: одного ротора № 1 (а), двох роторів № 1, 2 (б), двох роторів № 1, 3 (в), двох роторів № 2, 3 (г) і трьох роторів (д) з кутовою частотою 225 рад/с



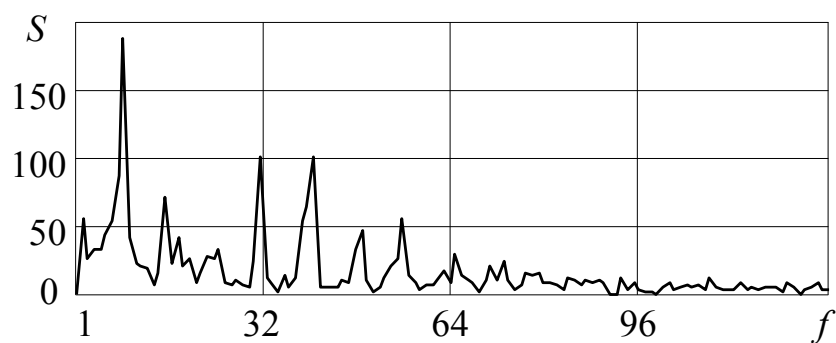
а



б



в



г

Закінчення рисунку 2.14 – Спектри доплерівських сигналів, що відповідають обертанню: одного ротора № 1 (а), двох роторів № 1, 2 (б), двох роторів № 1, 3 (в), двох роторів № 2, 3 (г) і трьох роторів (д) з кутовою частотою 225 рад/с

На рис. 2.14 видно, що при однаковій частоті обертання роторів на всіх спектрах частота першої основної гармоніки не змінюється і дорівнює $f_{ДС1} \approx 172$ 1/с. Також на всіх спектрах присутні елементи фонового спектру ліворуч і праворуч від основних гармонік. Аналіз спектру ДС при обертанні двох роторів № 1, 2 в один бік (рис. 2.14, б) показує, що з'являється шість додаткових гармонік на кратних $f_{ДС1} \approx 172$ 1/с частотах. При цьому амплітуди першої і другої гармонік збільшуються в два і півтора рази, відповідно, в порівнянні з спектром ДС при зондуванні одного ротора № 1 (рис. 2.14, а). Така поведінка спектру ДС обумовлена взаємним впливом обертання двох роторів в один бік. Спектр ДС при обертанні двох роторів № 1, 3 в різні боки (рис. 2.14, в) відрізняється від спектрів ДС, розглянутих вище. Так, амплітуда першої гармоніки збільшується тільки в півтора рази, а не в два, а друга гармоніка навіть зменшується, також змінюється ширина гармонік та їх форма. При цьому амплітуди гармонік зменшуються згідно з законом близькому до експоненціального. Крім того, порушується кратність частот гармонік частоті $f_{ДС1} \approx 172$ 1/с. Така поведінка гармонік спектру свідчить про складніший характер ДС і обумовлено різнобічним обертанням роторів, яке приводить до того, що взаємний їх вплив є не синхронним.

Спектр ДС при обертанні двох роторів № 2, 3 в різні боки (рис. 2.14, г) при змінній конфігурації їх розташування (на одній лінії, перпендикулярній напрямку на РЛС, див. рис. 2.3) також має деякі відмінності. Так, амплітуда першої гармоніки зменшується, а гармоніки стають ширшими. При цьому сім перших гармонік розташовуються на частотах кратних частоті $f_{ДС1} \approx 172$ 1/с, а восьма «руйнується». Зменшення амплітуд гармонік відбувається вже не згідно з законом близькому до експоненціального. Такий характер спектру також обумовлений напрямом обертанням роторів, а також їх взаємним розташуванням.

При зондуванні трьох обертових роторів спектр ДС (рис. 2.14, д) стає більш «порізаним». Перша гармоніка залишається без зміни, а друга і третя гармоніки спотворюються (змінюють форму і зменшують амплітуду). Амплітуди четвертої і п'ятої гармонік практично однакові і зростають, в порівнянні із спектрами ДС, розглянутих вище. Гармоніки з шостою по восьму включно не змінюються. Також

необхідно відзначити, що із збільшенням числа роторів в спектрах ДС (див. рис. 2.14, г і д) зростає рівень і складність високочастотних складових, тобто збільшується складність ДС.

Таким чином, частотно-часовий аналіз доплерівських сигналів, відбитих від обертових роторів БПЛА, показує, що структура (форма) сигналів та їх спектрів залежить від числа роторів, напряму їх обертання і геометричного розташування відносно РЛС. Проведений аналіз дозволяє розробити модель ДС, яка буде враховувати особливості форми сигналу.

2.3 Моделювання доплерівського сигналу, відбитого від БПЛА, з використанням фрактальних недиференційовних функцій

Експериментальне дослідження відбитих сигналів від рухомих об'єктів показує, що різна складність руху приводить до різних форм доплерівського сигналу [117]. При цьому форма сигналів не є гладкою, що обумовлено особливостями руху частин об'єкту, а також дією завад і шумів. Складна форма ДС не дозволяє записати модельні рівняння, використовуючи загальні закони цього явища. Тому доцільною є побудова моделей з використанням низки вимірювань спостережуваної величини, які характеризують поведінку об'єкту в послідовні моменти часу (створення моделей за експериментальними часовими рядами). Такий підхід до моделювання називається емпіричним [157], а в математичній статистиці і теорії автоматичного управління – ідентифікацією систем [158]. У нелінійній динаміці таке моделювання називається реконструкцією динамічних систем [112].

В основі методики моделювання ДС лежить принцип емпіричного моделювання, який з розвитком комп'ютерної техніки стає все більш поширеним. Відповідно до типової схеми емпіричного моделювання [157] на першому етапі здійснюється отримання і аналіз експериментальних часових рядів. Другий етап включає вибір структури моделі (виду функції, типу рівняння). Найбільш трудомістким етапом є третій етап – підгонка моделі (розрахунок параметрів). На останньому етапі здійснюється діагностична перевірка моделі.

Порядок отримання та аналіз особливостей (частотно-часовий аналіз) доплерівських сигналів, відбитих від обертових роторів БПЛА описано у підрозділі 2.1 та у роботі [47]. Аналіз цих ДС показав, що вони мають складну форму і здійснити моделювання таких сигналів шляхом формування диференціальних рівнянь не представляється можливим.

2.3.1. Вибір структури моделі (виду моделюючої функції)

Розглянемо можливість використання фрактальних недиференційовних функцій (ФНФ), для моделювання складної поведінки ДС, відбитих від обертових роторів БПЛА [48, 59].

Функцію $y = f(x)$ називають фрактальною, якщо її графіком є фрактальна множина, тобто функція $y = f(x)$ фрактальна, якщо існує значення функції y_0 яке є образом фрактальної множини точок. При цьому фрактальна функція тісно пов'язана з її диференціальними властивостями [159]. Найбільш відомими класичними ФНФ є [110, 115, 160, 161]: функція Больцано; функція Рімана; функція Ханкеля; функція Вейерштрасса; функція Дарбу та ін. Функції Больцано і Ханкеля за своєю структурою не дозволяють моделювати сигнали радіолокаційних засобів. Розглянемо особливості побудови деяких ФНФ, які можуть бути використані для моделювання сигналів.

Вираз для функції Рімана, яка не має кінцевої похідної ні в одній точці, має вигляд [110]

$$f(x) = \sum_{n=1}^N \frac{\sin n^2 x}{n^2}, \quad (2.1)$$

де x – ірраціональне або раціональне число;

N – кількість складових, що входять у функцію.

При $N = 1$ функція Рімана є звичайною синусоїдою з одиничною амплітудою. На рис. 2.15 показана функція Рімана при $N = 3$ (а) і $N = 6$ (б). Як видно на рис. 2.15, форма функції Рімана є порізаною, яка збільшується із збільшенням N .

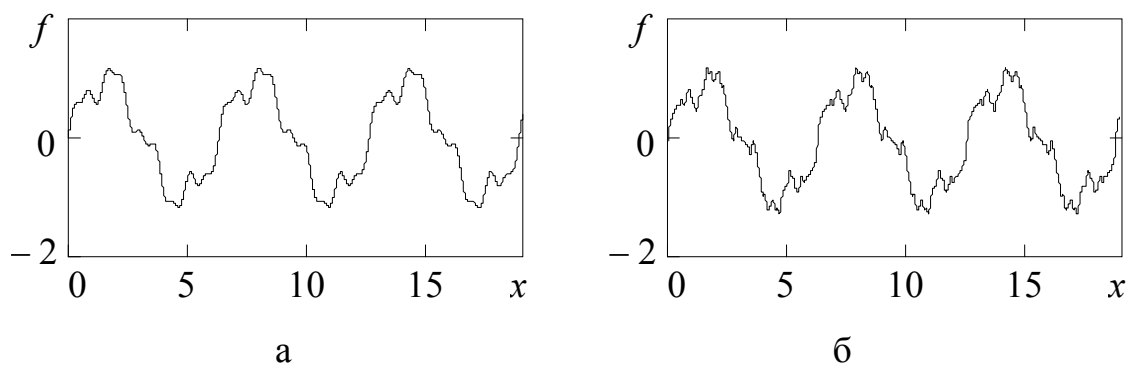


Рисунок 2.15 – Функція Рімана при: $N = 3$ (а); $N = 6$ (б)

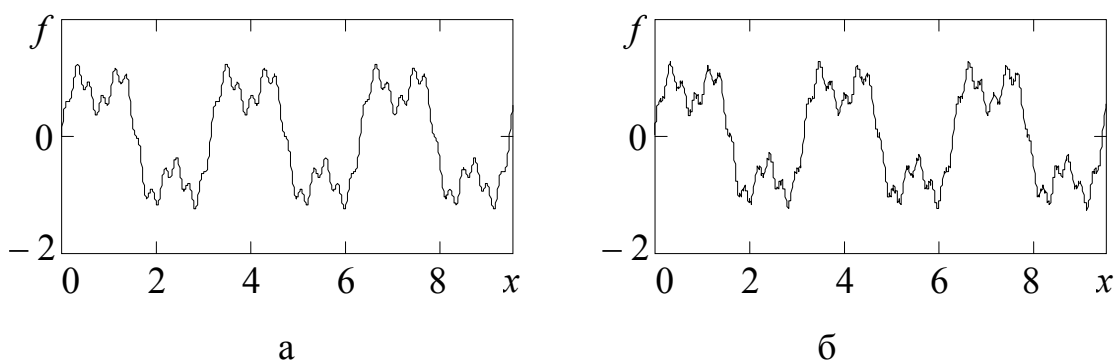


Рисунок 2.16 – Функція Дарбу при: $N = 3$ (а) і $N = 6$ (б)

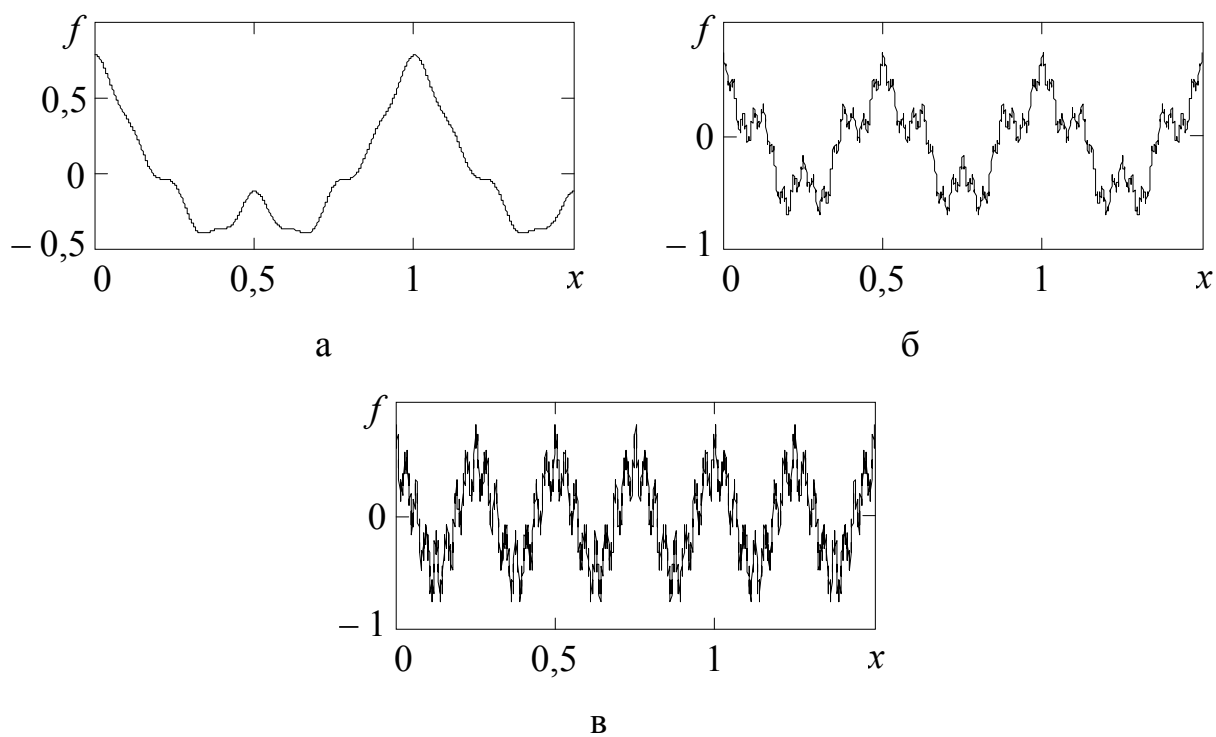


Рисунок 2.17 – Функція Вейерштрасса при $a = 0,45$, $N = 4$:

$b = 2$ (а); $b = 4$ (б); $b = 8$ (в)

Ці зміни більше виявляються при невеликих значеннях $N < 10$. При більшому числі складових порізаність функції візуально не змінюється. Таким чином, функція Рімана може бути використана для моделювання синусоїдальних сигналів за наявності незначних спотворень. Але, в даній функції можна варіювати тільки двома параметрами – кількістю періодів сигналу (x) і кількістю складових (N), що не дозволяє моделювати великий клас сигналів.

Функція Дарбу має наступний вигляд [161]

$$f(x) = \sum_{n=1}^N \frac{\sin[(n+1)! \cdot x]}{n!}. \quad (2.2)$$

Порівняння виразів (2.1) і (2.2) показує, що дані ФНФ відрізняються лише операціями, які проводяться з числом складових функції (піднесення у квадрат у виразі (2.1) і факторіал у виразі (2.2)). На рис. 2.16 показано функцію Дарбу при $N = 3$ (а) і $N = 6$ (а). Характер порізаності функції Дарбу із зростанням N такий же, як і у ФНФ Рімана. Але, як видно на рис. 2.16, форма функції Дарбу відрізняється від форми функції Рімана. У той же час, при моделюванні синусоїдальних сигналів з використанням функції Дарбу також можливе варіювання тільки двома параметрами (x і N), що обмежує завдання можливих умов модельованої дії.

Функцію Вейерштрасса, що не має похідної ні в одній точці, представляють в наступному вигляді [115]

$$f(x) = \sum_{n=1}^N a^n \cdot \cos(b^n \cdot \pi \cdot x), \quad (2.3)$$

де a – коефіцієнт масштабу нерівностей ($0 < a < 1$);

$b > 1$ – параметр частотного масштабування;

N – кількість складових, що входять у функцію.

При побудові даної функції спочатку береться косинусоїда $f_1(x) = a \cdot \cos(b \cdot \pi \cdot x)$. Потім на цю косинусоїду накладається ще одна із збільшеними в квадраті значеннями a і b $f_2(x) = a^2 \cdot \cos(b^2 \cdot \pi \cdot x)$. Оскільки, $0 < a < 1$, а $b > 1$, то амплітуда косинусоїди зменшується, а частота зростає, в порівнянні з

$f_1(x)$. Потім додається ще косинусоїда з меншою амплітудою і більшою частотою $f_3(x) = a^3 \cdot \cos(b^3 \cdot \pi \cdot x)$ і т. д. В результаті виникає нескінченно порізана крива. Вона має властивість самоподібності, тобто її частина подібна до цілого. Необхідно зазначити, що під час опису форми флуктуацій (порізаності) даної функції часто використовується фрактальна розмірність D , яка пов'язана з коефіцієнтом a , виразом: $D = 1 + a$. При значеннях D близьких до одиниці, функція $f(x)$ по суті гладка, при збільшенні значення від 1 до 2 можна отримувати різні фрактальні функції [110]. Параметр частотного масштабування також значно впливає на поведінку даної функції. На рис. 2.17 показана функція Вейерштрасса при $a = 0,45$, $N = 4$ і $b = 2$ (а), $b = 4$ (б), $b = 8$ (в). Як видно на рис. 2.17, із збільшенням значення b змінюються не тільки частотні характеристики функції, але і її структура. При малих значеннях b форма функції (її порізаність) не значна, а при великих – добре спостерігається її самоподібність. Наявність у функції Вейерштрасса чотирьох змінних параметрів (x , N , a і b) дозволяє значно розширити можливості моделювання сигналів з різними характеристиками.

Однією з відомих ФНФ, при побудові якої безпосередньо бере участь фрактальна розмірність D , є функція Вейерштрасса-Мандельброта $W(x)$, яка визначається співвідношенням [160]

$$W(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{(1 - e^{jb^n x}) e^{j\varphi_n}}{b^{(2-D)n}}. \quad (2.4)$$

Параметр b у функції $W(x)$ визначає, яку частину кривої видно, коли аргумент x змінюється в заданому інтервалі. Фрактальна розмірність D повинна змінюватися в діапазоні $1 < D < 2$, а φ_n є довільною фазою. Кожному значенню фази φ_n відповідає інша функція $W(x)$.

Косинусною ФНФ Вейерштрасса-Мандельброта називається дійсна частина функції $W(x)$ [160]

$$f(x) = \text{Re } W(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{(1 - \cos b^n x)}{b^{(2-D)n}}. \quad (2.5)$$

При побудові кривих дану функцію обмежують по n і досліджують вплив інших параметрів на її форму. Розглянемо вплив величини D на форму функції Вейерштрасса-Мандельброта (рис. 2.18). Як видно на рис. 2.18, при малих значеннях D функція по суті гладка, але коли D зростає до 2, починає сильно флюктувати. Обмежена функція Вейерштрасса-Мандельброта може використовуватися для моделювання деяких видів випадкових сигналів та дозволяє моделювати сигнали у великому діапазоні їх характеристик.

Для рішення практичних завдань, зокрема для моделювання поверхонь використовують модифіковані ФНФ Вейерштрасса-Мандельброта, в яку додаються параметри, що дозволяють змінювати її амплітуду, частоту і фазу [162]

$$f(x) = C \sum_{n=0}^{N-1} (1-D)^n \sin(2\pi \cdot K \cdot b^n x + \varphi_n), \quad (2.6)$$

де C – коефіцієнт контролю амплітуди;

N – кількість складових;

D – фрактальна розмірність;

K – просторове хвильове число;

b – параметр частотного масштабування;

φ_n – довільна фаза.

Також використовують модифіковану ФНФ Вейерштрасса-Мандельброта виду [163]

$$f(x) = C \sum_{n=0}^{N-1} b^{(D-2)n} \sin(2\pi \cdot K \cdot b^n x + \varphi_n). \quad (2.7)$$

Використання в цих функціях фрактальної розмірності, просторового хвильового числа, довільної фази і коефіцієнта контролю амплітуди дозволяє моделювати сигнали, обумовлені, наприклад, різною мірою нерівностей підстилаючої поверхні або флюктуаціями відбитого сигналу. Вирази (2.6) і (2.7) при моделюванні дають близькі результати, якщо задавати однакові функції під знаком суми (\sin або \cos) та їх параметри.

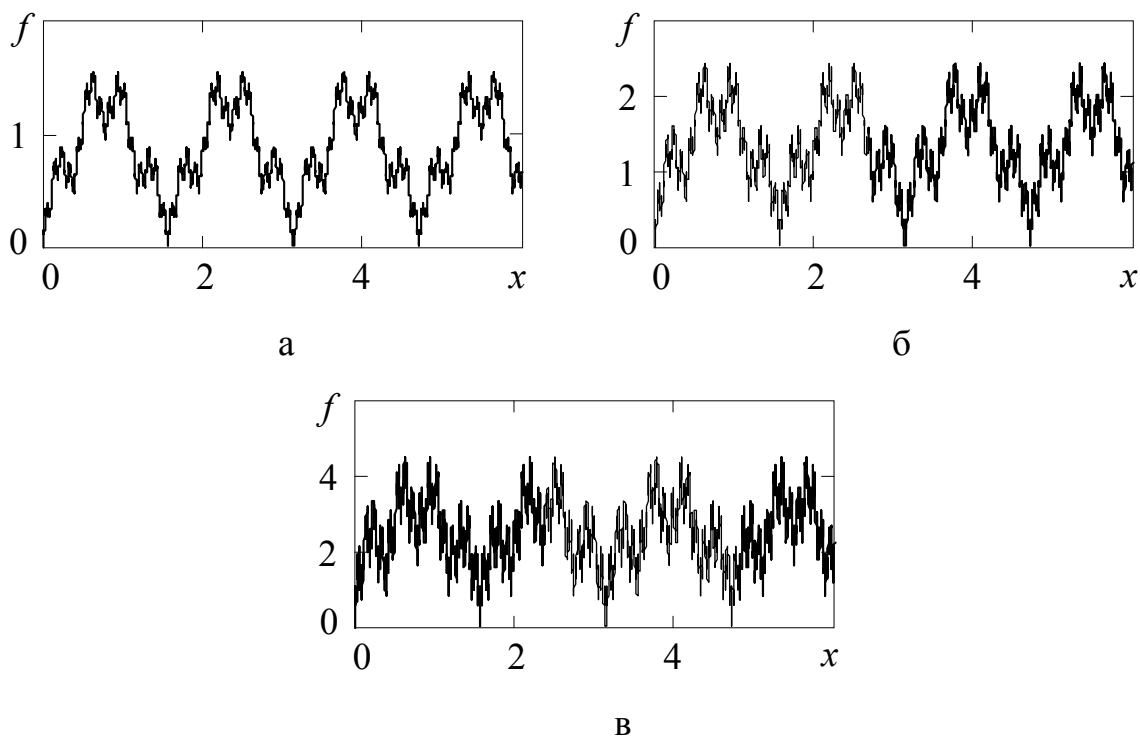


Рисунок 2.18 – Функція Вейерштрасса-Мандельброта при $b = 4$, $N = 4$:

$D = 1,45$ (а); $D = 1,65$ (б); $D = 1,85$ (в)

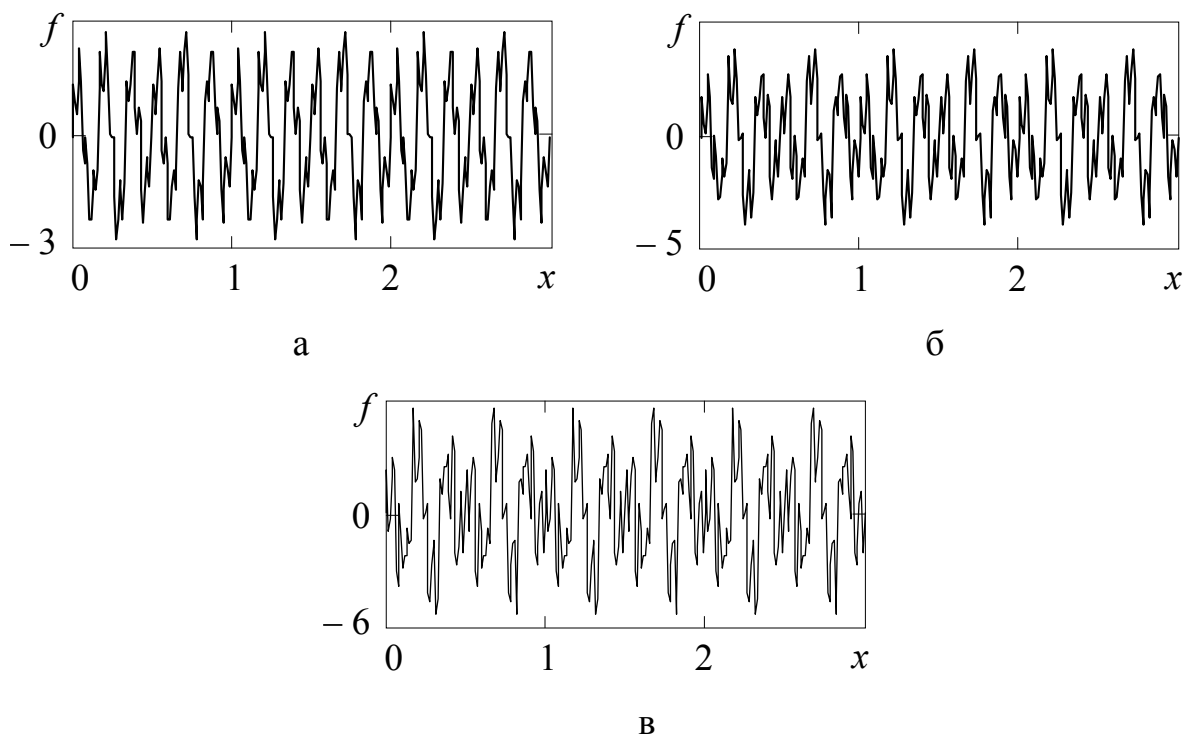


Рисунок 2.19 – Модифікована функція Вейерштрасса-Мандельброта при $C = 3,0$; $K = 1,5$; $b = 4$; $\varphi_n = 0,0$; $N = 6$: $D = 1,45$ (а); $D = 1,65$ (б); $D = 1,85$ (в)

Розглянуті вище функції, найбільш ефективні при моделюванні високочастотних (шумових або завадових) складових сигналу. Розглянемо вплив величини D на форму даної функції (рис. 2.19) при $C = 3,0$; $K = 1,5$; $b = 4$; $\varphi_n = 0,0$; $N = 6$ і $D = 1,45$ (а); $D = 1,65$ (б); $D = 1,85$ (в). Як видно на рис. 2.19, із збільшенням значення D флуктуації функції зростають. Таким чином, використання в даних функціях просторового хвильового числа, довільної фази і коефіцієнта контролю амплітуди дозволяє моделювати різні флуктуації сигналу.

Порядок формування фрактальних сигналів (ФС) описано в [115, 116]. При побудові ФС використовується правило, яке базується на властивостях ФНФ і враховує само подібність, а також гіперболічність опорних коливань. Це правило визначається виразом [115]

$$F_n(x) = \sum_{n=0}^{N-1} \frac{F_0(k^n x)}{k^n}, \quad (2.8)$$

де $F_0(x)$ – функція, що описує опорне коливання;

k – коефіцієнт подібності (масштабний коефіцієнт);

N – кількість коливань, що беруть участь у формуванні ФС.

З виразу (2.8) видно, що масштаб зміни параметрів опорного коливання однаковий (коефіцієнт стиснення дорівнює коефіцієнту розтягування). Залежно від вибору виду функції опорного коливання $F_0(x)$ вираз (2.8) описує ФС на основі або гармонійного коливання (косинусоїдального або синусоїдального), або на основі коливань з кутовою модуляцією. При побудові ФС з використанням опорного синусоїдального коливання його можна представити виразом [115]

$$F(x) = \sum_{n=0}^{N-1} \frac{U_0}{k^n} \sin(2\pi \cdot f_0 \cdot k^n \cdot x + \varphi_0), \quad (2.9)$$

де N – кількість функцій, що використовуються при формуванні сигналу;

U_0 – амплітуда опорного коливання;

k – коефіцієнт подібності;

f_0, φ_0 – початкові частота і фаза синусоїдальної функції.

На рис. 2.20 показані фрактальні сигнали отримані згідно виразу (2.9).

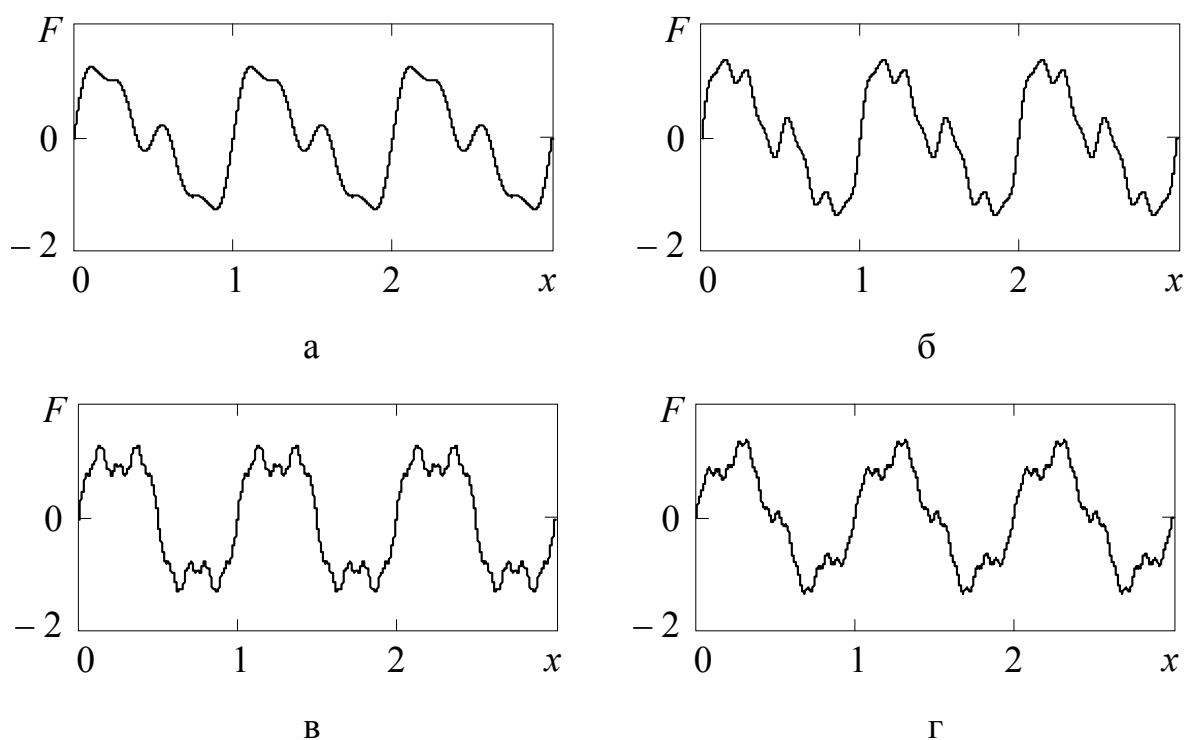


Рисунок 2.20 – Фрактальні сигнали при $U_0 = 1,0; f_0 = 1,0; \varphi_0 = 0,0$:

$N = 3, k = 2$ (а), $N = 4, k = 2$ (б), $k = 3$ (в), $k = 4$ (г)

На рис. 2.20, а і б видно, що із збільшенням кількості взаємодіючих складових N коливальний процес ускладнюється. Збільшення коефіцієнта подібності k (рис. 2.20, б-г) приводить до зміни форми сигналу. Варіювання значеннями амплітуди, частоти і фази сигналу приводить до зміни цих характеристик так як і у класичних сигналів. Таким чином, в основі побудови класичних ФНФ, також як і в основі побудови ФС, лежить гіпотеза самоподібності, що допускає нескінченну серію вкладень один в одне однакових (гомеоморфних) об'єктів.

Проведений аналіз ФНФ показав, що моделювання низькочастотної складової ДС доцільно проводити з використанням фрактального сигналу, а високочастотної – на базі модифікованої функції Вейерштрасса-Мандельброта. Результуюча модель доплерівського сигналу, відбитого від обертових роторів БПЛА представлятиме суму цих функцій [59]

$$Fm(x) = \sum_{n=0}^{N-1} \frac{U_0}{k^n} \sin(2\pi \cdot f_0 \cdot k^n \cdot x + \varphi_0) + C \sum_{n=1}^{N-1} b^{(D-2)n} \sin(2\pi \cdot K \cdot b^n \cdot x + \varphi_{n1}) \quad (2.10)$$

Позначення змінних приведені вище у формулах (2.6) і (2.9).

2.3.2. Вибір (розрахунок) параметрів моделі доплерівського сигналу

Розглянемо методику вибору параметрів моделі на прикладі ДС при обертанні одного ротора БПЛА з кутовою частотою 75 рад/с (див. рис. 2.8), оскільки найважче здійснити емпіричне моделювання ДС при невеликих швидкостях обертання роторів [48]. Як наголошувалося вище, даний сигнал має ряд особливостей. На часовій реалізації ДС виявляються два послідовні максимуми сигналу, перший приблизно вдвічі більше другого, а також спостерігаються по два додаткові максимуми (праворуч і ліворуч від основних піків).

Спочатку вибирається розмір часової вибірки, яка повинна відповідати довжині сигналу (часового ряду), отриманого експериментально. У випадку, що розглядається, це 1024 точки часового ряду. Далі вибираються параметри низькочастотної складової ДС. У якості такого сигналу пропонується [48] використовувати синусоїдальний або косинусоїдальний ФС, що описується виразом (2.9). Цей сигнал повинен бути узгоджений за амплітудою і частотою з ДС, отриманим експериментально, що забезпечить відповідність форми модельованого ДС реальній. Форму ФС можна змінювати вибором параметрів N , k і φ_0 . При невеликих швидкостях обертання ротора частоту опорного коливання ФС необхідно вибирати у два рази вище, а амплітуду в два рази менше, ніж частота і амплітуда максимальних піків ДС, отриманого експериментально. На рис. 2.21 показаний синусоїдальний ФС при початкових параметрах: $N = 2$; $k = 5$; $U_0 = 15,0$; $f_0 = 7,1$; $\varphi_0 = 0,0$.

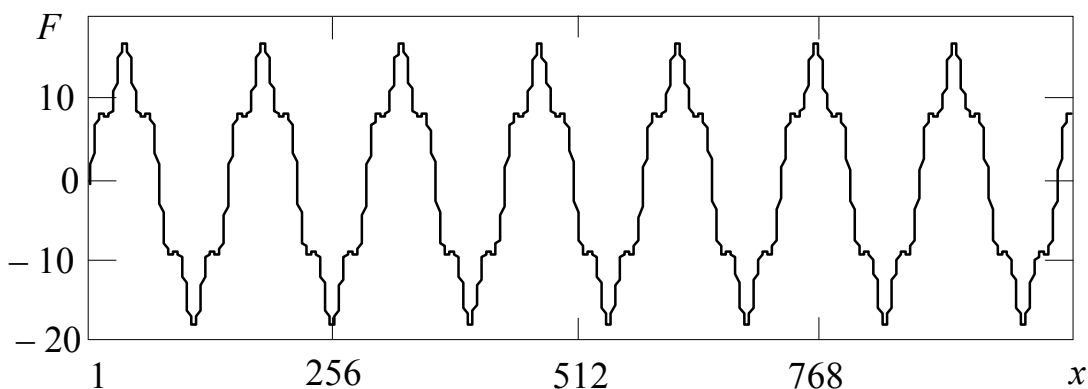


Рисунок 2.21 – Фрактальний сигнал при $N = 2$; $k = 5$; $U_0 = 15,0$; $f_0 = 7,1$; $\varphi_0 = 0,0$

Як видно на рис. 2.21 ФС визначає загальну поведінку модельованого сигналу – його періодичність і деякі особливості форми. На рис. 2.22 показано результат підбору амплітуди, частоти і форми ФС (жирна крива) на фоні ДС.

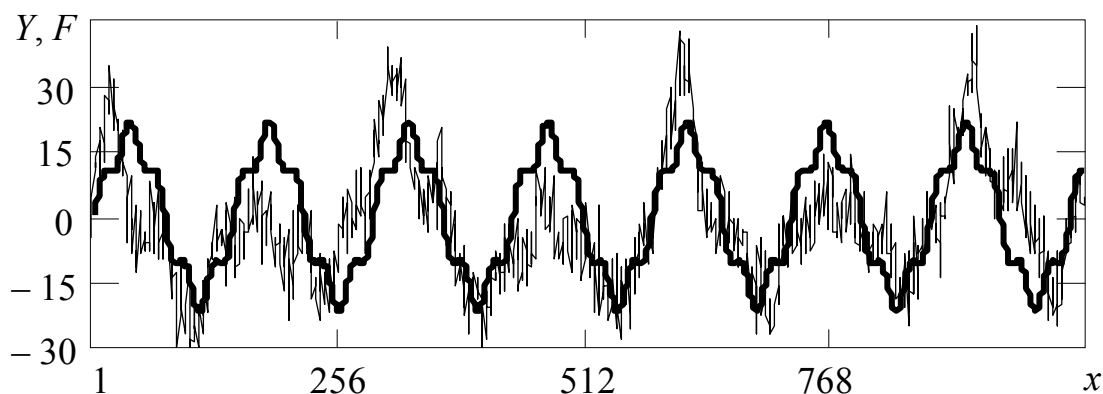


Рисунок 2.22 – До вибору амплітуди, частоти і форми фрактального сигналу

На рис. 2.22 видно, що частота ФС (7 періодів) у двічі більше частоти ДС (3,5 періоди), а амплітуда ФС (- 20 рівнів) у двічі менше максимального значення ДС (- 44 рівні). При цьому параметри $N = 2$ і $k = 5$ ФС вибрані так, щоб врахувати особливості форми реального ДС (один основний максимум і два бічних).

Для моделювання високочастотної складової ДС пропонується [48] використовувати модифіковану функцію Вейерштрасса-Мандельброта, що описується виразом (2.7). При цьому, спочатку вибираються коефіцієнт контролю амплітуди C і просторове хвилеве число K в двічі менше ніж амплітуда опорного коливання ФС U_0 та його частота f_0 . Такий вибір цих параметрів забезпечує зменшення максимумів амплітуди парних періодів ФС і збільшенню максимумів амплітуди непарних періодів ФС, що характерно для ДС при невисоких швидкостях обертання ротора. Потім, у разі потреби, параметри C і K коректуються залежно від параметрів ДС, отриманого експериментально. Для цього також може змінюватися довільна фаза – φ_n . Ступінь порізаності модельованого ДС забезпечується підбором кількості складових функції N_1 , фрактальної розмірності D і параметра частотного масштабування b .

На рис. 2.23 показана синусоїдальна модифікована функція Вейерштрасса-Мандельброта при початкових параметрах: $C = 7,5$; $N = 6$; $K = 3,67$; $b = 1,04e$ ($e \sim 2,71828$); $D = 1,85$; $\varphi_n = 0,0$.

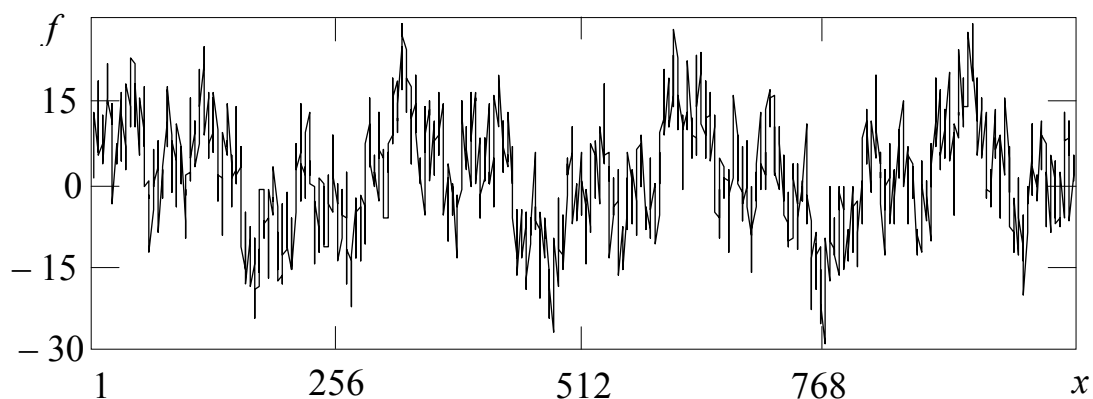


Рисунок 2.23 – Модифікована функція Вейерштрасса-Мандельброта при
 $C = 7,5$; $N = 6$; $K = 3,67$; $b = 1,04e$; $D = 1,85$; $\varphi_n = 0,0$

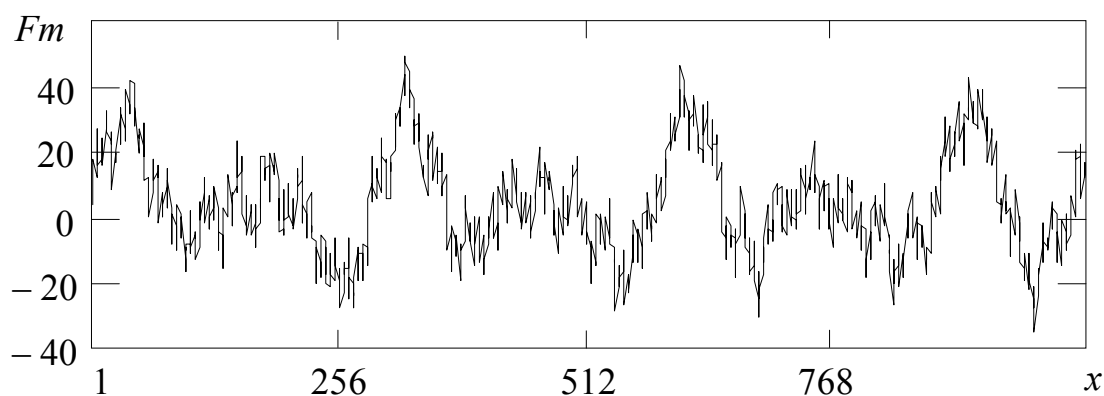


Рисунок 2.24 – Доплерівський сигнал при обертанні одного ротора БПЛА з кутовою частотою 75 рад/с, отриманий в результаті моделювання

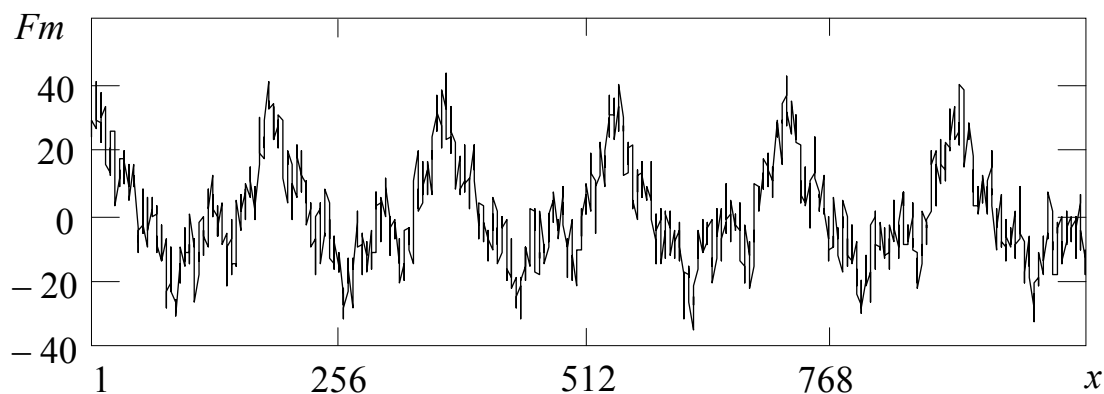


Рисунок 2.25 – Доплерівський сигнал при обертанні одного ротора БПЛА з кутовою частотою 150 рад/с, отриманий в результаті моделювання

На рис. 2.23 видно, що при вибраних параметрах функція Вейерштрасса-Мандельброта достатньо точно описує порізаність модельованого ДС.

На рис. 2.24 показаний модельований ДС при обертанні одного ротора БПЛА з кутовою частотою 75 рад/с, отриманий з використанням виразу (2.10). Як видно на рис. 2.24, результати моделювання відображають характерні особливості реального ДС, отриманого експериментально, його амплітуду, частоту, порізаність і форму (див. рис. 2.8), але не є його точною копією.

Розглянемо результати вибору параметрів моделі при інших швидкостях обертання і кількості роторів [48]. При збільшенні швидкості обертання ротора в двічі (кутова частота 150 рад/с), число періодів ДС збільшується до шести (див. рис. 2.10, а). Це дещо більше ніж у два рази в порівнянні з ДС ротора, що обертається з кутовою частотою 75 рад/с. Також спостерігається зміна форми ДС, зокрема, другі максимуми (парні періоди) зміщуються вправо. Низькочастотна складова такого сигналу може бути побудована на базі косинусоїдального ФС при наступних параметрах: $N = 3$; $k = 3$; $U_0 = 18,0$; $f_0 = 5,8$; $\varphi_0 = -0,36$. При цьому частота опорного коливання ФС вибирається так, щоб забезпечити моделювання шести періодів ДС. Вибір коефіцієнта подібності $k = 3$ і початкової фази $\varphi_0 = -0,36$ дозволяє врахувати зсув другого максимуму модельованого ДС вправо.

Для моделювання високочастотної складової ДС використовується синусоїдальна модифікована функція Вейерштрасса-Мандельброта. При цьому коефіцієнт контролю амплітуди вибирається рівним $C = 7,0$, який в сумі з амплітудою ФС забезпечує моделювання амплітуди ДС. На відміну від розглянутого вище випадку (обертання одного ротора з кутовою частотою 75 рад/с), просторове хвильове число K вибирається не менше в два рази, а більше в два рази, ніж частота опорного коливання ФС $K = 11,7$. Це обумовлено тим, що частота ФС відповідає частоті початкового ДС, а не в два рази менше, ніж це було при моделюванні ДС при обертанні одного ротора з кутовою частотою 75 рад/с. Фаза ФНФ вибрана $\varphi_{n1} = 0,0$. Ступінь порізаності модельованого ДС забезпечується підбором кількості складових функції $N_1 = 6$, фрактальної розмірності $D = 1,85$ і параметра частотного масштабування $b = 1,086e$.

На рис. 2.25 показано модель ДС при обертанні одного ротора БПЛА з кутовою частотою 150 рад/с, побудовану з використанням виразу (2.10) і вибраних параметрах ФС і ФНФ. Візуальне порівняння сигналів на рис. 2.10, а і рис. 2.25 показує, що при вибраних параметрах ФС і ФНФ модель ДС добре описує складність форми реального ДС. Але отриманий в результаті моделювання ДС не є копією початкового ДС, а лише описує особливості реального сигналу.

На рис. 2.26 показана модель ДС при обертанні одного ротора БПЛА з кутовою частотою 225 рад/с, побудована з використанням виразу (2.10). При цьому були вибрані наступні параметри моделі. Як низькочастотна складова був вибраний косинусоїдальний ФС при $N = 2$; $k = 2$; $U_0 = 15,0$; $f_0 = 7,5$; $\varphi_0 = 0,47$. Вибір таких параметрів ФС дозволяє врахувати ще більший зсув другого максимуму ДС вправо. Складність форми модельованого сигналу (високочастотна складова ДС) забезпечувалася наступними параметрами модифікованої функції Вейерштрасса-Мандельброта: $C = 7,0$; $N_1 = 6$; $K = 15,0$; $b = 1,08e$; $D = 1,85$; $\varphi_{n1} = 0,0$. Як і при моделюванні ДС при обертанні одного ротора з кутовою частотою 150 рад/с, просторове хвильове число K вибирається в два рази більше, ніж частота опорного коливання ФС ($f_0 = 7,5$ і $K = 15,0$), а ступінь порізаності сигналу забезпечується підбором N_1 , D і b . Аналіз сигналів, приведених на рис. 2.10, б і рис. 2.26, показує, що вибрані параметри моделі ДС дозволяють відобразити особливості складної форми реального ДС.

Розглянемо результати вибору параметрів моделі при збільшенні кількості роторів, що обертаються з кутовою частотою 225 рад/с [59]. Як наголошувалося вище, максимуми ДС при обертанні двох роторів розподіляються на дві частини. Для моделювання даної особливості сигналу використовувався синусоїдальний ФС з параметрами $N = 3$; $k = 2$; $U_0 = 20,0$; $f_0 = 8,1$; $\varphi_0 = -1,52$. Вибір кількості складових $N = 3$, коефіцієнта подібності $k = 2$ і початкової фази $\varphi_0 = -1,52$ дозволив змодельовати розділення максимумів ДС. Використання модифікованої функції Вейерштрасса-Мандельброта з параметрами $C = 9,0$; $N_1 = 6$; $K = 4,1$; $b = 1,094e$; $D = 1,85$; $\varphi_{n1} = 0,0$ дозволило змодельовати порізаність ДС. При цьому, просторове хвильове число K вибиралося в два рази менше, ніж частота опорного ФС.

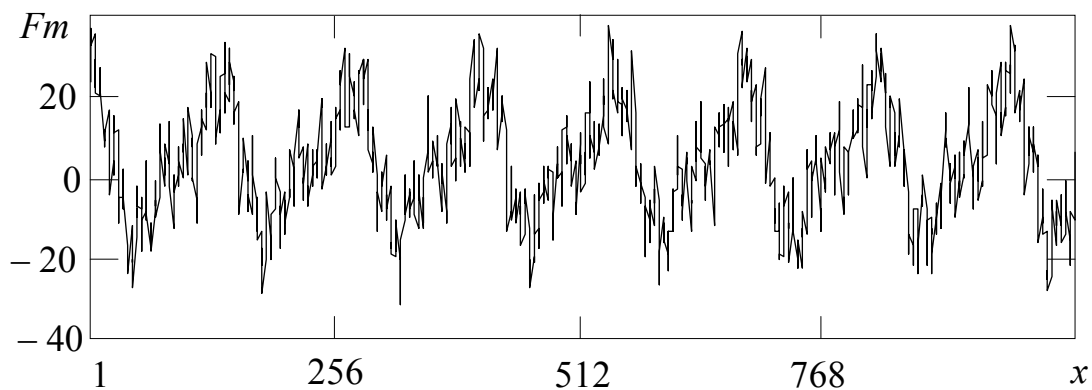


Рисунок 2.26 – Доплерівський сигнал при обертанні одного ротора БПЛА з кутовою частотою 225 рад/с, отриманий в результаті моделювання

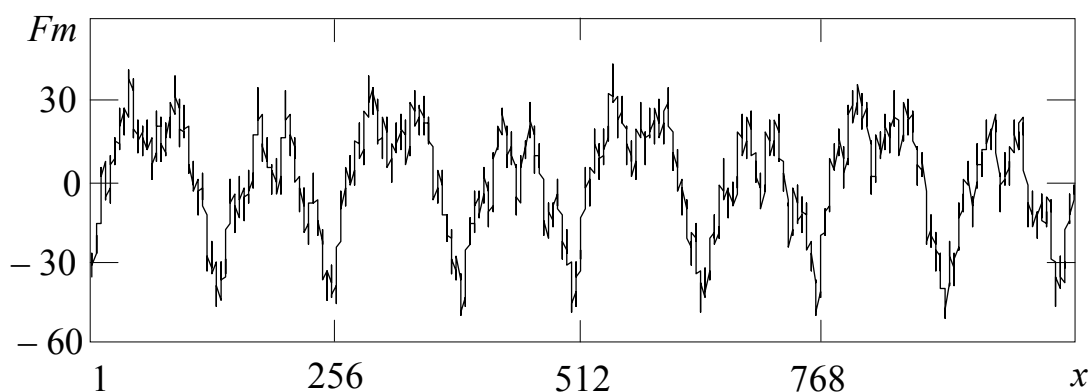


Рисунок 2.27 – Доплерівський сигнал при обертанні двох роторів БПЛА з кутовою частотою 225 рад/с, отриманий в результаті моделювання

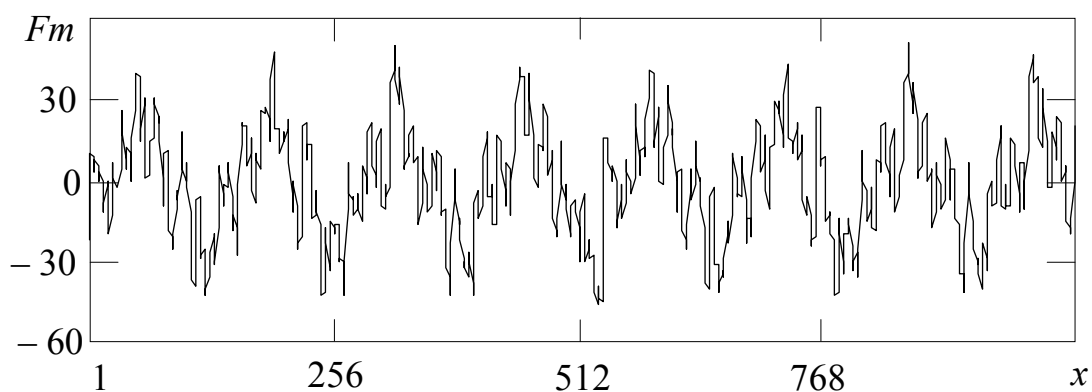


Рисунок 2.28 – Доплерівський сигнал при обертанні трьох роторів БПЛА з кутовою частотою 225 рад/с, отриманий в результаті моделювання

На рис. 2.27 показана модель ДС при обертанні двох роторів БПЛА з кутовою частотою 225 рад/с, яка побудована з використанням виразу (2.10) і вибраних параметрів ФС і ФНФ. Як видно на рис. 2.27, змодельований ДС відображає основні особливості реального ДС (див. рис. 2.11, б).

Збільшення числа оберткових роторів до трьох приводить до появи третьої складової в максимумах ДС. Цю особливість сигналу дозволяє змодельувати суму синусоїдального ФС з параметрами $N = 2$; $k = 6$; $U_0 = 20,0$; $f_0 = 7,7$; $\varphi_0 = -0,96$ і модифікованої функції Вейерштрасса-Мандельброта з параметрами $C = 7,0$; $N_1 = 7$; $K = 23,1$; $b = 0,52e$; $D = 1,85$; $\varphi_{n1} = 0,0$ [59]. При моделюванні такого ДС виявилися деякі особливості вибору параметрів ФНФ. Так просторове хвильове число K вибиралося в три рази більше, ніж частота опорного коливання ФС. Крім того, щоб врахувати характер порізаності ДС параметр частотного масштабування b вибирався менше $1,0e$ ($b = 0,52e$). Вибір решти параметрів не відрізнявся від описаних вище. На рис. 2.28 показана модель ДС при обертанні трьох роторів БПЛА з кутовою частотою 225 рад/с [59], яка побудована з використанням виразу (2.10) і вибраних параметрах ФС і ФНФ.

На етапі діагностичної перевірки моделі здійснювалося порівняння форми ДС, отриманого експериментально, і модельованого (якісна оцінка), а також порівняння величин фрактальних розмірностей, які характеризують складність (порізаність) їх форми (кількісна оцінка). Якісний аналіз реальних і модельованих ДС показав, що запропонована модель забезпечує хороше узгодження особливостей форми даних сигналів. Результати розрахунків фрактальних розмірностей реальних і модельованих ДС приведені в табл. 2.1 [48].

Таблиця 2.1 – Фрактальні розмірності (ФР) реальних і модельованих ДС

Кількість роторів і кутова частота їх обертання	ФР реального ДС	ФР модельованого ДС
1 ротор, 75 рад/с	1,639	1,635
1 ротор, 150 рад/с	1,644	1,653
1 ротор, 225 рад/с	1,657	1,662
2 ротори, 225 рад/с	1,635	1,628
3 ротори, 225 рад/с	1,622	1,619

Аналіз даних, приведених в табл. 2.1, показує, що величини ФР реального і модельованих ДС відрізняються в межах від 0,003 до 0,009, що свідчить про хорошу достовірність запропонованої моделі. Необхідно зазначити, що із збільшенням швидкості обертання одного ротора ФР модельованого сигналу збільшується також як і ФР у реального ДС. Із збільшенням числа роторів, що обертаються, порізаність ДС зменшується і зменшується величина ФР модельованого сигналу.

Висновки до розділу 2

1. Для аналізу сигналів відбитих від обертових роторів БПЛА було проведено низку експериментальних досліджень, яка містила лабораторні (статичні) та натурні (динамічні) дослідження. Під час лабораторних досліджень БПЛА фіксувався на одному місці (не злітав і не рухався), а оберталися лише його ротори, швидкість яких змінювалася. Також змінювалася кількість обертових роторів. Під час проведення натурних експериментів зондувалися два типи мультироторних БПЛА (з трьома і шістьма роторами), які рухалися у реальних умовах обстановки (у повітрі) на різних висотах і у різних напрямках.

2. Оцінені часові і спектральні характеристики доплерівських сигналів при зондуванні різної кількості роторів БПЛА і швидкості їх обертання. Встановлено, що із збільшенням кутової частоти обертання ротора період ДС зменшується (частота підвищується), але частота ДС, що фіксується, менше ніж кутова частота обертання, що задається з пульта управління БПЛА, чим більше частота обертання, тим більше відмінності цих частот.

3. Виявлені особливості структури (форми) ДС та їх спектрів, які ускладнюються при збільшенні частоти обертання ротора та їх кількості. Досліджені особливості ДС при різному напрямі обертання роторів при схожому їх геометричному розташуванні. Встановлено, що різна кількість і швидкість обертання роторів БПЛА приводить до складних форм ДС, оцінити особливості яких за допомогою частотно-часових характеристик дуже важко.

4. Для аналізу ДС відбитих від обертових роторів БПЛА необхідно розробити нову модель таких сигналів, яка дозволить оцінювати особливості їх форм. Складна форма ДС не дозволяє записати модельні рівняння, використовуючи загальні закони даних явищ. Тому для побудови моделі ДС запропоновано використання емпіричного моделювання. Розглянуті особливості використання деяких фрактальних недиференціальних функцій для моделювання радіолокаційних сигналів.

5. Розроблена модель доплерівського сигналу, відбитого від обертових роторів БПЛА, яка представляє собою суму фрактального сигналу (моделювання низькочастотної складової ДС) і модифікованої функції Вейерштрасса-Мандельброта (моделювання високочастотної складової ДС). Запропонована методика вибору параметрів моделі при різній швидкості і кількості обертових роторів БПЛА.

6. Якісний і кількісний аналіз реальних і модельованих ДС показав, що запропонована модель забезпечує хороше узгодження особливостей форми цих сигналів. Проведені дослідження у подальшому можуть бути використані для розпізнавання типу мультироторних БПЛА.

Результати досліджень даного розділу опубліковано у наукових працях [47, 48, 59].

РОЗДІЛ 3

МЕТОД АНАЛІЗУ СИГНАЛІВ, ВІДБИТИХ ВІД МУЛЬТИРОТОРНОГО БПЛА, З ВИКОРИСТАННЯМ ФАЗОВИХ ПОРТРЕТІВ

Проведено аналіз зміни форми фазових портретів сигналів, отриманих при зондуванні БПЛА, та встановлено, що вона відрізняється від форми фазових портретів фонових сигналів. Проаналізовано зміни форм фазових портретів при їх побудові з різними часовими затримками. Запропоновано метод аналізу доплерівських сигналів, відбитих від БПЛА з використанням фазових портретів, побудованих при різних часових затримках. Особлива форма фазових портретів може бути використана, як ознака розпізнавання типу мультироторного БПЛА. Розглянуто можливість використання зміни форми фазових портретів для розпізнавання БПЛА з різною кількістю роторів та різним характером їх руху.

3.1 Аналізу сигналів, відбитих від обертових роторів БПЛА, з використанням фазових портретів

Як зазначалося вище, складність форми сигналів відбитих від рухомих об'єктів змінюється у залежності від складності руху (типу рухомого об'єкту). Особливості форми відбитих сигналів, які неможливо або важко досліджувати аналітично, піддаються наочному уявленню і якісному дослідженню за допомогою перетворення вихідного сигналу в іншу площину аналізу [57].

Останнім часом для аналізу поведінки складних динамічних системи, в якій відомий тільки один параметр, використовують метод побудови псевдофазової площини (ПФП) з часовою затримкою [112, 116, 140]. На псевдофазовій площині будуються фазові портрети (ФП), тобто будується залежність амплітуди сигналу від цієї ж величини в інший момент часу, випереджаючий або відстаючий поточний момент часу на постійну величину T : $[x(t), x(t \pm T)]$ [140]. Порядок побудови ФП і підходи до вибору часової затримки наведено у підрозділі 1.3.1. Перетво-

рення початкового часового ряду в ПФП і побудова ФП дозволяє проаналізувати форму відбитих сигналів [57]. Розглянемо можливість аналізу ДС, відбитих від обертових роторів БПЛА з використанням ФП [49]. Для отримання таких ДС була проведена серія експериментів. Склад експериментальної установки та умови проведення експериментів наведено у підрозділі 1.2.1.

На рис. 3.1 показані ФП доплерівського сигналу при обертанні одного ротора з швидкістю 12,5 об/с (див. рис. 2.8), побудовані з різними часовими затримками: $T = 10$ (а) – перший мінімум середньої взаємної інформації (СВІ) і $T = 47$ (б) – перший нуль автокореляційної функції (АКФ). На зображеннях ФП по осі абсцис відкладені значення записаного сигналу (Y), а по осі ординат зрушені на T точок значення цього ж сигналу (Z).

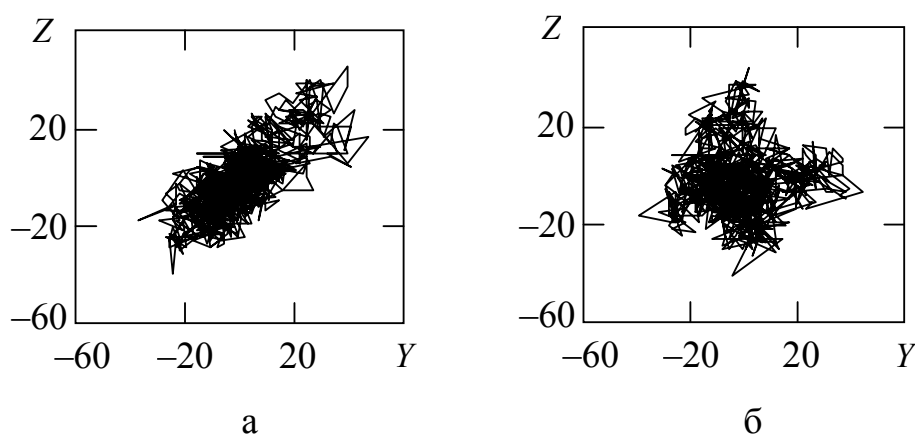


Рисунок 3.1 – Фазові портрети ДС при обертанні одного ротора БПЛА з швидкістю 12,5 об/с, побудовані з часом затримки: $T = 10$ (а) і $T = 47$ (б)

Як видно на рис. 3.1, форма ФП значно залежить від величини часової затримки T . Якщо T вибрати близьким до першого мінімуму СВІ ($T = 10$), то ФП матиме витягнуту по діагоналі форму і аналізувати особливості ДС в цьому випадку дуже важко. Єдина особливість такого ФП проявляється у верхній частині у вигляді деякого відділення фазової траєкторії (ФТ) від основної частини ФП [49]. Збільшення часової затримки до величини близької до першого нуля АКФ ($T = 47$) дозволяє досліджувати особливості ДС на ПФП. При цьому ФП не є витягнутим по діагоналі, а має характерну форму. На краях ФП спостерігаються чотири характерні області, дві зверху ФП і дві знизу. Верхні області відповідають мак-

симальним амплітудам ДС, а нижні – мінімальним. Наявність цих областей дозволяє зробити висновок, що ДС має низькочастотну складову, якої немає у фонового ДС [49].

На рис. 3.2 показано ФП фонового ДС, побудовані з часовими затримки: $T = 10$ (а) і $T = 47$ (б). Часові затримки вибрані такими ж, як і при побудові ФП ДС обертового ротора БПЛА.

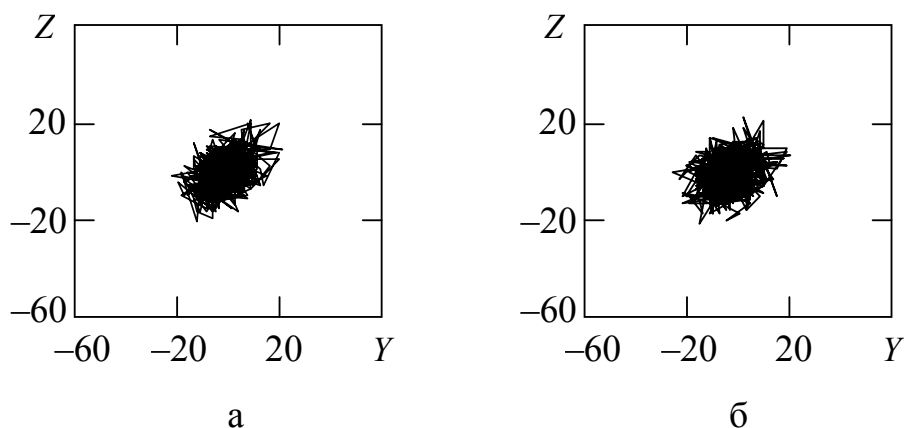


Рисунок 3.2 – Фазові портрети фонового ДС, побудовані з часовою затримкою: $T = 10$ (а) і $T = 47$ (б)

Як видно на рис. 3.2, форма ФП фонового ДС практично не залежить від часової затримки, а високочастотна (шумова) складова концентрується в центрі ФП [49]. Невелика еліпсоїдна форма ФП обумовлена модуляцією фонового сигналу електричною мережею з частотою 50 Гц.

Таким чином, поява на краях ФП характерних областей дозволяє розділити фоновий сигнал і сигнал при зондуванні обертового ротора БПЛА. При цьому фонові складова на ФП обертового ротора також знаходиться в центрі ФП. Порівняння ФП на рис. 3.1 і рис. 3.2 показує, що форма ФП фонового сигналу не залежить від величини часової затримки T , а форма ФП ДС при зондуванні обертового ротора БПЛА із збільшенням T значно змінюється. Розглянемо динаміку зміни форми ФП ДС при обертанні одного ротора з швидкістю 12,5 об/с (див. рис. 2.8) при збільшенні часової затримки [49].

На рис. 3.3 показано зміну форми ФП ДС при обертанні одного ротора під час збільшення часової затримки. Величини T показані зліва знизу на ФП.

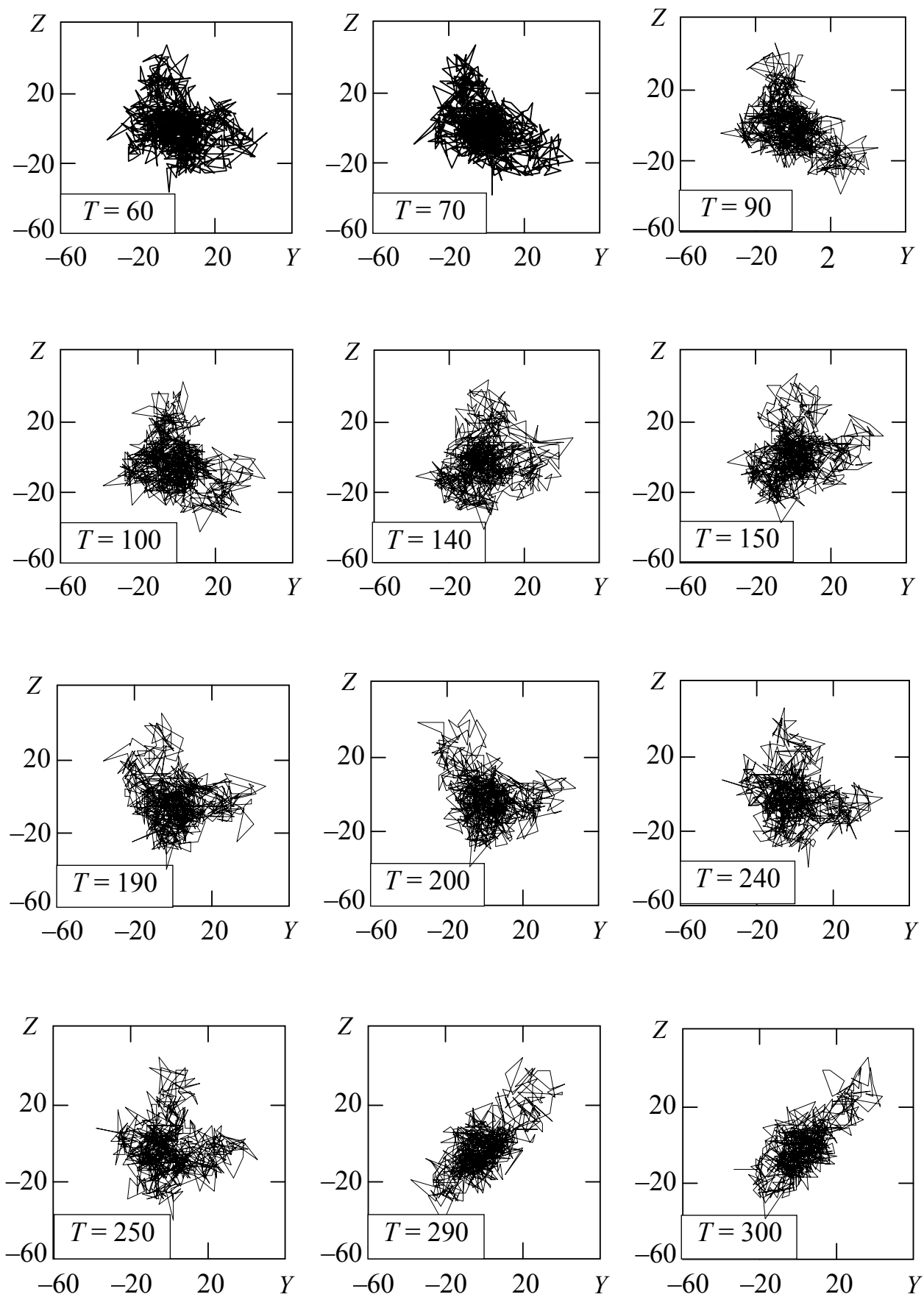
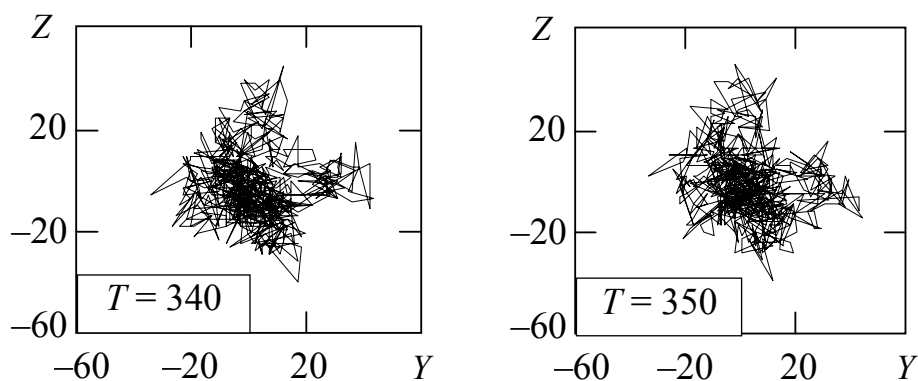


Рисунок 3.3 – Зміна форми ФП ДС при обертанні одного ротора під час збільшення часової затримки



Закінчення рисунку 3.3 – Зміна форми ФП ДС при обертанні одного ротора під час збільшення часової затримки

На рис. 3.3 показані тільки типові ФП, які дозволяють оцінити поведінку ФТ на краях ФП. Як видно з аналізу ФП, наведених на рис. 3.1 і рис. 3.3, із збільшенням часової затримки центральна частина ФП не змінюється, тобто вона обумовлена високочастотною складовою ДС. Для детального аналізу структури цієї складової необхідно зменшувати довжину вихідного сигналу до величин менших одного періоду ДС і вибирати невеликі значення часової затримки. Особливості поведінки ДС виявляються на краях ФП. Так при збільшенні T від рекомендованих (близьких до першого нуля АКФ) верхні області, відповідні максимальним амплітудам ДС починають віддалятися ($T = 60$), а нижні, що відповідають мінімумам ДС, згладжуються ($T = 70$). При подальшому збільшенні часової затримки ФП витягується по діагоналі ($T = 90$), а потім характерні області, що відповідають максимальним амплітудам ДС, не змінюються ($T = 100$).

Як наголошувалося вище, ДС є періодичним, і в одному періоді існують два максимальних (різної амплітуди) і два мінімальних (близької амплітуди) значення. При цьому період ДС складає приблизно 300 точок часового ряду, а період між максимумами з різними амплітудами приблизно 150 точок. Тому при часових затримках $T = 140$ і $T = 150$ форма ФП нагадує форму ФП, яка була при T , що дорівнювало першому нулю АКФ. Форма ФП продовжує змінюватися з збільшенням T ($T = 190$, $T = 200$, $T = 240$, $T = 250$). При цьому характерні області переміщуються за годинниковою стрілкою навколо центру ФП. Збільшення часової затримки до $T = 290$, $T = 300$ призводить до того, що форма ФП практично повто-

рює форму ФП при $T = 10$. Форма ФП при $T = 340$, $T = 350$ також практично повторює форму ФП при $T = 47$.

Таким чином, з проведеного аналізу можна зробити висновок, що, оскільки вихідний ДС є періодичним, то схожі форми ФП також з'являються періодично, з періодом рівним часовій затримці, яка дорівнює періоду ДС. При цьому форма ФП ДС змінюється певним чином із зміною часової затримки. Встановлена закономірність зміни форм ФП підтверджується і при збільшенні швидкості обертання одного ротора № 1 БПЛА до 25 об/с і 37,5 об/с.

На рис. 3.4 показано ФП доплерівського сигналу при обертанні одного ротора з швидкістю 25 об/с [49], побудовані з часовими затримками: $T = 9$ – перший мінімум СВІ (а), $T = 32$ – перший нуль АКФ (б), $T = 180$ (в), $T = 210$ (г), $T = 350$ (д) і $T = 380$ (е). Як видно на рис. 3.4 форма ФП практично повторюється приблизно через часову затримку, що складає $T = 170$ точок, яка відповідає періоду такого ДС (див. рис. 2.10, а). Відмінності у формі ФП проявляються в деякому розрядженні ФТ, що обумовлено тим, що при збільшенні часової затримки T , зменшується кількість точок, що бере участь в побудові ФП. Але характер поведінки ФТ зберігається.

На рис. 3.5 показано ФП доплерівського сигналу при обертанні одного ротора з швидкістю 37,5 об/с, побудовані з часовими затримками: $T = 9$ – перший мінімум СВІ (а), $T = 29$ – перший нуль АКФ (б), $T = 130$ (в), $T = 160$ (г), $T = 260$ (д) і $T = 290$ (е). На рис. 3.5 видно, що, також, як і при інших швидкостях обертання ротора форми ФП практично повторюються через часову затримку $T = 130$, що дорівнює періоду вихідного ДС. Також необхідно зазначити, що розрядження ФТ у ФП не проявляється. Це пов'язано з тим, що вихідний ДС містить більше число періодів у порівнянні з ДС, розглянутими вище.

Таким чином, проведений аналіз показав, що схожі форми ФП при збільшенні часової затримки проявляються періодично з періодом рівним періоду ДС. Також форма ФП ДС залежить від величини часової затримки.

Розглянемо відмінні особливості форми ФП ДС при зондуванні одного обертального БПЛА з різною швидкістю [49].

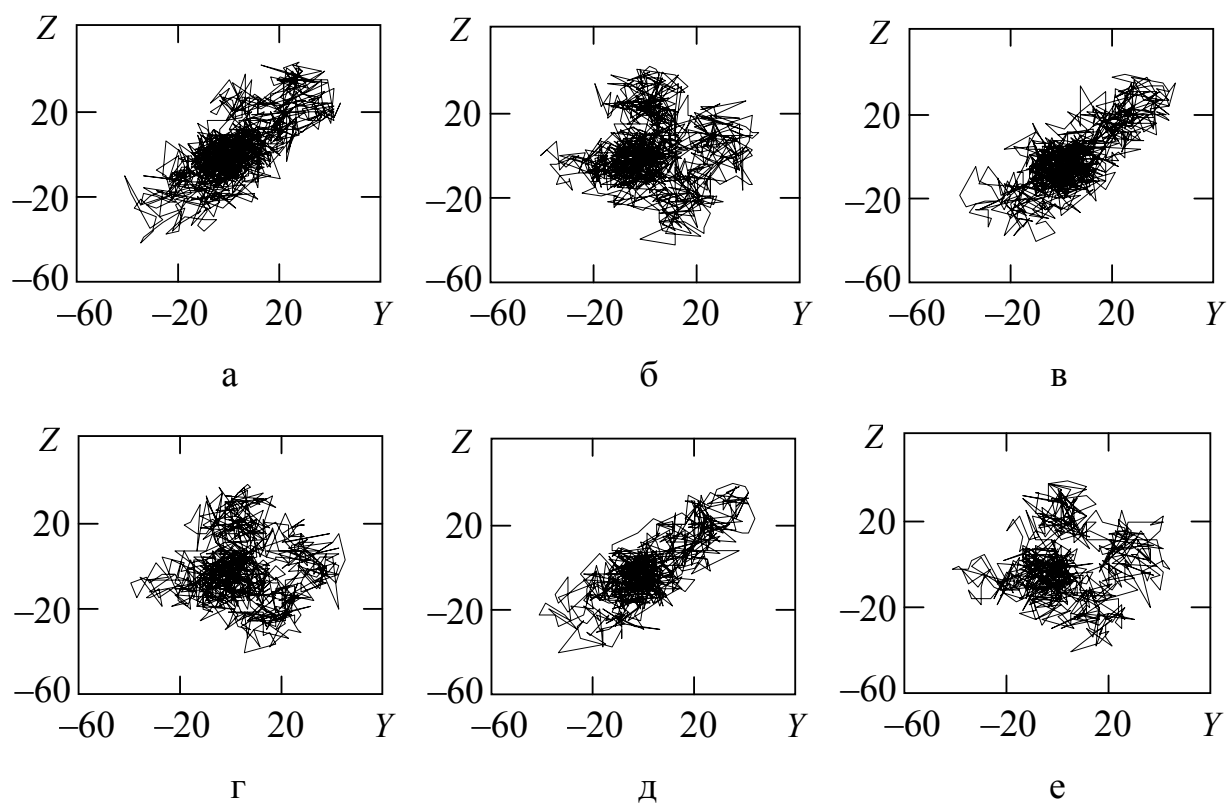


Рисунок 3.4 – Фазові портрети ДС під час обертання одного ротора з швидкістю 25 об/с при: $T = 9$ (а), $T = 32$ (б), $T = 180$ (в), $T = 210$ (г), $T = 350$ (д) і $T = 380$ (е)

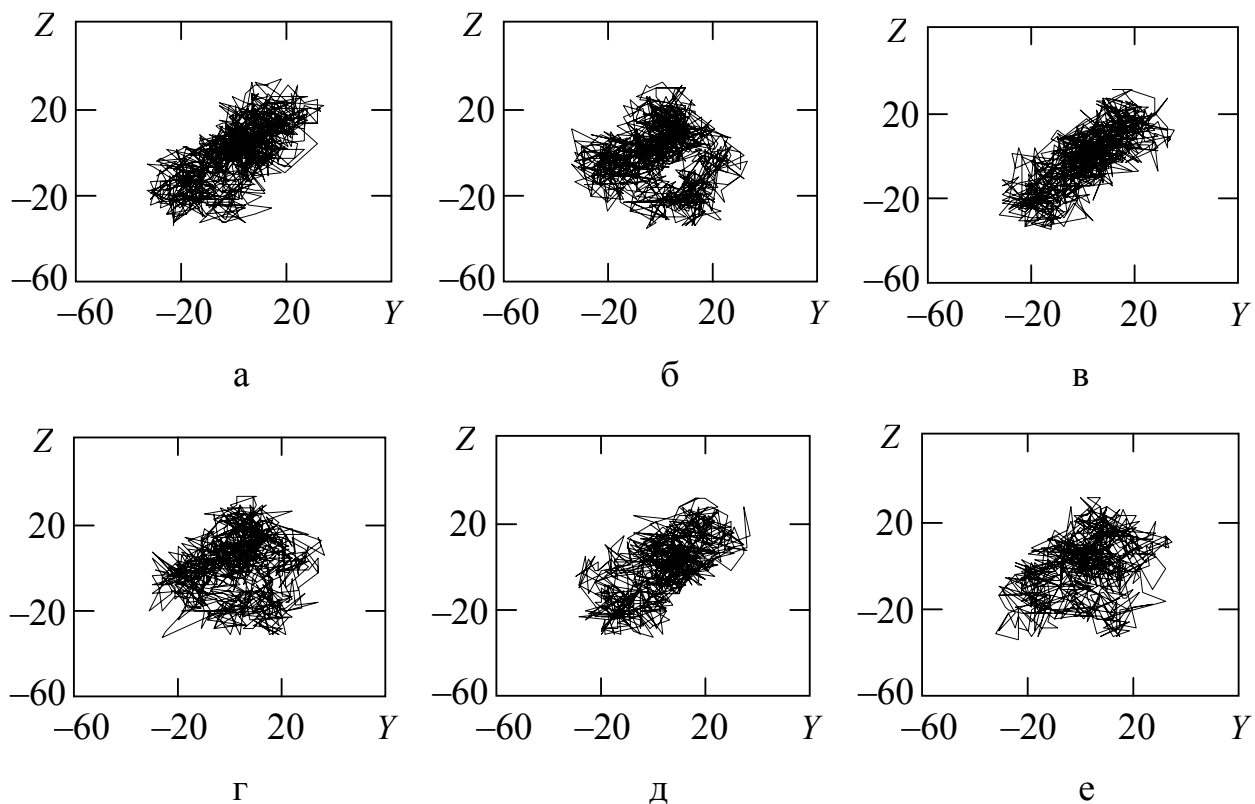


Рисунок 3.5 – Фазові портрети ДС під час обертання одного ротора з швидкістю 37,5 об/с при: $T = 10$ (а), $T = 29$ (б), $T = 130$ (в), $T = 160$ (г), $T = 260$ (д) і $T = 290$ (е)

Порівняння ФП, представлених на рис. 3.1, а, рис. 3.4, а і рис. 3.5, а, показує, що при невеликих часових затримках, близьких до першого мінімуму СВІ, аналізувати особливості ДС не представляється можливим. Всі ФП витягнуті по діагоналі і мають невеликі відділення ФТ у верхній і нижній частинах ФП. Тому подальший аналіз будемо проводити при інших часових затримках.

Одна особливість зміни форм ФП при збільшенні швидкості обертання ротора була розглянута вище – поява схожих ФП при часових затримках, що дорівнює періоду вихідного ДС. Інша особливість всіх ФП, яка не залежить від швидкості обертання роторів, пов'язана з тим, що високочастотні складові ДС групуються в центральній частині ФП, у формі, яку може бути названа «клубок ниток». Таким чином, на всіх ФП присутня область, в якій спостерігається випадковий рух точки, що зображає, по фазовій траєкторії.

Проведемо аналіз поведінки фазових траєкторій на краях ФП при збільшенні швидкості обертання ротора і зміні величин часової затримки [49].

На рис. 3.6 показані по чотири типові фазові портрети ДС, побудовані з різними часовими затримками, при обертанні одного ротора з швидкостями: 12,5 об/с (а), 25 об/с (б), 37,5 об/с (в). Значення величин T показано зліва знизу на ФП. Аналіз ФП показує, що з збільшенням швидкості обертання ротора (частота ДС збільшується) характер зміни форми ФП при однаковій довжині (кількості точок) вихідного ДС і однаковій часовій затримці при побудові ФП, буде різним. Але ці відмінності не значні і порівняння форм ФП необхідно проводити при часових затримках T більших ніж перший нуль АКФ. На рис. 3.6, це показано на лівих верхніх рисунках при $T = 85$ точок. Порівняння форм ФП показує, що із збільшенням швидкості обертання ротора, форми ФП більше відрізняються із збільшенням T від ФП, побудованих при величинах T близьких до першого нуля АКФ. Подальше збільшення часової затримки до $T = 105$ точок (середні верхні рисунки) показує, що відмінності у формах ФП продовжують збільшуватися із збільшенням швидкості обертання ротора.

Аналіз характерних форм ФП, приведених на нижніх рисунках показує, що із збільшенням швидкості обертання ротора ФТ на краях ФП групуються з біль-

шою щільністю. Цей процес добре видно на ФП, що мають трикутну форму (на рис. 3.6 це ФП при $T = 205$ для $V_p = 12,5$ об/с, при $T = 115$ для $V_p = 25$ об/с, при $T = 85$ для $V_p = 37,5$ об/с). Також аналіз форм ФП показує, що гармонійна низько-частотна складова ДС із зміною швидкості обертання ротора проявляється у вигляді чотирьох характерних областей на ФП, двох зверху (максимальні амплітуди ДС) і двох знизу (мінімальні амплітуди ДС). Але при високій швидкості обертання ротора ($V_p = 37,5$ об/с) ці області розташовуються ближче до центральної частини ФП, яка обумовлена високочастотною складовою ДС.

Таким чином, проведені дослідження показують, що якісний аналіз ДС (побудова і аналіз ФП) дозволяє оцінити особливості доплерівських сигналів, відбитих від обертових роторів БПЛА. Зміна часової затримки при побудові ФП (аналіз динаміки зміни форми ФП) дозволяє виявити відмінні особливості ДС при зміні швидкості обертання роторів. Розглянемо відмітні особливості форми ФП ДС при зондуванні різного числа роторів БПЛА, що обертаються з однаковою швидкістю [49].

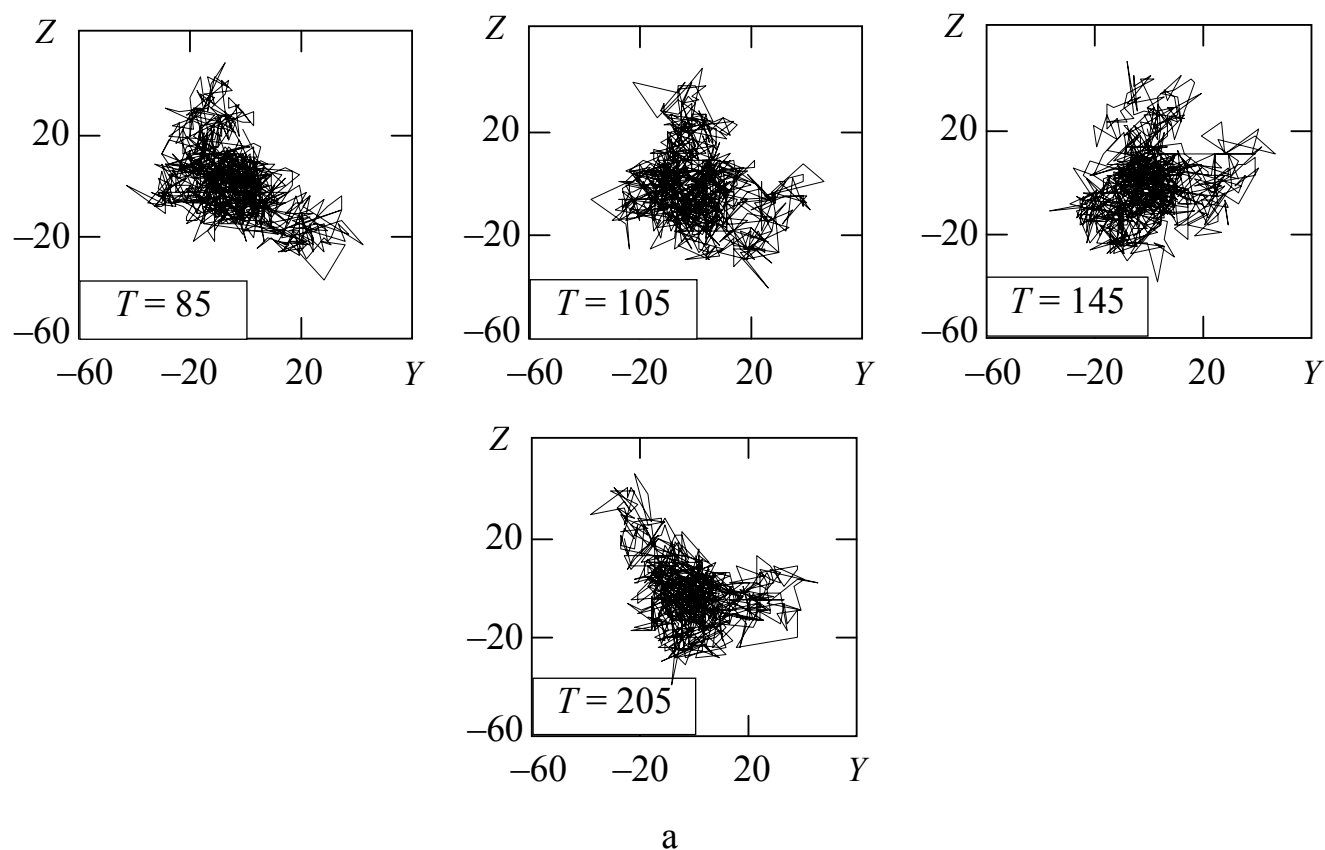
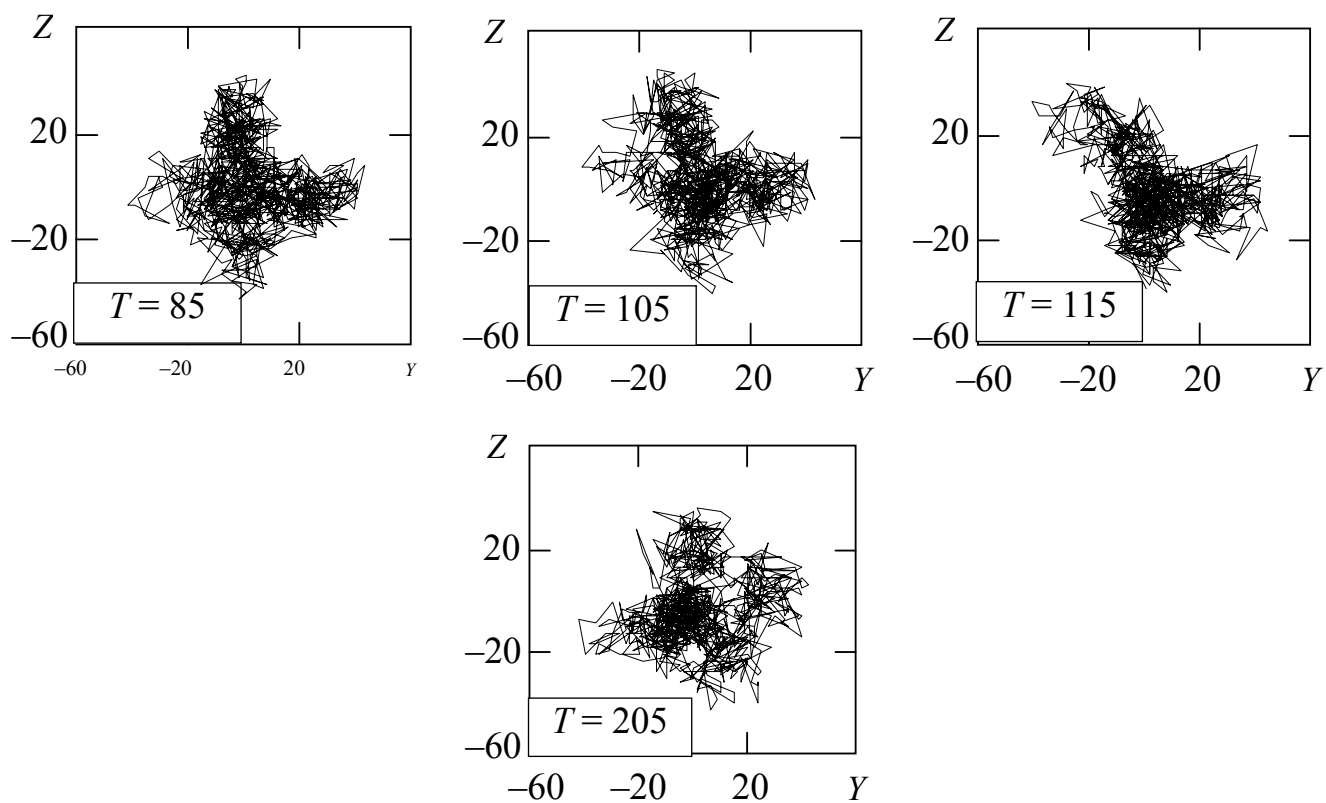
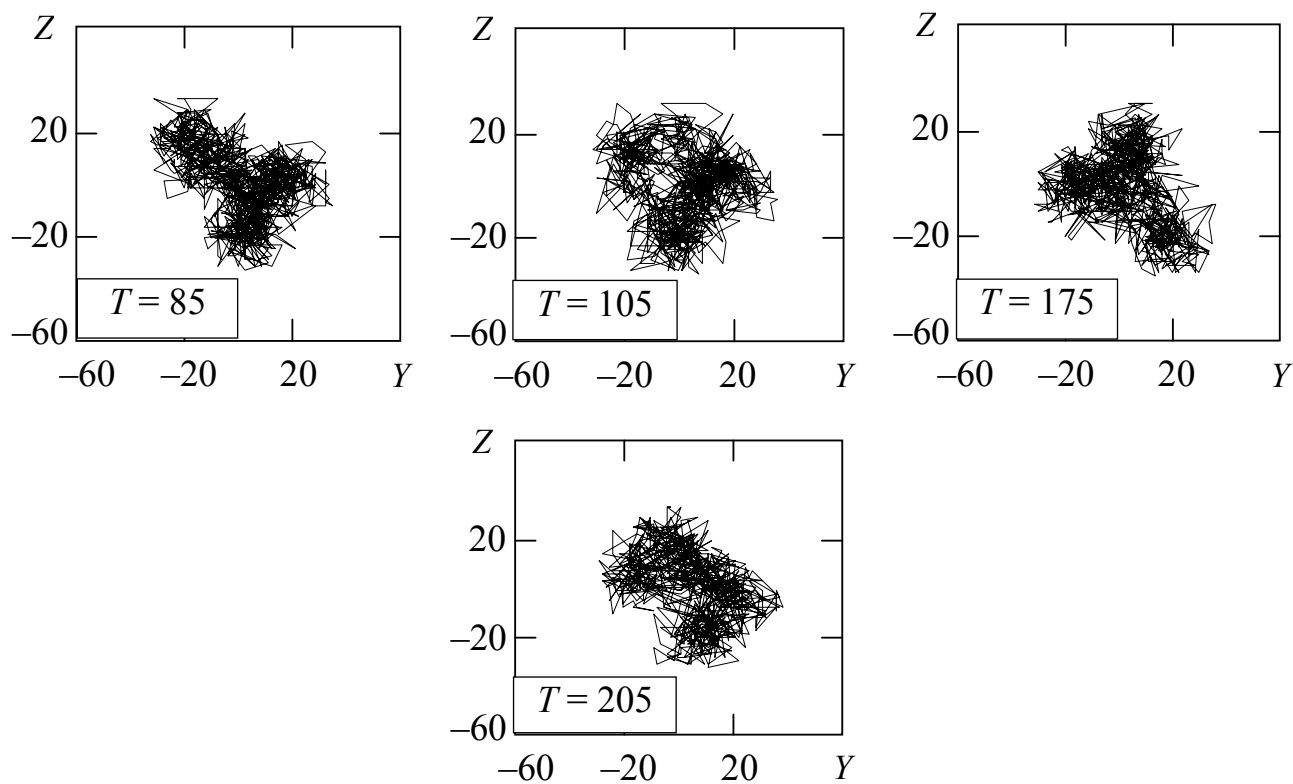


Рисунок 3.6 – Фазові портрети ДС при обертанні одного ротора з швидкостями: 12,5 об/с (а), 25 об/с (б) і 37,5 об/с (в)



б



в

Закінчення рисунку 3.6 – Фазові портрети ДС при обертанні одного ротора з швидкостями: 12,5 об/с (а), 25 об/с (б) і 37,5 об/с (в)

Докладний частотно-часовий аналіз таких ДС наведений у підрозділі 2.2 і у роботі [47]. Так ДС при зондуванні двох роторів відрізняється за формою від ДС при зондуванні тільки одного ротора № 1. У кожному періоді максимумів ДС спостерігається розділення сигналу на два практично однакові максимуми, а мінімуми ДС не мають такої характерної форми. Поява двох максимумів ДС є внеском частоти обертання другого ротора № 2 у ДС ротора № 1. Структура ДС при одночасному обертанні всіх трьох роторів відрізняється від ДС при зондуванні одного і двох роторів. Так, в максимумах сигналу виявляються три максимуми. При цьому центральний максимум, як зазвичай, найбільший. Також такі ДС мають низькочастотну (обумовлену швидкістю обертання і кількістю роторів) і високочастотну складові (обумовлену впливом фону і вібраціями обертаних роторів).

На рис. 3.7 показані ФП ДС сигналу при обертанні двох роторів, побудовані з часовими затримками $T = 10$ – перший мінімум СВІ (а) і $T = 28$ – перший нуль АКФ (б), а також трьох роторів з часовими затримками $T = 9$ – перший мінімум СВІ (в) і $T = 34$ – перший нуль АКФ (г). Як видно на рис. 3.7, форми ФП значно відрізняються між собою і від форм ФП при зондуванні одного ротора (див. рис. 3.4, а і б). Ці відмінності проявляються, як при виборі величини часової затримки T близької до першого мінімуму СВІ, так і близької до першого нуля АКФ, що не спостерігалось при зондуванні одного ротора з різними швидкостями. Так при зондуванні двох роторів форма ФП має дві характерні області при $T = 10$ (рис. 3.7, а), а деяка протяжність ФП по діагоналі також зберігається. При $T = 28$ (рис. 3.7, б) форма ФП стає кільцеподібною. При зондуванні трьох роторів у формі ФП відсутня протяжність по діагоналі при $T = 9$ (рис. 3.7, в), а на краях ФП виділяються три характерні області. Центральна частина ФП має форму «клубка ниток», що характерне для високочастотної (фонові) складові, але розміри цієї області в три рази більші, ніж у ФП фонового ДС (див. рис. 3.2, а). При $T = 34$ (рис. 3.7, г) форма ФП змінюється не сильно, відділення ФТ від центру ФП також відбувається в трьох областях. Таким чином, при зондуванні БПЛА з різною кількістю роторів ФП ДС значно відрізняються. Так при виборі T близької до першого нуля АКФ, при зондуванні одного ротора на краях ФП виділяються чотири характерні області, дві зверху ФП і дві знизу (див. рис. 3.4, б).

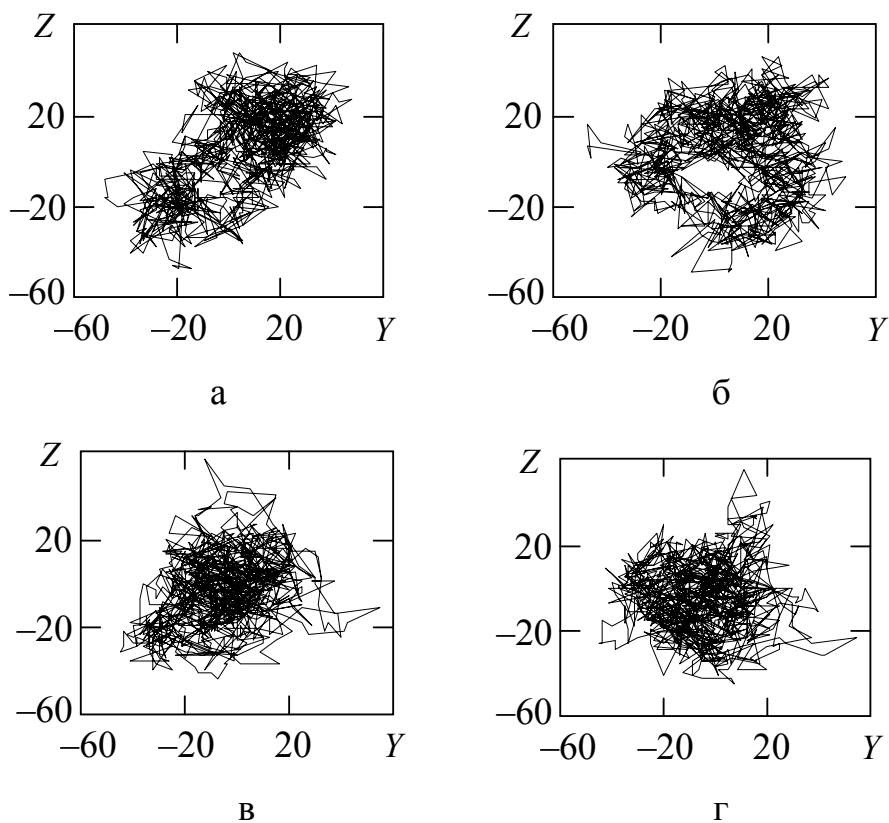


Рисунок 3.7 – Фазові портрети ДС під час обертання двох роторів при: $T = 10$ (а), $T = 28$ (б) і трьох роторів при: $T = 9$ (в), $T = 34$ (г)

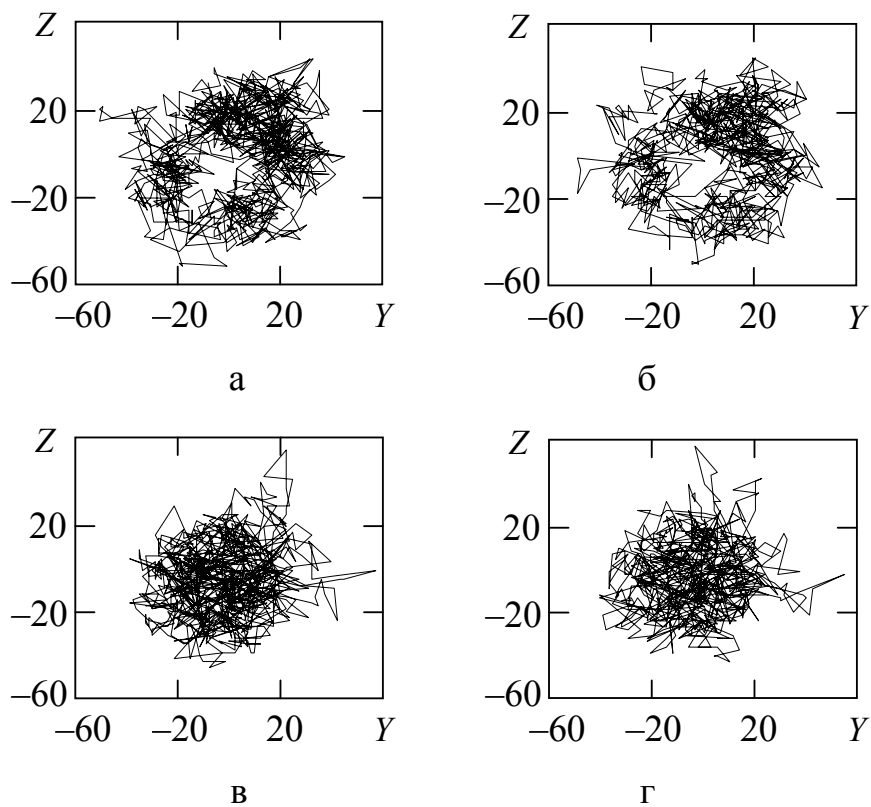


Рисунок 3.8 – Фазові портрети ДС під час обертання двох роторів при: $T = 150$ (а), $T = 280$ (б) і трьох роторів при: $T = 160$ (в), $T = 290$ (г)

При зондуванні двох роторів ФП має кільцеподібну форму (див. рис. 3.7, б), а при зондуванні трьох роторів – форму «клубка ниток» з трьома областями на краях ФП (див. рис. 3.7, г). Такі відмінності форм ФП можуть бути використані при розпізнаванні типу мультироторного БПЛА.

Розглянемо поведінку ФТ при різних значеннях часової затримки відмінних від T близьких до першого нуля АКФ, як це було проведено при аналізі зміни форми ФП ДС при обертанні одного ротора [49].

На рис. 3.8 показані ФП ДС при обертанні двох роторів при: $T = 150$ (а), $T = 280$ (б) і трьох роторів при: $T = 160$ (в), $T = 290$ (г). Такі часові затримки вибрані виходячи з періодичності ДС при швидкості обертання ротора 37,5 об/с, який, як наголошувалося вище, складає приблизно 130 точок. Як видно з аналізу ФП, представлених на рис. 3.7, б і рис. 3.8, а, б, їх форма практично повторюється приблизно через $T \approx 130$ точок. Відмінності проявляються тільки в розрядженні ФТ. Також порівняння форм ФП, представлених на рис. 3.7, г і рис. 3.8, в, г, показує, що характер поведінки ФТ практично повторюється через $T \approx 130$ точок.

Таким чином, періодичний характер зміни форм ФП ДС при збільшенні кількості обертових роторів БПЛА, зберігається, також, як і при збільшенні швидкості одного ротора. При цьому форма ФП ДС також залежить від величин часової затримки. Проведемо аналіз зміни форм ФП при збільшенні кількості обертових роторів і зміні величини часової затримки.

На рис. 3.9 показані по чотири типові ФП ДС, побудовані з різними часовими затримками, при обертанні двох (а) і трьох (б) роторів з швидкістю 37,5 об/с. Величини T вибрані такими ж, як і при зондуванні одного ротора, ФП якого показано на рис. 3.6, в. Порівняння форм ФП, приведених на рис. 3.6, в і рис. 3.9, а показує, що і при інших величинах T , вони також значно відрізняються між собою. Так при зондуванні двох роторів ФТ відвідує три характерні області на ПФП, на більшій відстані від центру ФП, чим це спостерігалось при зондуванні одного ротора. При цьому така форма ФП спостерігається на протязі проміжку $\Delta T \approx 15$ точок (наприклад, при $T = 85$, $T = 90$ і $T = 55$), а потім на протязі проміжку $\Delta T \approx 5$ точок (при $T = 105$, $T = 110$ і $T = 115$) спостерігається кільцеподібна форма ФП.

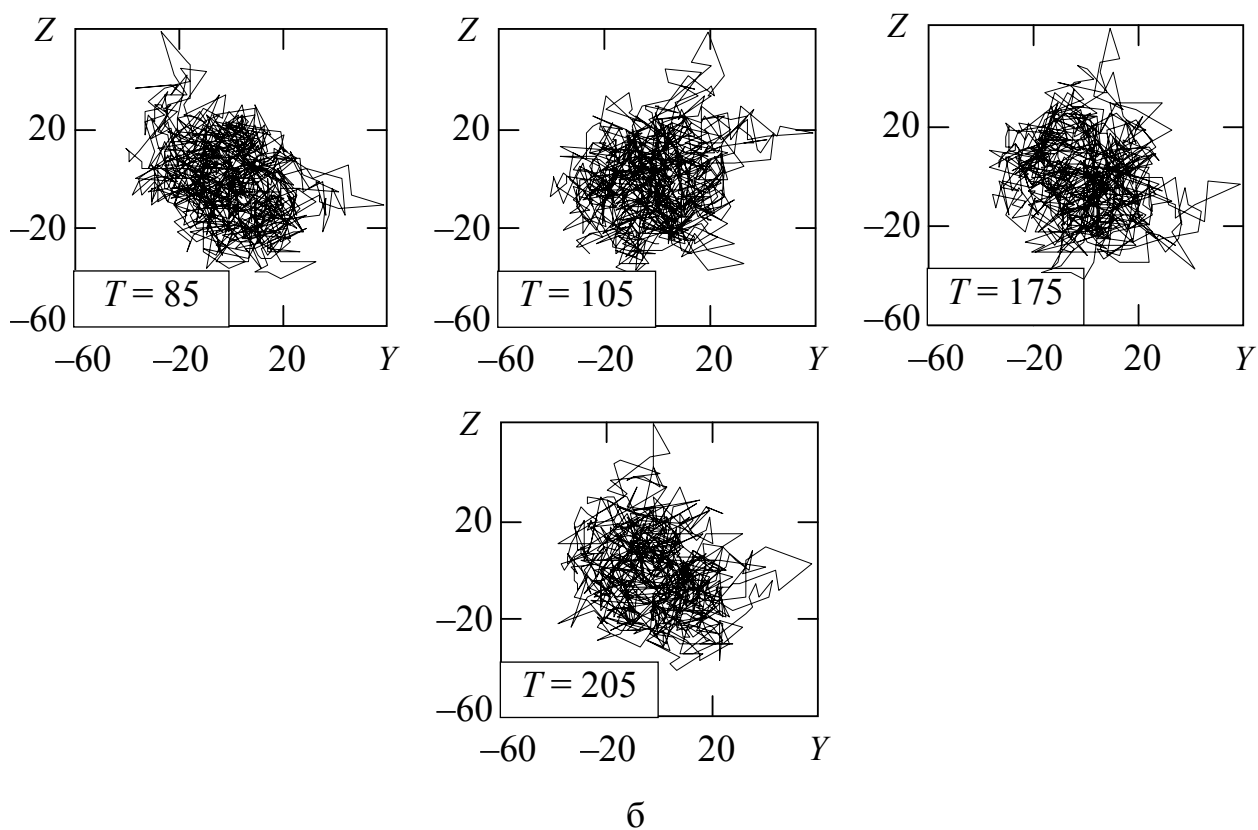
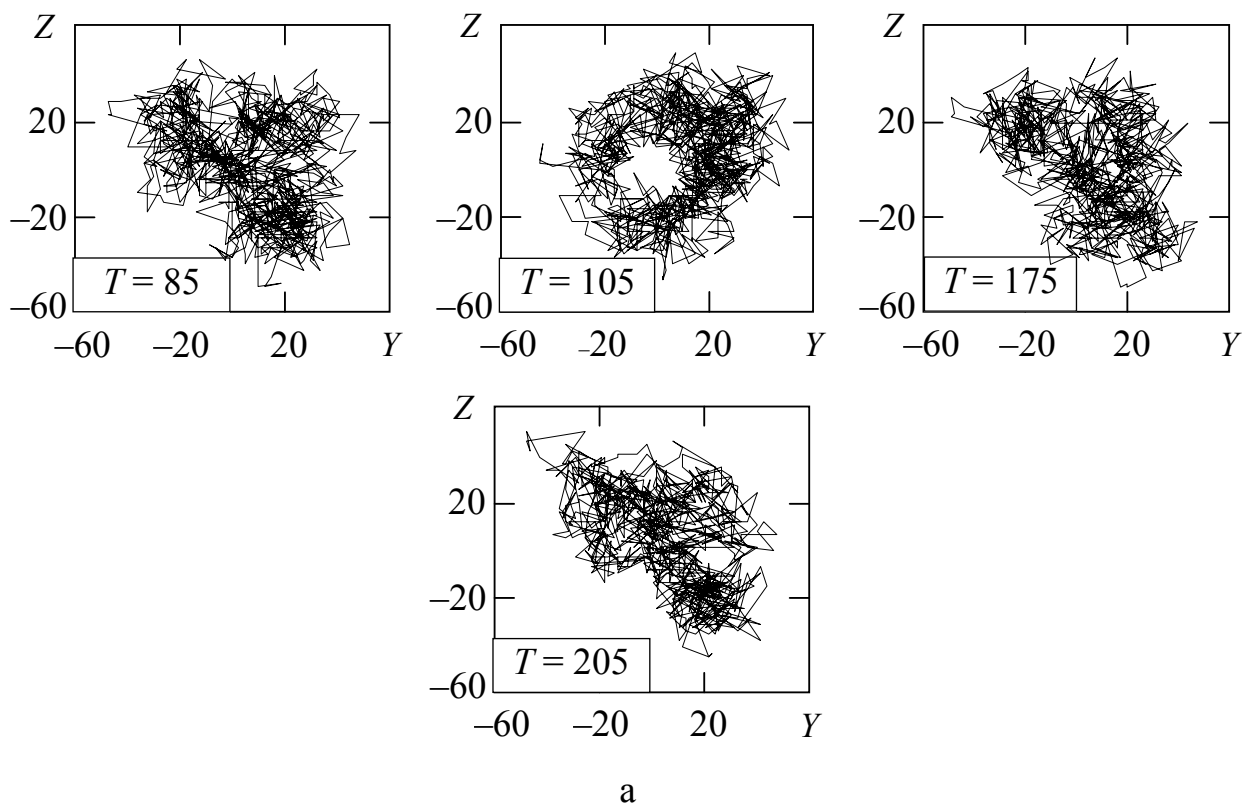


Рисунок 3.9 – Фазові портрети ДС під час обертання двох роторів (а) і трьох роторів (б)

Це обумовлено, швидше за все, розділенням максимумів на дві складові з періодами між ними приблизно 30 точок часового ряду. Така зміна форм ФП повторюється три рази на протязі проміжку часових затримок $\Delta T \approx 80$ точок, а потім на протязі проміжку часових затримок $\Delta T \approx 30$ форма ФП змінюється і має дві характерні області і витягується по діагоналі. Цей процес є періодичним з періодом приблизно 130 точок.

При зондуванні трьох роторів БПЛА, що обертаються, форма ДС стає більш складною і відповідно стає більш складною форма ФП (див. рис. 3.9, б). При цьому центральна частина ФП має форму «клубка ниток», а на краях ФП в трьох областях відбувається відділення ФТ від центру. Як видно на рис. 3.7, в, г, рис. 3.8, в, г і рис. 3.9, б, при зміні часової затримки форма ФП практично не змінюється. Але при часових затримки кратних періоду ДС ($T \approx 130$, $T \approx 260$ і т. д.) форма ФП починає витягуватися по діагоналі, а відділення фазової траєкторії відбувається в двох областях, як це показано на рис. 3.10.

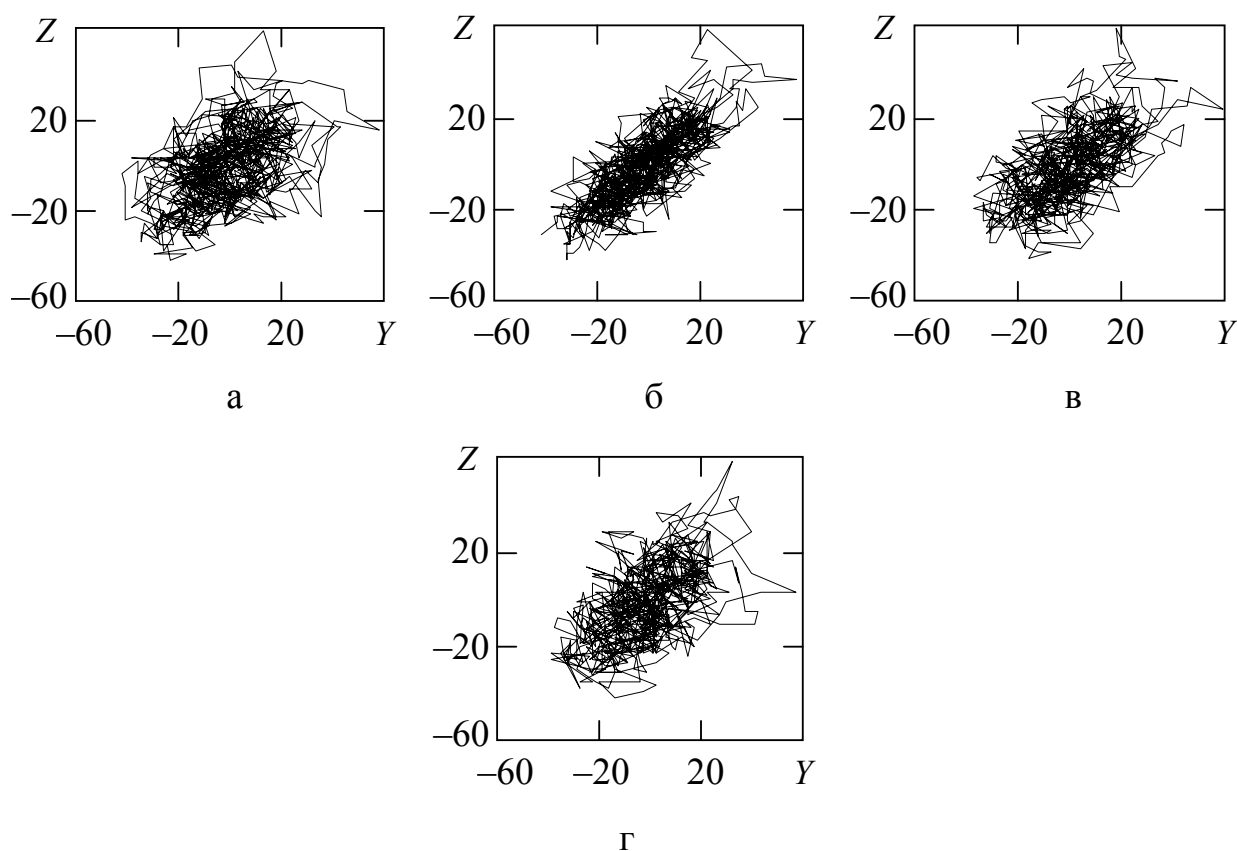


Рисунок 3.10 – Фазові портрети ДС під час обертання трьох роторів при:

$T = 125$ (а), $T = 130$ (б), $T = 260$ (в) $T = 265$ (г)

Таким чином, поява характерних форм ФП при зміні часової затримки під час зондування БПЛА з різною кількістю обертових роторів може бути використано при розпізнаванні типу БПЛА.

Проведені дослідження дозволяють запропонувати метод аналізу доплерівських сигналів, відбитих від роторів БПЛА, що обертаються, з використанням фазових портретів [49]. Метод містить декілька етапів (рис. 3.11). На першому і другому етапах з використанням доплерівської РЛС і АЦП звукової карти комп'ютера одержуються цифрові доплерівські сигнали, відбиті від фону і від обертових роторів БПЛА. На третьому здійснюється попередня обробка ДС – нормування і «віконна» обробка довгого часового ряду (з використання «стрибаючого вікна»). На четвертому етапі розраховуються середня взаємна інформація між двома вимірюваннями, і автокореляційна функція ДС, а потім вибирається часова затримка, яка використовується під час побудови фазових портретів. Величина T вибирається близькою до першого нуля АКФ або першого мінімуму СВІ. На п'ятому етапі будуються ФП фонових ДС і ДС при зондуванні БПЛА з різною кількістю роторів при T , близькому до першого нуля АКФ сигналів. На шостому і сьомому етапах здійснюється якісний аналіз форм ФП і за характерними формами ФП визначається відповідність ДС фону або БПЛА, а також визначається кількість обертових роторів БПЛА. Для визначення швидкості обертання роторів переходять до восьмого етапу – створення серії ФП, побудованих з часовими затримками, більшими, ніж T , близькою до першого нуля АКФ. На дев'ятому етапі здійснюється якісний аналіз зміни форм серії ФП, і по періодичності появи схожих ФП, а також динаміки зміни форм ФП оцінюється швидкість обертання роторів БПЛА.

Таким чином, розроблений метод дозволяє розділити ДС, відбиті від фону і мультироторного БПЛА, а також визначити тип БПЛА і оцінити швидкість обертання роторів. Крім того, метод дозволяє запропонувати нові ознаки розпізнавання мультироторного БПЛА – форму фазового портрету та динаміку її зміни під час зміни величин часової затримки. Розглянемо можливість застосування цих ознак для розпізнавання БПЛА з трьома і шістьма роторами та характеру їх руху.



Рисунок 3.11 – Структурна схема методу аналізу сигналів, відбитих від мультироторного БПЛА, з використанням фазових портретів

3.2 Розпізнавання характеру руху мультироторного БПЛА з використанням фазових портретів

3.2.1 Побудова фазових портретів доплерівських сигналів, відбитих від мультироторних БПЛА, без зміни часової затримки

У ході проведення експериментальних досліджень (експериментальна установка і умови проведення експериментів наведено у підрозділі 2.1.2) були отримані фонові ДС, та ДС під час зависання і польоту мультироторного БПЛА [51, 60]. При цьому зависання БПЛА досліджувалося на висоті 20 м, а рух БПЛА у напрямі до РЛС і від неї – на висоті 30 м.

Записаний сигнал з виходу головних телефонів при зондуванні фону мав довжину часового ряду, яка дорівнювалася 330 800 точкам, що при частоті дискретизації 22,05 кГц відповідає у часі 15,0 с. Для аналізу фонового ДС початковий часовий ряд оброблявся за допомогою «стрибаючого вікна» розміром 10 000 точок, величина «стрибка» дорівнювала розміру «вікна», що відповідає у часі 0,5 с записаного сигналу. Для кожного положення «вікна» будувався ФП з часовою затримкою $T = 50$ точок, що близько до першого нуля АКФ вихідного ДС [51].

На рис. 3.12 показані часові реалізації фонового ДС для окремих положень «вікна», номер якого позначено зліва зверху на рисунках. На зображеннях фонових ДС по осі абсцис відкладені номери точок записаного сигналу (x), а по осі ординат – його амплітуда (Y). Як видно з аналізу даних, показаних на рис. 3.12, часова структура фонових ДС має вигляд промодульованих за амплітудою, частотою і фазою синусоїд. Синусоїдальний характер ДС обумовлений його модуляцією джерелом живлення, а модуляція за амплітудою, частотою і фазою характеризує безпосередньо вплив фону (підстилаюча поверхня, рух дерев під дією вітру, переміщення людей на трасі зондування і т. д.).

Необхідно зазначити, що часові реалізації ДС, відбитих від фону, практично не відрізняється одна від одної, і провести аналіз особливостей фону не представляється можливим. У той же час під час проведення експериментів окрім фону на

трасії зондування знаходилися і люди (оператор БПЛА), рух якого впливав на відбиті фонові ДС.

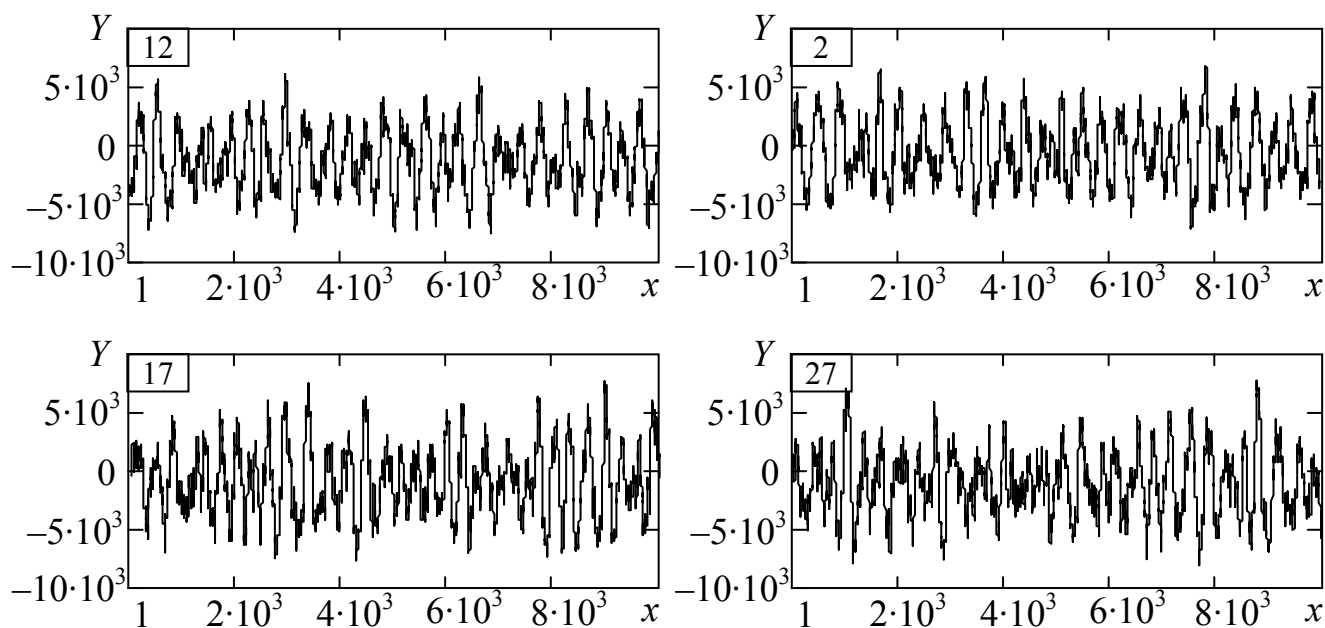


Рисунок 3.12 – Доплерівські сигнали з виходу головних телефонів під час зондування фону

На рис. 3.13 показані часові реалізації сигналів у «вікнах», в яких присутні відбиття від руху людей.

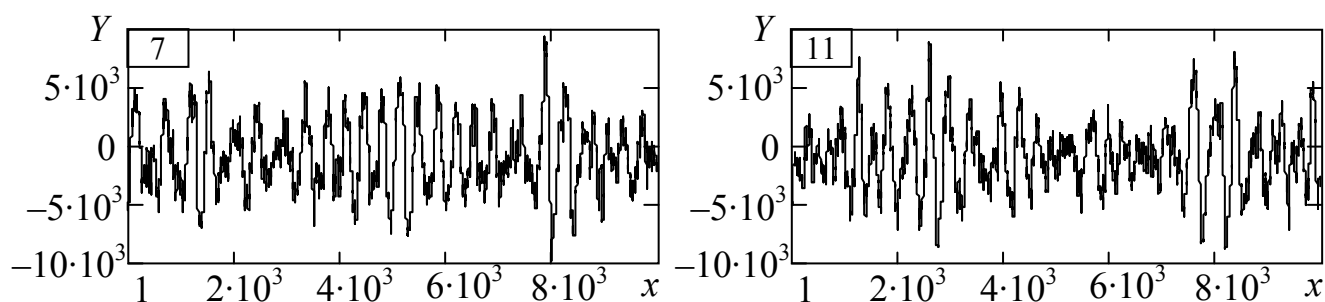


Рисунок 3.13 – Доплерівські сигнали з виходу головних телефонів під час зондування фону і руху людей (оператор БПЛА)

Як видно з порівняння часових реалізацій на рис. 3.12 і рис. 3.13 визначити, який сигнал характеризує тільки фон, а який фон і рух людини не можливо, тобто по часових реалізаціях візуально не можливо визначити, коли сигнал модулюється тільки фоном, а коли і фоном і рухом людини [51].

Для аналізу структури фонових ДС доцільно побудувати їх ФП і оцінити структуру ФП [55]. На рис. 3.14 показані ФП сигналів, наведених на рис. 3.12, а на рис. 3.15 – ФП сигналів, наведених на рис. 3.13. Номер «вікна» позначено зліва зверху на рисунках. На зображеннях ФП по осі абсцис відкладені значення записаного сигналу (Y), а по осі ординат – значення цього ж сигналу, зрушені на 50 точок (Z). Як видно на рис. 3.14, що зображаюча точка рухається за випадковою траєкторією, а ФП в цілому представляє згруповану в певній області ПФП фазову траєкторію у вигляді «клубка ниток». У той же час, ФТ сигналу, який характеризує і фон і рух людини (рис. 3.15) змінюється на краях ФП, і зображаюча точка рухається за характерною траєкторією, яка нагадує в деякому сенсі «петлю гістерезису» (особливо це видно в нижній лівій і верхній правій частинах ФП) [51].

Таким чином, аналіз форми фазових портретів, наведених на рис. 3.14 і рис. 3.15, показує, що структура ФП фонових ДС відрізняється від ФП сигналів, обумовлених і фоном і рухом людини. Така поведінка форм ФП дозволяє проводити аналіз ДС і здійснювати розпізнавання рухомих об'єктів.

Проведемо візуальний аналіз ДС, записаного при зондуванні БПЛА мультироторного типу, а також оцінимо його структуру з використанням фазових портретів [51]. Доплерівський сигнал, записаний з виходу головних телефонів РЛС, під час зависання БПЛА з трьома роторами на висоті 20 м, показано на рис. 3.16. Вихідний часовий ряд містить 286 700 точок, що при частоті дискретизації 22,05 кГц відповідає у часі 13,0 с. Візуальний аналіз записаного сигналу показує, що його структура не є однорідною, спостерігаються зміни амплітуди, які більше всього виявляються близько $8 \cdot 10^4$ точки, а також в діапазоні від $1,2 \cdot 10^5$ до $1,5 \cdot 10^5$ точок. Але визначити, чим викликані зміни амплітуди сигналу – фоном або зависанням БПЛА з використанням аналізу часової реалізації неможливо.

Проведемо аналіз структури отриманого ДС з використанням побудови ФП у «вікні» [51]. Умови обробки вихідного часового ряду виберемо такі ж самі, як і під час обробки фонового сигналу (розмір «вікна» і величина «стрибка» дорівнюють 10 000 точок, часова затримка $T = 50$ точок).

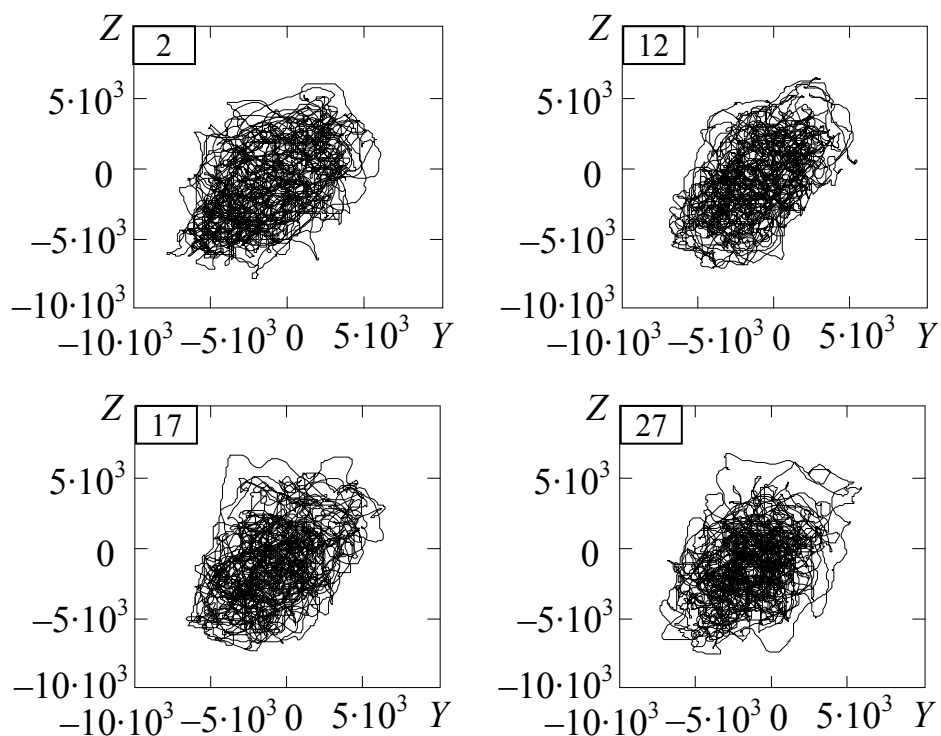


Рисунок 3.14 – Фазові портрети ($T = 50$) фонових сигналів

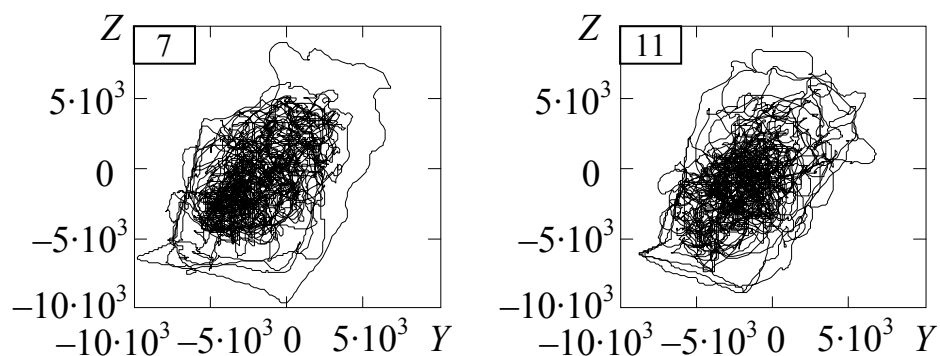


Рисунок 3.15 – Фазові портрети ($T = 50$) сигналів під час зондування фону і людей, що рухаються

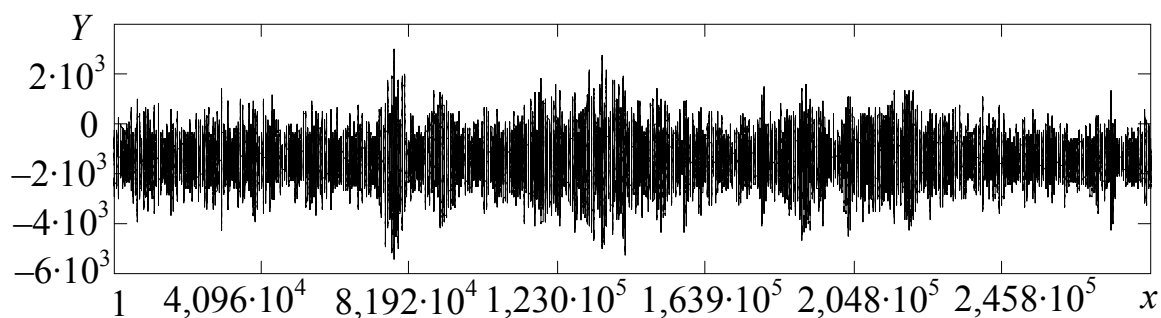


Рисунок 3.16 – Часова реалізація сигналу з виходу головних телефонів РЛС під час зависання БПЛА

Під час аналізу був оброблений весь часовий ряд, але на рис. 3.17 показані лише ФП сигналів для характерних положень «стрибаючого вікна» (номер «вікна» позначений зліва зверху на рисунках). З аналізу даних, наведених на рис. 3.17, видно, що форма ФП сигналів, отриманих під час зависання БПЛА з трьома роторами, відрізняється від форми ФП фонових сигналів (див. рис. 3.14) і сигналів, обумовлених рухом людини на трасі зондування (див. рис. 3.15).

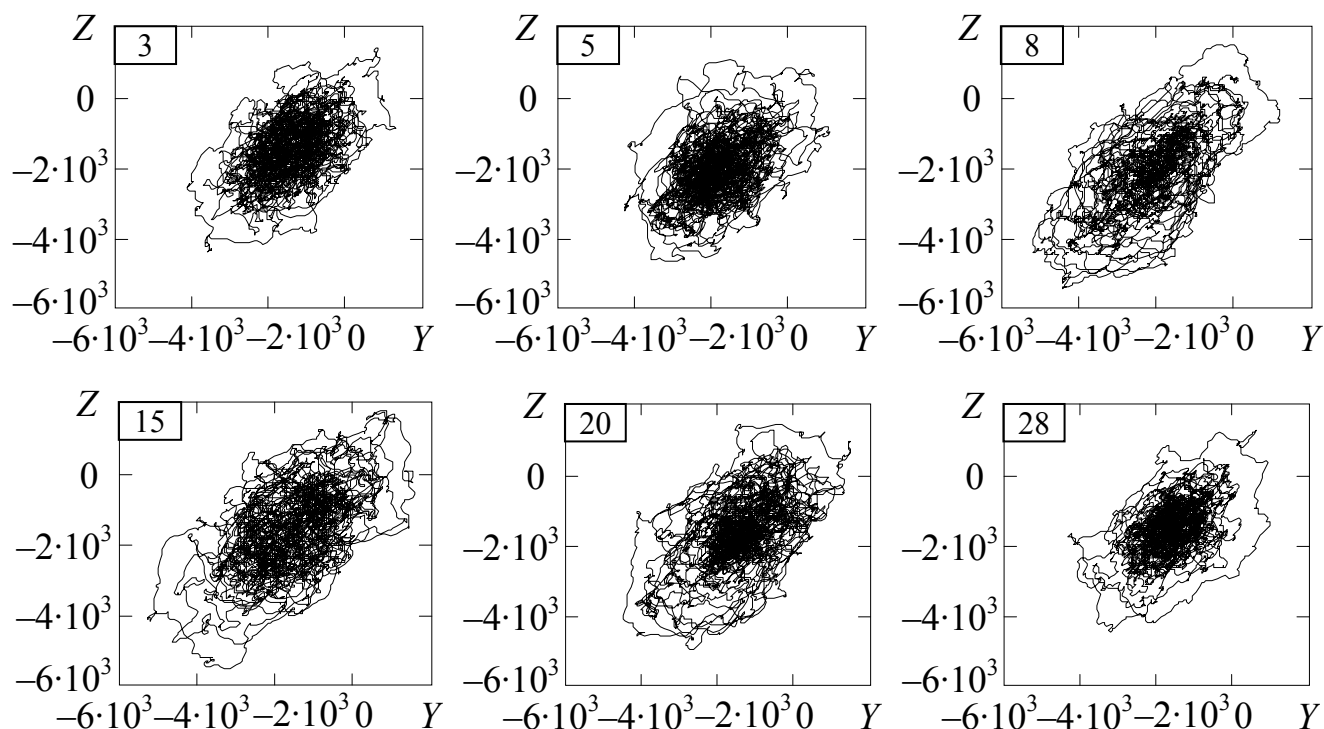


Рисунок 3.17 – Фазові портрети ($T = 50$) сигналів під час під час зависання БПЛА

На рис. 3.17 також видно, що на ФП сигналів, обумовлених зависанням БПЛА, фоновий сигнал концентрується в центрі ФП, а сигнал, який характеризує зависання БПЛА, відображається на краях ФП. Але на відміну від ФП, обумовлених рухом людини на трасі зондування, зміна руху ФТ здійснюється не по «петлі гістерезису», а відповідно до модуляції сигналу, яка обумовлена обертанням роторів, і виявляється у вигляді відділення ФТ від «клубка ниток» та її нерівним характером. Крім того, необхідно зазначити, що характерні ФП виявляються з періодичністю 2-3 положення «вікна», що, швидше за все, пояснюється зависанням БПЛА при рівномірному обертанні роторів [51].

Таким чином, з проведеного аналізу видно, що форми ФП сигналів, отриманих при зависанні БПЛА на висоті 20 м, відрізняється від форм ФП фонових сигналів і форма ФП може бути ознакою розпізнавання мультироторного БПЛА.

Проведемо аналіз структури сигналу під час руху БПЛА [51, 60]. Записаний сигнал з виходу головних телефонів під час руху БПЛА з трьома роторами на висоті 30 м до РЛС і від неї, показано на рис. 3.18. Вихідний часовий ряд містить 352 800 точок, що при частоті дискретизації 22,05 кГц відповідає у часі 16,0 с.

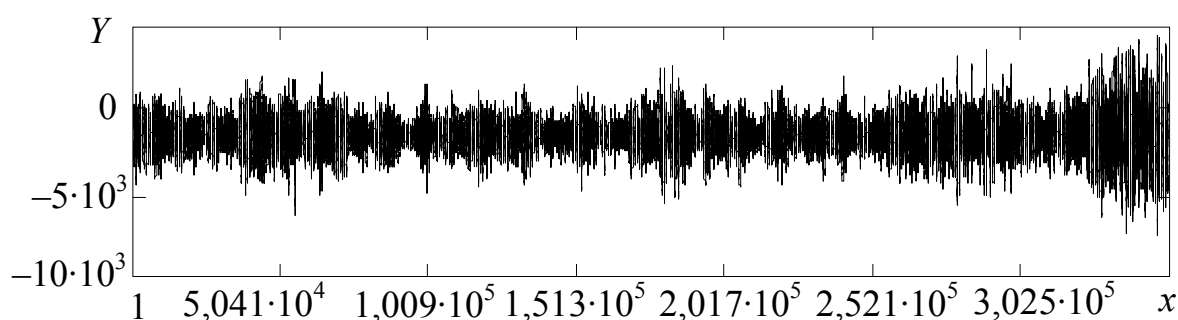


Рисунок 3.18 – Часова реалізація сигналу з виходу головних телефонів під час зондування рухомого БПЛА

Візуальний аналіз записаного сигналу показує, що структура сигналу, також як і при зависанні БПЛА, не є однорідною. По характеру сигналу можна сказати, що він не є фоновим, але за часовою реалізацією не можливо оцінити, яким характером руху викликані зміни амплітуди сигналу.

Проведемо аналіз структури отриманого часового ряду з використанням ФП [51]. Умови обробки вихідного ДС виберемо такими ж самі, як і під час обробки фонових сигналів і сигналу, обумовленого зависанням БПЛА. Під час аналізу був оброблений весь часовий ряд, але на рис. 3.19 показані лише ФП сигналів для характерних положень «стрибаючого вікна».

З порівняння даних, показаних на рис. 3.17 і рис. 3.19, видно, що форми ФП сигналів, отриманих при зависанні БПЛА і під час його руху у напрямі до РЛС і від неї, практично не відрізняються, тобто спостерігається відділення ФТ на краях ФП. Це логічно і пояснюється тим, що модуляція сигналу в основному відбувається за рахунок обертання роторів, а не за рахунок швидкості польоту БПЛА, яка під час експериментів була не великою.

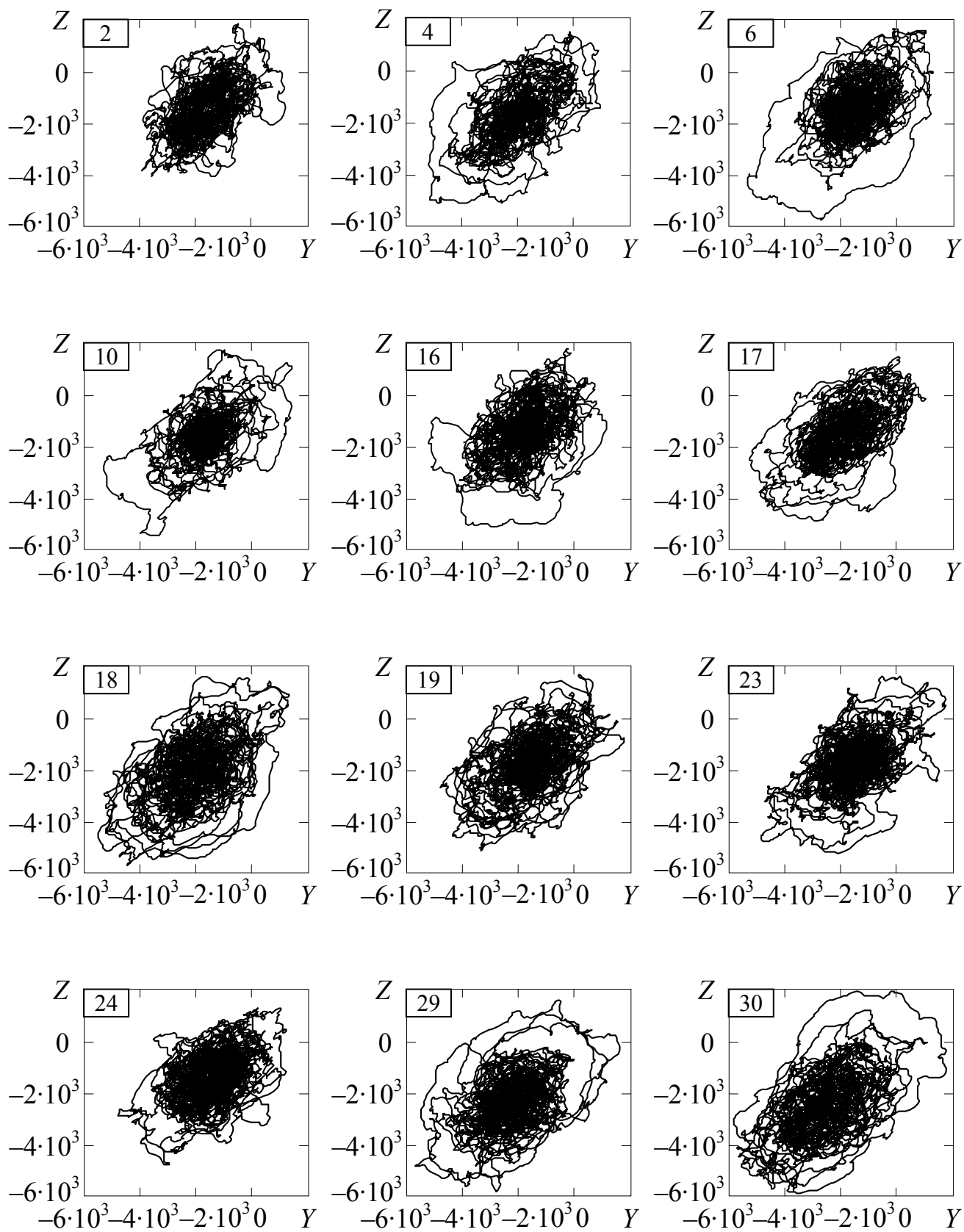


Рисунок 3.19 – Фазові портрети ($T = 50$) сигналів під час зондування рухомого БПЛА

Тому можна сказати, що на фазових портретах сигналів, обумовлених рухом БПЛА, фоновий сигнал також концентрується в центрі ФП, а сигнал, який характеризує безпосередньо рух БПЛА, відображається на краях ФП. При цьому на краях ФП спостерігається складніший характер поведінки ФТ, у порівнянні з зависанням БПЛА. Така форма ФП обумовлена як рухом БПЛА, так і обертанням роторів. Необхідно зазначити, що характерні для руху БПЛА ФП з'являються не періодично, а послідовно протягом до 10-ти послідовних «вікон», тобто у той час коли БПЛА знаходиться у стробі дальності РЛС. У той же час при зависанні БПЛА такі ФП виявляються з періодичністю 2 – 3 положення «вікна» [51].

На рис. 3.19 також видно, що на початку часового ряду спостерігається зависання БПЛА, і характерні ФП виявляються з періодичністю 2 – 3 положення «вікна» (див. 2-е, 4-е і 6-е «вікна»). Потім з 10-го «вікна» починається рух БПЛА, що проявляється в зміні форми ФП. Рух БПЛА надалі характеризується збільшенням протяжності появи характерних ФП – спочатку до трьох «вікон»: 10-е – 12-е «вікно», а потім – до десяти: з 16-го по 25-е «вікно». В кінці часового ряду характерні ФП з'являються тільки в двох послідовних «вікнах» – 29-е, 30-е «вікно», що обумовлено, швидше за все, вильотом БПЛА із стробу дальності РЛС.

Таким чином, форма ФП фонових сигналів відрізняється від фазових портретів сигналів, отриманих при зондуванні завислого і рухомого БПЛА. Характер руху БПЛА (зависання або рух у напрямі до РЛС і від неї) можна визначити по протяжності і періодичності появи характерних фазових портретів, а форма ФП може бути ознакою розпізнавання БПЛА мультироторного типу.

3.2.2 Аналіз змін форм фазових портретів із зміною часової затримки для розпізнавання характеру руху БПЛА

У підрозділі 3.2.1 було показано, що перетворення вихідного часового ряду на ПФП і побудова ФП при виборі часової затримки близької до першого нуля АКФ ($T = 50$), дозволяє проаналізувати форму ДС. Також зазначалося, що форма ФП сигналів, отриманих при зондуванні БПЛА, відрізняється від форми ФП фо-

нових сигналів, що дозволяє розділити фон і рухомий об'єкт, але, не дозволяють визначити тип рухомого БПЛА і характер руху. Проведемо аналіз зміни форми ФП при їх побудові з різними часовими затримками і розглянемо, як ці зміни впливають на форму ФП сигналів, відбитих від мультироторного БПЛА [53].

Для аналізу виберемо ФП в одному з «вікон», яке є характерним для фонового сигналу, наприклад, в 12-му «вікні» (див. рис. 3.14). Часову затримку T будемо змінювати з дискретністю 50 точок часового ряду. Фазові портрети сигналу з виходу головних телефонів при різних значеннях часової затримки показані на рис. 3.20 (величина T позначена зліва зверху на рисунках).

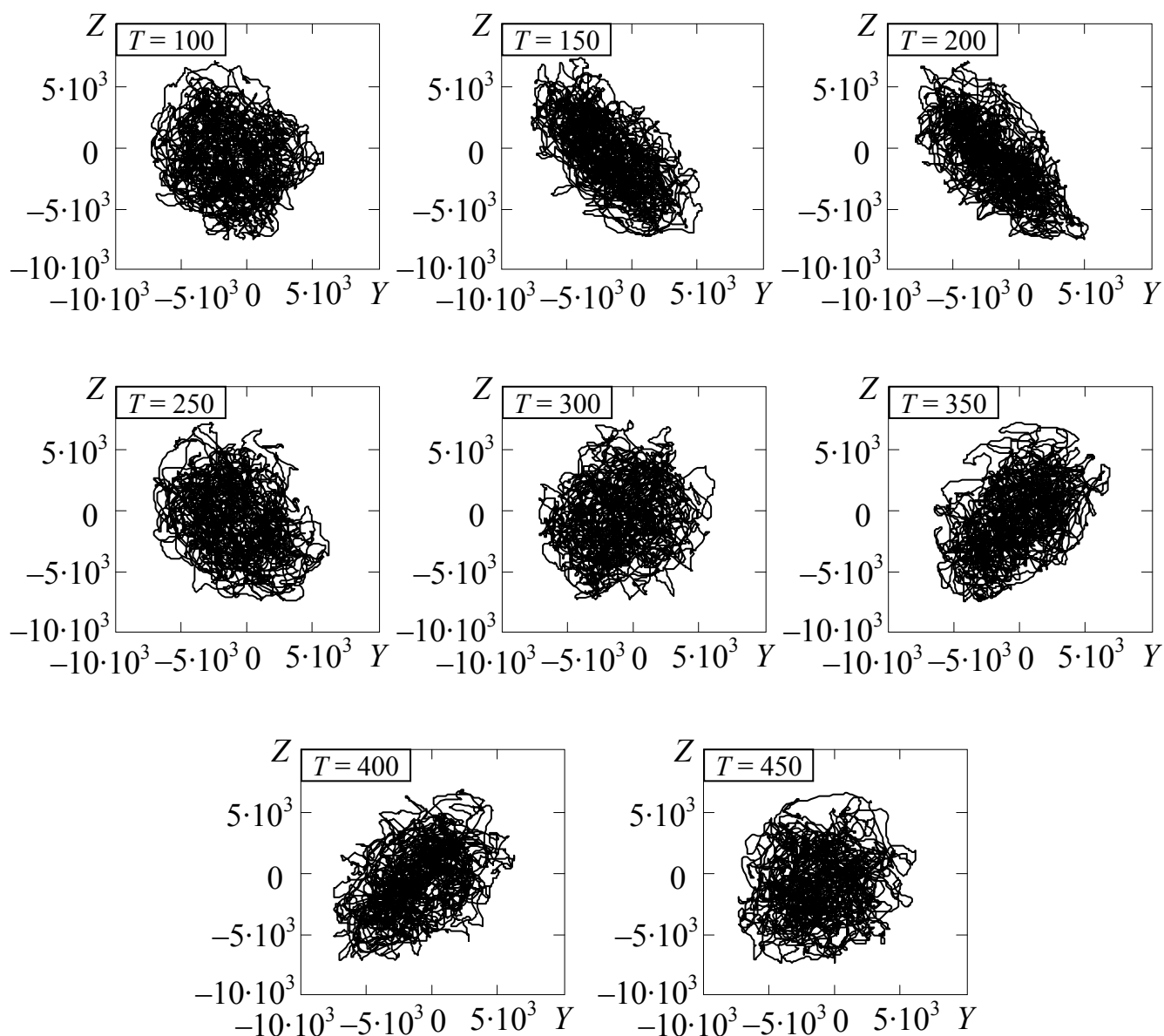


Рисунок 3.20 – Фазові портрети фонового сигналу (12-е «вікно») при різних значеннях часової затримки

Як видно з аналізу форм ФП, показаних на рис. 3.20, рух зображаючої точки по випадковій траєкторії практично не залежить від зміни часової затримки. При цьому ФТ групуються у певній області на ПФП у вигляді «клубка ниток» [53]. Така форма ФП пояснюється випадковою модуляцією за амплітудою, частотою і фазою синусоїдальних сигналів з виходу головних телефонів. Найчіткіше форма ФП – «клубок ниток» проявляється при часових затримках $T = 100$, $T = 300$ і $T = 450$ точок, тобто приблизно через 200 точок. На рис. 3.20, також видно, що при величинах $T = 150$, $T = 200$, $T = 350$ і $T = 400$ точок, окрім випадкового руху зображаючої точки, також спостерігається деяке подовження і поворот (вліво або вправо) ФП уздовж великої осі еліпса. Еліпсоїдна форма ФП обумовлена синусоїдальним характером фонового сигналу, який у свою чергу визначається його модуляцією джерелом живлення РЛС.

Таким чином, при зміні величини T загальна форма ФП фонового сигналу змінюється не сильно, і може бути охарактеризована як випадковий рух зображаючої точки по ФТ, а форма ФП може бути названа «клубок ниток».

Також як і при аналізі зміни форми ФП фонового сигналу, розглянемо поведінку ФТ при зондуванні завислого БПЛА, якщо значення часової затримки відрізняються від $T = 50$ точок [53]. Для аналізу виберемо ФП в одному з «вікон», наприклад, в 18-му, який є характерним для сигналу при зависанні БПЛА. Умови побудови ФП виберемо такі ж самі, як і під час побудови ФП фонового сигналу (T змінюється з дискретністю $T = 50$ точок). Фазові портрети сигналу з виходу головних телефонів, обумовленого зависанням БПЛА, при різних значеннях часової затримки T показані на рис. 3.21 (величина часової затримки позначена зліва знизу на ФП). Як видно з аналізу форм ФП, показаних на рис. 3.21, рух зображаючої точки по ФТ залежить від величини часової затримки. При цьому ФТ, обумовлена фоном, групується в центрі ФП у вигляді «клубка ниток», а обумовлена зависанням БПЛА – розташовується на краях ФП. Крім того, при величинах $T = 100$, $T = 150$, $T = 200$, $T = 350$ і $T = 400$ точок, ФТ, обумовлена БПЛА, концентрується в трьох областях ПФП, позначених на рис. 3.21 колами. Розташування цих областей має трикутну форму, що нагадує форму БПЛА з трьома роторами [53].

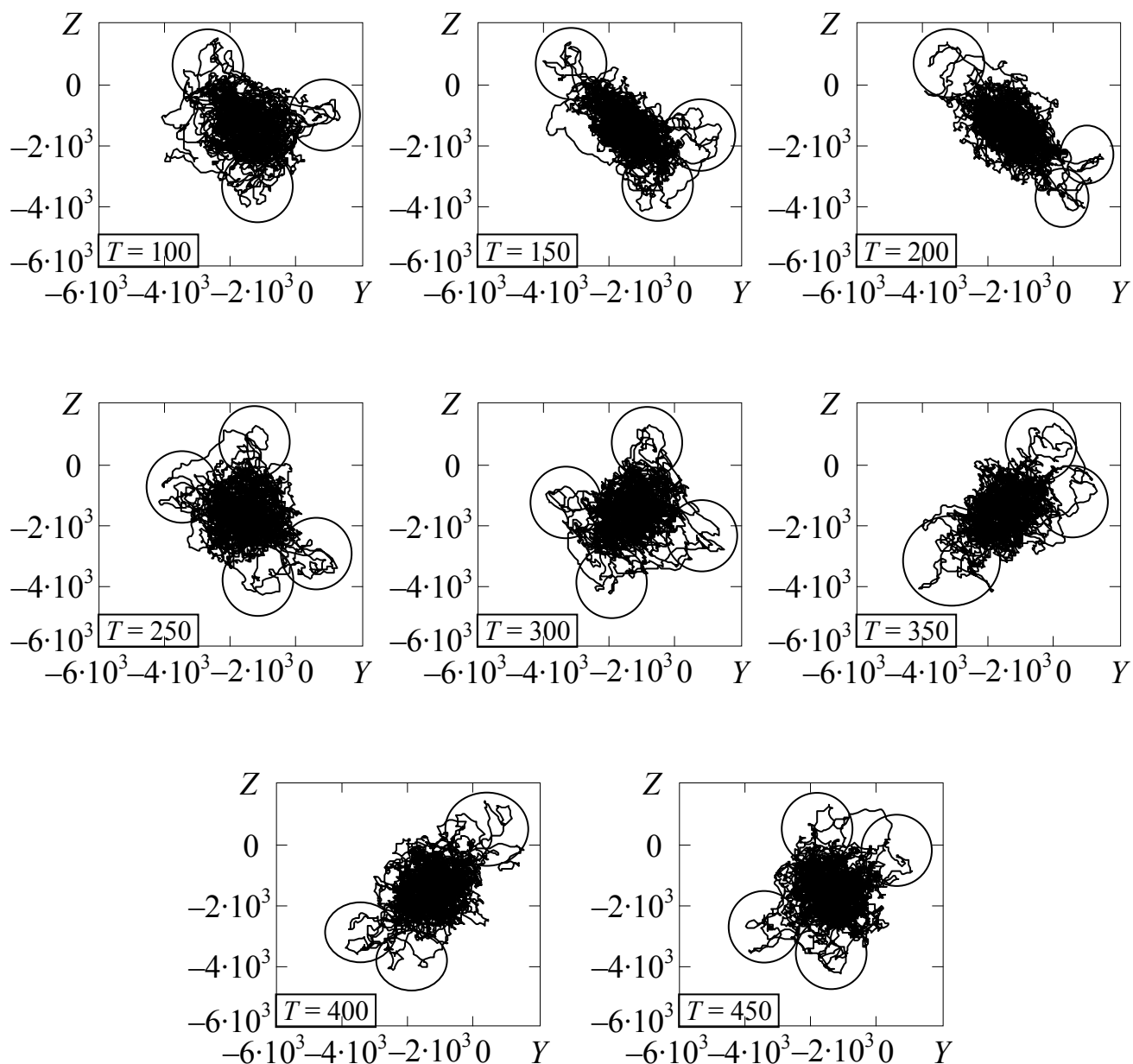


Рисунок 3.21 – Фазові портрети сигналу під час зондування завислого БПЛА (18-е «вікно») при різних значеннях часової затримки

Також на рис. 3.21 видно, що при $T = 200$ і $T = 400$ спостерігається загальне подовження ФП уздовж великої осі еліпса (звуження уздовж малої осі) і поворот ФП, відповідно, вліво і вправо. При цьому фазові траєкторії, обумовлені зависанням БПЛА, концентруються на кінцях великої півосі еліпса (зверху і знизу). У той же час при величинах часової затримки $T = 250$, $T = 300$ і $T = 450$ точок спостерігається концентрація ФТ у чотирьох областях ПФП [53].

Таким чином, під час побудови ФП з різною часовою затримкою ФТ концентрується у трьох областях ПФП, що обумовлено зависанням БПЛА з трьома ро-

торами. Найчіткіше трикутна форма ФП спостерігається при $T = 100$, $T = 150$ і $T = 350$ точок. Такої концентрації не спостерігається при побудові ФП фоновому сигналу (див. рис. 3.20). Така поведінка ФП може бути використана під час розпізнавання типу мультиторного БПЛА. Також необхідно зазначити, що при часовій затримці $T = 50$ точок трикутна форма ФП виражена слабо (див. рис. 3.17).

Розглянемо форму ФП сигналів, обумовлених зависанням БПЛА, в інших «вікнах», наприклад, в 5-му, 15-му, 20-му і 25-му при значенні часової затримки, що дорівнює $T = 150$ точок (рис. 3.22). Номер «вікна» позначено справа зверху на рисунку.

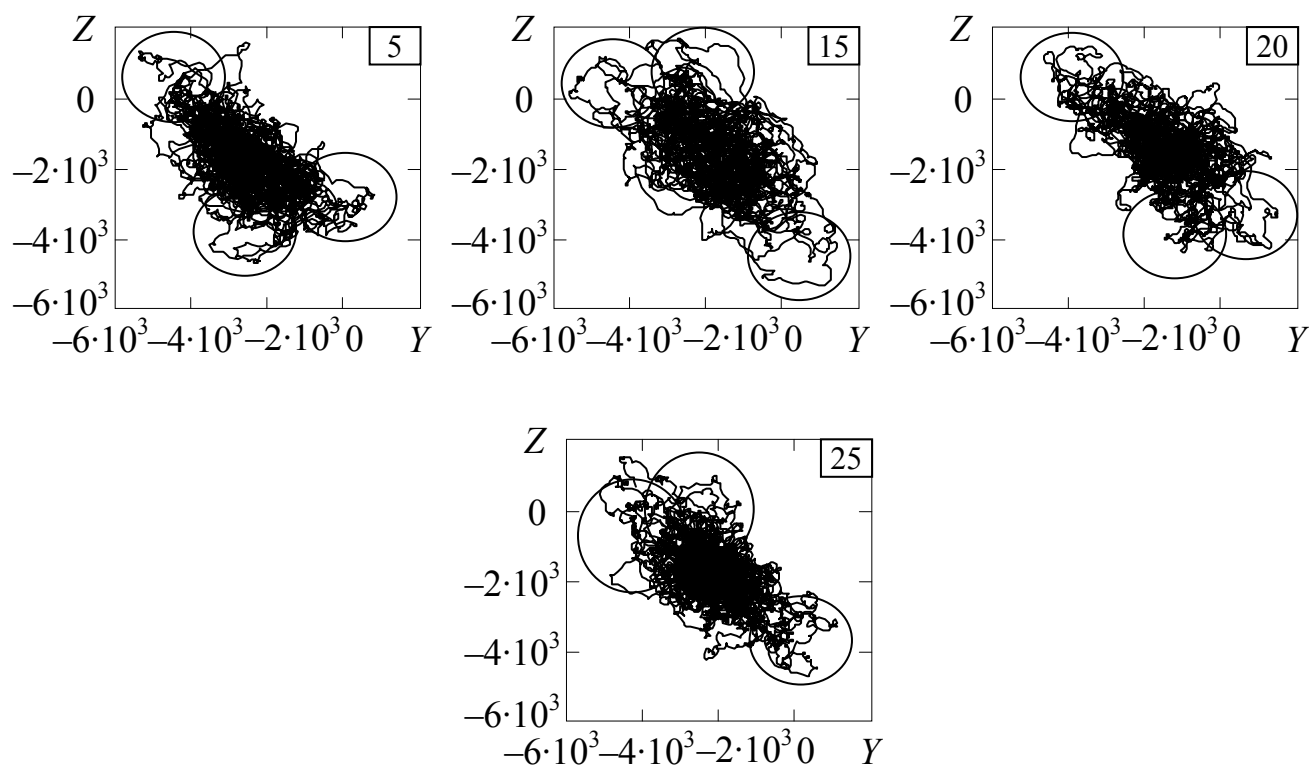


Рисунок 3.22 – Фазові портрети ($T = 150$) сигналів під час зондування завислого БПЛА

Як видно на рис. 3.22, при такій часовій затримці в цих «вікнах» також спостерігається, концентрація ФТ в трьох областях ПФП (трикутна форма ФП).

Далі розглянемо зміну форми ФП при значеннях часової затримки відмінних від $T = 50$ точок при зондуванні рухомого БПЛА у напрямі до РЛС і у зворотному напрямі (від РЛС) [53].

Аналіз ФП проводився для всіх «вікон» в діапазоні зміни часу затримки від $T = 50$ до $T = 450$ з дискретністю 50 точок, але на рис. 3.23 показані ФП сигналів з виходу головних телефонів тільки в характерних для руху БПЛА «вікнах». Величина T і номер «вікна» позначені зверху і знизу на ФП. При цьому на лівих рисунках була вибрана $T = 150$ точок при якій спостерігалася трикутна форма ФП при зондуванні завислого БПЛА (див. рис. 3.21 і рис. 3.22). На правих рисунках показані ФП при різних T , при яких спостерігається трикутна форма ФП. Аналіз лівих рисунків ($T = 150$) показує, що при такому часі затримки форма ФП сигналів, обумовлених рухом БПЛА, має слабо виражену трикутну форму. При такому значенні T форма ФП більше нагадує форму – «веретено» (розташування ФТ уздовж великої осі еліпса і концентрація окремих її елементів на краях ФП). Аналіз правих рисунків показує, що при інших часових затримках від $T = 300$ до $T = 400$ точок у формі ФП проявляється концентрація елементів ФТ в трьох областях таких, що нагадують трикутне розташування роторів БПЛА. Але необхідно зазначити, що на деяких ФП видно, що з'являються додаткові відділення ФТ від «клубка ниток» в інших областях ПФП (див. праві ФП на рис. 3.23).

Аналіз ФП, наведених на рис. 3.23 показує, що така поведінка ФТ обумовлена рухом БПЛА, тобто обертання роторі приводить до концентрації ФТ в трьох областях на краях ФП, а рух БПЛА – до відділення ФТ від ФП фоновому сигналу. При аналізі ФП під час зондування БПЛА, що завис, такої поведінки фазової траєкторії не спостерігається [53].

Таким чином, трикутна форма ФП сигналів, відбитих від рухомого БПЛА з трьома роторами, виявляється під час використання більших часових затримок, ніж при зависанні БПЛА. Також під час руху БПЛА форма ФП ускладнюється у порівнянні з зависанням БПЛА. Всі ці особливості поведінки ФП можуть бути використано під час визначення характеру руху БПЛА.

В результаті проведеного аналізу можна запропонувати методіку аналізу форми ФП сигналів, відбитих від мультироторного БПЛА, побудованих при різних часових затримках [53].

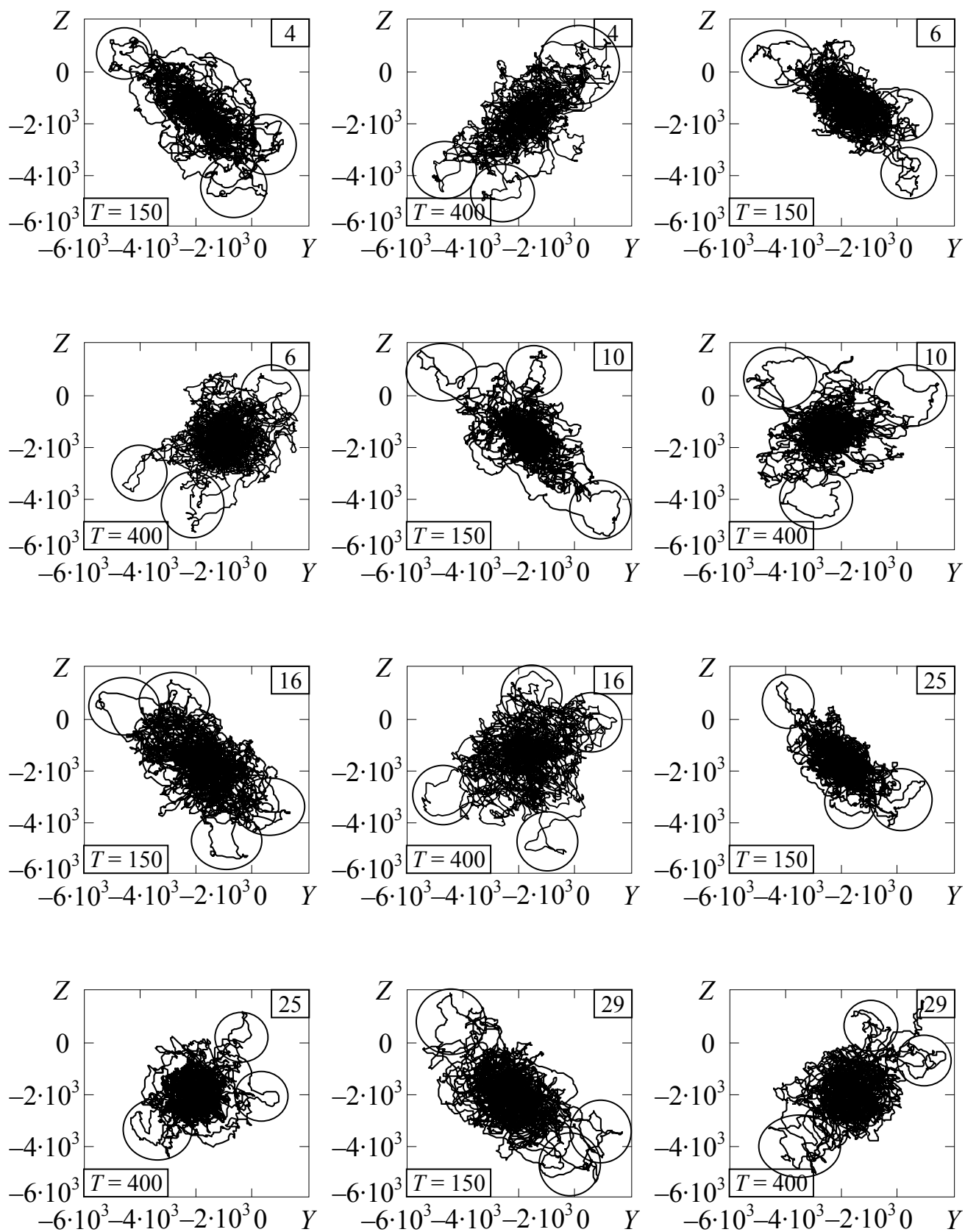


Рисунок 3.23 – Фазові портрети сигналів під час зондування
рухомого БПЛА

На початку ДС в аналоговому вигляді реєструється штатними засобами РЛС, потім він за допомогою АЦП перетворюється в цифровий часовий ряд. Після цього часовий ряд аналізується за допомогою «стрибаючого вікна» певного розміру (N_0) («вікно» переміщається на $M = k \cdot N_0$ точок, де k – коефіцієнт «стрибка», перше положення «вікна» містить значення з 1-ої до N_0 -ої точки часової вибірки, друге – з $(k \cdot N_0 + 1)$ -ої до $(k + 1) \cdot N_0$ -ої, третє – з $(2k \cdot N_0 + 1)$ -ої до $(2k + 1) \cdot N_0$ -ої і т. д.). Для кожного положення «вікна» будується ФП з часовою затримкою близькою до першого нуля АКФ (для розглянутих вище сигналів $T = 50$). У подальшому оператор проводить якісний аналіз форм ФП і приймає рішення про те, сигнал є фоновим або обумовлений об'єктом, що рухається, тобто на цьому етапі здійснюється попередній аналіз рухомого об'єкту. Для підвищення якості аналізу будуються три ФП в тому ж «вікні», але при інших значеннях часової затримки з дискретністю 50 точок, тобто при $T = 100, 150$ і 200 точок. Якісний аналіз зміни форми ФП дозволяє оператору ухвалити рішення про тип рухомого об'єкту. Якщо форма ФП практично не змінюється, то сигнал є фоновим. А якщо ФП концентрується в трьох областях на краях ФП, то сигнал обумовлений БПЛА з трьома роторами. Побудова трьох ФП при великих часових затримках $T = 300, 350$ і 400 точок дозволяє визначити характер руху БПЛА. Якщо форми ФП подібні до форм, що спостерігалися при $T = 100, 150$ і 200 , то сигнал відповідає завислому БПЛА, а якщо трикутна форма ФП ускладнюється і спостерігається додаткове відділення ФП від фонового ФП, то сигнал обумовлений рухомим БПЛА.

Таким чином, запропонована методика дозволяє аналізувати доплерівські сигнали, відбиті від мультироторних БПЛА та забезпечує розпізнавання характеру їх руху з використанням нової ознаки – форма фазових портретів.

3.3 Дослідження форм фазових портретів доплерівських сигналів для розпізнавання БПЛА з різною кількістю роторів

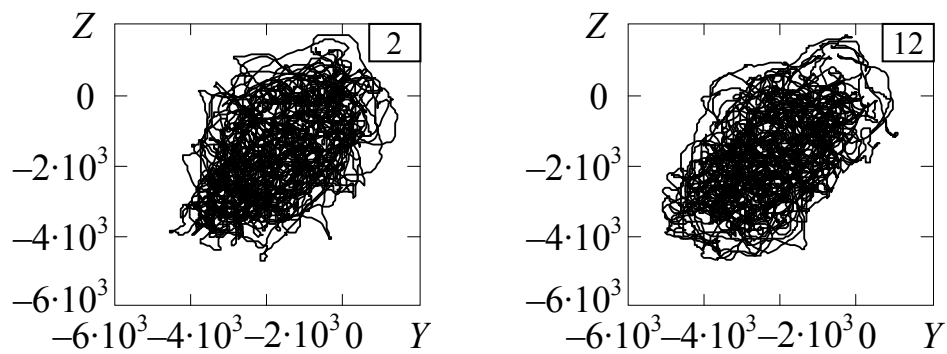
Розглянемо можливість застосування розробленої методики аналізу ДС для визначення типу мультироторного БПЛА, які відрізняються кількістю роторів

[55]. Спочатку побудуємо ФП при $T = 50$ точок, що близько до першого нуля АКФ вихідного часового ряду. На рис. 3.24 показані ФП фонових сигналів (а), а також ФП сигналів при зондуванні БПЛА з трьома (б) і шістьма (в) роторами, завислого (ліворуч) і рухомого (праворуч). Номер «вікна» позначено справа зверху на рисунках. Аналіз форми ФП, представлених на рис. 3.24, показує, що форма ФП фонового сигналу має вигляд «клубка ниток», а форми ФП сигналів, обумовлених зависанням і рухом БПЛА, як з трьома так і шістьма роторами, відрізняються від фонових відділенням ФТ від «клубка ниток». Такі форми ФП обумовлені обертанням роторів і рухом БПЛА. Але, форми ФП сигналів під час зондування БПЛА з трьома роторами практично не відрізняються від форм ФП сигналів під час зондування БПЛА з шістьма роторами. Таким чином, форми ФП, побудовані при $T = 50$, дозволяють розділити фон і рухомий об'єкт, але не дозволяють визначити типи БПЛА, які відрізняються кількістю роторів.

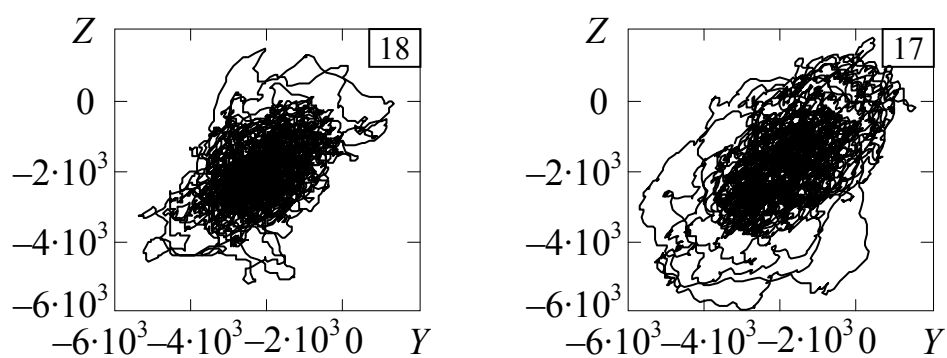
Проаналізуємо зміни форми ФП сигналів при зондуванні БПЛА різних типів, з використанням інших значень часової затримки [55]. Часову затримку будемо змінюватися так, як це було показано у підрозділі 3.2.2, з дискретністю 50 точок часового ряду. Для аналізу розглянемо ФП в одному з «вікон», яке вибирається з довгої реалізації при зондуванні БПЛА з трьома і шістьма роторами. Спочатку розглянемо ФП сигналів під час зависання БПЛА даних типів.

Фазові портрети сигналів з виходу головних телефонів під час зависання БПЛА на висоті 20 м при різних значеннях T показані на рис. 3.25 (величина T позначена знизу на рисунках). Ліворуч показані ФП сигналів під час зондування БПЛА з трьома роторами (18-е «вікно»), а праворуч – з шістьма (7-е «вікно»). Області відділення фазової траєкторії від фону показані колом.

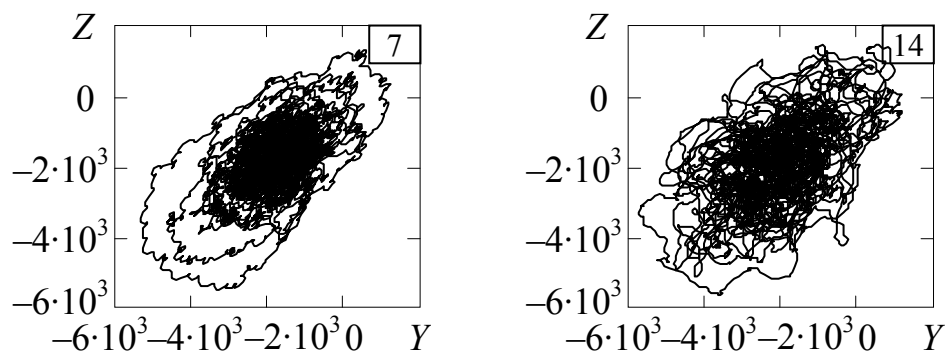
Аналіз форм ФП, наведених на рис. 3.25, показує, що під час зміни T , у випадковому русі зображаючої точки починає виявлятися певна закономірність [55]. Так, при $T = 150$ з'являються відмінності у формах ФП сигналів при зондуванні БПЛА з трьома і шістьма роторами. В першому випадку ФТ має особливості в трьох областях ФП, а в другому – в шести областях, що відповідає кількості роторів, розташованих на БПЛА.



а



б



в

Рисунок 3.24 – Фазові портрети ($T = 50$) фонового сигналу (а) і сигналів під час зондування БПЛА з трьома (б) і шістьма (в) роторами, завислих (ліворуч) і рухомих (праворуч)

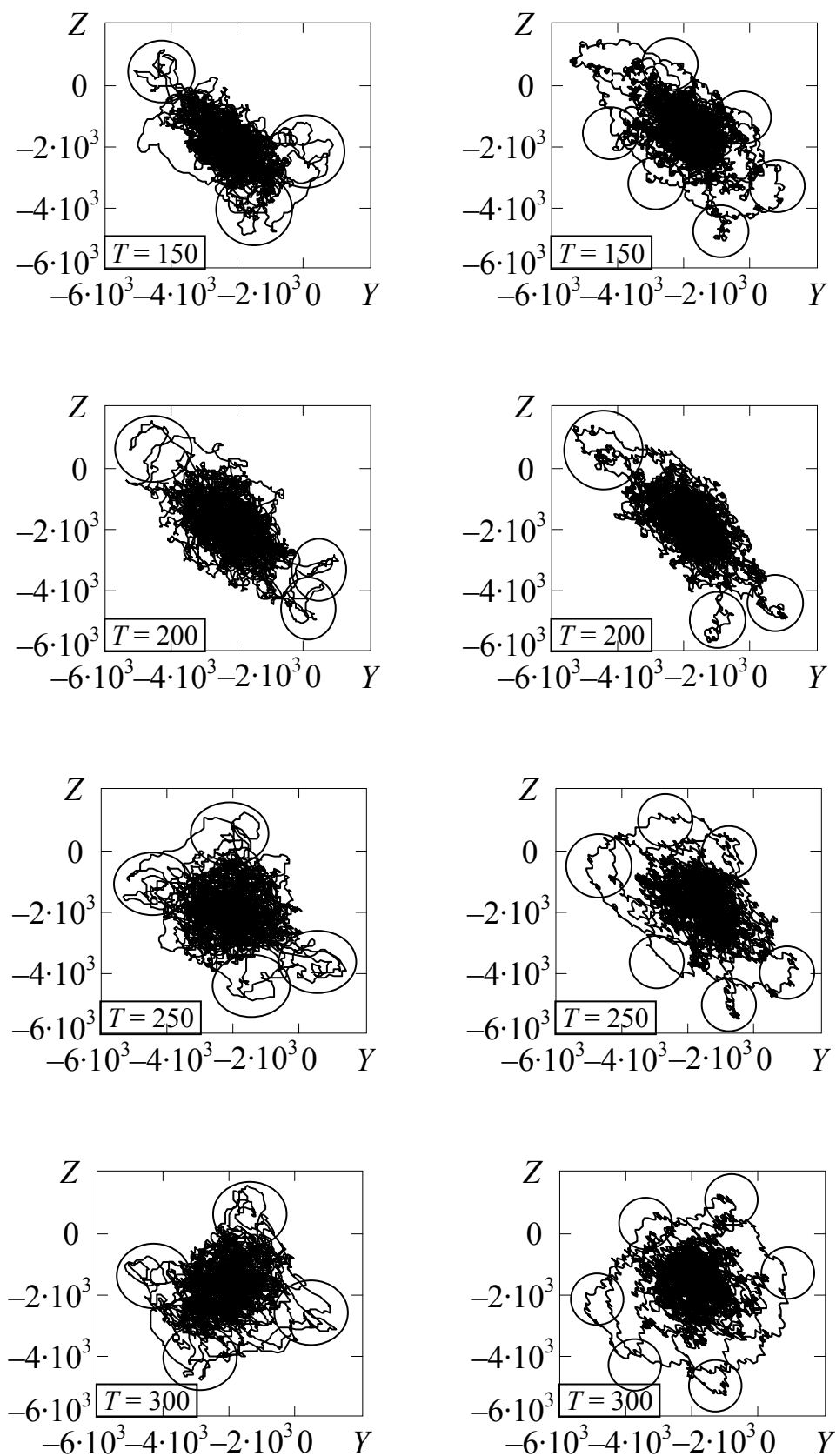
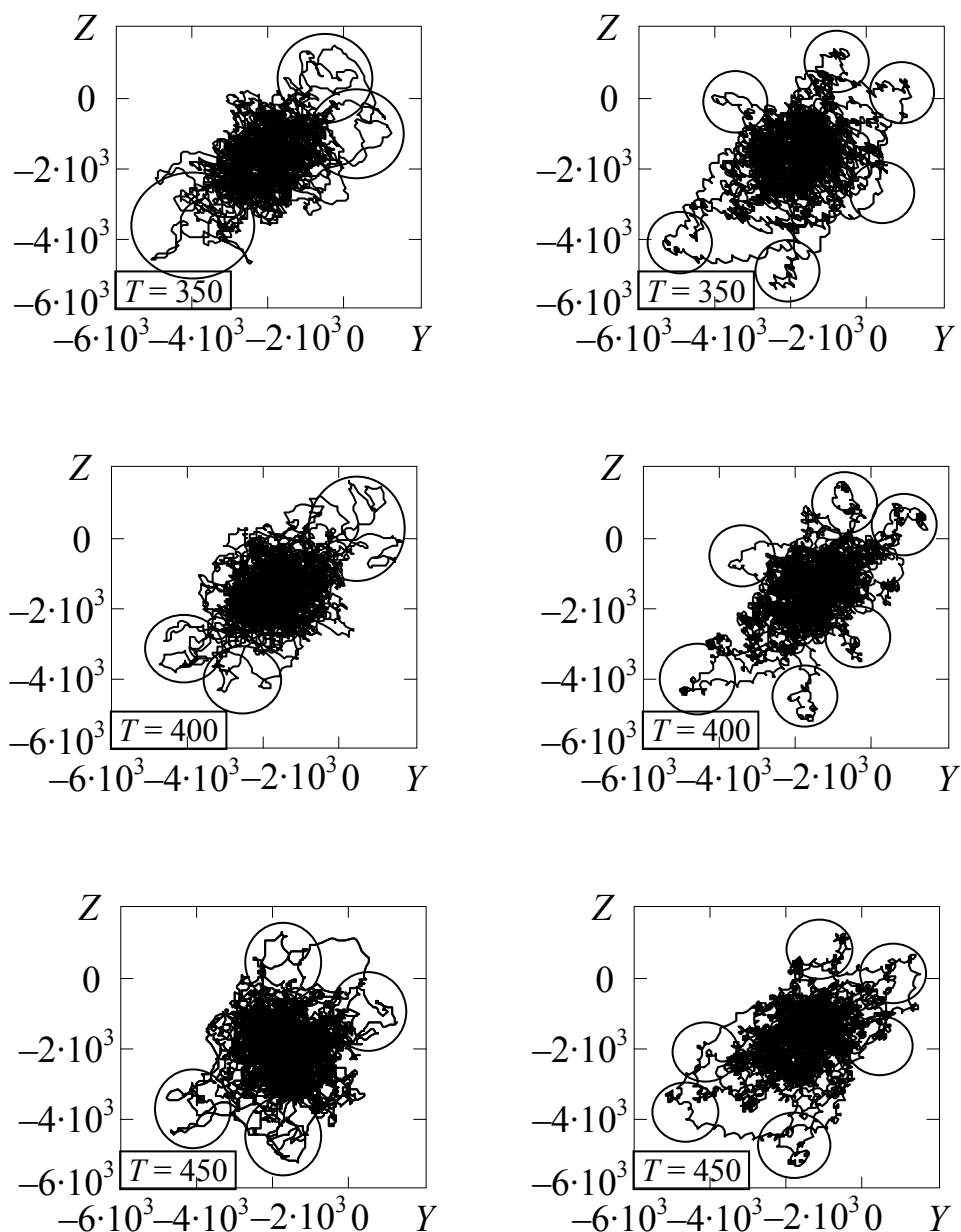


Рисунок 3.25 – Фазові портрети сигналів під час зондування завислих БПЛА з трьома (ліворуч) і шістьма (праворуч) роторами при різних значеннях T



Закінчення рисунку 3.25 – Фазові портрети сигналів під час зондування завислих БПЛА з трьома (ліворуч) і шістьма (праворуч) роторами при різних значеннях T

Але при $T = 200$ ФП сигналів під час зондування БПЛА з трьома і шістьма роторами практично не відрізняються, і в обох випадках форма ФП нагадує «веретено». При збільшенні T , зазначена вище особливість ФТ знов проявляється. Так при $T = 250$ ФП сигналів БПЛА з трьома і шістьма роторами відрізняються кількістю характерних областей, яка залежить від кількості роторів. Особливий інтерес представляє форма ФП при великих значеннях T [55]. При $T = 300$ ФП сигналу БПЛА з шістьма роторами має шість характерних областей, практично рівномірно розташованих навколо «клубка ниток» у вигляді «кружева». Така поведін-

нка ФТ значно відрізняється від ФП сигналу БПЛА з трьома роторами. При $T = 350$ і $T = 400$ визначені особливості ФП зберігаються – на краях ФП відбувається групування елементів ФТ в трьох і шести областях ПФП. Як вже зазначалося вище, такі форми ФП нагадують форми БПЛА з трьома і шістьма роторами. Особливо ці відмінності у формах ФП спостерігаються при $T = 400$. Також необхідно зазначити, що при $T = 450$ форми ФП також відрізняються, але ці відмінності не такі великі.

Таким чином, з проведеного дослідження видно, що форми ФП сигналів, отриманих при зависанні БПЛА з трьома і шістьма роторами на висоті 20 м, при збільшенні часової затримки істотно відрізняються від форм ФП фонових сигналів і один від одного. Форми ФП сигналів, обумовлених зависанням БПЛА, при величинах $T > 300$ точок часового ряду, нагадують реальні форми БПЛА з трьома і шістьма роторами. Така особлива форма ФП може бути використана, як ознака розпізнавання типу завислого БПЛА з трьома або шістьма роторами.

Розглянемо форми ФП сигналів під час руху БПЛА з трьома і шістьма роторами на висоті 30 м [55]. Також як і при дослідженні змін форм ФП при зависанні БПЛА, розглянемо поведінку ФТ при значеннях T відмінних від $T = 50$ точок. При цьому розглянемо часові затримки від $T = 300$ до $T = 450$ з дискретністю 50 точок.

Фазові портрети сигналів з виходу головних телефонів при різних значеннях T показані на рис. 3.26 (величина T позначена знизу на рисунках). Ліворуч показані ФП сигналів при зондуванні БПЛА з трьома роторами (17-е «вікно»), а праворуч – з шістьма (14-е «вікно»). Аналіз ФП, наведених на рис. 3.26, показує, що форми ФП під час руху БПЛА, також як і при зависанні, мають форму, що нагадують реальні форми БПЛА з трьома і шістьма роторами. Але на відміну від ФП сигналів, обумовлених зависанням БПЛА, ця схожість дещо розмита при малих значеннях T . Це можна пояснити саме рухом БПЛА. На рис. 3.26 також видно, що при $T = 300$ форми ФП при зондуванні БПЛА з трьома і шістьма роторами схожі. Але при збільшенні часової затримки до $T = 350$ і $T = 400$ проявляється концентрація елементів ФТ в трьох (ліві рисунки) і шести (праві рисунки) областях, що нагадує реальне розташування роторів на БПЛА.

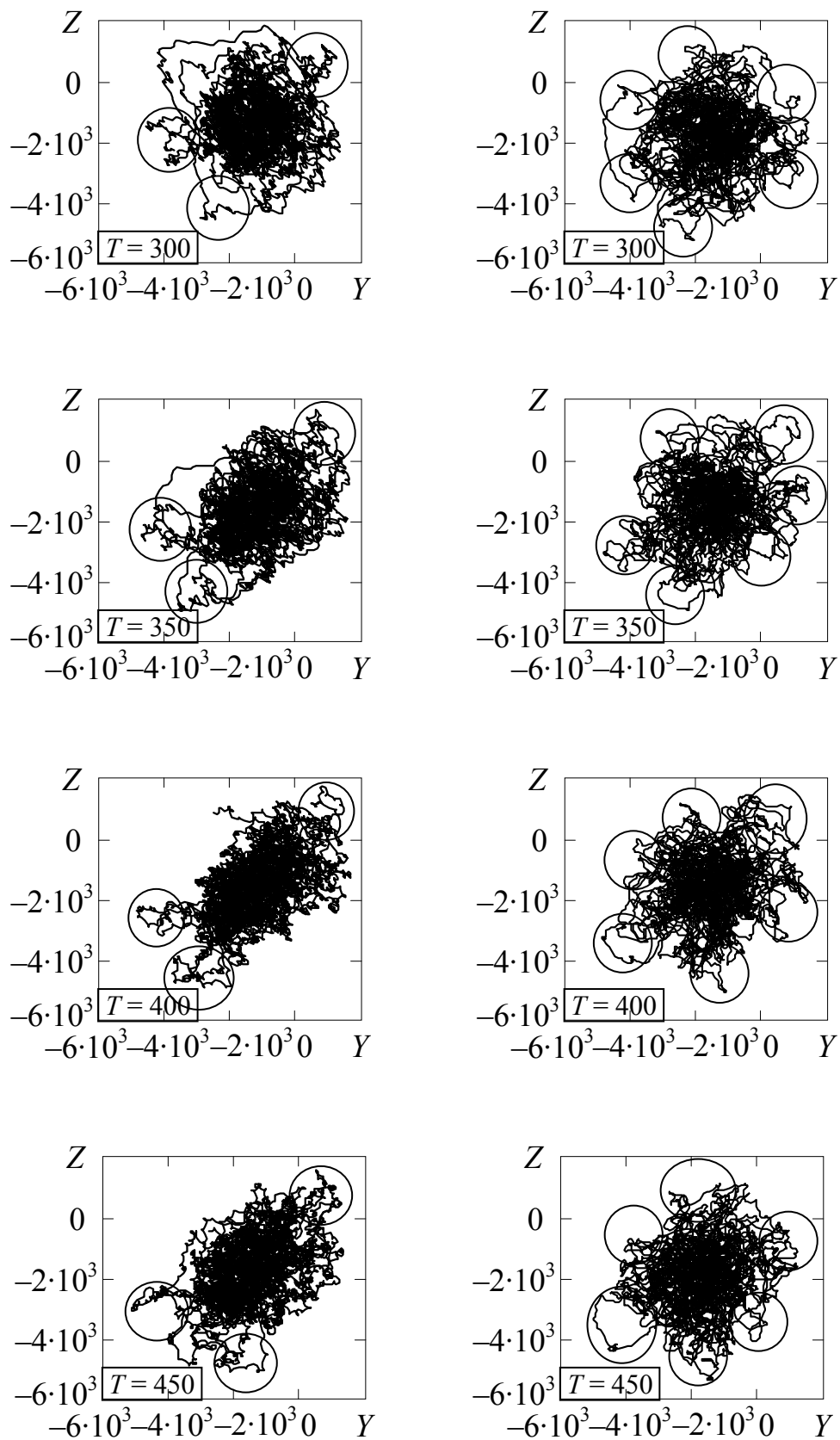


Рисунок 3.26 – Фазові портрети сигналів під час зондування рухомих БПЛА з трьома (ліворуч) і шістьма (праворуч) роторами при різних значеннях T

При $T = 450$ розглянуті особливості ФП зберігаються, але під час руху БПЛА з шістьма роторами групування елементів ФТ не таке чітке. Також необхідно зазначити, що з порівняння даних, наведених на рис. 3.25 і рис. 3.26, видно, що форми ФП сигналів, отриманих при зависанні БПЛА і під час руху БПЛА, мають деякі відмінності. Перш за все, при зависанні БПЛА на краях ФП спостерігається форма руху ФТ у вигляді «кружева», а під час руху БПЛА такої поведінки ФТ не спостерігається. Крім того, на відміну від зависання БПЛА, де спостерігається відділення невеликої кількості елементів ФТ від «клубка ниток» (фоновий сигнал), під час руху БПЛА на краях ФП фазова траєкторія формується з більшою кількістю елементів, які відокремлюються від фону. Також структура ФП, яка обумовлена фоновим сигналом (в центрі ФП), є «не тугим клубком ниток» – фазові траєкторії не скрізь щільно заповнюють центр ФП. Це, швидше за все, пояснюється тим, що модуляція сигналу відбувається не тільки обертанням роторів, але і безпосередньо рухом мультироторного БПЛА.

Для перевірки прояви характерних особливостей ФП розглянемо форми ФП сигналів під час зависання і руху БПЛА в інших «вікнах» вихідного ДС [55]. На рис. 3.27 показані ФП завислих БПЛА з трьома (ліворуч) і шістьма (праворуч) роторами. Номер «вікна» позначено зверху, а величина T – знизу на рисунках. Значення T вибиралися від $T = 350$ до $T = 450$ при яких проявлялися особливості в розглянутих вище «вікнах». Порівняльний аналіз лівих і правих ФП на рис. 3.27 показує, що ФП сигналів при зондуванні завислих БПЛА з трьома і шістьма роторами мають істотні відмінності. У цих «вікнах» також проявляються особливості поведінки ФТ, тобто вони групуються в трьох і шести областях ФП відповідно. При зондуванні завислого БПЛА з шістьма роторами характерні форми ФП краще проявляються при $T = 450$, а БПЛА з трьома роторами при менших значеннях T .

Характерні форми ФП також проявляються і при зондуванні рухомих БПЛА з трьома (ліворуч) і шістьма (праворуч) роторами (рис. 3.28). При цьому форма ФП ускладнюється у порівнянні з зависанням БПЛА. На краях ФП спостерігається складніший характер поведінки ФТ, обумовлений і рухом БПЛА і обертанням роторів. Все це може бути використано під час розпізнавання характеру руху БПЛА.

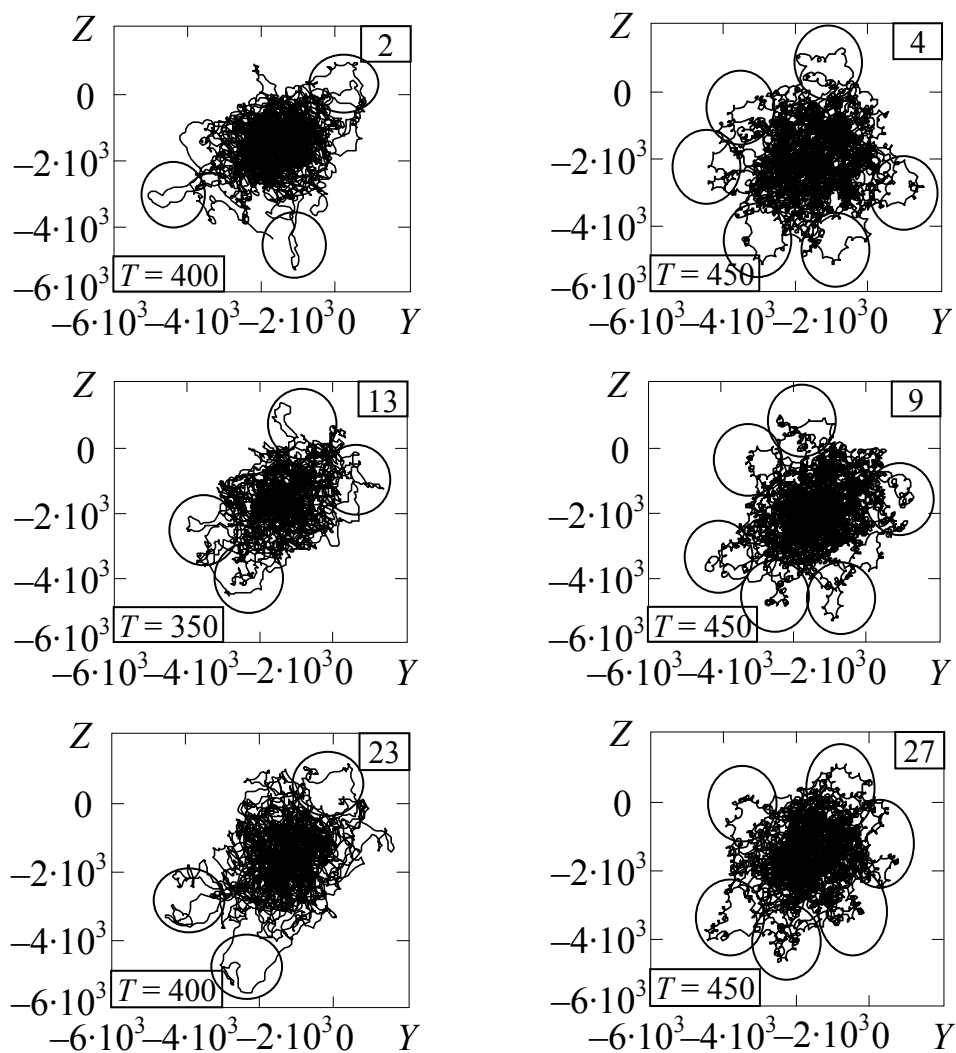


Рисунок 3.27 – Фазові портрети сигналів під час зондування завислих БПЛА з трьома (зліва) і шістьма (справа) роторами в різних «вікнах»

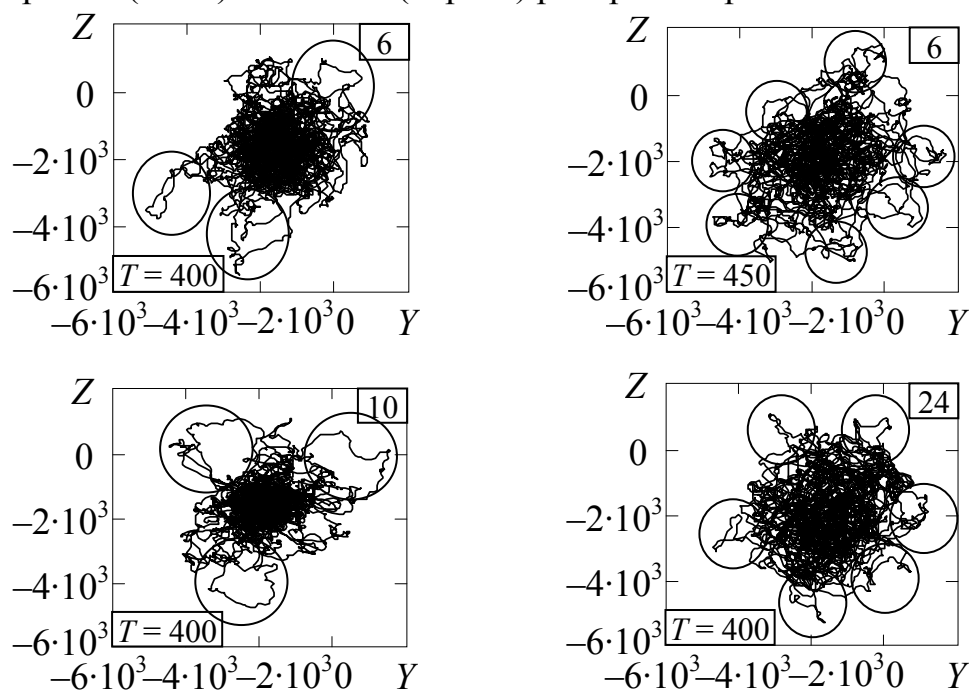


Рисунок 3.28 – Фазові портрети сигналів під час зондування рухомих БПЛА з трьома (ліворуч) і шістьма (праворуч) роторами в різних «вікнах»

Таким чином, дослідження форм ФП сигналів, отриманих при зондуванні БПЛА з трьома і шістьма роторами показали, що вони істотно відрізняються, а форми нагадують форму розміщення роторів на БПЛА. Особлива форма ФП може бути використана у якості ознаки розпізнавання типу мультироторних БПЛА та характеру їх руху.

Висновки до розділу 3

1. Проведено аналіз зміни форм фазових портретів сигналів, отриманих при зондуванні БПЛА, та встановлено, що вона відрізняється від форм фазових портретів фонових сигналів. Поява на краях ФП характерних областей дозволяє розділити фоновий сигнал і сигнал при зондуванні БПЛА. Таким чином, форма ФП може бути ознакою розпізнавання БПЛА мультироторного типу.

2. Досліджено форми ФП сигналів, побудованих з часовими затримками близьким до АКФ ДС під час зондування завислого і рухомого БПЛА з трьома роторами. Встановлено, що при таких часових затримках ФП практично не відрізняються. Відмінність в характері руху БПЛА можна визначити за протяжністю і періодичністю появи характерних ФП.

3. Проаналізовано зміни форм фазових портретів при їх побудові з різними часовими затримками. Визначено, що форма ФП фонового сигналу практично не залежить від величини часової затримки і може бути охарактеризована як випадковий рух зображаючої точки по фазовій траєкторії на ПФП. У той же час під час зондування обертового ротора БПЛА форма ФП ДС суттєво залежить від величини часової затримки. При її збільшенні схожі форми ФП (але відмінні від форми ФП фонового сигналу) виявляються періодично (періодом дорівнює періоду ДС). Із збільшенням швидкості обертання ротора періодичність появи схожих ФП зменшується.

4. Періодичний характер зміни форм ФП ДС при збільшенні кількості обертових роторів БПЛА зберігається. При цьому форма ФП ДС значно змінюється, якщо збільшується кількість обертових роторів на БПЛА. Також встановлено, що

форми ФП суттєво залежать від величин часової затримки, яка використовувалася при їх побудові.

5. Запропоновано метод аналізу доплерівських сигналів, відбитих від обертових роторів БПЛА, з використанням фазових портретів, побудованих при різних часових затримках. Застосування цього методу дозволить розділити фоновий ДС і ДС, відбитий від БПЛА, а також визначити число роторів на БПЛА та оцінити швидкість їх обертання.

6. З використанням розробленого методу досліджено особливі форми фазових портретів під час зондування БПЛА з трьома і шістьма роторами з метою їх розпізнавання і визначення характеру руху. Встановлено, що форми ФП сигналів, отриманих при зондуванні таких БПЛА, істотно відрізняються, а їх форми нагадують форму розміщення роторів на реальних БПЛА.

7. При зміні часової затримки на краях ФП сигналів, отриманих під час зависання і руху БПЛА, виявляється концентрація фазової траєкторії відповідно у трьох і шістьох областях ПФП. Ускладнення форм ФП (додаткове відділення фазової траєкторії від фонового ФП при збільшенні часової затримки) проявляється під час зміни характеру руху – від зависання до руху БПЛА у бік РЛС та від неї.

8. Особливі форми ФП можуть бути використано під час розпізнавання типу мультироторного БПЛА – з трьома або шістьма роторами, а також характеру їх руху. Запропоновано методику розпізнавання типу мультироторного БПЛА з використанням аналізу форм ФП ДС, побудованих при різних часових затримках.

9. Для підвищення ймовірності розпізнавання мультироторних БПЛА доцільно оцінити можливість аналізу складності доплерівських сигналів і ФП ДС, побудованих при різних часових затримки, з використанням величини фрактальної розмірності.

Результати досліджень даного розділу опубліковано у наукових працях [49, 51, 53, 55, 58, 60].

РОЗДІЛ 4

ФРАКТАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ДОПЛЕРІВСЬКИХ СИГНАЛІВ, ВІДБИТИХ ВІД МУЛЬТИРОТОРНОГО БПЛА

Проведено аналіз складності ДС при різній швидкості і кількості обертових роторів БПЛА з використанням фрактальної розмірності та встановлено, що вона збільшується із збільшенням швидкості обертання роторів, а при збільшенні кількості роторів залежить від напряму обертання роторів та їх геометричного розташування. Проаналізовано зміни ФР фазових портретів при їх побудові з різними часовими затримками. Удосконалено метод аналізу доплерівських сигналів, відбитих від БПЛА, з використанням ФР фазових портретів, побудованих при різних часових затримках. Різна величина фрактальної розмірності ДС і ФП може бути використана, як ознака розпізнавання типу мультироторного БПЛА. Розглянуто можливість використання зміни ФР для розпізнавання БПЛА з різною кількістю роторів та різним характером руху.

4.1 Дослідження доплерівських сигналів, відбитих від обертових роторів БПЛА, з використанням фрактальної розмірності

У підрозділі 2.1 проведено докладний частотно-часовий аналіз ДС, відбитих від обертових роторів БПЛА, та показано, що використання спектрального аналізу дозволяє встановити залежність між швидкістю обертання роторів, що задається з пульта управління, і кутовою частотою обертання роторів, яка оцінюється за допомогою доплерівської РЛС [47]. Але спектральний аналіз не дозволяє кількісно оцінити складність форми ДС.

Ступінь флуктуацій відбитого ДС може бути описана за допомогою характеристичного коефіцієнта – фрактальної розмірності D [57]. Поняття та порядок визначення фрактальної розмірності розглянуто у підрозділі 1.3.2. Розглянемо можливість аналізу складності ДС, відбитих від обертових роторів БПЛА, з вико-

ристанням фрактальних розмірностей [50]. Як зазначалося у підрозділі 1.3.2 найчастіше при аналізі часових рядів з використанням ФР застосовують для її визначення метод покриття і метод визначення довжини лінії. Під час подальшого аналізу ДС фрактальні розмірності будемо розраховувати методом покриття при апроксимації точок методом МНК і на лінійній ділянці, а також методом довжини лінії при апроксимації точок методом МНК.

У табл. 4.1 [50] наведені чисельні значення фрактальних розмірностей ДС при обертанні одного ротора з швидкостями 12,5 об/с (див. рис. 2.8), 25 об/с (див. рис. 2.10, а), 37,5 об/с (див. рис. 2.10, б) і 50 об/с (див. рис. 2.10, в).

Таблиця 4.1 – Величини ФР ДС при змінах швидкості обертання ротора

Швидкість обертання ротора БПЛА	Значення ФР ДС		
	Метод покриття		Метод довжини лінії, МНК
	Метод МНК	Лінійна ділянка	
12,5 об/с	1,5604	1,7880	1,5408
25 об/с	1,5626	1,7942	1,5488
37,5 об/с	1,5646	1,8157	1,5772
50 об/с	1,5659	1,8192	1,5910

Як видно з табл. 4.1, при збільшенні швидкості обертання ротора фрактальна розмірність ДС збільшується. Найбільше зростання величини ФР ($\Delta D = 0,0215$) спостерігається при збільшенні швидкості обертання ротора від 25 об/с до 37,5 об/с, а при менших і більших швидкостях – $\Delta D \approx 0,005$. Також з даних табл. 4.1 видно, що ФР, розраховані методом покриття і методом довжини лінії при апроксимації точок методом МНК, мають близькі значення. Але, при використанні методу покриття відмінності у величинах ФР спостерігаються в третьому знаку після коми, що не дозволяє аналізувати зміну форми ДС з використанням ФР. Тому апроксимацію точок при використанні даного методу необхідно проводити на лінійній ділянці. Метод довжини лінії дозволяє аналізувати складність форми ДС і при апроксимації точок методом МНК. Але, величини ФР, розраховані цими двома методами, відрізнятимуться в першому знаку після коми [50].

Проведемо оцінку складності форми ДС з використанням ФР при зондуванні БПЛА з різною кількістю роторів [50]: двох роторів № 1, 2 (див. рис. 2.11, б), двох роторів № 1, 3 (див. рис. 2.11, в), двох роторів № 2, 3 (див. рис. 2.11, г) і трьох роторів (див. рис. 2.11, д) при швидкості 37,5 об/с. Фрактальні розмірності також розраховувалися двома методами.

У табл. 4.2 [50] наведені величини ФР ДС при зондуванні двох і трьох обертових роторів БПЛА. При цьому під час зондування двох роторів їх взаємне розташування змінювалося. Також необхідно зазначити, що напрям обертання ротора № 3 був протилежним напрямку обертання роторів № 1 і № 2.

Таблиця 4.2 – Величини ФР ДС при зміні кількості роторів

Кількість роторів БПЛА	Значення ФР доплерівського сигналу		
	Метод покриття		Метод довжини лінії, МНК
	МНК	Лінійна ділянка	
Два ротори № 1, 2	1,5917	1,8350	1,5738
Два ротори № 1, 3	1,5638	1,8086	1,5364
Два ротори № 2, 3	1,5751	1,8266	1,5698
Три ротори	1,5709	1,8049	1,5313

З даних табл. 4.2 видно, що величини ФР ДС залежать від кількості обертових роторів, але ФР не збільшується з збільшенням кількості роторів. Так найбільші значення ФР спостерігаються при обертанні двох роторів № 1, 2. Це, швидше за все, обумовлено тим, що ці ротори обертаються в один бік та їх взаємне розташування обумовлює складну структуру ДС. При зондуванні двох роторів, що обертаються в різні боки (ротори № 1, 3 та № 2, 3) на складність сигналу і на величину ФР впливає також їх взаємне розташування у просторі [50]. Так, якщо ротори зміщені у напрямі до РЛС (ротори № 1, 3), то величина ФР зменшується, а при зміщенні роторів за азимутом (ротори № 1, 3) – ФР збільшується. При зондуванні трьох обертових роторів ФР приймає свої мінімальні значення. Це обумовлено, як їх геометричним розташуванням, так і напрямом обертання роторів, що

приводить до більшої гладкості відбитого ДС. Крім того, в табл. 4.2 видно, що на величину ФР впливає метод її визначення.

Таким чином, розрахунок ФР дозволяє здійснити чисельну оцінку складності ДС, відбитих від обертових роторів БПЛА. При цьому величина ФР змінюється залежно від кількості і швидкості обертання роторів, що може бути використано під час розпізнавання типу мультироторного БПЛА.

Розглянемо можливість аналізу ДС, відбитих від фону та рухомого БПЛА з використанням ФР, які визначалися методом покриття [61]. Під час аналізу сигналів вихідний часовий ряд оброблявся за допомогою «стрибаючого вікна» розміром 10 000 точок, яка дорівнювала величині «стрибка». Для кожного положення «вікна» розраховувалася ФР за допомогою спеціальної програми розрахунку ФР сигналів і фазових портретів.

Розглянемо величини ФР сигналів, відбитих від фону [52]. На рис. 4.1 показано сигнал з виходу головних телефонів при зондуванні фону довжиною 330 800 точок, що при частоті дискретизації 22,05 кГц відповідав 15,0 с.

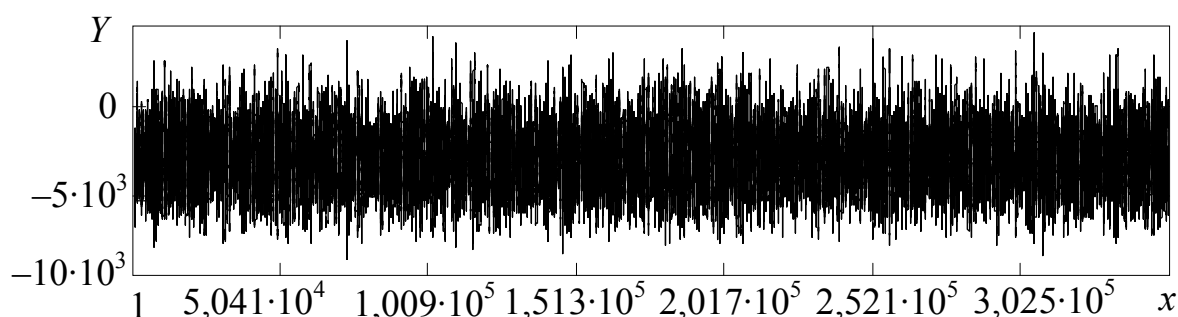


Рисунок 4.1 – Часова реалізація сигналу з виходу головних телефонів під час зондування фону

Як видно з аналізу даних, показаних на рис. 4.1, часова структура сигналу при зондуванні фону має вигляд промодульованих за амплітудою, частотою і фазою синусоїд. Також необхідно зазначити, що у вихідному сигналі окрім чистого фону були присутні відбиття від рухомих людей (операторів БПЛА), але по часовим реалізаціям провести аналіз особливостей фонового сигналу не представляється можливим [52]. Для аналізу відбитого сигналу доцільно розрахувати ФР у

межах «стрибаючих вікон» і з їх допомогою оцінити його особливості. У табл. 4.3 приведені значення ФР під час «віконного» аналізу вихідного фонового сигналу.

Таблиця 4.3 – Величини ФР фонового сигналу

Номер «вікна»	Значення ФР	Номер «вікна»	Значення ФР
1	1,8854	18	1,8860
2	1,8906	19	1,8866
3	1,8752	20	1,8843
4	1,8858	21	1,8802
5	1,8796	22	1,8820
6	1,8641	23	1,8608
7	1,8574	24	1,8688
8	1,8797	25	1,8766
9	1,8766	26	1,8819
10	1,8702	27	1,8798
11	1,8647	28	1,8700
12	1,8929	29	1,8602
13	1,8934	30	1,8796
14	1,8754	31	1,8848
15	1,8923	32	1,8795
16	1,8738	33	1,8904
17	1,8966		

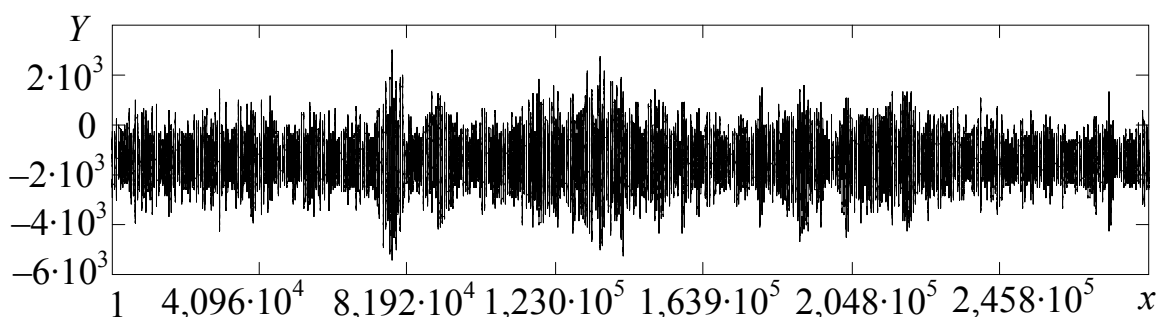
Як видно з аналізу даних табл. 4.3, величини ФР сигналів в 2-му, 4-му, 12-му, 13-му, 15-му, з 17-го по 20-е, а також в 31-му і 33-му «вікнах» (відповідно, $D_2 = 1,8906$, $D_4 = 1,8858$, $D_{12} = 1,8929$, $D_{13} = 1,8934$, $D_{15} = 1,8923$, $D_{17} = 1,8966$, $D_{18} = 1,8860$, $D_{19} = 1,8866$, $D_{20} = 1,8843$, $D_{31} = 1,8848$ і $D_{33} = 1,8904$) обумовлені тільки фоном. При цьому значення ФР змінюються в межах приблизного від $D = 1,885$ до $D = 1,895$, тобто середнє значення ФР близьке до $D_{cp} = 1,89$ [52].

У той же час значення ФР сигналів в яких переважає рух людей (у 7-му, 11-му, 23-му і 29-му «вікнах»), $D_7 = 1,8574$, $D_{11} = 1,8647$, $D_{23} = 1,8608$ і $D_{29} = 1,8602$,

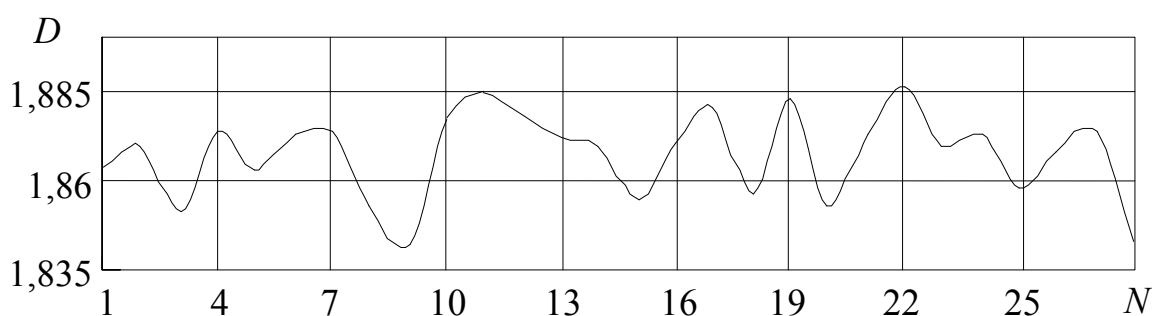
які позначені у таблиці сірим фоном), коливаються навколо значення $D_{\text{ср}} = 1,86$. В інших «вікнах» ФР змінюється в межах приблизного від $D = 1,865$ до $D = 1,885$, тобто можна сказати, що в них сигнал обумовлений і фоном, і рухом людей. При цьому у «вікнах», в яких ФР ближча до $D = 1,865$ переважають відбиття від рухомих людей, а у «вікнах» в яких ФР ближча до $D = 1,885$ – відбиття від фону.

Таким чином, фрактальна розмірність фоновому сигналу в середньому близька до значення $D_{\text{ср}} = 1,89 \pm 0,01$, що надалі може бути використано під час розрізнення фоновому сигналу і сигналу, обумовленого рухом БПЛА.

Оцінимо складність аналіз сигналу, відбитого від завислого БПЛА мультироторного типу, з використанням ФР [52]. На рис. 4.2, а показано ДС, записаний з виходу головних телефонів РЛС, під час зависання БПЛА з трьома роторами на висоті 20 м.



а



б

Рисунок 4.2 – Часова реалізація сигналу з виходу головних телефонів РЛС (а) і зміна величин ФР (б) під час зависання БПЛА

Візуальний аналіз сигналу показує, що його структура не є однорідною, спостерігаються зміни амплітуди, які більше всього проявляються близько 80 000 точки, а також в діапазоні від 120 000 до 150 000 точок. Але визначити, чим ви-

кликані зміни амплітуди сигналу – фоном або зависанням БПЛА за допомогою часової реалізації неможливо. Проведемо аналіз структури цього сигналу з використанням ФР. Умови обробки початкового часового ряду будуть такими ж, як і при обробці фонового сигналу (розмір «вікна» і величина «стрибка» дорівнюють 10 000 точок).

На рис. 4.2, б показано зміну величин ФР від положення «вікна», по осі абсцис відкладені номери положення «вікна» (N), а по осі ординат – значення ФР у «вікні» (D). Як видно з аналізу даних, наведених на рис. 4.2, б, найменші значення ФР спостерігаються в 1-му, 3-му, 5-му, 8-му, 9-му, 15-му, 18-му, 20-му, 23-му, 25-му і 28-му «вікнах». При цьому ФР у «вікнах» дорівнюють $D_1 = 1,8625$, $D_3 = 1,8496$, $D_5 = 1,8615$, $D_8 = 1,8506$, $D_9 = 1,8392$, $D_{15} = 1,8528$, $D_{18} = 1,8542$, $D_{20} = 1,8509$, $D_{23} = 1,8685$, $D_{25} = 1,8563$ і $D_{28} = 1,8256$.

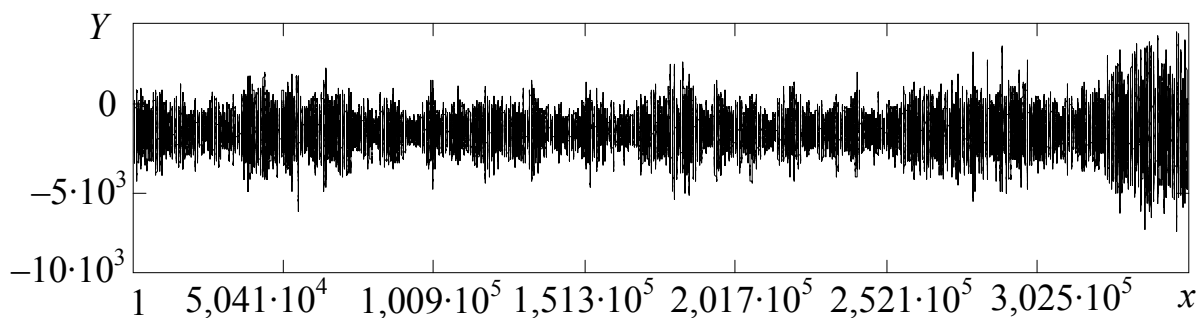
Таким чином, середнє значення ФР сигналів, обумовлених зависанням БПЛА, в основному коливається навколо значення $D_{cp} = 1,85 \pm 0,01$. Крім того, необхідно зазначити, що приведені вище значення ФР, виявляються з періодичністю 2 – 3 положення «вікна». Особливо це проявляється на початку і в кінці часової реалізації. Це, швидше за все, пояснюється тим, що в ці моменти часу зависання БПЛА здійснювалося при рівномірному обертанні роторів без зміни висоти.

Фрактальні розмірності в інших «вікнах» також характеризують зависання БПЛА, але в них в більшому або в меншому ступені переважає фоновий сигнал, і ФР в цих «вікнах» збільшується, що характерно для фонового сигналу [52]. Найбільші значення ФР спостерігаються в 11-му, 17-му, 19-му і 22-му «вікнах», ФР дорівнюють $D_{11} = 1,8847$, $D_{17} = 1,8803$, $D_{19} = 1,8831$ і $D_{22} = 1,8870$. Як було показано вище, такі значення ФР відповідають фоновому сигналу ($D_{cp} = 1,89 \pm 0,01$).

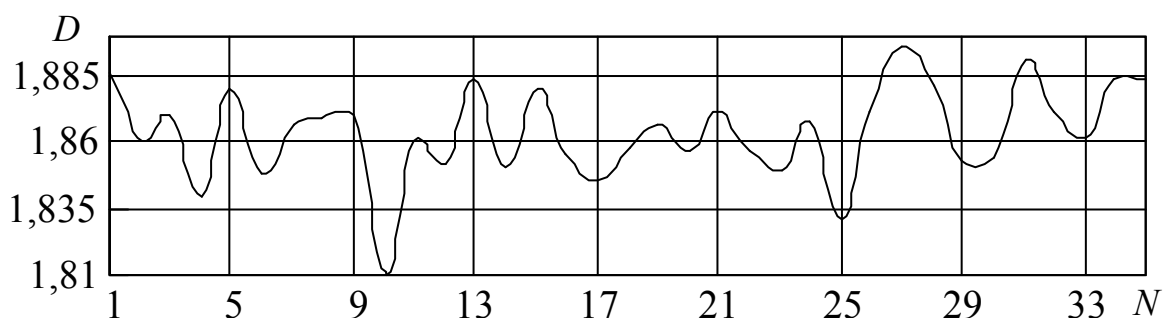
Таким чином, відмінність у величинах ФР сигналів з виходу головних телефонів при зондуванні фону і завислого БПЛА може бути використано як ознаку розпізнавання БПЛА з трьома роторами.

Проведемо аналіз сигналу під час руху БПЛА у напрямі до РЛС і від неї [52]. Сигнал з виходу головних телефонів під час руху БПЛА з трьома роторами

на висоті 30 м, показано на рис. 4.3, а. Початковий часовий ряд містить 352 800 точок, що при частоті дискретизації 22,05 кГц відповідає 16,0 с.



а



б

Рисунок 4.3 – Часова реалізація сигналу з виходу головних телефонів РЛС (а) і зміна величин ФР (б) під час руху БПЛА

Візуальний аналіз часової реалізації сигналу показує, що його структура, також як і при зависанні БПЛА, не є однорідною. По характеру сигналу можна сказати, що він не є фоновим, але по часовій реалізації не можливо оцінити, чим викликані зміни амплітуди сигналу. Проаналізуємо отриманий часовий ряд з використанням ФР. Умови обробки часового ряду будуть такими ж, як і при обробці фонового сигналу і сигналу, обумовленого зависанням БПЛА. На рис. 4.3, б показана зміна величини ФР від положення «стрибаючого вікна». З порівняння даних, наведених на рис. 4.2, б і рис. 4.3, б, видно, що величини ФР сигналів, отриманих при зависанні БПЛА і під час його руху у напрямі до РЛС і від неї, практично не відрізняються, тобто тільки за величиною ФР визначити характер руху БПЛА не можна. Це пояснюється тим, що модуляція сигналу в основному відбувається із-за обертання роторів, а не із-за швидкості польоту БПЛА, яка під час експериментів була не високою [52].

На рис. 4.3, б також видно, що на початку часового ряду спостерігається зависання БПЛА, і найменші ФР спостерігаються з періодичністю 2 – 3 положення «вікна» ($N=2$, $N=4$ і $N=6$). При цьому ФР у цих «вікнах» дорівнюють $D_2 = 1,8603$, $D_4 = 1,8392$ і $D_6 = 1,8478$. Після цього в 10-му «вікні» спостерігається початок руху БПЛА, що проявляється у мінімальному значенні ФР, яке дорівнює $D_{10} = 1,8089$. Рух БПЛА далі характеризується збільшенням протяжності появи найменших ФР – спочатку до трьох «вікон»: 10-е, 11-е і 12-е «вікна» ($D_{10} = 1,8089$, $D_{11} = 1,8607$ і $D_{12} = 1,8517$), а потім – до десяти: з 16-го по 25-е «вікна» ($D_{16} = 1,8551$, $D_{17} = 1,8457$, $D_{18} = 1,8586$, $D_{19} = 1,8670$, $D_{20} = 1,8568$, $D_{21} = 1,8711$, $D_{22} = 1,8573$, $D_{23} = 1,8497$, $D_{24} = 1,8683$ і $D_{25} = 1,8307$). В кінці часового ряду найменші ФР спостерігаються тільки у двох послідовних «вікнах» – 29-му, 30-му і 32-му, 33-му «вікнах», що обумовлено, швидше за все, зависанням БПЛА і його вильотом із стробу дальності РЛС [52].

Таким чином, відмінність в характері руху БПЛА (зависання або рух у напрямі до РЛС і від неї) можна визначити по протяжності і періодичності появи найменших ФР. Також необхідно зазначити, що середнє значення ФР сигналів під час зондування БПЛА ($D_{cp} = 1,85 \pm 0,01$) відрізняється від значень ФР фонового сигналу ($D_{cp} = 1,89 \pm 0,01$). Але тільки за величиною ФР визначити характер руху БПЛА (зависання або рух у напрямі до РЛС і від неї) практично не можна із-за близьких значень ФР. Для визначення характеру руху мультироторного БПЛА доцільно розрахувати ФР фазових портретів, побудованих з різною часовою затримкою.

4.2 Метод фрактального аналізу складності фазових портретів доплерівських сигналів, відбитих від мультироторного БПЛА

4.2.1 Аналіз величин фрактальних розмірностей фазових портретів сигналів, відбитих від обертових роторів БПЛА, під час зміни часової затримки

У розділі 3 було показано, що особливості форми ДС можна досліджувати за допомогою фазових портретів побудованих на псевдофазовій площині з різною

часовою затримкою. Проведемо аналіз зміни величин ФР фазових портретів ДС при різній швидкості і кількості обертових роторів БПЛА. Спочатку розрахуємо фрактальні розмірності ФП сигналів при обертанні одного ротора з різними швидкостями, які побудовані з часовою затримкою T близькою до першого нуля АКФ [50]. На рис. 4.4 показано ФП ДС при обертанні ротора з швидкостями 12,5 об/с, $T = 47$ (а); 25 об/с, $T = 32$ (б); 37,5 об/с, $T = 29$ (в) і 50 об/с, $T = 24$ (г).

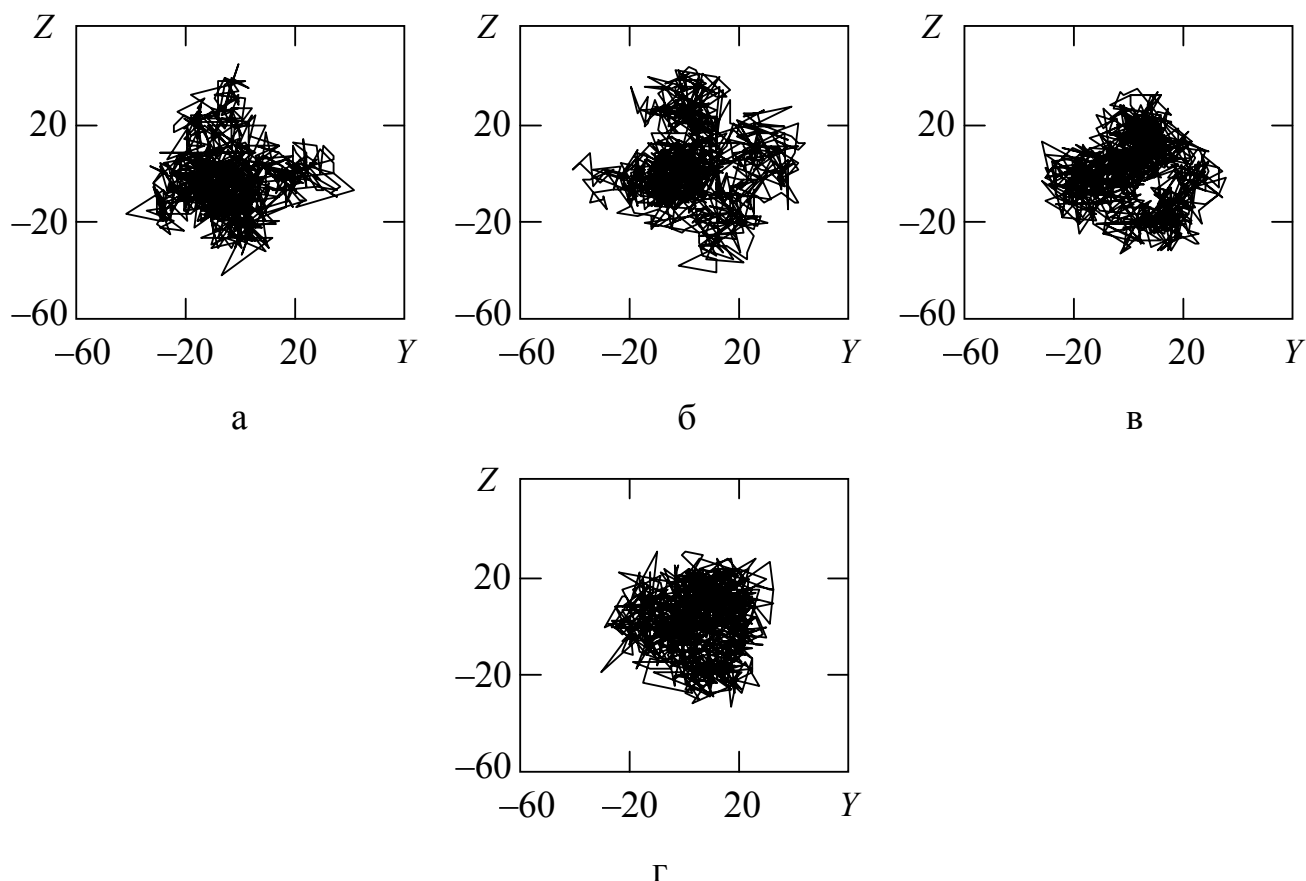


Рисунок 4.4 – Фазові портрети ДС під час обертання ротора №1 з швидкостями: 12,5 об/с, $T = 47$ (а); 25 об/с, $T = 32$ (б); 37,5 об/с, $T = 29$ (в) і 50 об/с, $T = 24$ (г)

На рис. 4.4 видно, що із збільшенням швидкості обертання ротора форма ФП змінюється при однаковій довжині (кількості точок) ДС. Зміна форм ФП може бути використана як ознака розпізнавання швидкості обертання ротора БПЛА, але порівняння форм ФП не дозволяє кількісно оцінити складність ДС.

У табл. 4.4 наведено чисельні значення ФР ДС при обертанні одного ротора з різними швидкостями, а також значення ФР фазових портретів ДС, показаних на рис. 4.4. Фрактальні розмірності розраховувалися з використанням методу покриття на лінійній ділянці графіка (7 точок).

Таблиця 4.4 – Величини ФР при змінах швидкості обертання ротора

Швидкість обертання ротора БПЛА	Значення ФР	
	Доплерівський сигнал	Фазовий портрет ДС
12,5 об/с	1,7880	1,7950
25 об/с	1,7942	1,8049
37,5 об/с	1,8157	1,8269
50 об/с	1,8192	1,8267

Як видно з даних табл. 4.4, при збільшенні швидкості обертання ротора ФР фазового портрета ДС також збільшується, як і ФР часової реалізації ДС. Характер збільшення значень ФР ФП також зберігається, але значення ФР більше на $\Delta D \approx 0,01$ при всіх значеннях швидкості обертання ротора. Також необхідно зазначити, що дослідження ФР тільки одного ФП, побудованого при T рівному першому нулю АКФ, не дозволяє досліджувати особливості ДС, отриманих при зондуванні ротора БПЛА, що обертається з різною швидкістю [50].

Проведемо оцінку складності форми ФП ДС з використанням ФР при зондуванні БПЛА з різною кількістю роторів [50]. На рис. 4.5 показані ФП ДС при обертанні двох роторів № 1, 2, $T = 28$ (а) № 1, 3, $T = 27$ (б) № 2, 3, $T = 15$ (в) і трьох роторів, $T = 34$ (г). Часові затримки дорівнюють першому нулю АКФ ДС. На рис. 4.5 видно, що із збільшенням кількості обертових роторів форми ФП значно відрізняються між собою і від форм ФП при зондуванні одного ротора (див. рис. 4.4), що може бути ознакою розпізнавання БПЛА з різним числом роторів. Для кількісної оцінки складності ФП ДС розрахуємо їх ФР.

У табл. 4.5 наведено чисельні значення ФР ДС при обертанні двох і трьох роторів БПЛА з швидкістю 37,5 об/с, а також значення ФР фазових портретів ДС, показаних на рис. 4.5. Фрактальні розмірності також розраховувалися з використанням методу покриття на лінійній ділянці графіка (7 точок).

З даних табл. 4.5 видно, що величини ФР фазових портретів ДС залежать від кількості обертових роторів. При цьому залежності збільшення величини ФР від збільшення кількості роторів не спостерігається [50].

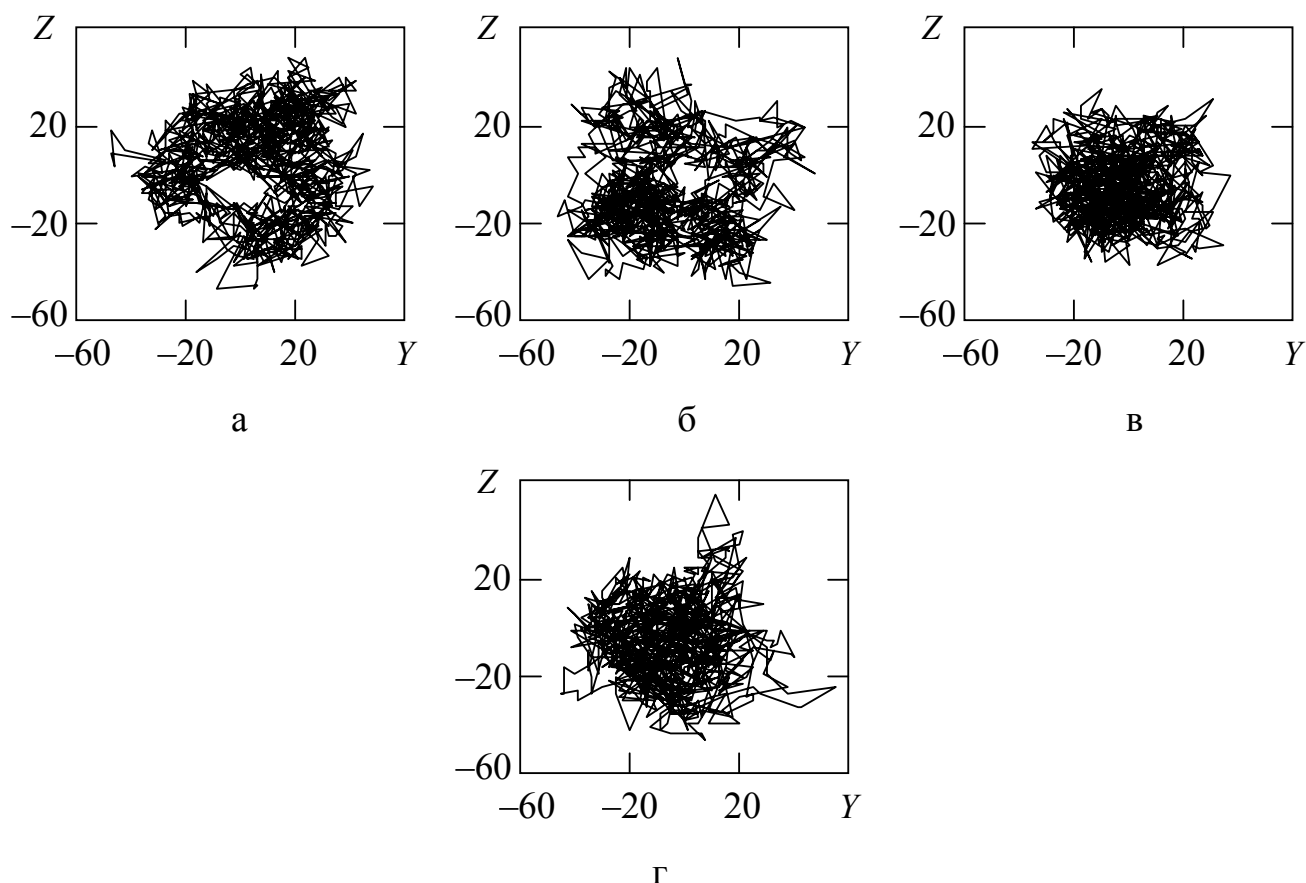


Рисунок 4.5 – Фазові портрети ДС під час обертання двох роторів №1, 2, $T = 28$ (а), №1, 3, $T = 27$ (б), №2, 3, $T = 15$ (в) і трьох роторів, $T = 34$ (г)

Таблиця 4.5 – Величини ФР при зміні кількості роторів

Кількість роторів БПЛА	Значення ФР	
	Доплерівський сигнал	Фазовий портрет ДС
Два ротори № 1, 2	1,8350	1,8526
Два ротори № 1, 3	1,8086	1,8224
Два ротори № 2, 3	1,8266	1,8353
Три ротори	1,8049	1,8019

Особливості зміни величин ФР ФП такі ж, як і величин ФР часових реалізацій ДС, які були розглянуті вище. Відмінності полягають тільки у величинах ФР, вони більше від $\Delta D \approx 0,0176$ до $\Delta D \approx 0,0087$, у залежності від геометричного розташування двох роторів. При зондуванні трьох роторів величини ФР часової реалізації та фазового портрета ДС практично не відрізняються.

Таким чином, зміни форм ФП і значень ФР ФП можуть бути використані як ознаки розпізнавання мультироторних БПЛА з різною кількістю і швидкістю обертання роторів. Але для дослідження особливостей ДС при зондуванні таких БПЛА необхідно розраховувати ФР фазових портретів, побудованих при різних значеннях часової затримки T .

На рис. 4.6 показано залежність зміни величин ФР ФП (D) від величини часової затримки (T) під час зондування одного обертового ротора БПЛА з швидкостями: 12,5 об/с (крива 1), 25 об/с (крива 2), 37,5 об/с (крива 3) і 50 об/с (крива 4).

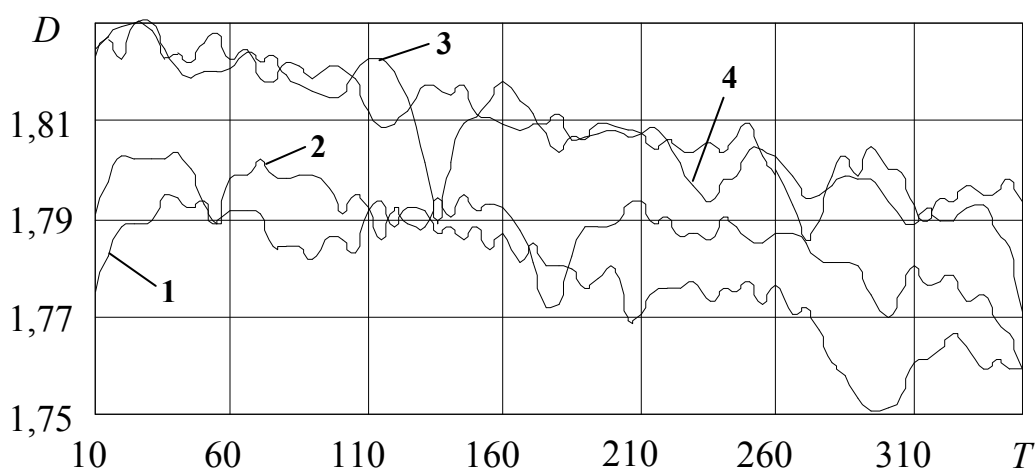


Рисунок 4.6 – Залежність змін величин ФР ФП від величин часової затримки:

$$V_p = 12,5 \text{ об/с (1)}, V_p = 25 \text{ об/с (2)}, V_p = 37,5 \text{ об/с (3)}, V_p = 50 \text{ об/с (4)}$$

Як видно з ходу кривих, показаних на рис. 4.6, величини ФР ФП зменшуються із збільшенням величини T , яка використовується для побудови ФП. Така поведінка величин ФР не залежить від швидкості обертання ротора. Це, швидше за все, обумовлено тим, що з збільшенням T зменшується кількість точок, що беруть участь у побудові ФП [50]. На рис. 4.6 також видно, що із збільшенням швидкості обертання ротора від 12,5 об/с до 37,5 об/с ФР ФП збільшуються (крива 1 нижче, ніж крива 2, а крива 2 нижче, ніж крива 3). Але при збільшенні швидкості обертання до 50 об/с величини ФР ФП не збільшуються і практично співпадають з ФР ФП при швидкості обертання 37,5 об/с. Головна особливість поведінки величин ФР ФП під час зміни часової затримки полягає в тому, що при T , яка близька до періоду ДС, фрактальна розмірність приймає мінімальні значення. При цьому

мінімальні значення з'являються з періодом, який дорівнює періоду ДС. Цей процес добре спостерігається на рис. 4.6.

У табл. 4.6 наведено вибіркові значення ФР ФП, які використовувалися при побудові графіків, показаних на рис. 4.6. Вибіркові значення ФР формувалися для областей в яких величини ФР різко змінювалися при збільшенні часової затримки. У табл. 4.6 жирним шрифтом (на початку таблиці) виділені максимальні значення ФР, а жирним курсивним шрифтом на сірому фоні (у нижній частині таблиці) – мінімальні значення ФР. З аналізу даних табл. 4.6 видно, що при $V_p = 12,5$ об/с мінімальне значення ФР ФП ($D_{295} = 1,7505$) виявляється при $T = 295$ точок, що близько періоду ДС. При збільшенні швидкості до $V_p = 25$ об/с мінімальні значення з'являються з періодом приблизно 175 точок ($D_{175} = 1,7717$, $D_{355} = 1,7559$), а при $V_p = 37,5$ об/с – з періодом 135 точок ($D_{135} = 1,7891$, $D_{270} = 1,7843$).

Таблиця 4.6 – Зміни величин ФР ФП при зміні величин часової затримки під час зондування одного ротор № 1 БПЛА

T	$V_R = 12,5$ об/с	$V_R = 25$ об/с	$V_R = 37,5$ об/с	$V_R = 50$ об/с
10	1,7752	1,791	1,8247	1,8223
15	1,7825	1,7973	1,8275	1,8259
20	1,7883	1,8029	1,8294	1,8223
25	1,7892	1,8025	1,8298	1,8296
30	1,7894	1,8023	1,8305	1,8283
35	1,7947	1,8025	1,8249	1,8221
40	1,7942	1,8033	1,8205	1,823
45	1,7923	1,8004	1,8187	1,821
110	1,7917	1,7921	1,823	1,8105
115	1,7938	1,7859	1,8225	1,8075
120	1,7881	1,7921	1,8199	1,808
125	1,7925	1,789	1,8148	1,811
130	1,7917	1,7884	1,8018	1,8164

Закінчення таблиці 4.6 – Зміни величин ФР ФП при зміні величин часової затримки під час зондування одного ротор № 1 БПЛА

T	$V_R = 12,5$ об/с	$V_R = 25$ об/с	$V_R = 37,5$ об/с	$V_R = 50$ об/с
135	1,7871	1,7941	1,7891	1,8152
140	1,7882	1,7906	1,8013	1,814
...
170	1,785	1,7814	1,8114	1,808
175	1,7801	1,7717	1,8078	1,8081
180	1,7805	1,7728	1,8035	1,8101
...
230	1,7771	1,7871	1,8035	1,7956
235	1,7729	1,7854	1,8055	1,7926
240	1,7757	1,7905	1,8034	1,7969
...
265	1,7706	1,7869	1,7916	1,7978
270	1,7715	1,7851	1,7843	1,793
275	1,7669	1,7819	1,7882	1,7935
280	1,7604	1,7813	1,7978	1,7957
285	1,7579	1,7813	1,8015	1,7975
290	1,7531	1,7807	1,7977	1,7969
295	1,7505	1,7743	1,8033	1,797
300	1,7516	1,77	1,7991	1,7924
305	1,7541	1,775	1,7984	1,7889
...
340	1,7612	1,7695	1,7946	1,7864
345	1,7593	1,7663	1,797	1,7828
350	1,7595	1,7595	1,7922	1,77
355	1,7585	1,7559	1,7914	1,7749
360	1,757	1,7647	1,7873	1,7808
365	1,7579	1,7672	1,7858	1,7815

При швидкості $V_p = 50$ об/с період ДС ще зменшується, і мінімальні значення ФР ФП з'являються з періодом приблизно 115 точок ($D_{115} = 1,8075$, $D_{235} = 1,7926$, $D_{350} = 1,77$). Але, як наголошувалося у [47], частота ДС, що фіксується РЛС, менша (період більший), ніж швидкість (частота) обертання ротора, що задається з пульта управління БПЛА. При цьому, чим більше швидкість обертання ротора, тим більше відмінності цих частот (періодів). Так при збільшенні швидкості в 2 рази з $V_p = 12,5$ об/с до $V_p = 25$ об/с період збільшується не в два рази, а в $\Delta T = 295/175 \approx 1,7$ разів. При збільшенні швидкості в 3 рази період збільшується в $\Delta T = 295/135 \approx 2,2$ рази, а при збільшенні швидкості в 4 рази – тільки в $\Delta T = 295/115 \approx 2,6$ рази [50]. У табл. 4.6 також видно, що максимальні значення ФР ФП з'являються при невеликих часових затримках – від 25 до 40 точок ($V_p = 12,5$ об/с – $D_{35} = 1,7947$, $V_p = 25$ об/с – $D_{40} = 1,8033$, $V_p = 37,5$ об/с – $D_{30} = 1,8305$, $V_p = 50$ об/с – $D_{25} = 1,8296$). Особливості зміни максимальних величин ФР ФП такі ж, як і величин ФР ФП, наведених у табл. 4.4.

Таким чином, динаміка зміни величин ФР ФП при зміні часової затримки дозволяє досліджувати особливостей ДС при зондуванні одного ротора БПЛА, що обертається з різною швидкістю.

Розглянемо динаміку зміни величин ФР ФП при збільшенні кількості роторів на БПЛА, але при однаковій швидкості їх обертання [50]. На рис. 4.7 показано залежність змін величин ФР ФП (D) від величин часової затримки (T) під час зондування одного ротору № 1 (крива 1), двох роторів № 1, 2 (крива 2) і трьох роторів (крива 3), що обертаються з швидкістю 37,5 об/с.

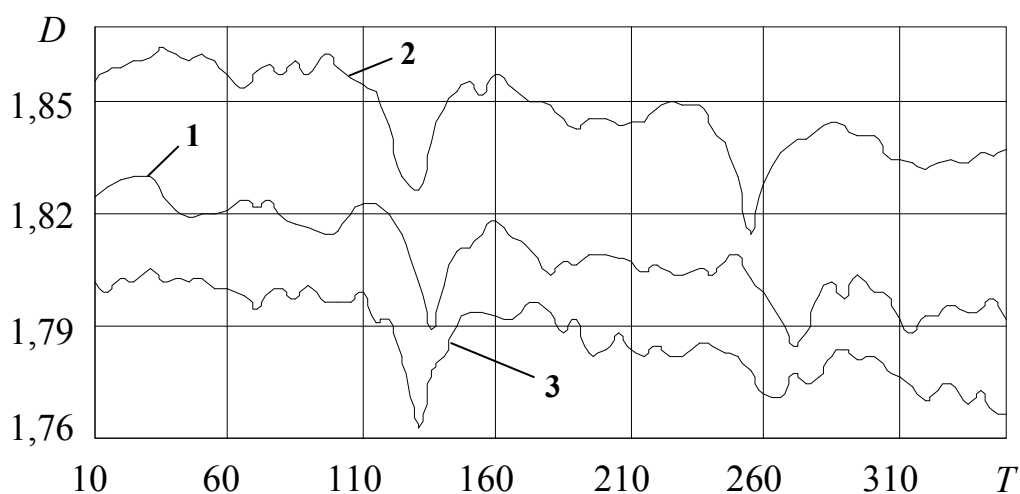


Рисунок 4.7 – Залежність змін величин ФР від величин часової затримки:
один ротор (1), два ротори (2), три ротори (3)

На рис. 4.7 видно, що величини ФР ФП при зондуванні двох і трьох роторів зменшуються із збільшенням величини T , також як і при зондуванні одного ротора. З ходу кривих також видно, що при зондуванні двох роторів величина ФР ФП більша, ніж при зондуванні одного і трьох роторів. Це, швидше за все, обумовлено взаємним розташуванням роторів і різним напрямом їх обертання, що впливає на структуру ДС. Оскільки швидкість обертання роторів була практично однаковою $V_p = 37,5$ об/с, то мінімальні значення ФР ФП з'являються періодично при часових затримках близьких до періоду ДС – приблизно 135 точок (один ротор – $D_{135} = 1,7891$, $D_{270} = 1,7843$, два ротори – $D_{130} = 1,8267$, $D_{255} = 1,8149$, три ротори – $D_{130} = 1,763$, $D_{265} = 1,7709$). На рис. 4.7 також видно, що максимальні значення ФР ФП з'являються при невеликих часових затримках (один ротор – $D_{30} = 1,8305$, два ротори – $D_{35} = 1,8646$, три ротори – $D_{30} = 1,805$). Особливості зміни максимальних величин ФР ФП такі ж, як і величин ФР ФП, наведених у табл. 4.4.

Розглянемо вплив взаємного розташування роторів і напряму їх обертання на величину ФР фазових портретів при збільшенні часових затримок, які використовуються при побудові ФП [50].

На рис. 4.8 показано залежності змін величин ФР (D) від величин часової затримки (T) під час зондування двох роторів № 1, 2 (крива 1), двох роторів № 1, 3 (крива 2), двох роторів № 2, 3 (крива 3), що обертаються з швидкістю 37,5 об/с. При цьому ротори № 1, 2 оберталися в один бік, а ротори № 1, 3 і № 2, 3 – в різні.

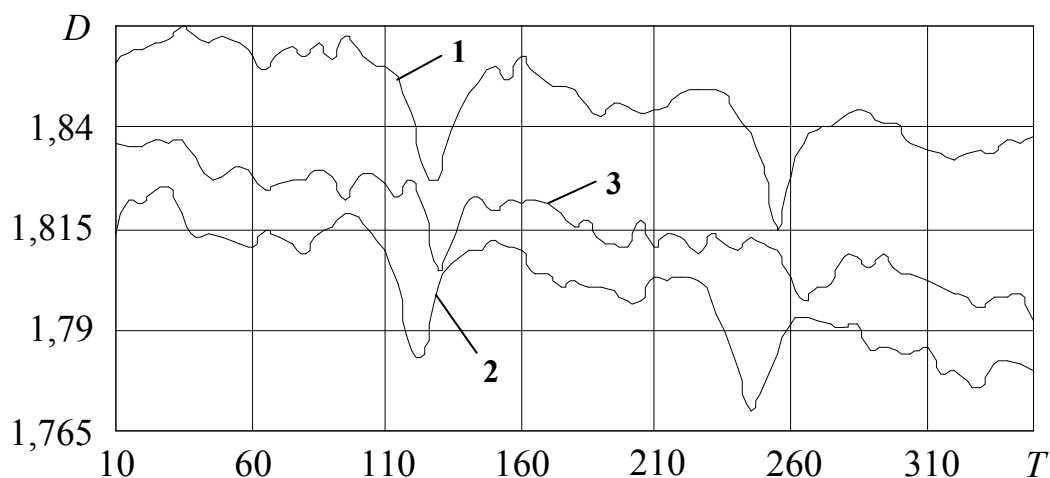


Рисунок 4.8 – Залежність змін величин ФР від величин часової затримки:
два ротори № 1, 2 (1), два ротори № 1, 3 (2), два ротори № 2, 3 (3)

На рис. 4.8 видно, що мінімальні значення ФР ФП з'являються періодично при часових затримках близьких до періоду ДС (ротори № 1, 2 – $D_{130} = 1,8267$, $D_{255} = 1,8149$, ротори № 1, 3 – $D_{125} = 1,7843$, $D_{245} = 1,7696$, ротори № 2, 3 – $D_{130} = 1,8045$, $D_{265} = 1,7975$), оскільки швидкість обертання роторів була практично однаковою $V_p = 37,5$ об/с. Найбільші значення ФР ФП спостерігаються при обертанні двох роторів № 1, 2. Як наголошувалося вище, це, швидше за все, обумовлено тим, що ці ротори обертаються в один бік, а їх взаємне розташування обумовлює складну структуру ДС. При зондуванні двох роторів, що обертаються в різні боки, але при схожому взаємному розташуванні (ротори № 1, 3 зміщені у напрямі до РЛС) величини ФР ФП будуть найменшими. Це зв'язано, швидше за все, з тим, що обертання роторів в різні боки приводить до руйнування структури ДС. Зміна взаємного розташування роторів при їх різнобічному обертанні (ротори № 2, 3 зміщені за азимутом) приводить до деякого збільшення величин ФР ФП. Але, вони менше ніж при зондуванні роторів № 1, 2, що обертаються в один бік.

На рис. 4.8 також видно, що максимальні значення ФР ФП, як і в попередніх випадках, з'являються при невеликих часових затримках (ротори № 1, 2 – $D_{35} = 1,8646$, ротори № 1, 3 – $D_{30} = 1,8251$, ротори № 2, 3 – $D_{35} = 1,8369$). Особливості зміни максимальних величин ФР ФП такі ж, як і величин ФР ФП, наведених у табл. 4.5.

Таким чином, проведений аналіз показує, що дослідження динаміки зміни величин ФР ФП дозволяє здійснити чисельну оцінку характеристик ДС. При цьому величини ФР ФП при зміні часової затримки залежать від геометричного розташування роторів БПЛА і напряму їх взаємного обертання.

Проведені дослідження дозволяють удосконалити метод аналізу сигналів, відбитих від мультироторного БПЛА, з використанням фазових портретів за рахунок визначення фрактальних розмірностей ДС і ФП [50]. Структурну схему методу фрактального аналізу складності фазових портретів ДС, відбитих від мультироторного БПЛА показано на рис. 4.9.

Перші п'ять етапів вдосконаленого методу співпадають з аналогічними етапами методу, розглянутого у підрозділі 3.1 (див. рис. 3.11).

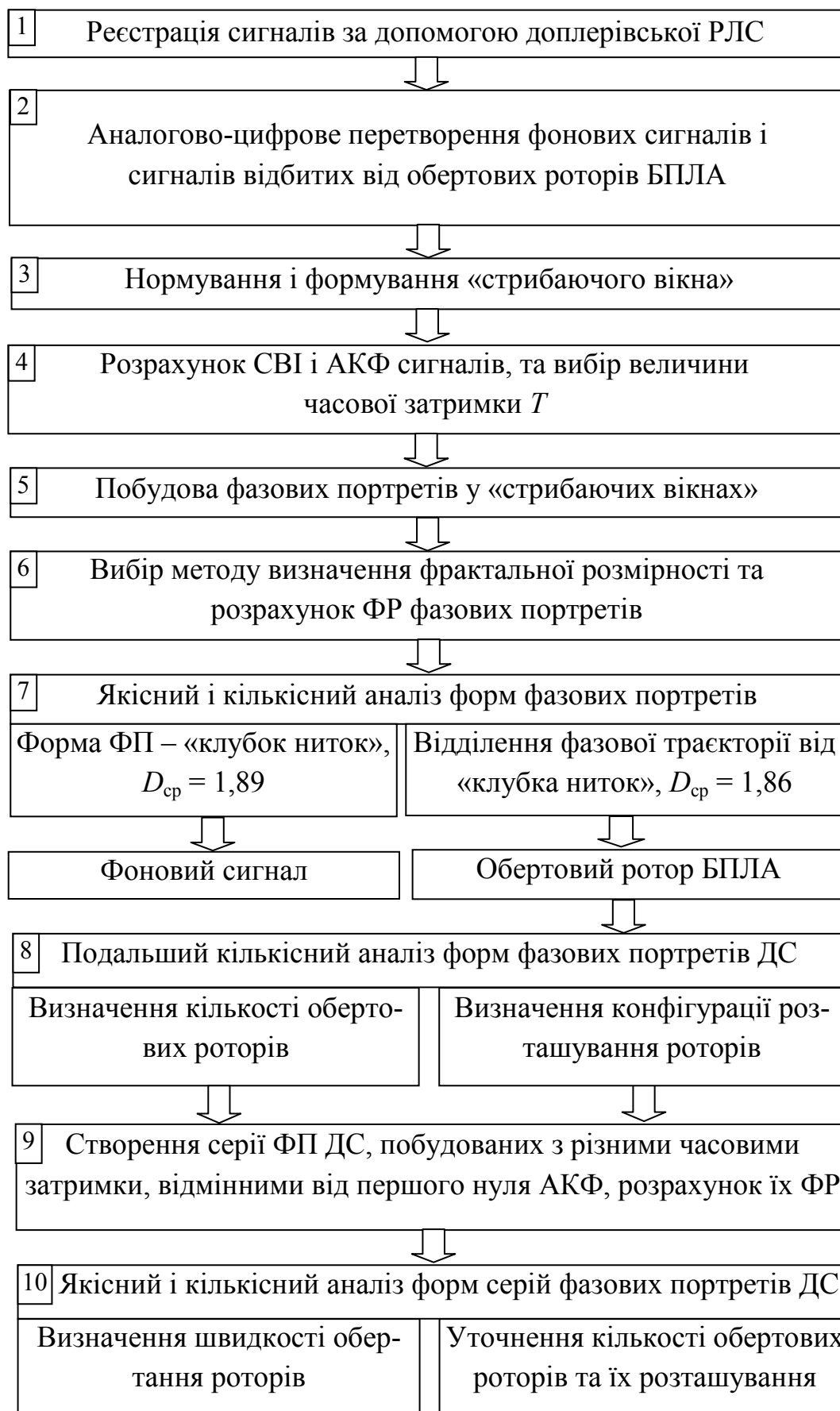


Рисунок 4.9 – Структурна схема методу фрактального аналізу складності фазових портретів доплерівських сигналів, відбитих від мультироторного БПЛА

На шостому етапі для чисельної оцінки складності ДС проводиться розрахунок ФР для ФП, побудованих на п'ятому етапі, а також обчислюється середнє значення ФР цих ФП. При цьому метод розрахунку ФР вибирається найбільш чутливий до зміни форм ФП ДС (метод покриття, метод довжини лінії і т. д.), а також спосіб апроксимації точок у вибраному методі розрахунку. На сьомому і восьмому етапах здійснюється якісний та кількісний аналіз складності форм ФП.

За характерними формами ФП, а також величинами ФР визначається відповідність ДС фону або БПЛА, а також визначається кількість обертових роторів БПЛА. На дев'ятому етапі створюється серії ФП, побудованих з часовими затримками, більшими першого нуля АКФ, і для кожного ФП розраховується ФР. Чисельні значення ФР ФП дозволяють підвищити достовірність результатів, отриманих на попередніх етапах. На десятому етапі здійснюється якісний та кількісний аналіз зміни форм серії ФП і величин ФР, і по періодичності появи схожих ФП і мінімальних значень ФР ФП, а також динаміки зміни форм ФП і величин ФР ФП під час зміни часової затримки оцінюється кількість і швидкість обертання роторів БПЛА [50].

Таким чином, удосконалений метод фрактального аналізу дозволяє здійснити кількісну оцінку складності ФП ДС, яка спільно з візуальним аналізом (якісною оцінкою) дозволяє визначити тип БПЛА і оцінити швидкість обертання роторів, а також розширити ознаки розпізнавання мультироторного БПЛА новими – величина фрактальної розмірності ФП та динаміка її зміни під час зміни часової затримки, що використовується під час побудови ФП. Розглянемо можливість застосування цих ознак для розпізнавання БПЛА з трьома і шістьма роторами та характеру їх руху.

4.2.2 Дослідження характеру руху мультироторного БПЛА з використанням фрактальних розмірностей фазових портретів

У підрозділі 4.1 було показано, що розрахунок ФР сигналів з виходу каналу фазового детектування РЛС дозволяє кількісно оцінити складність форми сигналів. Також показано, що відмінність у величинах ФР сигналів з виходу головних

телефонів при зондуванні фону і БПЛА може бути використане як ознака розпізнавання БПЛА мультироторного типу. У підрозділі 4.2.1 проведено аналіз зміни ФР фазових портретів при їх побудові з різними часовими затримкам. Розглянемо можливість визначення характеру руху мультироторного БПЛА з використанням фрактальних розмірностей ФП [54].

На рис. 4.10 показані ФП фонового сигналу (а), а також ФП сигналів при зондуванні БПЛА під час зависання (б) і рухомого БПЛА (в) при різних значеннях T . Докладний аналіз змін форм ФП від величин T наведено у підрозділі 3.2.

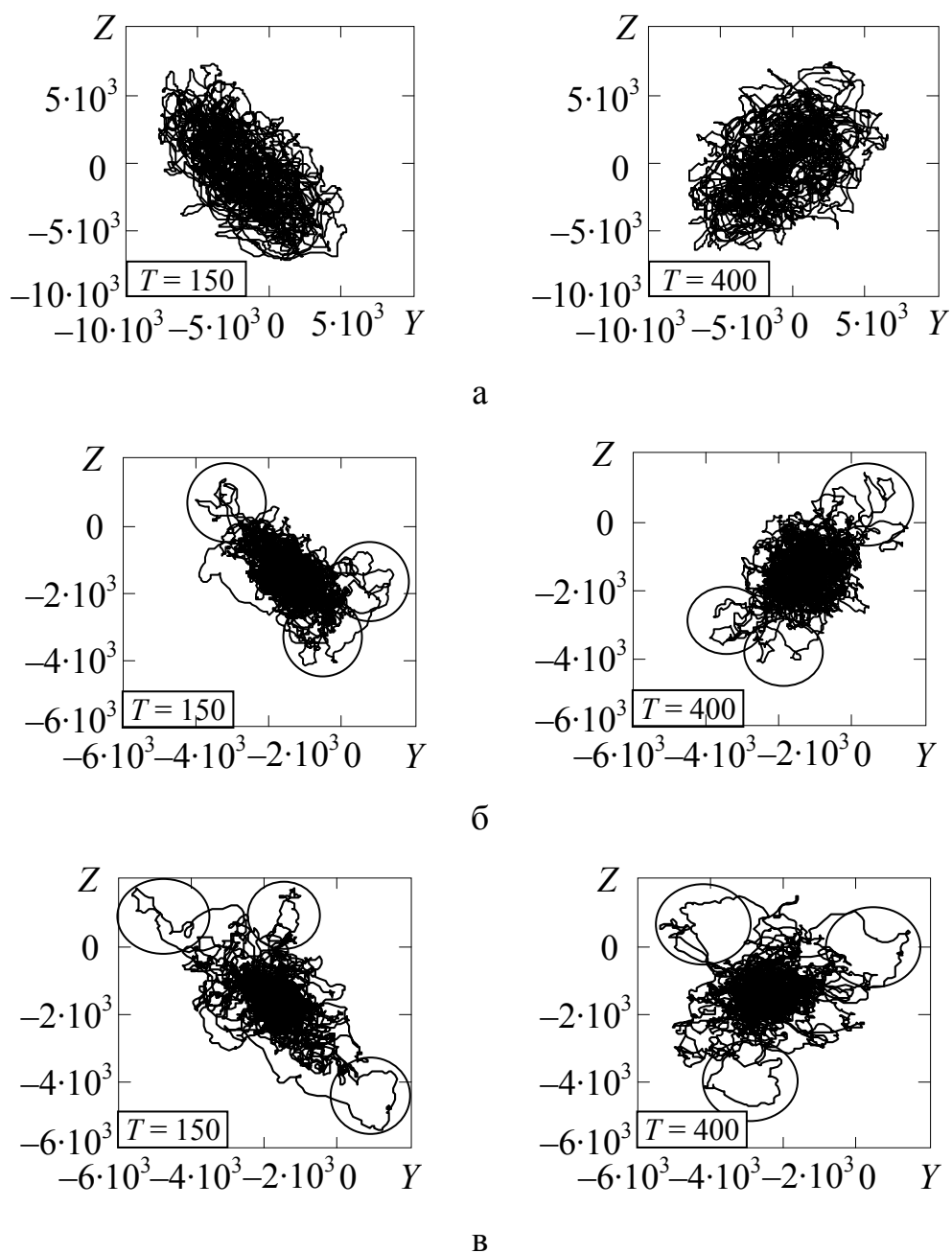


Рисунок 4.10 – Фазові портрети фонового сигналу (а), сигналів під час зондування завислого БПЛА (б) і рухомого БПЛА (в)

На рис. 4.10, а видно, що ФП фонового сигналу представляє згруповану ФТ в певній області ПФР, і його форму можна охарактеризувати, як випадковий рух зображаючої точки по ФТ. Крім того, на рис. 4.10, а видно, що форма ФП фонового сигналу при зміні величини T практично не змінюється, спостерігається тільки деяке подовження і поворот ФП (вліво або вправо) уздовж великої осі еліпса.

На ФП сигналів, обумовлених зависанням і рухом БПЛА (рис. 4.10, б і в), фоновий сигнал також концентрується в центрі ФП, а фазова траєкторія, яка характеризує обертання роторів і рух БПЛА, відображається на краях ФП, і виявляється у вигляді відділення ФТ від фонового ФП. При цьому на краях ФП рухомого БПЛА спостерігається складніший характер поведінки ФТ ніж при зависанні. Крім того, при побудові ФП сигналів, отриманих під час зависання і руху БПЛА, із зміною часової затримки на краях ФП виявляється концентрація ФТ в трьох областях ПФП. Розташування цих областей має трикутну форму, що нагадує форму БПЛА з трьома роторами [54].

Проаналізуємо величини ФР ФП, побудованих з різними T , а також можливість їх використання як ознаки розпізнавання мультироторного БПЛА [54]. Спочатку розрахуємо ФР ФП фонового сигналу при різних значеннях T з використанням методу покриття. Часову затримку T будемо змінювати з дискретністю 25 точок часового ряду. Результати розрахунків ФР ФП наведено у табл. 4.7. Як видно з табл. 4.7, ФР ФП при $T = 25$ точок носить аномальний характер, тобто сильно відрізняється від інших значень, тому надалі при малих часових затримках ($T < 50$) ФР розраховувати не доцільно. Також з даних наведених у табл. 4.7 видно, що ФР ФП при різних T змінюються. Максимальне ($D_{\text{макс}} = 1,9180$) і мінімальне ($D_{\text{мін}} = 1,8958$) значення ФР ФП позначені у таблиці сірим кольором. Таким чином, діапазон зміни ФР ФП при різних значеннях T складає $\Delta D_{\text{ф}} = 0,0222$.

Характер змін величин ФР ФП (D) під час зміни часової затримки (T) краще аналізувати за допомогою графічної залежності, яка показана на рис. 4.11. На рис. 4.11 видно, що найбільші коливання (зміни) ФР ФП спостерігаються при $T < 325$ точок часового ряду. При більших часових затримках величини ФР ФП наближуються до значення $D_{\text{ср,ф}} = 1,91 \pm 0,005$ [54]. На інтервалі часових затримок

від $T = 450$ до $T = 550$ діапазон зміни ФР ФП складає $\Delta D_{\phi} = D_{550} - D_{450} = 1,9131 - 1,9046 = 0,0085$.

Таблиця 4.7 – Величини ФР фазових портретів фонового сигналу

Значення часової затримки, T	Значення ФР фазових портретів	Значення часової затримки, T	Значення ФР фазових портретів
25	1,8767	300	1,9142
50	1,9054	325	1,9108
75	1,9180	350	1,9080
100	1,9145	375	1,9088
125	1,9077	400	1,9078
150	1,8983	425	1,9047
175	1,8958	450	1,9046
200	1,9000	475	1,9088
225	1,9055	500	1,9112
250	1,9107	525	1,9127
275	1,9127	550	1,9131

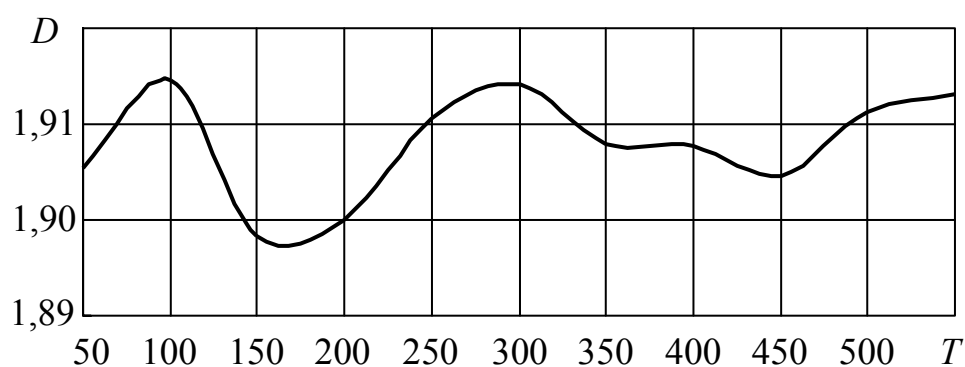


Рисунок 4.11 – Залежність величини ФР ФП фонового сигналу від T

Таким чином, аналіз даних табл. 4.7 і рис. 4.11 показує, що ФР ФП фонового сигналу при зміні часової затримки змінюється не значно, і може бути оцінена як $D_{\phi} = 1,91 \pm 0,005$, що надалі можна використовувати при розрізненні фонового сигналу і сигналу, обумовленого рухомим БПЛА.

Оцінимо величини ФР ФП сигналів при зондуванні мультироторного БПЛА під час його зависання і руху [54]. Для цього розрахуємо ФР ФП за допомогою методу покриття. У табл. 4.8 приведені величини ФР ФП сигналів при зондуванні завислого БПЛА і рухомого БПЛА при різних T . Часова затримка T , також як і при дослідженні ФР ФП фоновому сигналу, змінювалася з дискретністю 25 точок. Фрактальна розмірність ФП при $T = 25$ точок (аномальна) не розраховувалася.

Таблиця 4.8 – Величини ФР ФП сигналів при зондуванні завислого і рухомого БПЛА

Завислий БПЛА		Рухомий БПЛА	
Значення часової затримки, T	Значення ФР фазових портретів	Значення часової затримки, T	Значення ФР фазових портретів
50	1,8529	50	1,8579
75	1,8652	75	1,8662
100	1,8598	100	1,8622
125	1,8458	125	1,8513
150	1,8356	150	1,8449
175	1,8360	175	1,8521
200	1,8394	200	1,8580
225	1,8510	225	1,8607
250	1,8579	250	1,8628
275	1,8576	275	1,8638
300	1,8568	300	1,8621
325	1,8545	325	1,8605
350	1,8499	350	1,8624
375	1,8494	375	1,8647
400	1,8515	400	1,8656
425	1,8539	425	1,8665
450	1,8568	450	1,8672
475	1,8563	475	1,8660
500	1,8551	500	1,8656
525	1,8514	525	1,8678
550	1,8491	550	1,8665

З даних табл. 4.8 видно, що ФР ФП сигналів при зондуванні мультироторного БПЛА також змінюються під час зміни T . Максимальні і мінімальні значення ФР ФП позначені у таблиці сірим кольором. Діапазон зміни ФР ФП при різних значеннях T склав для завислого БПЛА $\Delta D_3 = 0,0296$, а для рухомого – $\Delta D_p = 0,0229$. Крім того, необхідно зазначити, що максимальне значення ФР ФП сигналу, обумовленого рухом БПЛА ($D_{\text{макс}} = 1,8678$), спостерігається не при значенні $T = 75$ точок, як у фоновому сигналу і сигналу, обумовленого зависанням БПЛА, (хоча при такому T воно також велике $D_{75} = 1,8662$), а при $T = 525$. Це обумовлено, швидше за все, складнішою поведінкою ФТ під час руху БПЛА.

Таким чином, мінімальні значення ФР ФП сигналів при зондуванні мультироторного БПЛА спостерігаються при $T = 150 \pm 25$ точок, а максимальні, в основному, – при $T = 75 \pm 25$ точок. Діапазон зміни ФР ФП сигналів, обумовлених зависанням і рухом БПЛА, при зміні часових затримок не сильно відрізняється від діапазону зміни ФР ФП фоновому сигналу.

Для оцінки характеру змін величин ФР ФП аналізованих сигналів побудуємо їх залежність від значень часової затримки, яка показана на рис. 4.12. На рисунку крива 1 відповідає змінам ФР ФП завислого БПЛА, крива 2 – рухомого БПЛА. Для спрощення порівняння на рисунку наведено зміни ФР ФП фоновому сигналу – крива 3. Як видно з ходу кривих найбільші коливання (зміни) ФР ФП сигналів, обумовлених БПЛА, також як і фоновому сигналу, спостерігаються при $T < 325$ точок. При більших T величини ФР ФП аналізованих сигналів прагнуть до сталих значень, які відрізняються для фону і різного характеру руху БПЛА.

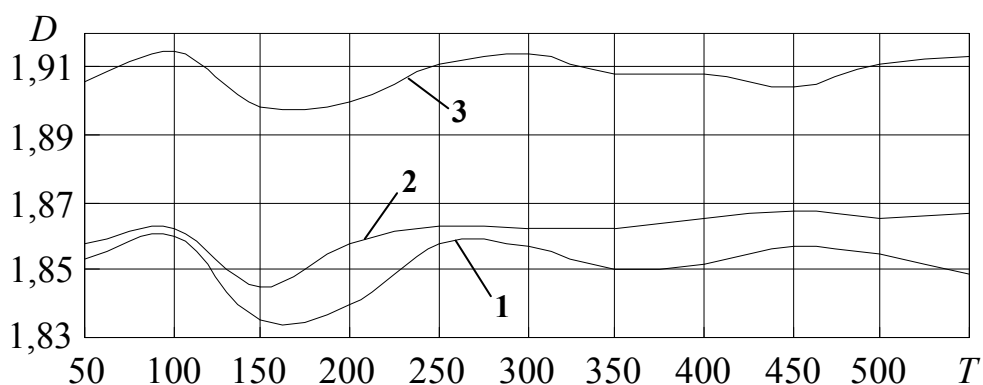


Рисунок 4.12 – Залежність величин ФР ФП сигналів від часової затримки: завислий БПЛА (крива 1), рухомий БПЛА (крива 2), фоновий сигнал (крива 3)

З даних табл. 4.8 і рис. 4.12 видно, що ФР ФП сигналу, обумовленого зави-
санням БПЛА, при збільшенні T прагнуть до середнього значення
 $D_{\text{ср.з}} = 1,853 \pm 0,005$, а ФР ФП сигналу, обумовленого рухом БПЛА, – до
 $D_{\text{ср.р}} = 1,865 \pm 0,005$. У той же час ФР ФП фоновому сигналу при збільшенні T пра-
гнуть до значення $D_{\text{ср.ф}} = 1,91 \pm 0,005$.

Оцінімо діапазон зміни ФР ФП, обумовлених БПЛА, на інтервалі часових
затримок від $T = 450$ до $T = 550$. Так при зависанні БПЛА діапазон зміни ФР ФП
складає $\Delta D_z = D_{450} - D_{550} = 1,8568 - 1,8491 = 0,0077$, а при русі БПЛА –
 $\Delta D_p = D_{550} - D_{450} = 1,8678 - 1,8624 = 0,0054$. Як наголошувалося вище, діапазон
зміни ФР ФП фоновому сигналу складає $\Delta D_f = 0,0085$. Порівняльний аналіз даних
табл. 4.7 і табл. 4.8, а також даних на рис. 4.12, показують, що відмінність у вели-
чинах ФР ФП сигналів, обумовлених зависанням і рухом БПЛА, дозволяють ви-
значити характер руху БПЛА, що не вдається здійснити по величині ФР відповід-
них сигналів.

Таким чином, дослідження характеру руху мультироторного БПЛА з вико-
ристанням ФР ФП з використанням удосконаленого методу фрактального аналізу
показали, що ФР ФП фонових сигналів відрізняється від ФР ФП сигналів, отри-
маних при зондуванні завислого і рухомого БПЛА. Відмінності у величинах ФР
дозволяють розділити фон та БПЛА з різним характером їх руху. Представляє
практичний інтерес оцінити можливість використання розробленого методу для
визначення типу мультироторного БПЛА.

4.3 Розпізнавання типу мультироторного БПЛА з використанням величин фрактальних розмірностей фазових портретів доплерівських сигналів

У підрозділі 4.2 було показано, що ФР ФП сигналів, отриманих під час зон-
дування БПЛА з трьома роторами, відрізняється від ФР ФП фонових сигналів. Ро-
зглянемо відмінності ФР ФП сигналів, відбитих БПЛА з різною кількістю роторів
(трима і шістьма) під час зміни величин T [56]. Детальний аналіз форм ФП ДС,
відбитих від таких БПЛА, при різних значеннях T , проведено у підрозділі 3.3

(див. аналіз рис. 3.25 і рис. 3.26). Аналіз форм ФП показав, що при зміні часової затримки ФТ, обумовлена фоном, групується в центрі ФП у вигляді «клубка ниток», а обумовлена зависанням і рухом БПЛА – розташовується на краях ФП. При цьому ФТ сигналу при зондуванні БПЛА з трьома роторами групується в трьох областях ФП, а при зондуванні БПЛА з шістьма роторами – в шести областях, що нагадує в деякому роді форми БПЛА з трьома і шістьма роторами.

Оцінімо складність форм ФП ДС при зондуванні БПЛА з трьома і шістьма роторами при їх зависанні і русі з використанням фрактальної розмірності [56]. Фрактальна розмірність визначалася з використанням методу покриття.

У табл. 4.9 наведено результати розрахунку величин ФР ФП сигналів при зондуванні завислих БПЛА з трьома (18-е «вікно») і шістьма (7-е «вікно») роторами при різних T . Часова затримка змінювалася з дискретністю 25 точок. Раніше зазначалося, що ФР ФП при $T = 25$ точок має аномальний характер, тому при $T = 25$ ФР ФП не розраховувалася. З даних табл. 4.9 видно, що ФР ФП сигналів при зондуванні мультироторних БПЛА змінюються із зміною T . Максимальні і мінімальні значення ФР ФП позначені у таблиці сірим кольором. Мінімальні значення ФР спостерігаються при невеликих значеннях часової затримки $T = 100$ точок, а максимальні значення в діапазоні $150 < T < 200$. Ширина діапазону зміни ФР ФП для завислого БПЛА з трьома роторами склала $\Delta D_3 = D_{75} - D_{175} = 1,8625 - 1,8377 = 0,0248$, а з шістьма – $\Delta D_6 = 0,0257$, тобто діапазони приблизно однакові.

Проаналізуємо характер змін величин ФР ФП від значень часової затримки за допомогою графічної залежності, яку показано на рис. 4.13 (крива 1 – відповідає БПЛА з трьома роторами, а крива 2 – з шістьма) [56]. На рис. 4.13 видно, що найбільші коливання (зміни) ФР ФП спостерігаються при $T < 250$ точок. При більших T величина ФР ФП сигналів при зондуванні БПЛА з трьома роторами прагне до значення $D_{cp,3} = 1,85 \pm 0,005$, а з шістьма – до $D_{cp,6} = 1,84 \pm 0,005$ [56]. Така поведінка ФР обумовлена відмінностями і складністю форм ФП сигналів при зондуванні БПЛА з трьома і шістьма роторами. Тобто, ФП сигналів, відбитих від БПЛА з трьома роторами, є більш згрупованими (щільними) і відділення ФТ спостерігається тільки у 3 – 4 областях, а ФП сигналів, відбитих від БПЛА з шістьма

роторами, є менш згрупованими (розрідженими) у 6 областях. Тому величина ФР ФП сигналів БПЛА з трьома роторами більше, ніж ФП сигналів БПЛА з шістьма роторами.

Таблиця 4.9 – Величини ФР ФП сигналів при зондуванні завислих БПЛА з трьома і шістьма роторами

БПЛА з трьома роторами		БПЛА з шістьма роторами	
Значення часової затримки, T	Значення ФР фазових портретів	Значення часової затримки, T	Значення ФР фазових портретів
50	1,8535	50	1,8417
75	1,8625	75	1,8527
100	1,8580	100	1,8532
125	1,8469	125	1,8491
150	1,8390	150	1,8424
175	1,8377	175	1,8327
200	1,8420	200	1,8275
225	1,8502	225	1,8359
250	1,8552	250	1,8431
275	1,8537	275	1,8490
300	1,8537	300	1,8477
325	1,8516	325	1,8481
350	1,8476	350	1,8459
375	1,8427	375	1,8396
400	1,8501	400	1,8355
425	1,8515	425	1,8376
450	1,8529	450	1,8419
475	1,8536	475	1,8478
500	1,8486	500	1,8448
525	1,8490	525	1,8443
550	1,8452	550	1,8442

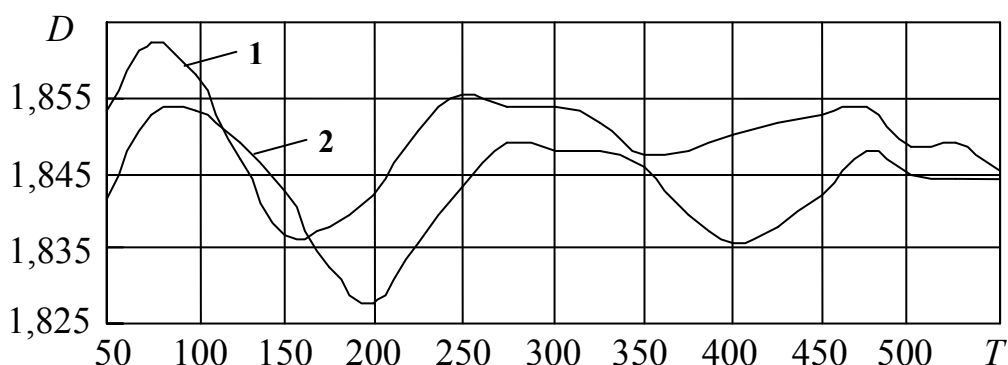


Рисунок 4.13 – Залежність величин фрактальної розмірності ФП сигналів, відбитих від завислих БПЛА, від зміни часової затримки: БПЛА з трьома роторами (крива 1), БПЛА з шістьма роторами (крива 2)

Таким чином, аналіз даних табл. 4.9 і рис. 4.13 показує, що ФР ФП сигналів при зондуванні завислих БПЛА з трьома і шістьма роторами відрізняються, що може бути використано під час розпізнавання типу мультироторного БПЛА.

У табл. 4.10 наведено результати розрахунку величин ФР ФП сигналів при зондуванні рухомих БПЛА з трьома (17-е «вікно») і шістьма (14-е «вікно») роторами при різних часових затримках T . З даних табл. 4.10 видно, що характер змін ФР ФП сигналів при зондуванні рухомих БПЛА такий же, як і при зондуванні завислих БПЛА. Мінімальні і максимальні значення ФР ФП також спостерігаються при невеликих значеннях часової затримки – $T = 100$ і $150 < T < 200$ точок, відповідно. Ширина діапазонів змін ФР ФП сигналів, відбитих від рухомих БПЛА, також відрізняються не значно. Відповідно для БПЛА з трьома роторами вона складає $\Delta D_3 = 0,0283$, а з шістьма – $\Delta D_6 = 0,0212$.

На рис. 4.14 показано характер зміни величини ФР ФП сигналів, відбитих від рухомих БПЛА, від значення часової затримки (крива 1 – відповідає БПЛА з трьома роторами, а крива 2 – з шістьма). На рис. 4.14 видно, що і під час руху БПЛА найбільші коливання ФР ФП також спостерігаються при $T < 250$ точок часового ряду. При більших T величина ФР ФП сигналів при зондуванні БПЛА з трьома роторами прагне до значення $D_{\text{ср.3}} = 1,86 \pm 0,005$, а з шістьма – до $D_{\text{ср.6}} = 1,875 \pm 0,005$ [56]. Як було показано вище, при зависанні БПЛА відповідні середні значення ФР були меншими. Це обумовлено тим, що під час руху БПЛА

форми ФП сигналів стають більш складними. Так ФП сигналів, відбитих від рухомих БПЛА займають значну частину ПФП, що і обумовлює великі значення ФР.

Таблиця 4.10 – Величини ФР ФП сигналів при зондуванні рухомих БПЛА з трьома і шістьма роторами

БПЛА з трьома роторами		БПЛА з шістьма роторами	
Значення часової затримки, T	Значення ФР фазових портретів	Значення часової затримки, T	Значення ФР фазових портретів
50	1,8612	50	1,8752
75	1,8720	75	1,8831
100	1,8735	100	1,8859
125	1,8650	125	1,8787
150	1,8553	150	1,8686
175	1,8454	175	1,8647
200	1,8452	200	1,8695
225	1,8519	225	1,8789
250	1,8571	250	1,8765
275	1,8679	275	1,8815
300	1,8723	300	1,8800
325	1,8684	325	1,8799
350	1,8660	350	1,8794
375	1,8603	375	1,8771
400	1,8567	400	1,8781
425	1,8567	425	1,8772
450	1,8610	450	1,8777
475	1,8654	475	1,8784
500	1,8690	500	1,8795
525	1,8696	525	1,8788
550	1,8635	550	1,8767

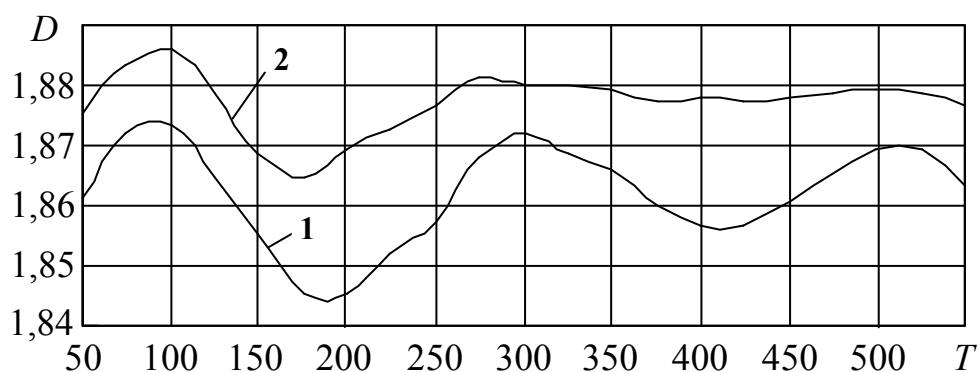


Рисунок 4.14 – Залежність величин ФР ФП сигналів, відбитих від рухомих БПЛА, від зміни часової затримки: БПЛА з трьома роторами (крива 1), БПЛА з шістьма роторами (крива 2)

Також на відміну від завислих БПЛА, ФП сигналів рухомого БПЛА з шістьма роторами стають складнішими, ніж ФП сигналів БПЛА з трьома роторами. Тому під час руху БПЛА величина ФР ФП сигналів БПЛА з шістьма роторами більше, ніж ФП сигналів БПЛА з трьома роторами.

Таким чином, аналіз даних табл. 4.10 і рис. 4.14 показує, що ФР ФП сигналів при зондуванні рухомих БПЛА з трьома і шістьма роторами, також як і завислих БПЛА, відрізняються, що також може бути використане під час розпізнавання типу мультироторних БПЛА.

Покажемо на одному рисунку залежності змін величин ФР ФП сигналів, відбитих від завислих і рухомих БПЛА з трьома і шістьма роторами, від значення T (рис. 4.15). На рисунку крива 1 – відповідає рухомому БПЛА з трьома роторами, крива 2 – рухомому БПЛА з шістьма роторами, крива 3 – завислого БПЛА з трьома роторами, а крива 4 – завислого БПЛА з шістьма роторами. На рис. 4.15 видно, що при $T < 250$ точок для всіх досліджуваних сигналів чисельні значення ФР ФП мають значні коливання. Тому при таких T проводити розпізнавання типу БПЛА з використанням ФР ФП не доцільно. Розпізнавання типу мультироторного БПЛА можливо при $T > 300$ точок. При цьому середні значення ФР ФП сигналів відрізняються ($D_{зкр.3} = 1,85$; $D_{зкр.6} = 1,84$; $D_{ркр.3} = 1,86$; $D_{ркр.6} = 1,875$), що дозволяє за їх величиною визначити тип мультироторного БПЛА і характер його руху. Якість розпізнавання збільшиться, якщо при цьому здійснювати аналіз форм ФП.

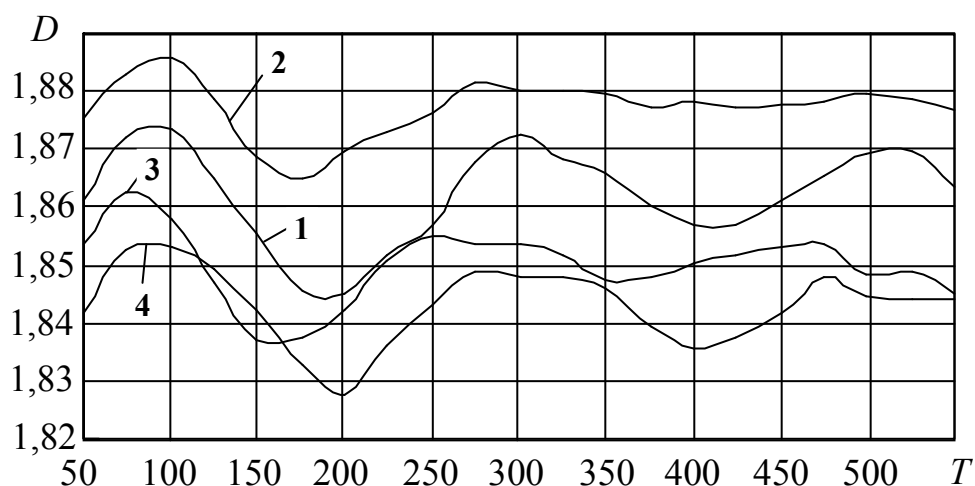


Рисунок 4.15 – Залежність величин ФР ФП сигналів, відбитих від завислих і рухомих БПЛА, від зміни часої затримки: рухомий БПЛА з трьома роторами (крива 1), рухомий БПЛА з шістьма роторами (крива 2), завислий БПЛА з трьома роторами (крива 3), завислий БПЛА з шістьма роторами (крива 4)

Таким чином, проведений аналіз показує, що цьому середні значення ФР ФП сигналів відрізняються ($D_{зср.3} = 1,85$; $D_{зср.6} = 1,84$; $D_{рсп.3} = 1,86$; $D_{рсп.6} = 1,875$), що дозволяє запропонувати методику за розпізнавання типу мультироторного БПЛА і характер його руху за величиною ФР і формою ФП, побудованих при різних часових затримках [62].

Спочатку для кожного положення «стрибаючого вікна» будується ФП ДС з часою затримкою від $T = 50$ до $T = 200$ з дискретністю $\Delta T = 25$ точок, а також обчислюється середнє значення ФР цих ФП. За формою ФП (якісна ознака) і величиною ФР ФП (кількісна ознака) оператор приймає рішення про те, сигнал є фоновим або обумовлений рухом мультироторного БПЛА. Якщо ФТ концентрується в трьох областях на краях ФП, то сигнал обумовлений БПЛА з трьома роторами, а якщо у шості – то, обумовлений БПЛА з шістьма роторами. У подальшому для визначення характеру руху БПЛА будуються шість ФП при великих часових затримках від $T = 300$ до $T = 425$ з дискретністю $\Delta T = 25$ точок. Після цього оператор аналізує зміну форм ФП і середніх величин ФР ФП. Аналіз середніх значень ФР ФП сигналів дозволяє підвищити якість розпізнавання типу БПЛА, а також характеру його руху ($D_{зср.3} = 1,85$; $D_{зср.6} = 1,84$; $D_{рсп.3} = 1,86$; $D_{рсп.6} = 1,875$).

Запропонована методика дозволяє розділити фонові сигнали і сигнали, обумовлені зависанням і рухом мультироторного БПЛА з використанням форми ФП (якісна ознака) і величини ФР ФП (кількісна ознака).

4.4. Оцінка ефективності розпізнавання типу мультироторного БПЛА з використанням фрактального методу аналізу фазових портретів

Для оцінки ефективності розробленого методу розпізнавання будемо використовувати основний показник – ймовірність правильного розпізнавання (ЙПР) [30, 31]. У зв'язку з тим, що аналітичні методи оцінювання ЙПР отримати дуже складно, то основним способом оцінки ефективності розпізнавання є моделювання процесу розпізнавання на основі прямого статистичного експерименту. Даний експеримент проводився на базі персонального комп'ютера з використанням доплерівських сигналів, отриманих за допомогою РЛС розвідки наземних цілей РЛ133 «Кредо», та застосування методу статистичних випробувань (метод Монте-Карло) [164]. Розглянемо методику проведення статистичних випробувань.

Під час використання методу Монте-Карло спочатку необхідно визначити число випробувань для того, щоб його характеристики були визначені із заданою точністю. Якщо в результаті N реалізацій (випробувань) частота події A вийшла рівною p , то дійсне значення ймовірності події A практично буде у межах [164]

$$p \pm 2\sqrt{\frac{p(1-p)}{N}}. \quad (4.1)$$

Для того, щоб максимальна практично можлива помилка у визначенні ймовірності події A була не більше Δ потрібно здійснити не менше ніж [164]

$$N = \frac{4p(1-p)}{\Delta^2} \quad (4.2)$$

реалізацій, де p – шукана ймовірність події.

Аналіз виразу (4.2) показує, що при малих значеннях можливої помилки розпізнавання $\Delta < 10^{-3}$ необхідно проводити дуже велику кількість випробувань,

наприклад, при $P_{роз} = 0,9$ і $\Delta = 10^{-4}$ необхідно провести порядка чотирьох мільйонів випробувань. Оскільки для проведення розпізнавання БПЛА з використанням розроблених методів необхідний деякий час, то комп'ютерний експеримент проводився тільки для двох значень можливої помилки селекції $\Delta_1 = 10^{-2}$ і $\Delta_2 = 10^{-3}$ для $P_{роз} = 0,9$. При цьому випробування проводилися $N_1 = 3600$ і $N_2 = 360\ 000$ разів відповідно.

Методика проведення випробувань полягала в наступному:

1. Створюється база тестових фазових портретів ДС, отриманих експериментально, у кількості 100 різноманітних ФП для кожного типу руху БПЛА (зависання, рух у напрям РЛС) і типу БПЛА (з трьома і шістьма роторами). В загалі було побудовано 400 тестових ФП. При цьому кількість точок часового ряду під час побудови ФП дорівнювала 8 192, а часова затримка вибиралася рівною $T = 350$ точок при якій найбільше проявляються особливості форми ФП, обумовлені типом мультироторного БПЛА. Також для ДС під час руху БПЛА з трьома і шістьма роторами за допомогою ШПФ (8 192 точок) створюється база тестових спектрів ДС (побудовано 200 тестових спектрів). По-третє створюється база тестових ФП з різним відношенням сигнал/шум (ФПВСШ). Задане значення нормально розподіленого шуму додавалося до експериментально отриманого ДС під час руху БПЛА з трьома і шістьма роторами, а потім будувався ФП (побудовано 600 тестових ФПВСШ з відношенням сигнал/шум 5 дБ, 10 дБ і 15 дБ).

2. Вибираються пороги з якими будуть порівнюватися розраховані ФР ФП і ширина спектру ДС. Порогові значення ФР при розпізнаванні завислого БПЛА з трьома роторами були у межах $D_{3нор}^{завис} = 1,85 \pm 0,005$, з шістьма – $D_{6нор}^{завис} = 1,84 \pm 0,005$, рухомого БПЛА з трьома роторами – у межах $D_{3нор}^{рух} = 1,86 \pm 0,005$, а з шістьма – $D_{6нор}^{рух} = 1,875 \pm 0,005$. Порогові значення ширини спектрів при розпізнаванні рухомого БПЛА з трьома роторами були у межах $S_{3нор}^{рух}$ від 16 до 26 дискрети, а з шістьма $S_{6нор}^{рух}$ – від 14 до 30 дискрети. Величини порогів вибиралися під час попередньої обробки експериментальних сигналів.

3. Випадковим чином з бази тестових ФП (спектрів, ФПВСШ) вибирається один з ФП (спектр, ФПВСШ), який відповідає конкретному БПЛА і характеру його

го руху, і розраховується його ФР (ширина спектру, ФР ФПВСШ), яка порівнюється з відповідним пороговим значенням. Якщо значення ФР (ширини спектру, ФР ФПСШ) відповідає заданим межах порогу, то визначається подія A – правильне розпізнавання БПЛА. Як події A використовувався по-перше факт правильного визначення типу БПЛА при фрактальному аналізі ДС, по-друге факт правильного визначення типу БПЛА за шириною спектру ДС і по-третє факт правильного визначення типу БПЛА при різних значеннях відношення сигнал/шум.

3. Пункти 1 і 2 повторювалися $N_1 = 3600$ і $N_2 = 360\,000$ разів, що відповідало помилкам $\Delta_1 = 10^{-2}$ і $\Delta_2 = 10^{-3}$, при цьому час проведення кожного випробування склало приблизно 28 хвилин і 39 годин відповідно. Загальна кількість експериментів дорівнювала двадцяти чотирьом.

4. Після відпрацювання пунктів 1-3 підраховується кількість правильних рішень про розпізнавання типу БПЛА та характеру його руху n . Якщо рішення приймається правильно, то значення n збільшується на одиницю, якщо ж рішення помилкове, то одиниця не додається.

5. Знаходиться відношення правильних рішень розпізнавання типу БПЛА n і загального числа випробувань N

$$P_{роз} = \frac{n}{N}. \quad (4.3)$$

а також помилка розпізнавання

$$\Delta_{роз} = 2\sqrt{\frac{P_{роз}(1-P_{роз})}{N}}. \quad (4.4)$$

Отримана статистична оцінка ймовірність $P_{роз}$ (4.3) береться за ймовірність правильного розпізнавання із помилкою $\Delta_{роз}$ (4.4).

Чисельні значення ЙПР типу БПЛА з трьома і шістьма роторами з використанням фрактальної розмірності ФП, отримані в результаті проведення статистичного експерименту, наведено у табл. 4.11.

Таблиця 4.11 – Ймовірність правильного розпізнавання типу БПЛА з використанням ФР ФП

Можлива помилка розпізнавання	Тип БПЛА та характер його руху			
	З трьома роторами		З шістьма роторами	
	Зависання	Рух	Зависання	Рух
$\Delta = 10^{-2}$	0,82263	0,83875	0,84675	0,86125
$\Delta = 10^{-3}$	0,8108075	0,8243421	0,835125	0,8511438

Аналіз даних табл. 4.11 показує, що використання ФР для розпізнавання типу БПЛА забезпечує ЙПР не менше $P_{роз} = 0,82$ при $\Delta = 10^{-2}$ і $P_{роз} = 0,81$ при $\Delta = 10^{-3}$. Застосування спектрального аналізу з використанням ШПФ дозволяє провести аналіз форми спектру та визначити його ширину. Проведемо порівняння ЙПР запропонованої методики розпізнавання з використанням ФР ФП і аналізу ширини спектру сигналу з виходу ФД шляхом проведення статистичного експерименту. Під час експерименту ширина спектру визначалася на рівні 0,5 від максимальної величини спектру. Рішення про правильне розпізнавання приймалося, якщо ширина спектру сигналу з виходу ФД була у межах порогових значень. Чисельні значення ЙПР рухомого БПЛА з трьома і шістьма роторами, отримані з використанням ФР ФП і ширини спектру ДС наведено у табл. 4.12.

Таблиця 4.12 – Ймовірність правильного розпізнавання типу рухомого БПЛА з використанням ФР ФП і ширини спектру ДС

Можлива помилка розпізнавання	Тип рухомого БПЛА			
	З трьома роторами		З шістьма роторами	
	Ширина спектру	ФР фазового портрету	Ширина спектру	ФР фазового портрету
$\Delta = 10^{-2}$	0,56631	0,83875	0,52752	0,86125
$\Delta = 10^{-3}$	0,5611087	0,8243421	0,5125237	0,8511438

Аналіз даних табл. 4.12 показує, що використання ширини спектру ДС в якості ознаки розпізнавання не дозволяє здійснити розрізнення типу рухомого БПЛА у зв'язку з тим, що ЙПР не перевищує $P_{роз} = 0,57$. У той же час викорис-

тання ФР ФП для розпізнавання забезпечує величину ЙПР не менше $P_{роз} = 0,81$ в розглянутих вище умовах.

Проведемо дослідження впливу відношення сигнал/шум на ЙПР за допомогою комп'ютерного експерименту. Тестова вибірка формувалася в результаті складання часової вибірки ДС, отриманої в результаті проведення натурного експерименту і вибірки випадкових чисел, отриманих з використанням вбудованої функції створення векторів з нормальним законом розподілу $\text{norm}(N, m, \sigma)$ системи математичних обчислень Mathcad. Як зазначалося вище, тестові вибірки формувалися для трьох значень відношення сигнал/шум 5 дБ, 10 дБ і 15 дБ. Далі для тестових вибірок будувалися ФП, які оброблялися з використанням ФР. Відповідно до методики оцінки ЙПР, наведеної вище, були отримані криві ЙПР рухомих БПЛА з трьома і шістьма роторами, які наведено на рис. 4.16 при різних значеннях помилки розпізнавання $\Delta_1 = 10^{-2}$ і $\Delta_2 = 10^{-3}$.

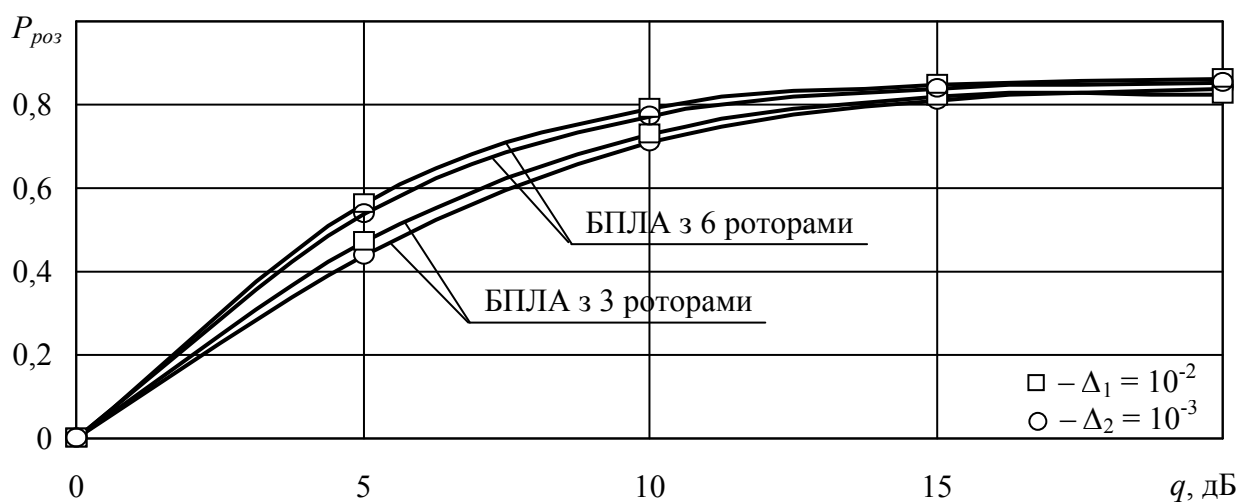


Рисунок 4.16 – Залежності ймовірності правильного розпізнавання БПЛА з трьома і шістьма роторами

Аналіз даних на рис. 4.16 показує, що ЙПР при відношеннях сигнал/шум більше 10 дБ складає не менше $P_{роз} = 0,75$, крім того, ЙПР зменшується не значно із збільшенням кількості роторів БПЛА. Зміна необхідної величини помилки розпізнавання ($\Delta_1 = 10^{-2}$ або $\Delta_2 = 10^{-3}$) практично не впливає хід кривих ЙПР.

Таким чином, використання у якості ознаки розпізнавання величини фрактальної розмірності фазових портретів ДС при розпізнаванні типу мультироторного БПЛА дозволяє забезпечити ЙПС не менше $P_{роз} = 0,75$ при відношеннях сигнал/шум 10 дБ і вище.

Висновки з розділу 4

1. Для кількісної оцінки складності доплерівських сигналів відбитих від обертових роторів БПЛА та їх фазових портретів пропонується використовувати величину фрактальної розмірності.

2. Встановлено, що значення фрактальних розмірностей ДС збільшуються при збільшенні швидкості обертання ротора БПЛА, а також те, що при збільшенні кількості обертових роторів величини ФР залежать від напряму обертання роторів та їх геометричного розташування.

3. Досліджені особливості ДС фазових портретів, побудованих з різними часовими затримками, при зондуванні обертових роторів БПЛА із використанням величин фрактальних розмірностей. Показано, що зміни форм ФП і значень фрактальних розмірностей ФП можуть бути використані як ознаки розпізнавання мультироторних БПЛА.

4. Запропоновано метод фрактального аналізу складності фазових портретів доплерівських сигналів, відбитих від мультироторного БПЛА, який дозволяє визначити кількість обертових роторів на БПЛА і оцінити швидкість їх обертання.

5. Відмінність у величинах фрактальних розмірностей сигналів з виходу каналу фазового детектування РЛС при зондуванні фону і БПЛА може бути використане як ознака розпізнавання БПЛА з трьома роторами.

6. Фрактальні розмірності ДС, відбитих від завислого БПЛА і під час його руху на невеликій швидкості практично не відрізняються, тобто по величині ФР не можна визначити тип руху БПЛА. Відмінність в характері руху БПЛА можна визначити по протяжності і періодичності появи найменших фрактальних розмірностей.

7. Відмінність у величинах ФР фазових портретів ДС, побудованих при різних часових затримках, під час зондування фону і мультироторного БПЛА може бути використане як ознака розпізнавання типу БПЛА. Величини фрактальних розмірностей ФП сигналів при зондуванні мультироторних БПЛА змінюються, і із збільшенням часової затримки прагнуть до сталих (середніх) значень. По величині ФР ФП можна визначити характер руху БПЛА.

8. Запропоновано методику розпізнавання БПЛА мультироторного типу з використанням форми фазових портретів, побудованих при різних часових затримки, і величин їх фрактальних розмірностей, який дозволяє підвищити якість розпізнавання БПЛА мультироторного типу і визначення характеру його руху.

9. Методика оцінки ймовірності правильного розпізнавання типу мультироторного БПЛА при використанні фрактальної розмірності ФП ДС припускає проведення статистичного експерименту з подальшою обробкою результатів методом статистичних випробувань (методом Монте-Карло).

10. Використання ФР фазових портретів ДС для розпізнавання типу БПЛА забезпечує ЙПР не менше $P_{роз} = 0,82$ при $\Delta = 10^{-2}$ і $P_{роз} = 0,81$ при $\Delta = 10^{-3}$, а також не менше $P_{роз} = 0,75$ при відношеннях сигнал/шум 10 дБ і вище.

Результати досліджень даного розділу опубліковано у наукових працях [50, 52, 54, 56, 57, 61, 62].

ВИСНОВКИ

В результаті дисертаційних досліджень вирішена актуальна науково-прикладна задача розробки методів аналізу взаємодії електромагнітного випромінювання з обертовими роторами БПЛА та визначення взаємозв'язків між параметрами ДС і кінематичними параметрами БПЛА.

При цьому отримані наступні наукові результати:

1. Вперше розроблена модель доплерівського сигналу, відбитого від обертових роторів БПЛА, яка відрізняється від відомих використанням фрактальних недиференційованих функцій. Під час побудови моделі було використано емпіричне моделювання, що забезпечує моделювання особливостей форм відбитих сигналів без запису модельних рівнянь. За результатами експериментальних досліджень встановлено, що складність форми ДС, відбитих від обертових роторів БПЛА, змінюється з зміною кількості роторів БПЛА та їх швидкості та має низькочастотну і високочастотну складові. При цьому, для моделювання низькочастотної складової ДС запропоновано використовувати фрактальний сигнал, а високочастотної – модифіковану функцію Вейерштрасса-Мандельброта.

2. Запропоновано методику вибору параметрів моделі при різній швидкості і кількості обертових роторів БПЛА. Так при невеликих швидкостях обертання ротора частоту фрактального сигналу необхідно вибирати у два рази вище, а амплітуду в два рази менше, ніж частота і амплітуда максимальних піків ДС, отриманого експериментально. При цьому коефіцієнт контролю амплітуди і просторове хвилеве число модифікованої функції Вейерштрасса-Мандельброта вибираються в двічі менше ніж амплітуда і частота фрактального сигналу, а ступінь порізаності ДС забезпечується підбором кількості складових функції, фрактальної розмірності і параметра частотного масштабування. Якісний (візуальне порівняння форм реальних і модельованих сигналів) і кількісний (розрахунок фрактальних розмірностей, $D_{PC75} = 1,639$, $D_{MC75} = 1,635$) аналіз показав, що запропонована модель забезпечує хороше узгодження особливостей форми таких сигналів.

3. Вперше розроблено метод аналізу сигналів, відбитих від мультироторного БПЛА, який відрізняється від відомих використанням серії фазових портретів, побудованих на псевдофазовій площині з різною часовою затримкою. Розроблений метод дозволяє досліджувати (якісно) особливості взаємодії електромагнітного випромінювання з різною кількістю і швидкістю обертових роторів БПЛА. З використанням розробленого методу:

- встановлено, що форми фазових портретів сигналів, отриманих при зондуванні БПЛА, відрізняється від форм ФП фонових сигналів (на краях ФП з'являються характерні області). Запропоновано використовувати форму ФП з зміною часової затримки, як ознаку розпізнавання БПЛА мультироторного типу;

- визначено, що форма ФП фонового сигналу практично не залежить від величини часової затримки і може бути охарактеризована як випадковий рух зображуючої точки по фазовій траєкторії на ПФП. У той же час під час зондування обертового ротора БПЛА форма ФП ДС суттєво залежить від величини часової затримки. При її збільшенні схожі форми ФП (але відмінні від форми ФП фонового сигналу) виявляються періодично (періодом дорівнює періоду ДС);

- досліджено та визначено, що із збільшенням швидкості обертання ротора періодичність появи схожих ФП зменшується. Періодичний характер зміни форм ФП ДС при збільшенні кількості обертових роторів БПЛА зберігається. При цьому форма ФП ДС значно змінюється, якщо збільшується кількість обертових роторів на БПЛА.

4. Удосконалено метод аналізу доплерівських сигналів, відбитих від мультироторного БПЛА, який відрізняється від відомих використанням фрактального аналізу фазових портретів, побудованих з різною часовою затримкою. Запропонований метод дозволяє кількісно оцінити складність форми сигналів під час взаємодії електромагнітного випромінювання з обертовими роторами БПЛА та виявити періодичність появи схожих фазових портретів. Застосування нового методу дозволило:

- встановити, що значення ФР ДС збільшуються при збільшенні швидкості обертання ротора БПЛА. Найбільше зростання величини ФР ($\Delta D = 0,0215$) спо-

стерігається при збільшенні швидкості обертання ротора від 25 об/с до 37,5 об/с, а при менших і більших швидкостях – $\Delta D \approx 0,005$;

- визначити, що величини ФР ДС залежать від кількості обертових роторів, але ФР не збільшується із збільшенням кількості роторів. Так найбільші значення ФР спостерігаються при обертанні двох роторів, що обумовлено їх взаємним розташуванням у просторі і напрямом обертання, які ускладнюють структуру ДС;

- встановити, що величина фрактальної розмірності часової реалізації сигналу не значно менше (ΔD змінюється від 0,003 до 0,013) у порівнянні з величиною фрактальної розмірності фазового портрету цього сигналу;

- запропонувати зміну величин ФР сигналів і значень ФР ФП як ознаки розпізнавання мультироторних БПЛА. При цьому значення ФР ФП фонового змінюються в межах приблизного від $D = 1,885$ до $D = 1,895$, тобто середнє значення ФР ФП фонового сигналу дорівнює $D_{\text{ср}} = 1,89 \pm 0,01$. Середнє значення ФР ФП сигналів, обумовлених зависанням БПЛА, в основному коливається навколо значення $D_{\text{ср}} = 1,85 \pm 0,01$. Характер руху БПЛА (зависання або рух у напрямі до РЛС і від неї) можна визначити по протяжності і періодичності появи найменших ФР ФП;

- дослідити особливості ФР ФП ДС, побудованих з різними часовими затримками, при зондуванні обертових роторів БПЛА. Визначено головну особливість поведінки величин ФР ФП під час зміни часової затримки, яка полягає в тому, що при T , які близькі до періоду ДС, фрактальна розмірність приймає мінімальні значення. Так при збільшенні швидкості в 2 рази з $V_p = 12,5$ об/с до $V_p = 25$ об/с період збільшується, але не в два рази, а в 1,7 разів. При збільшенні швидкості в 3 рази період збільшується в 2,2 рази, а при збільшенні швидкості в 4 рази – тільки в 2,6 рази;

- запропоновано для підвищення точності визначення ФР ФП і збільшення чутливості методу проводити апроксимацію точок на лінійній (початковій) ділянці графіка.

5. Запропоновано методику розпізнавання типу рухомого БПЛА, яка відрізняється від відомих використанням нових ознак розпізнавання – форми фазового

портрету і величини фрактальної розмірності. При цьому характерні форми ФП можуть бути використано під час розпізнавання БПЛА з трьома і шістьма роторами, а за величиною ФР ФП можна визначити характер руху БПЛА. З використанням розробленої методики:

- якісно досліджено особливі форми ФП під час зондування БПЛА з трьома і шістьма роторами і встановлено, що форми ФП сигналів, отриманих при зондуванні таких БПЛА, істотно відрізняються, а їх форми нагадують форму розміщення роторів на реальних БПЛА;

- визначено, що під час зміни часової затримки на краях ФП сигналів, отриманих під час зависання і руху БПЛА, виявляється концентрація фазової траєкторії відповідно у трьох і шістьох областях ПФП. Ускладнення форм ФП (додаткове відділення фазової траєкторії від фонового ФП при збільшенні часової затримки) проявляється під час зміни характеру руху – від зависання до руху БПЛА у бік РЛС та від неї;

- встановлено, що ФР ФП фонового сигналу при зміні часової затримки може бути оцінена як $D_{\phi} = 1,91 \pm 0,005$, а ФР ФП сигналів при зондуванні БПЛА з трьома роторами – $D_3 = 1,85 \pm 0,005$ і з шістьма – $D_{\text{ср.6}} = 1,84 \pm 0,005$. Різницю у величинах ФР ФП можна використовувати при розрізненні фонового сигналу і сигналу, обумовленого рухомим БПЛА;

- визначено, що величини ФР ФП сигналів при зондуванні мультироторних БПЛА змінюються, і із збільшенням часової затримки і прагнуть до сталих (середніх) значень. При цьому середні значення ФР ФП сигналів відрізняються ($D_{\text{зср.3}} = 1,85$; $D_{\text{зср.6}} = 1,84$; $D_{\text{рсп.3}} = 1,86$; $D_{\text{рсп.6}} = 1,875$), що дозволяє за їх величиною визначити тип мультироторного БПЛА. Відмінність в характері руху БПЛА також можна визначити за протяжністю і періодичністю появи найменших фрактальних розмірностей.

6. Оцінка ефективності розроблених методів була за результатами статистичного експерименту з подальшою обробкою результатів методом статистичних випробувань (методом Монте-Карло). Визначено, що ймовірність правильного розпізнавання типу мультироторного БПЛА при використанні фрактальної розмі-

рності ФП ДС не менше $P_{роз} = 0,82$ при $\Delta = 10^{-2}$ і $P_{роз} = 0,81$ при $\Delta = 10^{-3}$. Порівняння отриманих ЙПР з ймовірністю правильного розпізнавання з використанням ширини спектру сигналу показує, що розроблені методи забезпечують кращі показники у 1,47 разів під час розпізнавання БПЛА з трьома роторами і $\Delta = 10^{-3}$ та у 1,67 разів під час розпізнавання БПЛА з шістьма роторами і $\Delta = 10^{-3}$. Отримані криві ЙПР рухомих БПЛА з трьома і шістьма роторами показують, що розроблені методи при відношеннях сигнал/шум вище 10 дБ забезпечують ймовірність правильного розпізнавання не менше $P_{роз} = 0,75$.

7. Мета досліджень спрямованих на визначення нових ознак розпізнавання БПЛА мультироторного типу за рахунок виявлення особливостей взаємодії електромагнітного випромінювання з обертовими роторами БПЛА з використанням методів нелінійної динаміки досягнута, та всі часткові науково-технічних завдань вирішені повністю. Запропоновані методи і методика можуть бути використані для розробки нових та удосконалення існуючих систем розпізнавання радіолокаційних засобів спостереження.

Перспективними напрямками подальших досліджень можуть бути: оцінка можливості використання розроблених методів для розпізнавання БПЛА інших типів, наприклад, побудованих за літаковою схемою; подальший розвиток методів аналізу взаємодії електромагнітного випромінювання з обертовими роторами БПЛА за рахунок застосування нових методів нелінійної динаміки, наприклад, методу перетинів Пуанкаре; удосконалення методики розпізнавання типу рухомих мультироторних БПЛА за рахунок використання перетворення акустичних сигналів методами нелінійної динаміки.

Автор щиро вдячний колективу відділу Дистанційного зондування Землі Інституту радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України за допомогу при підготовці дисертації та особисто завідувачу відділу Іванову Віктору Кузьмичу за участь в обговореннях, пов'язаних з реалізацією та удосконаленням результатів роботи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Различные виды мультикоптеров // livejournal.com [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rcdrone.livejournal.com/5115.html>.
2. Биард Р.У. Малые беспилотные летательные аппараты: теория и практика / Р.У. Биард, Т.У. МакЛейн. – М.: Техносфера, 2015. – 312 с.
3. Класифікація безпілотних літальних апаратів / Тимочко О.І., Голубничий Д.Ю., Третяк В.Ф., Рубан І.В. // Системи озброєння і військова техніка. – 2007. – Вип. 1(9). – С. 61 – 66.
4. Теорія і техніка протидії безпілотним засобам повітряного нападу / Ткаченко В.І., Даник Ю.Г., Дробаха Г.А., Пащенко Р.Е. [та ін.]. – Х.: ХВУ, 2002. – 220 с.
5. Барбасов В.К. Многороторные беспилотные летательные аппараты и возможности их использования для дистанционного зондирования Земли / Барбасов В.К., Гаврюшин М.Н., Дрыга Д.О. // Инженерные изыскания. – 2012. – № 10. – С. 38 – 42.
6. Вождаев В.В. Характеристики радиолокационной заметности летательных аппаратов / В.В. Вождаев, Л.Л. Теперин. – М.: Физмалит, 2018. – 376 с.
7. Асмаков С. Современные мультикоптеры: многообразие моделей и проблема выбора / Асмаков С. // КомпьютерПресс [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://compress.ru/post/20160601-m-copters-choice>.
8. В США разработали систему регистрации малых беспилотников [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ato.ru/content/v-ssha-razrabotali-sistemu-registracii-malyh-bespilotnikov>.
9. Госавиаслужба Украины пересмотрела ограничения на полеты дронов в сторону увеличения веса, дальности и высоты полета [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://interfax.com.ua/news/general/533582.html>.
10. Вопросы перспективной радиолокации: Коллективная монография / Под ред. А.В. Соколова. – М.: Радиотехника, 2003. – 512 с.

11. Мирошников М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов / Мирошников М.М. – Л.: Машиностроение, 1977. – 600 с.

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

13. Годунов А.И. Взаимосвязь машинного (технического) зрения с компьютерным зрением при идентификации малогабаритного беспилотного летательного аппарата / Годунов А.И., Шишков С.В., Бикеев Р.Р. // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». – 2015. – Т. 1. – С. 213 – 217.

14. Проблемы обнаружения беспилотных летательных аппаратов оптико-электронными устройствами / Соловьев В.А., Купреев А.В., Жендарев М.В., Якименко И.В. // Электронный математический и медико-биологический журнал. – 2011. – Т. 10, Вып. 3. – С. 1 – 13.

15. К вопросу о наблюдении малоразмерных беспилотных летательных аппаратов / Ананенков А.Е., Марин Д.В., Нуждин В.М. [и др.] // Труды МАИ. – 2016. – № 91. – С. 19.

16. Тарасов В.В. Инфракрасные системы «смотрящего» типа / В.В. Тарасов, Ю.Г. Якушенков. – М.: «Логос», 2004. – 452 с.

17. Шиляева Д.А. Разработка структурной схемы стереоскопического дневного наблюдательного прибора / Д.А. Шиляева, В.С. Ефремов // Сборник статей по материалам международного научного конгресса «Интерэкспо Гео-Сибирь». – 2019. – Т. 6, Вып. 2. – С. 72 – 78. – Режим доступа: <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2019-6-2-72-78>.

18. Пархоменко А.В., Устинов Е.М., Смогунов В.В., Пархоменко В.А., Ильясов Ю.В. Пат. 83549 Российская Федерация, МПК G01S 3/00 (2009.07). Устройство разведки объектов методом комбинированного стереоэффекта; патентообладатель Пензенский Артиллерийский Инженерный Институт; заявл. 29.12.2008.

19. Рассеяние электромагнитных волн воздушными и наземными радиолокационными объектами: монография / Сухаревский О.И. [и др.]; под ред. О.И. Сухаревского. – Харьков: ХУПС, 2009. – 468 с.

20. Ряполов И.Е. Характеристики рассеяния беспилотного летательного аппарата RQ-4B Global Hawk в сантиметровом и дециметровом диапазонах длин волн / Ряполов И.Е., Василец В.А., Сухаревский О.И. // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2014. – № 3(16). – С. 25 – 28.

21. Филин Е.Д. Методы обнаружения малоразмерных беспилотных летательных аппаратов на основе анализа электромагнитного спектра / Е.Д. Филин, Р.В. Киричек // Информационные технологии и телекоммуникации. – 2018. – Т. 6, № 2. – С. 87 – 93.

22. Воробьев Е.Н. Исследование сигнальных признаков распознавания малых БПЛА в полуактивной РЛС / Воробьев Е.Н. // Вестник Новгородского государственного университета. – 2019. – № 4(116). – С. 72 – 77. – Режим доступа: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2019.4\(116\).72-77](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2019.4(116).72-77).

23. Куприянов А.И. Радиоэлектронные системы в информационном конфликте / А.И. Куприянов, А.В. Сахаров. – М.: Вузовская книга, 2003. – 528 с.

24. Информационные характеристики звуковых сигналов малых беспилотных летательных аппаратов / Карташов В.М., Олейников В.Н., Шейко С.А., Бабкин С.И. [и др.] // Радиотехника. Всеукр. межвед. научн.-техн. сборник. – 2017. – Вып. 191. – С. 181 – 187.

25. Характеристики акустических полей наземных и малоразмерных воздушных объектов акустической разведки / Луценко В.И., Луценко И.В., Мазуренко А.В., Соболяк А.В. // Прикладная радиоэлектроника. – 2017. – Т. 16, № 1, 2. – С. 18 – 22.

26. Луценко В.И. Дальность действия систем акустической разведки / Луценко В.И., Луценко И.В., Соболяк А.В. // Прикладная радиоэлектроника. – 2015. – Т. 14, № 2. – С. 125 – 136.

27. Особливості акустичних сигналів безпілотних літальних апаратів / Гордієнко Ю.О., Бугайов М.В., Солонець О.І., Солопій О.А. // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2016. – № 1(22). – С. 32 – 35.

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

29. Загоруйко Н.Г. Методы распознавания и их применение / Загоруйко Н.Г. – М.: Сов. радио, 1972. – 208 с.
30. Горелик А.Л. Методы распознавания / А.Л. Горелик, В.А. Скрипкин. – М.: Высшая школа, 1984. – 208 с.
31. Селекция и распознавание на основе локационной информации / Под ред. А.Л. Горелика. – М.: Радио и связь, 1990. – 240 с.
32. Методы радиолокационного распознавания и их моделирование / Ширман Я.Д., Горшков С.А., Лещенко С.П., Братченко Г.Д. [и др.] // Радиотехника. – 2000. – № 2. – С. 5 – 65.
33. Лещенко С.П. Исследование влияния вторичной модуляции на форму получаемых радиолокационных дальностных портретов при использовании когерентных многочастотных сигналов / С.П. Лещенко, А.Г. Варакута // Збірник наукових праць ХВУ. – Х: ХВУ, 1999. – Вип. 3(25). – С. 60 – 64.
34. Лещенко С.П. Вплив помилок виміру швидкості та ракурсу повітряних об'єктів на якість їх розпізнавання при використанні радіолокаційних дальнісних портретів / Лещенко С.П. // Системи озброєння і військова техніка. – 2019. – № 4(60). – С. 23 – 30. – Режим доступу: <https://doi.org/10.30748/soivt.2019.60.03>.
35. Лещенко С.П. Радіолокаційне розпізнавання повітряних об'єктів по їх дальнісним портретам та залученням додаткових ознак / Лещенко С.П. // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2020. – № 2(39). – С. 83 – 92.
36. Тоцкий А.В. Распознавание летательных аппаратов по радиолокационным дальностным профилям / Тоцкий А.В., Молчанов П.А., Поспелов Б.Б. // Авиационно-космическая техника и технология. – 2010. – № 5(72). – С. 77 – 82.
37. Филимонов А.Б. Методы формирования информативных признаков радиолокационных дальностных портретов воздушных целей / А.Б. Филимонов, Фам Фыонг Кыонг // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2016. – Т. 17, № 4. – С. 273 – 281. – Режим доступа: <https://doi.org/10.17587/mau.17.273-281>.
38. Филимонов А.Б. Динамическое распознавание воздушных целей по радиолокационным дальностным портретам / А.Б. Филимонов, Фам Фыонг Кыонг // Информационные технологии. – 2016. – Т. 22, № 6. – С. 423 – 430.

39. Hudson S. Correlation filters for aircraft identification from radar range profiles / S. Hudson, D. Psaltis // IEEE Transaction on aerospace and electronic systems. – 1993. – Vol. 29, No. 3. – P. 741 – 748.

40. Слюсарь Н.М. Вторичная модуляция радиолокационных сигналов динамическими объектами / Слюсарь Н.М. – Смоленск: ВА ВПВОВС, 2006. – 173 с.

41. Комбинированный метод расчета характеристик рассеяния объектов сложной формы и его применение для моделирования спектров винтовой модуляции вертолетов / Залевский Г.С., Бречка М.М., Василец В.А., Сухаревский О.И. // Системи обробки інформації. – 2014. – Вип. 4(120). – С. 80 – 85.

42. Метод чисельного моделювання спектрів гвинтової модуляції вертольотів / Бречка М.М., Залевський Г.С., Василець В.О., Сухаревський О.І. // Системи обробки інформації. – 2012. – Вип. 3(101). – С. 13 – 17.

43. Евдокимова Е.О. Модель сигнала для оценки параметров подвижных объектов на основе анализа доплеровского спектра / Евдокимова Е.О. // Изв. ЮФУ. Технические науки. – 2013. – Т. 142, № 5. – С. 122 – 128.

44. Micro-Doppler effect in radar: phenomenon, model, and simulation study / Chen V.C., Li F., Ho S.S., Wechsler H. // Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions. – 2006. – № 42(1). – P. 2 – 21.

45. Chen V.C. The micro-Doppler effect in radar / V.C. Chen. – Artech House Publishers, 2011. – 290 p.

46. Temporal Deep Learning for Drone Micro-Doppler Classification / Brooks D.A., Schwander O., Barbaresco F. [ect.] // 19th International Radar Symposium (IRS), Bonn, Germany. – 2018. – P. 1 – 10.

47. Частотно–временной анализ радиолокационных отражений от мультироторного БПЛА / Пащенко Р.Э., Иванов В.К., Цюпак Д.О., Левадный Ю.В. // Радиофизика и электроника. – 2019. – Т. 24, № 4. – С. 35 – 45.

48. Цюпак Д.О. Моделювання доплерівського сигналу, відбитого від безпілотного літального апарату, з використанням фрактальних недиференційовних функцій / Пащенко Р.Е., Иванов В.К., Цюпак Д.О. // Радиофизика и электроника. – 2020. – Т. 25, № 3. – С. 16 – 25.

49. Цюпак Д.О. Аналіз доплерівських сигналів, відбитих від роторів БПЛА, з використанням фазових портретів / Пащенко Р.Е., Іванов В.К., Цюпак Д.О. // *Радиофизика и электроника*. – 2020. – Т. 25, № 4. – С. 18 – 29.

50. Tsyupak D. Doppler signal analysis of drone rotors reflection with fractal dimensions / Pashchenko R., Ivanov V., Tsyupak D. // *Telecommunications and Radio Engineering*. – 2020. – Vol. 79, Is. 16. – P. 1425 – 1440.

51. Распознавание БПЛА мультироторного типа с использованием фазовых портретов / Пащенко Р.Э., Кортунов В.И., Цюпак Д.О., Барданова О.А. // *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. – 2013. – № 4(13). – С. 68 – 72.

52. Распознавание БПЛА мультироторного типа с использованием фрактальных размерностей / Пащенко Р.Э., Илюшко В.М., Фатеев А.С., Цюпак Д.О. // *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. – 2014. – № 1(14). – С. 156 – 160.

53. Анализ формы фазовых портретов при изменении времени задержки для распознавания БПЛА мультироторного типа / Пащенко Р.Э., Цюпак Д.О., Ратайчук И.А, Барданова О.А. // *Збірник наукових праць “Системи обробки інформації”*. – Х.: ХУ ПС. – 2015. – Вип. 1(126). – С. 44 – 49.

54. Анализ величин фрактальных размерностей фазовых портретов для распознавания БПЛА мультироторного типа / Пащенко Р.Э., Фатеев А.С., Цюпак Д.О., Романцов А.А. // *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. – 2016. – № 1(22). – С. 83 – 87.

55. Распознавание типа мультироторного БПЛА с использованием формы фазовых портретов / Пащенко Р.Э., Іванов В.К., Цюпак Д.О., Гергель И.А. // *Системи озброєння і військова техніка*. – 2017. – № 1(49). – С. 143 – 147.

56. Распознавание типа мультироторного БПЛА с использованием фрактальных размерностей фазовых портретов / Пащенко Р.Э., Іванов В.К., Цюпак Д.О., Молчанов А.А. // *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. – 2017. – № 2(27). – С. 99 – 104.

57. Tsyupak D. On radar signals analysis using the fractal dimension / Pashchenko R., Ivanov V., Tsyupak D. // *4th International Scientific and Practical Conference*

“Problems of Infocommunications. Science and Technology” (PICS&T-2017). – Ukraine, Kharkov, 2017. – paper 84.

58. Tsyupak D. The Use of Fractal Signals in Information and Communication Systems / Pashchenko R., Ivanov V., Tsyupak D. // 6th International Scientific and Practical Conference “Problems of Infocommunications. Science and Technology” (PICS&T-2019). – Ukraine, Kjev, 2019. – picst19_780.pdf.

59. Tsyupak D. Doppler radar signal model for sensing rotary drone rotors / Pashchenko R., Ivanov V., Tsyupak D. // The 6th Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium (MRRS-2020). – Ukraine, Kharkiv. 2020. – DOI: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252782.

60. Цюпак Д.О. Распознавание БПЛА мультироторного типа с использованием фазовых портретов / Пащенко Р.Э., Барданова О.А., Цюпак Д.О. // Тези доповідей одинадцятої НК ХУПС. – Х.: ХУ ПС, 2015. – С. 152.

61. Распознавание БПЛА мультироторного типа с использованием фрактальных размерностей / Пащенко Р.Э., Иванов В.К., Барданова О.А., Цюпак Д.О. // Матеріали п'ятої міжнародної НТК “Сучасні напрямки розвитку ІКТ та ЗУ”. – Полтава: ПНТУ, Баку; ВА ЗС АР, Кіровоград: КЛА НАУ, Харків: “ДП ХНДІ ТМ”. – 2015. – С. 6, 7.

62. Цюпак Д.О. Метод распознавания БПЛА мультироторного типа с использованием фрактальных размерностей / Р.Э. Пащенко, Д.О. Цюпак // Тези доповідей тринадцятої НК ХУПС. – Х.: ХУ ПС, 2017. – С. 209.

63. Розробка і удосконалення радіофізичних методів зондування поверхні і атмосфери Землі та біологічних об'єктів: Звіт про НДР «Індекс» (заключний) / Інститут радіофізики і електроніки імені О.Я. Усикова Національної академії наук України, № 0111U010477. – Х., 2016. – С. 93 – 147.

64. Розробка та застосування нових радіофізичних методів дистанційного зондування довкілля та біологічних об'єктів : Анотований звіт про НДР «Інверсія» / Інститут радіофізики і електроніки імені О.Я. Усикова Національної академії наук України, № 0117U004040. – Х., 2019. – С. 14.

65. Макаренко С.И. Анализ средств и способов противодействия беспилотным летательным аппаратам. Часть 1. Беспилотный летательный аппарат как объект обнаружения и поражения / С.И. Макаренко, А.В. Тимошенко, А.С. Васильченко // Системы управления, связи и безопасности. – 2020. – № 1. – С. 109 – 146.

66. Даник Ю.Г. Аналіз ефективності виявлення тактичних безпілотних літальних апаратів пасивними та активними засобами спостереження / Ю.Г. Даник, М.В. Бугайов // Збірник наукових праць ЖВІ ДУТ. – Вип. 10. – Житомир: ЖВІ ДУТ, 2015. – С. 5 – 20.

67. Теодорович Н.Н. Способы обнаружения и борьбы с малогабаритными беспилотными летательными аппаратами / Н.Н. Теодорович, С.М. Строганова, П.С. Абрамов // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». – 2017. – Т. 9, № 1. – Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/13TVN117.pdf>.

68. Дальномеры. Принцип лазерной дальнометрии. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://pricel.com.ua/news/?blog_id=28.

69. Насадка к оптико-электронным приборам для визирования объектов при больших углах места / Шишков С.В., Пархоменко А.В., Устинов Е.М., Пархоменко В.А., Илясов Ю.В. // Патент на полезную модель № 83603, 10.06.09. Федеральный институт промышленной собственности.

70. Оптическое обнаружение беспилотников [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://olvitech.com/ru/home/security-solutions/optical-drone-detection/>.

71. Гавилов В.А. Видимость в атмосфере / Гавилов В.А. – Л.: Гидрометеопиздат, 1966. – 324 с.

72. Физика и техника инфракрасного излучения / Джемиссон Дж. Э. [и др.]; пер. с англ. Н.В. Васильченко. – М.: Советское радио, 1965. – 643 с.

73. Гейстер С.Р. Решение задачи обнаружения маловысотных легкомоторных летательных аппаратов путем использования акустических и сейсмических полей / С.Р. Гейстер, А.М. Джеки // Наука и военная безопасность. – 2008. – № 1. – С. 42 – 46. – Режим доступа: <http://militaryarticle.ru/nauka-i-voennaya-bezopasnost/2008/12105-reshenie-zadachi-obnaruzhenija-malovysotnyh>.

74. Соболяк О. В. Моніторинг електромагнітних і акустичних випромінювань антропогенних об'єктів: дис. канд. фіз.-мат. наук: 01.04.03 / Соболяк Олександр Васильович. – Х.: ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАН України, 2019. – 234 с.

75. Marino L. Experimental analysis of UAV-propellers noise / Marino L. // 16th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. University «La Sapienza», Rome, Italy. – American Institute of Aeronautics and Astronautics. – 2010. – P. 1 – 14.

76. Zelnio A.M. Detection of small aircraft using an acoustic array. Thesis. B.S. / Zelnio A.M. – Electrical Engineering, Wright State University. – 2007. – 55 p.

77. Pham T. TTCP AG-6: Acousting detection and tracking of UAVs / T. Pham, N. Srour // U.S. Army Research Laboratory. Proc. of SPIE. – 2004. – Vol. 54. – P. 24 – 29.

78. Красильников В.А. Введение в физическую акустику / В.А. Красильников, В.В. Крылов. – М.: Наука, 1984. – 403 с.

79. Алгоритмы пеленгации беспилотных летательных аппаратов по их акустическому излучению / Карташов В.М., Корытцев И.В., Олейников В.Н., Зубков О.В. [и др.] // Радиотехника. – 2019. – Вып. 196. С. 22 – 31.

80. Затухание звука при распространении на местности. Ч. 1. Расчет поглощения звука атмосферой: ГОСТ 31295.1-2005 (ИСО 9613-1:1993). – [Дата введения 2007-01-01]. – М.: Стандартиформ, 2006. – 43 с. – (Межгосударственный стандарт).

81. Ширман Я.Д. Теоретические основы радиолокации / Ширман Я.Д. – М.: Сов. радио, 1970. – С. 235 – 240.

82. Матвеев А.Н. Электродинамика: учеб. пособие. / Матвеев А.Н. – М.: Высш. школа, 1980. – 272 с.

83. Радиолокационные характеристики летательных аппаратов / Под ред. Л.Т. Тучкова. – М.: Радио и связь, 1985. – 236 с.

84. Кравцов С.В. Моделирование рассеяния электромагнитного поля на пропеллере аэродинамической цели / С.В. Кравцов, С.П. Лещенко // Электромагнитные волны и электронные системы. – 1999. – № 4. – С. 39 – 44.

85. Гейстер С.Р. Математические модели радиолокационного сигнала, отраженного от несущего винта вертолета, в приложении к обращенному синтезу апертуры / С.Р. Гейстер, Т.Т. Нгуен // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. – 2019. – Т. 22, № 3. – С. 74 – 87.

86. Плотницкая Е.С. Модель рассеянного винтами вертолета радиолокационного сигнала / Плотницкая Е.С. // Сборник материалов VIII научно-практической конференции. Том II. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2020. – С. 29 – 32.

87. Васильев Е.Н. Возбуждение тел вращения / Васильев Е.Н. – М.: Радио и связь, 1987. – 272 с.

88. Залевский Г.С. Радиолокационные дальностные портреты крылатых ракет в различных диапазонах длин волн / Г.С. Залевский, В.А. Василец, О.И. Сухаревский // Прикладная радиоэлектроника. – 2014. – Т. 13, № 1. – С. 20 – 28.

89. Ряполов И.Е. Высокочастотный метод расчета рассеяния вторичного излучения диэлектрических частей модели беспилотного летательного аппарата / И.Е. Ряполов, В.А. Василец, О.И. Сухаревский // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2014. – № 2(118). – С. 58 – 62.

90. Перунов Ю.М. Радиоэлектронная борьба: радиотехническая разведка / Ю.М. Перунов, А.И. Куприянов – М.: Вузовская книга, 2017. – 190 с.

91. Лещенко С.П. Вплив ракурсу спостереження повітряних об'єктів на якість їх радіолокаційного розпізнавання / Лещенко С.П. // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2018. – № 4(33). – С. 60 – 68.

92. Фам Фыонг Кыонг Нейросетевая схема распознавания воздушных целей по радиолокационным дальностным портретам / Фам Фыонг Кыонг // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – № 4(46), Ч. 2. – С. 204 – 210.

93. Фам Фыонг Кыонг Анализ и идентификация радиолокационных дальностных портретов воздушных целей на основе технологий вычислительного интеллекта: Автореферат дис. канд. техн. наук: 05.13.01 / Фам Фыонг Кыонг. – М.: Московский технологический университет, 2017. – 25 с.

94. Radar HRRP Target Recognition Based on Concatenated Deep Neural Networks / Kuo Liao, Jsnxiu Si, Fangqi Zhu, Xudong He // IEEE Access. – 2018. – Vol. 6. – P. 29211 – 29218.

95. Jouny I. Classification of radar target using synthetic neural network / Jouny I., Garber F., Ahalt S. // IEEE Transaction on aerospace and electronic systems. – 1993. – Vol. 29, No. 2. – P. 336 – 344.

96. Воробьев Е.Н. Распознавание винтомоторных летательных аппаратов в пассивной бистатической РЛС / Воробьев Е.Н., Веремьев В.И., Холодняк Д.В. // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. – 2018. – № 6. – С. 75 – 82.

97. Надточий В.Н. Исследование особенностей описания признаков радиолокационного распознавания воздушных целей в бортовых радиолокационных системах / Надточий В.Н. // Радиотехника и связь. Серия: Естественные и технические науки. – 2017. – № 10. – С. 20 – 24.

98. Экспериментальные исследования информационных свойств когерентных радиолокационных сигналов / Черных М.М., Васильев О.В., Богданов А.В., Савельев А.Н. [и др.] // Радиотехника. – 2000. – № 3. – С. 47 – 54.

99. Tait P. Introduction to Radar Target Recognition / Tait P. – London: Institution of Engineering and Technology, 2005. – 404 p

100. Boashash B. Time frequency analysis / Boashash B. – Access Online via Elsevier, 2003. – 81 p.

101. Sejdić E. Time-frequency feature representation using energy concentration: An overview of recent advances / Sejdić E., Djurović I., Jiang J. // Digital Signal Processing. – 2009. – № 9(1). – P. 53 – 183.

102. Евдокимова Е.О. Алгоритмы декомпозиции многокомпонентных доплеровских сигналов, отраженных от подвижных объектов: Автореферат дис. канд. техн. наук: 05.12.04 / Евдокимова Екатерина Олеговна. – Таганрог: Южный федеральный университет, 2013. – 16 с.

103. Евдокимова Е.О. Анализ алгоритмов декомпозиции многокомпонентных доплеровских сигналов для определения параметров движения объектов / Е.О. Евдокимова, В.П. Федосов. // Труды Международной научной конференции

«Излучение и рассеяние ЭМВ – ИРЭМВ-2-13». – Таганрог: Изд-во ЮФУ. – 2013. – С. 679 – 684.

104. Евдокимова Е.О. Модель сигнала для оценки параметров подвижных объектов на основе анализа доплеровского спектра / Евдокимова Е.О. // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 5(142). – С. 122 – 128.

105. Analysis of radar micro-Doppler signatures from experimental helicopter and human data / Thayaparan T., Abrol S., Riseborough E. [ect.] // IET Radar, Sonar & Navigation. – 2007. – № 1(4). – P. 289 – 299.

106. Björklund S. Target Detection and Classification of Small Drones by Boosting on Radar Micro-Doppler / Björklund S. // 15th European Radar Conference (EuRAD), Madrid, Spain. – 2018. – P. 182 – 185.

107. Chadwick A.D. Micro-drone detection using softwaredefined 3G passive radar / Chadwick A.D. // International Conference on Radar Systems (Radar 2017), Belfast. – 2017. – P. 1 – 6.

108. Лысенко А.И. Математическое моделирование движения квадрокоптера / А.И. Лысенко, Е.Н. Тачина // Вісник АМУ серія «Техніка». – Вип. 2(10). – 2015. – С. 128 – 136.

109. Лазарев В.С. Разработка математической модели БПЛА на базе квадрокоптера с рамой DJI F-450 / В.С. Лазарев, А.А. Лашев // Инженерный вестник Дона. – № 2. – 2018. – Режим доступа: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/5001.

110. Данилов Ю.А. Лекции по нелинейной динамике. Элементарное введение / Данилов Ю.А. – М.: Постмаркет, 2001. – 190 с.

111. Анищенко В.С. Знакомство с нелинейной динамикой / Анищенко В.С. – Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2002. – 144 с.

112. Малинецкий Г.Г. Современные проблемы нелинейной динамики / Г.Г. Малинецкий, А.Б. Потапов. – М.: Едиториал УРСС, 2002. – 360 с.

113. Табор М. Хаос и интегрируемость в нелинейной динамике / Табор М. – М.: Едиториал УРСС, 2001. – 318 с.

114. Hilborn R.C. Chaos and Nonlinear Dynamics / Hilborn R.C. – Oxford: Oxford University Press, 1991. – 650 p.

115. Пащенко Р.Э. Основы теории формирования фрактальных сигналов / Пащенко Р.Э. – Харьков: ХООО “НЭО “ЭкоПерспектива”, 2005. – 296 с.

116. Фрактальный анализ процессов, структур и сигналов: Коллективная монография / Доля Г.Н., Иванов В.К., Пащенко Р.Э., Стадник А.М. [и др.]; Под ред. Р.Э. Пащенко. – Харьков: ХООО “НЭО “ЭкоПерспектива”, 2006. – 348 с.

117. Automatic fall detection based on Doppler radar motion signature / Liu L., Popescu M., Skubic M., Rantz M. [et al.] // In Proceedings of 5th International Conference on Pervasive Computing Technologies for Healthcare (PervasiveHealth), and Workshops. – 2011. – P. 222 – 225.

118. K-Band CW Transceiver IPS-154 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.innosent.de/en/radar-systems/product-finder/>

119. ООО “КБ АВИА” [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.kb-avia.com/index.html>.

120. Оборот в минуту [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Оборот_в_минуту.

121. Изделие 1РЛ133. Техническое описание. БД 1.400.009 ТО. – 1974. – 232 с.

122. Изделие 1РЛ133. Инструкция по эксплуатации. БД 1.400.009 ИЭ. – 1974. – 215 с.

123. Mandelbrot B.B. Fractals: Form, Chance and Dimension / Mandelbrot B.B. – San-Francisco: Freeman, 1977. – 365 p.

124. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы / Мандельброт Б. – М.: Институт компьютерных исследований, 2002. – 656 с.

125. Федер Е. Фракталы / Федер Е. – М.: Мир, 1991. – 254 с.

126. Кроновер Р.М. Фракталы и хаос в динамических системах / Кроновер Р.М. – М.: Постмаркет, 2000. – 352 с.

127. Божокин С.В. Фракталы и мультифракталы / С.В. Божокин, Д.А. Паршин. – Ижевск: НИЦ “Регулярная и хаотическая динамика”, 2001. – 128 с.

128. Морозов А.Д. Введение в теорию фракталов / Морозов А.Д. – Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2002. – 160 с.

129. Потапов А.А. Фракталы в радиофизике и радиолокации / Потапов А.А. – М.: Логос, 2002. – 664 с.
130. Фракталы в физике: [Труды VI международного симпозиума по фракталам в физике]. – М.: Мир, 1988. – 672 с.
131. Турбин А.Ф. Фрактальные множества, функции, распределения / А.Ф. Турбин, Н.В. Працевитый. – К.: Наук. думка, 1992. – 207 с.
132. Шредер М. Фракталы, хаос, степенные законы. Миниатюры из бесконечного рая / Шредер М. – Ижевск: НИЦ “Регулярная и хаотическая динамика”, 2001. – 528 с.
133. Ваврив Д.М. Фрактальная размерность: проблемы вычислений / Д.М. Ваврив, В.Б. Рябов // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1989. – Т. 29, № 7. – С. 987 – 999.
134. Вишик М.И. Фрактальная размерность множеств / Вишик М.И. // Соросовский образовательный журнал. – 1998. – № 1. – С. 122 – 127.
135. Becker K.H. Dynamical Systems and Fractals / K.H. Becker, M. Dorfler. – Cambridge: Cambridge University Press, 1989. – 397 p.
136. Bende A. Fractals in Science / A. Bende, S. Halvin. – Berlin: Springer-Verlag, 1995. – 298 p.
137. Falconer K.J. Fractal Geometry. Mathematical Foundations and Applications / Falconer K.J. – Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2003. – 337 p.
138. Странные аттракторы / Под ред. Я.Г. Синая, Л.П. Шильникова. – М.: Мир, 1981. – 253 с.
139. Берже П. Порядок в хаосе. О детерминистском подходе к турбулентности / Берже П., Помо И., Видаль К. – М.: Мир, 1991. – 368 с.
140. Мун Ф. Хаотические колебания: Вводный курс для научных работников и инженеров / Мун Ф. – М.: Мир, 1990. – 312 с.
141. Малинецкий Г.Г. О вычислении размерностей странных аттракторов / Г.Г. Малинецкий, А.Б. Потапов // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1988. – Т. 28, № 7. – С. 1021 – 1037.

142. Takens F. Detecting strange attractors in turbulence / Takens F. // *Dynamical Systems and Turbulence. Lecture Notes in Mathematics*, edited by D.A. Rand L.S. Young. – Heidelberg: Springer-Verlag, 1981. – P. 366 – 381.

143. Eckmann J.P. Ergodic Theory of Chaos and Strange Attractors / J.P. Eckmann, D. Ruelle // *Rev. Mod. Phys.* – 1985. – V. 57, № 3. – P. 617 – 656.

144. Grassberger P. Characterization of Strange Attractors / P. Grassberger, I. Procaccia // *Phys. Rev. Lett.* 50. – 1983. – P. 346 – 349.

145. Abraham N.B. Calculating the Dimension of Attractors From Small Data Sets / N.B. Abraham, A.M. Albano, B. Das [ect.] // *Phys. Lett.* – 1986. – V. 114A, № 5. – P. 217 – 221.

146. Farmer J.D. The Dimension of Chaotic Attractors / Farmer J.D., Ott E., Yorke J.A. // *Physica* 7. – 1980. – № 357. – P. 453 – 472.

147. Grassberger P. On the Hausdorff Dimension of Fractal Attractors / Grassberger P. // *J. Stat. Phys.* – 1981. – V. 26, № 1. – P. 173 – 179.

148. Ляпунов А.М. Собр. соч. Т. 2 / Ляпунов А.М. – М.-Л.: 1956. – С. 7 – 263.

149. Determining Lyapunov exponents from a time series / Wolf A., Swift J.B., Swinney H.L. [ect.] // *Physica D.* 16. – 1985. – № 3. – P. 285 – 317.

150. Йосс Ж. Элементарная теория устойчивости и бифуркаций / Ж. Йосс, Д. Джозеф. – М.: Мир, 1983. – 304 с.

151. Теория бифуркаций / В.И. Арнольд, В.С. Афраймович, Ю.С. Ильяшенко [и др.] // *Итоги науки и техники. Современные проблемы математики. Фундаментальные направления.* – 1985. – Т. 5. – С. 5 – 220.

152. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы / Гоноровский И.С. – М.: Сов. радио, 1986. – 512 с.

153. Тэллор Дж. Анализ и расчет нелинейных систем автоматического управления / Дж. Тэллор, М. Пестель. – М.-Л.: Энергия, 1964. – 488 с.

154. FRACTAN. Программа для вычисления корреляционной размерности и корреляционной энтропии по временному ряду данных [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.iki.rssi.ru/magbase/RESULT/APPENDIX/fractan.boom.ru/soft.htm>

155. Петерс Э. Хаос и порядок на рынках капитала. Новый аналитический взгляд на циклы, цены и изменчивость рынка / Петерс Э. – М.: Мир, 2000. – 333 с.

156. Специальный пакет расширения FracLab 2.0 системы математического моделирования MATLAB FracLab 2.0 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.irccyn.ec-nantes.fr/hebergement/FracLab/FracLab.html>.

157. Безручко Б.П. Математическое моделирование и хаотические временные ряды / Б.П. Безручко, Д.А. Смирнов. – Саратов: ГосУНЦ «Колледж», 2005. – 320 с.

158. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя / Льюнг Л. – М.: Наука, 1991. – 432 с.

159. Огороков В.А. Фракталы в фундаментальной физике. Фрактальные свойства множественного образования частиц и топология выборки / В.А. Огороков, Е.В. Сандракова. – М.: МИФИ, 2009. – 460 с.

160. Berry M.V. On The Weierstrass-Mandelbrot Fractal Function / M.V. Berry, Z.V. Lewis // Proc. R. Soc. (London). – 1980. – V. A370, № 1743. – P. 459 – 484.

161. Кравченко В.Ф. Атомарно-фрактальные функции в задачах синтеза антенн / В.Ф. Кравченко, А.А. Потапов, В.М. Масюк // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. – 2001. – № 6. – С. 4 – 41.

162. Jaggard D.L. Fractal surface scattering: A generalized Rayleigh solution / D.L. Jaggard, X. Sun // J. Appl. Phys. – 1990. – V. 68, № 11. – P. 5456 – 5462.

163. Jaggard D.L. Scattering from bandlimited fractal fibers / D.L. Jaggard, X. Sun // IEEE transaction on antennas and propagation. – 1989. – V. 37, № 12. – P. 1591 – 1597.

164. Метод статистических испытаний (Метод Монте-Карло) / Под ред. Ю.А. Шрейдера. – М.: Физматгиз, 1962. – 332 с.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації.

1.1 Публікації у фахових виданнях України

1. Анализ особенностей сигналов доплеровской РЛС, отраженных от мультиторного БПЛА / Пащенко Р.Э., Иванов В.К., Цюпак Д.О., Левадный Ю.В. // Радиофизика и электроника. – 2019. – Т. 24, № 4. – С. 35 – 45. (Google Scholar).

(Особистий внесок – проведено частотно-часовий аналіз сигналів доплерівської РЛС при зондуванні БПЛА мультиторного типу. Виявлені особливості структури (форми) ДС та їх спектрів, які ускладнюються при збільшенні частоти обертання ротора та їх кількості. Показано вплив напрямку обертання роторів (в один бік або у різні) на форму часової реалізації ДС та його спектр.)

2. Цюпак Д.О. Моделювання доплерівського сигналу, відбитого від безпілотного літального апарату, з використанням фрактальних недиференційованих функцій / Пащенко Р.Е., Иванов В.К., Цюпак Д.О. // Радиофизика и электроника. – 2020. – Т. 25, № 3. – С. 16 – 25. (Google Scholar).

(Особистий внесок – запропонована модель доплерівського сигналу, відбитого від обертаних роторів БПЛА, яка представляє суму фрактального сигналу (моделювання низькочастотної складової ДС) та модифікованої функції Вейерштрасса–Мандельброта (моделювання високочастотної складової ДС). Проведено якісний і кількісний аналіз реальних ДС і ДС, отриманих з використанням запропонованої моделі, який показав, що модель забезпечує добре узгодження особливостей форми цих сигналів.)

3. Цюпак Д.О. Аналіз доплерівських сигналів, відбитих від роторів БПЛА, з використанням фазових портретів / Пащенко Р.Е., Иванов В.К., Цюпак Д.О. // Радиофизика и электроника. – 2020. – Т. 25, № 4. – С. 18 – 29. (Google Scholar).

(Особистий внесок – запропоновано метод аналізу доплерівських сигналів, відбитих від обертаних роторів БПЛА з використанням фазових портретів, який до-

зволяє визначати кількість роторів на БПЛА і оцінити швидкість їх обертання. Проведено аналіз зміни форм фазових портретів ДС, відбитих від обертових роторів БПЛА при їх побудові з різними часовими затримки. При збільшенні часової затримки схожі форми ФП з'являються періодично з періодом рівним періоду ДС, а при збільшенні швидкості обертання ротора періодичність появи схожих ФП зменшується.)

4. Распознавание БПЛА мультироторного типа с использованием фазовых портретов / Пащенко Р.Э., Кортунов В.И., Цюпак Д.О., Барданова О.А. // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2013. – № 4(13). – С. 68 – 72. (Google Scholar).

(Особистий внесок – досліджено форми фазових портретів сигналів, отриманих при зондуванні БПЛА, і показано, що вони відрізняються від форми фазових портретів фонових сигналів. Встановлено, що відмінність у характері руху БПЛА можна визначити за протяжністю і періодичністю появи характерних фазових портретів.)

5. Распознавание БПЛА мультироторного типа с использованием фрактальных размерностей / Пащенко Р.Э., Илюшко В.М., Фатеев А.С., Цюпак Д.О. // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2014. – № 1(14). – С. 156 – 160. (Google Scholar).

(Особистий внесок – проведено розрахунок величин фрактальних розмірностей сигналів з виходу каналу фазового детектування РЛС, що дозволило кількісно оцінити складність форми сигналів. Визначено, що відмінність у величинах ФР сигналів при зондуванні фону і БПЛА може бути використано як ознаку розпізнавання мультироторного БПЛА.)

6. Анализ формы фазовых портретов при изменении времени задержки для распознавания БПЛА мультироторного типа / Пащенко Р.Э., Цюпак Д.О., Ратайчук И.А, Барданова О.А. // Збірник наукових праць “Системи обробки інформації”. – Х.: ХУ ПС. – 2015. – Вип. 1(126). – С. 44 – 49. (Google Scholar).

(Особистий внесок – проведено аналіз зміни форми фазових портретів при їх побудові з різними часовими затримками. Розглянута можливість використання

зміни форми фазових портретів, побудованих при різному часі затримки, для розпізнавання БПЛА.)

7. Анализ величин фрактальных размерностей фазовых портретов для распознавания БПЛА мультироторного типа / Пащенко Р.Э., Фатеев А.С., Цюпак Д.О., Романцов А.А. // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2016. – № 1(22). – С. 83 – 87. (Google Scholar).

(Особистий внесок – розглянуто можливість використання величини фрактальної розмірності фазових портретів як ознаки розпізнавання БПЛА мультироторного типу. Показано, що значення ФР фазових портретів сигналів, отриманих при зондуванні БПЛА, відрізняються від значень ФР фазових портретів фонових сигналів.)

8. Распознавание типа мультироторного БПЛА с использованием формы фазовых портретов / Пащенко Р.Э., Иванов В.К., Цюпак Д.О., Гергель И.А. // Системи озброєння і військова техніка. – 2017. – № 1(49). – С. 143 – 147. (Google Scholar).

(Особистий внесок – проведено аналіз форм фазових портретів сигналів при зондуванні БПЛА з трьома і шістьма роторами. Розглянута можливість використання форми фазових портретів для розпізнавання типу мультироторних БПЛА, які відрізняються кількістю роторів.)

9. Распознавание типа мультироторного БПЛА с использованием фрактальных размерностей фазовых портретов / Пащенко Р.Э., Иванов В.К., Цюпак Д.О., Молчанов А.А. // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2017. – № 2(27). – С. 99 – 104. (Google Scholar).

(Особистий внесок – проведено розрахунок величин фрактальних розмірностей фазових портретів сигналів, побудованих з різними часовими затримками, при зондуванні БПЛА з трьома і шістьма роторами. Розглянута можливість використання величин ФР для розпізнавання типу мультироторних БПЛА, які відрізняються кількістю роторів.)

1.2. Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації у зарубіжних спеціалізованих виданнях

1. Tsyupak D. Doppler signal analysis of drone rotors reflection with fractal dimensions / Pashchenko R., Ivanov V., Tsyupak D. // Telecommunications and Radio Engineering. – 2020. – Vol. 79, Is. 16. – P. 1425 – 1440. (Scopus).

(Особистий внесок – запропоновано метод аналізу складності форми ДС, відбитих від обертових роторів БПЛА з використанням фрактальних розмірностей. Проаналізована можливість використання двох методів визначення ФР для оцінки складності ДС. Встановлено, що при збільшенні кількості роторів, що обертаються, величини ФР доплерівських сигналів залежать від напрямку обертання роторів та їх геометричного розташування.)

2. Наукові праці, що засвідчують апробацію матеріалів дисертації

1. Tsyupak D. On radar signals analysis using the fractal dimension / Pashchenko R., Ivanov V., Tsyupak D. // 4th International Scientific and Practical Conference “Problems of Infocommunications. Science and Technology” (PICS&T-2017). – Ukraine, Kharkov, 2017. – paper 84. (Scopus).

(Особистий внесок – оцінена можливість аналізу характеристик сигналів радіолокаційних засобів з використанням одного з методів нелінійної динаміки – фрактального методу.)

2. Tsyupak D. The Use of Fractal Signals in Information and Communication Systems / Pashchenko R., Ivanov V., Tsyupak D. // 6th International Scientific and Practical Conference “Problems of Infocommunications. Science and Technology” (PICS&T-2019). – Ukraine, Kjev, 2019. – picst19_780.pdf. (Scopus).

(Особистий внесок – проведено аналіз специфічних параметрів і властивостей фрактальних сигналів, що відрізняють його від класичних радіосигналів, з використанням фазових портретів.)

3. Tsyupak D. Doppler radar signal model for sensing rotary drone rotors / Pashchenko R., Ivanov V., Tsyupak D. // The 6th Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium (MRRS-2020). – Ukraine, Kharkiv. 2020. – DOI: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252782. (Scopus).

(Особистий внесок – проведено аналіз форми ДС, отриманих експериментально при зондуванні БПЛА мультироторного типу. Вибрані параметри математичної моделі ДС при різній кількості обертових роторів БПЛА.)

4. Цюпак Д.О. Распознавание БПЛА мультироторного типа с использованием фазовых портретов / Пащенко Р.Э., Барданова О.А., Цюпак Д.О. // Тези доповідей одинадцятої НК ХУПС. – Х.: ХУ ПС, 2015. – С. 152.

(Особистий внесок – запропоновано використання форм фазових портретів сигналів, як ознаки розпізнавання БПЛА мультироторного типу, які відрізняються при зондуванні БПЛА і фону.)

5. Распознавание БПЛА мультироторного типа с использованием фрактальных размерностей / Пащенко Р.Э., Иванов В.К., Барданова О.А., Цюпак Д.О. // Матеріали п'ятої міжнародної НТК “Сучасні напрямки розвитку ІКТ та ЗУ”. – Полтава: ПНТУ, Баку; ВА ЗС АР, Кіровоград: КЛА НАУ, Харків: “ДП ХНДІ ТМ”. – 2015. – С. 6, 7.

(Особистий внесок – запропоновано використання величин фрактальних розмірностей, як ознаки розпізнавання БПЛА мультироторного типу, які відрізняється під час зондування БПЛА і фону.)

6. Цюпак Д.О. Метод распознавания БПЛА мультироторного типа с использованием фрактальных размерностей / Пащенко Р.Э., Цюпак Д.О. // Тези доповідей тринадцятої НК ХУПС. – Х.: ХУ ПС, 2017. – С. 209.

(Особистий внесок – запропоновано використання величин фрактальних розмірностей фазових портретів, як ознаки розпізнавання БПЛА мультироторного типу, які відрізняється при зондуванні БПЛА і фону.)

ВИЗНАЧЕННЯ ДАЛЬНОСТІ ДІІ ЗАСОБІВ СПОСТЕРЕЖЕННЯ ЗА БПЛА

Б. 1 Дальність виявлення БПЛА оптико-електронними засобами

Дальність виявлення БПЛА оптичними системами залежить від фізичних умов спостереження і може бути визначена за виразом [66]

$$R = \sqrt{\frac{B_\lambda S_{об} r_{об} S_{пр} \Delta\lambda \tau_{пр} \tau_{ср}}{4\pi P_{пор}}}, \quad (\text{Б.1})$$

де B_λ – спектральна щільність випромінювання поверхні БПЛА за рахунок освітлення її Сонцем ($B_\lambda = 10^2 \text{ Вт/см}^2 \cdot \text{мкм} \cdot \text{ср}$);

$S_{об}$ – ефективна поверхня відбиття БПЛА в оптичному діапазоні;

$r_{об}$ – коефіцієнт відбиття поверхні БПЛА;

$S_{пр}$ – ефективна площа об'єктива, на яку падає випромінювання;

$\Delta\lambda$ – смуга пропускання оптичного фільтра (мкм);

$\tau_{пр}$, $\tau_{ср}$ – коефіцієнти пропускання приймального пристрою і середовища відповідно;

$P_{пор}$ – порогова чутливість приймального пристрою.

З виразу (Б.1) видно, що збільшити дальність виявлення БПЛА можна за рахунок збільшення ефективної площі об'єктива, розширення смуги пропускання оптичного фільтра і збільшення коефіцієнта пропускання приймального пристрою, а також зменшення порогової чутливості приймального пристрою. Також покращення ефективності пошуку БПЛА досягається за рахунок звуження поля зору, зменшення зони огляду і збільшення часу пошуку [65].

Під час застосування ІЧ засобів розподіл інтенсивності випромінювання для абсолютно чорного тіла визначають за законом Планка [72] та він залежить (змінюється) від довжини хвилі та абсолютної температури нагрітого тіла, а реальних

(сірих) тіл ще й від спектрального коефіцієнта випромінювання. Дальність виявлення пасивними ІЧ засобами об'єкту, що має температуру T , визначають за виразом [66]

$$R = \sqrt{\frac{S_{\text{проект}} S_{\text{аперт}} \tau_{\text{пр}}}{P_{\text{пор}}} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_{\text{ср}}(\lambda) J'(\lambda) d\lambda}, \quad (\text{Б.2})$$

де $S_{\text{проект}}$ – площа проекції БПЛА на картинну площину, перпендикулярну напрямку спостереження;

$S_{\text{аперт}}$ – ефективна площа приймальної апертури ІЧ засобу;

$\tau_{\text{пр}}$ – коефіцієнти пропускання приймального пристрою ІЧ засобу;

$P_{\text{пор}}$ – порогова чутливість приймального пристрою ІЧ засобу;

λ_1, λ_2 – межі спектрального діапазону приймального пристрою ІЧ засобу;

$\tau_{\text{ср}}(\lambda)$ – спектральний коефіцієнт пропускання середовища;

$J'(\lambda)$ – розподіл інтенсивності випромінювання реального (сірого) тіла.

Відразу після проведення вимірювань яскравості об'єкту за допомогою того ж самого ІЧ засобу визначаються параметри поточного фонового випромінювання неба. Потужність фонового випромінювання розраховують відповідно до виразу [14]

$$P_{\phi} = (\Delta\varepsilon \times \Delta\beta) \sqrt{S_{\text{проект}} \tau_{\text{пр}} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_{\text{ср}}(\lambda) N_{\phi}(\lambda) d\lambda}, \quad (\text{Б.3})$$

де $\Delta\varepsilon \times \Delta\beta$ – розміри миттєвого поля зору системи;

$N_{\phi}(\lambda)$ – спектральна випромінювальна здатність фону, що визначається за станом атмосфери.

Як видно з виразів (Б.2) і (Б.3) для збільшення дальності виявлення БПЛА необхідно збільшувати розмір оптичної системи та звужувати її промінь. Також застосування однопроменевої ІЧ системи дозволяє контролюватися тільки малі тілесні кути зони огляду. Для контролю великих тілесних кутів потрібні багатоп-

роменеві ГЧ системи, у яких деяка кількість нерухомих променів настроюється на заданий напрямок, що контролюється [14].

Б. 2 Дальність виявлення БПЛА акустичними і радіолокаційними засобами спостереження

Дальність енергетичного виявлення акустичного сигналу можна записати в такому вигляді [66]

$$R = \sqrt{\frac{P_{дж}^2 S_{пр} G_{дж}}{4\pi P_{пор}^2}} \exp(-0,115\alpha), \quad (\text{Б.4})$$

де $P_{дж}$ – значення акустичного тиску, створеного корисним сигналом джерела;

$S_{пр}$ – ефективна поверхня прийому акустичної хвилі засобом спостереження;

$G_{дж}$ – коефіцієнт спрямованої дії джерела сигналу;

$P_{пор}$ – порогове значення акустичного тиску;

α – коефіцієнт загасання акустичних коливань внаслідок релаксаційних процесів.

Як видно з виразу (Б.4), дальність виявлення БПЛА зростає із збільшенням акустичного тиску, створеного джерелом сигналу, а також ефективної поверхні прийому акустичної хвилі засобом спостереження і коефіцієнту спрямованої дії джерела сигналу. Також дальність виявлення БПЛА залежить від порогового значення акустичного тиску і коефіцієнта загасання акустичних коливань внаслідок релаксаційних процесів.

Вираз для визначення дальності виявлення БПЛА активною РЛС можна записати у такому вигляді [66]

$$R = \sqrt[4]{\frac{P_{пер} G_{пер} G_{пр} \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 P_{пор}}}, \quad (\text{Б.5})$$

де $P_{пер}$ – потужність передавача;

$G_{пер}$ – коефіцієнт підсилення передавальної антени;

G_{np} – коефіцієнт підсилення приймальної антени;

σ – ефективна поверхня розсіювання БПЛА;

$P_{пор}$ – порогова потужність сигналу на вході приймача РЛС.

Як видно з виразу (Б.5), на дальність виявлення БПЛА, крім ЕПР, впливають характеристики РЛС.

Дальність виявлення сигналу БПЛА засобами РТР визначається за формулою [66]

$$R = \sqrt{\frac{P_{дж} G_{дж}(\varepsilon, \beta) G_{np}(\varepsilon, \beta) \lambda^2}{(4\pi)^2 P_{пор}}}, \quad (\text{Б.6})$$

де $P_{дж}$ – потужність сигналу джерела випромінювання;

$G_{дж}(\varepsilon, \beta)$ – коефіцієнт підсилення антени джерела випромінювання залежно від сферичних координат;

$G_{np}(\varepsilon, \beta)$ – коефіцієнт підсилення антени станції РТР залежно від сферичних координат;

$P_{пор}$ – порогова потужність сигналу на вході приймача станції РТР.

Як видно з аналізу виразу (Б.6), що дальність виявлення може бути значною, якщо потужність випромінювання передавачів і коефіцієнт підсилення антени радіоелектронних засобів БПЛА велика.

ІНФОРМАЦІЙНА І КОРЕЛЯЦІЙНА РОЗМІРНОСТІ

Розмірність яка враховує в тій або іншій формі частоту з якою траєкторія потрапляє в елемент розбиття (коло або квадрат) є інформаційна розмірність [125]. Цей тип розмірності аналогічний ємкісній розмірності (1.7) і також часто використовується. Під час визначення такої розмірності також влаштовують покриття множини точок N_0 квадратами з стороною довжини ε . Та визначають ймовірність потрапляння точок у квадрат покриття P_i . Інформаційна розмірність визначається як

$$D_1 = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{I(\varepsilon)}{\log(1/\varepsilon)} = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\sum P_i \log P_i}{\log \varepsilon}. \quad (\text{B.1})$$

Інформаційна розмірність пов'язана з ємкісною (РХБ) як $D_1 \leq D_H$.

Кореляційна розмірність є третім найбільш поширеним типом фрактальної розмірності [125]. При її визначенні безперервна траєкторія дискретизується – замінюється множиною з N точок $\{x_i\}$. Потім обчислюють відстань між парами точок $r_{ij} = |x_i - x_j|$, використовуючи або звичайну евклідову міру відстані (квадратний корінь з суми квадратів компонент), або яку-небудь еквівалентну міру (наприклад, суму абсолютних величин компонент вектору). Кореляційна функція визначається як

$$C(\varepsilon) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N^2} \left(\begin{array}{l} \text{кількість пар } (i, j), \\ \text{для яких відстань } r_{ij} < \varepsilon \end{array} \right). \quad (\text{B.2})$$

Ця функція залежить від ε , і при $\varepsilon \rightarrow 0$ змінюється за ступеневим законом, тобто

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} C(\varepsilon) = a \cdot \varepsilon^{D_2},$$

тому кореляційну розмірність можна визначити як

$$D_2 = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\log C(\varepsilon)}{\log \varepsilon}. \quad (\text{B.3})$$

Інформаційна і кореляційна розмірності обмежують ємкісну розмірність (РХБ) знизу, тобто $D_2 \leq D_1 \leq D_H$.

Але у багатьох випадках вся три розмірності дуже близькі.

Розмірність Реньї узагальнює всі розглянуті вище розмірності [125]. За визначенням, q -а розмірність Реньї визначається за формулою

$$D_q = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{1}{q-1} \frac{\log \sum_{i=1}^N P_i^q}{\log \varepsilon}, \quad (\text{B.4})$$

де P_i – ймовірність попадання на i -у компоненту лінії.

Додаток Г

АКТИ ПРО РЕАЛІЗАЦІЮ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор Національного аерокосмічного
університету ім. М.Є. Жуковського «ХАІ» з
наукової роботи
доктор технічних наук
професор

В.В. ПАВЛІКОВ

2020 р.

А К Т

впровадження наукових положень і результатів
дисертаційного дослідження
Цюпака Дмитра Олеговича

Комісія у складі голови – завідувача кафедри геоінформаційних технологій та космічного моніторингу Землі кандидата технічних наук ГОРЕЛИКА Станіслава Ігоровича і членів: професора кафедри доктора технічних наук професора БУТЕНКО Ольги Станіславівни і доцента кафедри кандидата технічних наук доцента АНДРЕЄВА Сергія Михайловича, розглянувши матеріали дисертаційного дослідження Цюпака Дмитра Олеговича «Методи аналізу взаємодії електромагнітного випромінювання з рухомих БПЛА з використанням методів нелінійної динаміки» прийшла до висновку, що матеріали дисертаційної роботи, а саме:

- метод аналізу сигналів, відбитих від мультироторного БПЛА, з використанням серії фазових портретів, побудованих на псевдофазовій площині з різною часовою затримкою;

- метод аналізу доплерівських сигналів, відбитих від мультироторного БПЛА, з використанням фрактального аналізу фазових портретів, побудованих з різною часовою затримкою,

впроваджені в навчальний процес і використовуються під час проведення лекцій і лабораторних робіт з навчальної дисципліни «Геофізика», застосування розроблених методів дозволило дослідити особливості форм геофізичних сигналів, зокрема сигналів обумовлених землетрусами різної інтенсивності та атмосферних явищ.

Голова комісії
завідувач кафедри геоінформаційних технологій та космічного моніторингу
Землі
кандидат технічних наук



С.І. ГОРЕЛИК

Члени комісії:
доктор технічних наук
професор



О.С. БУТЕНКО

кандидат технічних наук
доцент



С.М. АНДРЕЄВ