

УДК 530.1.537.86 + 621.396.96

Р.Э. Пащенко¹, А.С. Фатеев¹, Д.О. Цюпак¹, А.А. Романцов²¹ Институт радиофизики и электроники имени А.Я. Усикова НАН Украины, Харьков² Национальный аэрокосмический университет имени Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Харьков

АНАЛИЗ ВЕЛИЧИН ФРАКТАЛЬНЫХ РАЗМЕРНОСТЕЙ ФАЗОВЫХ ПОРТРЕТОВ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ БПЛА МУЛЬТИРОТОРНОГО ТИПА

Рассмотрена возможность использования величины фрактальной размерности фазовых портретов в качестве признака распознавания БПЛА мультироторного типа. Показано, что значения фрактальных размерностей фазовых портретов сигналов, полученных при зондировании БПЛА, отличаются от значений фрактальных размерностей фазовых портретов фоновых сигналов. Предложен усовершенствованный метод распознавания БПЛА мультироторного типа с использованием формы фазовых портретов, построенных при различных временах задержки, и величин их фрактальных размерностей.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, распознавание БПЛА, фрактальная размерность, фазовый портрет.

Постановка проблемы и анализ литературы

Сигналы с выхода канала фазового детектора когерентно-импульсной РЛС имеют сложную форму. Изменение формы сигнала определяется характером движения объекта зондирования. В последнее десятилетие все чаще для анализа сигналов, имеющих сложную форму, используют фрактальный метод анализа временных рядов [1-3]. При использовании данного метода степень флуктуаций может быть описана с помощью характеристического коэффициента – фрактальной размерности D . Фрактальная размерность (ФР), как правило, является положительным нецелым числом, которое отображает, некоторым образом, сложность формы сигнала. При двумерном представлении принимаемого сигнала, величина фрактальной размерности лежит в пределах $1,0 < D < 2,0$ [1]. Большому значению ФР соответствует большая степень заполнения плоскости.

В работе [4] показано, что расчет ФР сигналов с выхода канала фазового детектирования РЛС позволяет количественно оценить сложность формы сигналов. Также в [4] отмечается, что различие в величинах фрактальных размерностей сигналов с выхода головных телефонов при зондировании фона и БПЛА может быть использовано в качестве признака распознавания БПЛА мультироторного типа с тремя винтами. Так ФР фонового сигнала в среднем близка значению $D_{cp} = 1,89 \pm 0,01$, а среднее значение ФР сигналов, обусловленных зависанием и движением БПЛА, в основном колеблется около значения $D_{cp} = 1,85 \pm 0,01$.

Для получения исходных сигналов использовалась экспериментальная установка на базе когерентно-импульсной РЛС 1РЛ133 “Кредо” сантимет-

рового диапазона (простой сигнал, $\lambda = 2$ см, $\tau_n = 0,4$ мкс) [5]. В качестве объекта зондирования использовался БПЛА мультироторного типа с тремя винтами, разработанный в ООО “КБ АВИА” Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского “ХАИ” [6], который зависал на высоте 20 м и двигался на высоте 30 м в направлении к РЛС и от нее. Краткое описание эксперимента и исходные временные реализации приведены в [4]. При анализе сигнала исходный временной ряд обрабатывался с помощью “скачущего окна”, размеры “окна” и величина “скачка” равнялись 10 000 точек, что соответствует 0,5 секунды записанного сигнала с выхода головных телефонов РЛС. Для каждого положения “окна” определялось численное значение ФР с помощью специальной программы для расчета ФР сигналов и фазовых портретов. Фрактальная размерность определялась с использованием метода покрытия [1].

В работе [7] проведен анализ изменения формы фазовых портретов (ФП) при их построении с различными временами задержки, а также рассмотрена возможность использования изменения формы ФП для распознавания БПЛА.

На рис. 1 показаны ФП фонового сигнала (а) (12-ое “окно”), а также ФП сигналов при зондировании зависшего БПЛА (б) (18-ое “окно”) и движущегося БПЛА (в) (12-ое “окно”) при различных значениях временной задержки T . Величина временной задержки и номер “окна” обозначены на ФП. На изображениях ФП по оси абсцисс отложены значения записанного сигнала (Y), а по оси ординат сдвинутые на T точек значения этого же сигнала (Z).

На рис. 1, а видно, что ФП фонового сигнала представляет собой сгруппированную в определенной области псевдофазовой плоскости (ПФП) фазовую траекторию, и может быть охарактеризован как

случайное движение изображающей точки по фазовой траектории. Кроме того, на рис. 1, а видно, что форма ФП фонового сигнала при изменении величины временной задержки практически не изменяется, наблюдается только некоторое удлинение и поворот (влево или вправо) ФП вдоль большой оси эллипса [7].

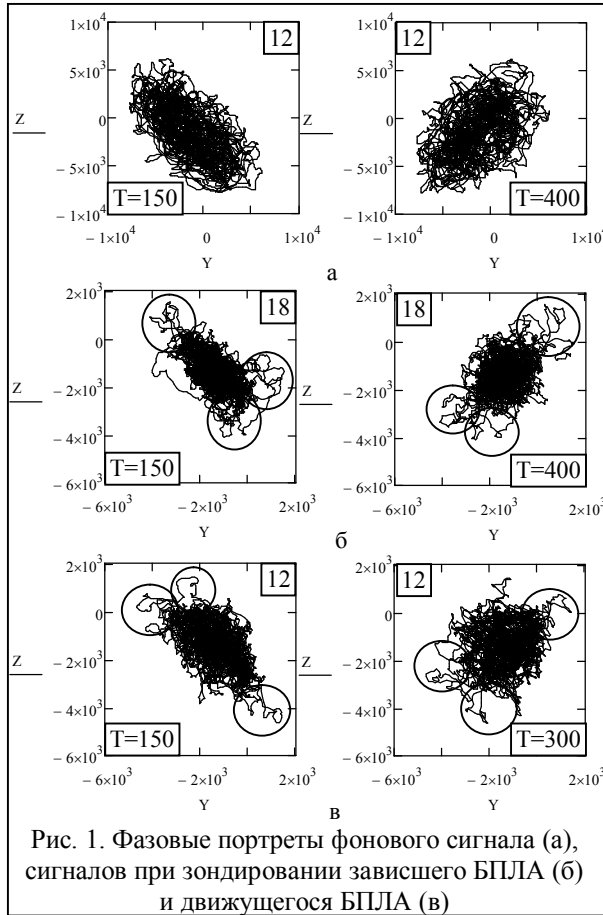


Рис. 1. Фазовые портреты фонового сигнала (а), сигналов при зондировании зависшего БПЛА (б) и движущегося БПЛА (в)

На ФП сигналов, обусловленных зависанием и движением БПЛА (рис. 1, б и в, соответственно), фоновый сигнал также концентрируется в центре ФП, а фазовые траектории, которые характеризуют вращение винтов и движение БПЛА, отображаются на краях ФП, и проявляются в виде отделившихся фазовой траектории от фонового ФП. При этом на краях ФП движущегося БПЛА наблюдается более сложный характер поведения фазовой траектории, чем при зависании БПЛА. Кроме того, при построении ФП сигналов, полученных при зависании и движении БПЛА, с изменением временной задержки на краях ФП проявляется концентрация фазовой траектории в трех областях ПФП. Расположение этих областей имеет треугольную форму, напоминающую форму БПЛА мультироторного типа с тремя винтами [7].

Представляет практический интерес провести анализ величин фрактальных размерностей фазовых портретов, построенных с различными временами задержки, а также возможности их использования в

качестве признака распознавания БПЛА мультироторного типа.

Цель статьи: провести анализ изменения величин фрактальных размерностей фазовых портретов при их построении с различными временами задержки и рассмотреть возможность использования величин фрактальных размерностей фазовых портретов для распознавания БПЛА.

Анализ фрактальных размерностей фазовых портретов сигналов, отраженных от фона

Проведем количественную оценку сложности формы фазовых портретов фонового сигнала при изменении временной задержки путем вычисления фрактальной размерности ФП. С помощью специальной программы для расчета ФР сигналов и фазовых портретов, в которой реализован метод покрытия, рассчитаем ФР фазовых портретов фонового сигнала (12-ое “окно”) при различных временах задержки T. В 12-ом “окне” присутствуют отражения только от фона. Временную задержку T будем изменять с дискретностью 25 точек временного ряда. Результаты расчетов ФР ФП приведены в табл. 1.

Таблица 1

Величины ФР фазовых портретов фонового сигнала

| Значение временной задержки, T | Значение ФР фазовых портретов | Значение временной задержки, T | Значение ФР фазовых портретов |
|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| 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 |

Как видно из табл. 1, фрактальная размерность ФП при временной задержке 25 точек носит аномальный характер (сильно отличающееся от других значений), поэтому в дальнейшем при малых временах задержек $T < 50$, ФР рассчитывать не целесообразно. Также в табл. 1 видно, что ФР фазовых портретов при разных временах задержек изменяются. Максимальное ($D_{\text{макс}} = 1,9180$) и минимальное ($D_{\text{мин}} = 1,8958$) значения ФР ФП выделены в таблице серым цветом. Таким образом, диапазон изменения ФР ФП при различных значениях временной задержки составляет $\Delta D_{\text{ф}} = 0,0222$. Характер изменения величины ФР ФП от значения временной задержки лучше проследить с помощью графической

зависимости, показанной на рис. 2. На рисунке по оси абсцисс отложены значения фрактальной размерности ФП (D), а по оси ординат – значения временной задержки (T).

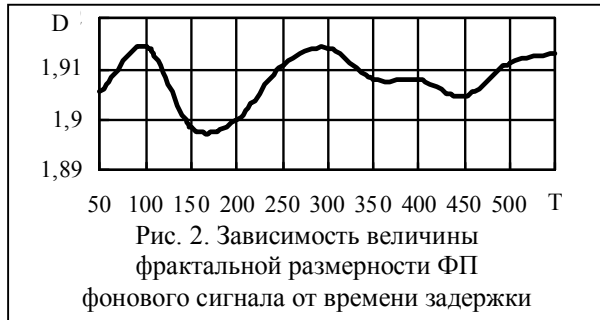


Рис. 2. Зависимость величины фрактальной размерности ФП фонового сигнала от времени задержки

На рис. 2 видно, что наибольшие колебания (изменения) ФР ФП наблюдаются при временах задержки $T < 325$ точек временного ряда. При больших временах задержки величина ФР ФП стремится к значению $D_{ср.ф} \approx 1,91 \pm 0,005$. На интервале временных задержек от $T = 325$ до $T = 550$ диапазон изменения ФР ФП составляет $\Delta D_{ф} = D_{550} - D_{450} = 1,9131 - 1,9046 = 0,0085$.

Таким образом, анализ данных табл. 1 и рис. 2 показывает, что фрактальная размерность ФП фонового сигнала при изменении времени задержки изменяется не значительно, и может быть оценена как $D = 1,91 \pm 0,005$, что в дальнейшем можно использовать при разделении фонового сигнала и сигнала, обусловленного движущимися объектами.

Оценка фрактальных размерностей фазовых портретов сигналов при зондировании БПЛА мультироторного типа

Оценим сложность формы фазовых портретов сигналов при зондировании БПЛА мультироторного типа (зависание и движение БПЛА) при изменении временной задержки. Для этого рассчитаем фрактальные размерности ФП с помощью специальной программы для расчета ФР сигналов и фазовых портретов, в которой реализован метод покрытия. В табл. 2 приведены величины фрактальных размерностей ФП сигналов при зондировании зависшего БПЛА (18-ое “окно”) и движущегося БПЛА (12-ое “окно”) при различных временах задержки T . Временная задержка T , также как и при исследовании ФР ФП фонового сигнала, изменялась с дискретностью 25 точек временного ряда. Фрактальная размерность ФП при временной задержке $T = 25$ точек (аномальная) не рассчитывалась.

Из данных табл. 2 видно, что фрактальные размерности ФП сигналов при зондировании БПЛА мультироторного типа также изменяются при изменении времен задержек. Максимальные и минимальные значения ФР ФП выделены в таблице се-

рым цветом. Диапазон изменения ФР ФП при различных значениях временной задержки составил для зависшего БПЛА $\Delta D_{з} = 0,0296$, а для движущегося БПЛА – $\Delta D_{д} = 0,0229$.

Таблица 2

Величины ФР фазовых портретов сигналов при зондировании зависшего и движущегося БПЛА

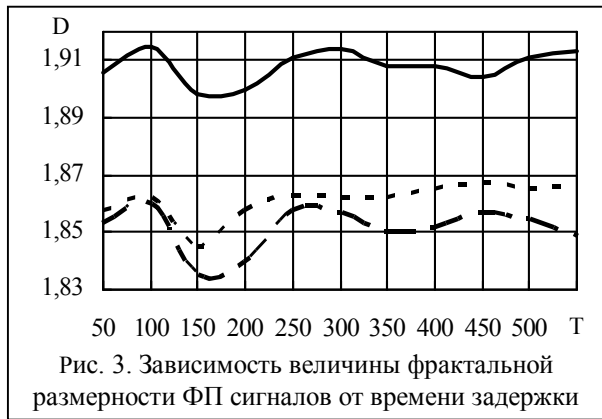
| Зависший БПЛА | | Движущийся БПЛА | |
|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| Значение временной задержки, T | Значение ФР фазовых портретов | Значение временной задержки, T | Значение ФР фазовых портретов |
| 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 |

Кроме того, необходимо отметить, что максимальное значение ФР ФП сигнала, обусловленного движением БПЛА, ($D_{макс} = 1,8678$) наблюдается не при значении временной задержки $T = 75$ точек, как у фонового сигнала и сигнала, обусловленного зависанием БПЛА, (хотя при таком T оно также велико $D_{75} = 1,8662$), а при временной задержке $T = 525$. Это обусловлено, скорее всего, более сложным поведением фазовой траектории при движении БПЛА.

Таким образом, минимальные значения ФР ФП анализируемых сигналов наблюдаются при $T = 150 \pm 25$ точек, а максимальные, в основном, – при $T = 75 \pm 25$ точек. Диапазон изменения ФР ФП сигналов, обусловленных БПЛА, при изменении времени задержки не сильно отличается от диапазона изменения ФР ФП фонового сигнала.

Для оценки характера изменения величины ФР ФП анализируемых сигналов построим ее зависимость от значения временной задержки, которая показана на рис. 3. На рисунке сплошной линией показано изменение ФР ФП фонового сигнала, пунктирной линией – зависшего БПЛА и точечной линией – движущегося БПЛА.

Как видно из хода кривых на рис. 3, наибольшие колебания (изменения) ФР ФП сигналов, обусловленных БПЛА, также как и для фонового сигнала, наблюдаются при временах задержки $T < 325$ точек временного ряда. При больших временах задержки величина ФР ФП анализируемых сигналов стремится к установившимся значениям, различным для фона и характера движения БПЛА.



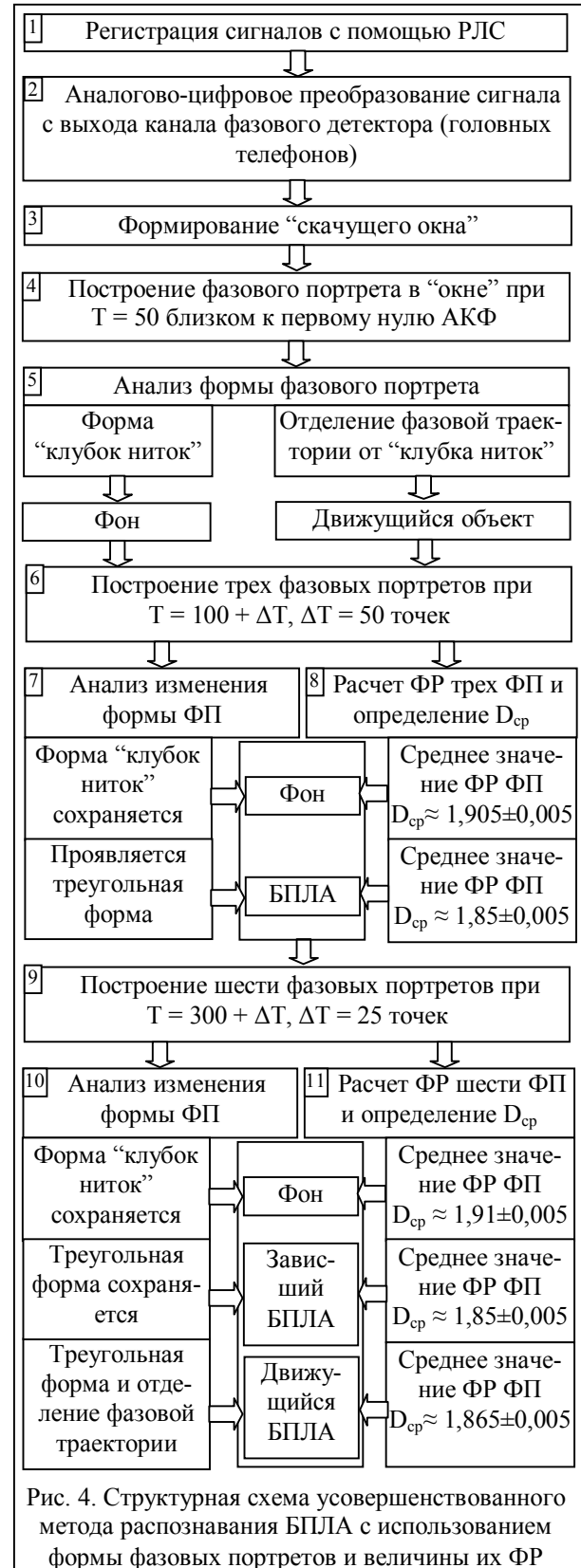
Из данных табл. 2 и рис. 3 видно, что ФР ФП сигнала, обусловленного зависанием БПЛА, при увеличении времени задержки стремится к среднему значению $D_{ср,з} \approx 1,853 \pm 0,005$, а ФР ФП сигнала, обусловленного движением БПЛА, – к $D_{ср,д} \approx 1,865 \pm 0,005$. В тоже время, как отмечалось выше, ФР ФП фонового сигнала при увеличении T стремится к значению $D_{ср,ф} \approx 1,91 \pm 0,005$. Также необходимо отметить, в работе [4] показано, что среднее значение ФР сигналов при зондировании зависшего и движущегося БПЛА практически не отличаются и составляют $D_{ср} \approx 1,85$.

Оценим диапазон изменения ФР ФП, обусловленных БПЛА, на интервале временных задержек от $T = 325$ до $T = 550$. Так при зависании БПЛА диапазон изменения ФР ФП составляет $\Delta D_з = D_{450} - D_{550} = 1,8568 - 1,8491 = 0,0077$, а при движении БПЛА $\Delta D_д = D_{525} - D_{350} = 1,8678 - 1,8624 = 0,0054$. Как отмечалось выше, диапазон изменения ФР ФП фонового сигнала составляет $\Delta D_ф = 0,0085$.

Таким образом, сравнительный анализ данных табл. 1 и табл. 2, а также данных на рис. 3, показывают, что различие в величинах фрактальных размерностей ФП сигналов с выхода головных телефонов при зондировании фона и БПЛА может быть использовано в качестве признака распознавания БПЛА мультироторного типа с тремя винтами. Также различия в величинах фрактальных размерностей ФП сигналов, обусловленных зависанием и движением БПЛА, позволяют определить характер движения БПЛА, что не удается по величине ФР соответствующих сигналов.

Проведенный анализ изменения величин фрактальных размерностей фазовых портретов при уве-

личении времени задержки, позволяет усовершенствовать, предложенный в [7], метод распознавания БПЛА мультироторного типа с использованием формы фазовых портретов, построенных при различных временах задержки. Структурная схема усовершенствованного метода показана на рис. 4.



Первые семь (1-7) этапов усовершенствованного метода распознавания совпадают с аналогичными этапами метода, рассмотренного в [7]. На восьмом этапе (8) для повышения качества распознавания производится расчет ФР трех ФП, построенных на шестом этапе, а также вычисляется среднее значение ФР этих ФП. По форме ФП (качественный признак) и величине ФР ФП (количественный признак) принимается решение о том, сигнал является фоновым или обусловлен БПЛА. Характер движения БПЛА на этом этапе не определяется. Для определения характера движения БПЛА строятся шесть ФП при больших временах задержки от $T = 300$ до $T = 425$ с дискретностью $\Delta T = 25$ точек (9 этап). На десятом этапе (10), анализируется изменение формы ФП, а на одиннадцатом (11) – рассчитывается ФР этих ФП и вычисляется их среднее значение. Характерные формы ФП (качественный признак) и различные величины ФР ФП (количественный признак) позволяют разделить фоновые сигналы и сигналы, обусловленные зависанием и движением БПЛА.

Таким образом, предложенный метод позволяет распознать БПЛА с использованием как качественного (форма ФП), так и количественного (величина ФР ФП) признаков, что улучшает качество распознавания.

Выводы

1. Различие в величинах фрактальных размерностей фазовых портретов (построенных при различных временах задержки) сигналов с выхода головных телефонов при зондировании фона и БПЛА может быть использовано в качестве признака распознавания БПЛА мультироторного типа с тремя винтами.

2. Величины фрактальных размерностей ФП сигналов при зависании и движении БПЛА отличаются и по величине ФР ФП можно определить характер движения БПЛА.

3. Предложен усовершенствованный метод распознавания БПЛА мультироторного типа с использованием формы фазовых портретов, построенных при различных временах задержки, и величин их фрактальных размерностей, который позволяет повысить качество распознавания БПЛА мультироторного типа и определения характера его движения.

4. При проведении дальнейших исследований целесообразно оценить возможность применения разработанного метода для распознавания БПЛА, отличающихся количеством роторов.

Список литературы

1. Федер Е. Фракталы / Е. Федер. – М.: Мир, 1991. – 254 с.
2. Малинецкий Г.Г. Современные проблемы нелинейной динамики / Г.Г. Малинецкий, А.Б. Потапов. – М.: Едиториал УРСС, 2002. – 360 с.
3. Фрактальный анализ процессов, структур и сигналов: Коллективная монография / [Доля Г.Н., Иванов В.К., Пащенко Р.Э. и др.]; Под ред. Р.Э. Пащенко. – Х.: ХООО “НЭО “ЭкоПерспектива”, 2006. – 348 с.
4. Распознавание БПЛА мультироторного типа с использованием фрактальных размерностей / Р.Э. Пащенко, В.М. Илюшко, А.С. Фатеев, Д.О. Цюпак // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2014. – № 1 (14). – С. 156 – 160.
5. Изделие 1РЛ133. Техническое описание. БД 1.400.009 ТО. – 1974. – 232 с.
6. ООО “КБ АВИА” [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.kb-avia.com/index.html>.
7. Анализ формы фазовых портретов при изменении времени задержки для распознавания БПЛА мультироторного типа / Р.Э. Пащенко, Д.О. Цюпак, И.А. Ратайчук, О.А. Барданова // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2015. – Вип. 1(126). – С. 44 – 49.

Поступила в редколлегию 10.10.2015

Рецензент: д-р техн. наук проф. А.В. Полярус, Харьковский национальный автомобильный университет, Харьков.

АНАЛІЗ ВЕЛИЧИН ФРАКТАЛЬНИХ РОЗМІРНОСТЕЙ ФАЗОВИХ ПОРТРЕТІВ ДЛЯ РОЗПІЗНАВАННЯ БПЛА МУЛЬТИРОТОРНОГО ТИПУ

Р.Е. Пащенко, О.С. Фатеев, Д.О. Цюпак, О.О. Романцов

Розглянута можливість використання величини фрактальної розмірності фазових портретів як ознаки розпізнавання БПЛА мультироторного типу. Показано, що значення фрактальних розмірностей фазових портретів сигналів, отриманих при зондуванні БПЛА, відрізняються від значень фрактальних розмірностей фазових портретів фонових сигналів. Запропонований вдосконалений метод розпізнавання БПЛА мультироторного типу з використанням форми фазових портретів, побудованих при різному часу затримки, і величин їх фрактальних розмірностей.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, розпізнавання БПЛА, фрактальна розмірність, фазовий портрет.

ANALYSIS SIZES OF FRACTAL DIMENSIONS PHASE PORTRAITS FOR OF MULTIROTOR TYPE PILOTLESS VEHICLE RECOGNITION

R.E. Paschenko, A.S. Fateev, D.O. Cupak, A.A. Romancov

Possibility of the use size of fractal dimension phase portraits is considered as a sign recognition BPLA of multirotor type. It is rotined that the values of fractal dimensions phase portraits of signals, got at sounding BPLA, differ from the values of fractal dimensions phase portraits base-line signals. The improved method recognition BPLA of multirotor type is offered with the use form phase portraits, built at different times of delay, and sizes their fractal dimensions.

Keywords: pilotless vehicle, pilotless vehicle recognition, fractal dimension, phase portrait.