

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 методу 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 площина, 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 мультироторного БПЛА / Пащенко Р.Э., Иванов В.К., Цюпак Д.О., Левадный Ю.В. // Радиопизика 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 / Пащенко Р.Е., Иванов В.К., Цюпак Д.О. // Радиопизика 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.