

УДК 530.1.537.86 + 621.396.96

Р.Э. Пашенко¹, В.К. Иванов¹, Д.О. Цюпак¹, А.А. Молчанов²¹ Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины, Харьков² Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Харьков

РАСПОЗНАВАНИЕ ТИПА МУЛЬТИРОТОРНОГО БПЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФРАКТАЛЬНЫХ РАЗМЕРНОСТЕЙ ФАЗОВЫХ ПОРТРЕТОВ

Проведен анализ величин фрактальных размерностей фазовых портретов сигналов, построенных с различными временами задержки, при зондировании БПЛА с тремя и шестью роторами. Рассмотрена возможность использования этих величин для распознавания типа мультироторных БПЛА, отличающихся числом роторов. Показано, что величины фрактальных размерностей фазовых портретов сигналов, при зондировании зависших и движущихся БПЛА с тремя и шестью роторами, отличаются. Численные значения фрактальных размерностей фазовых портретов могут быть использованы как признак распознавания типа мультироторного БПЛА и характера его движения.

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

Постановка проблемы и анализ литературы

В последнее время значительно расширился парк беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), особенно БПЛА мультироторного типа. Такие БПЛА отличаются как спектром решаемых задач (в военной и гражданской сферах), так и их конструктивным построением. При их конструировании широко используют полимеры, стекловолокно, пенопласт, картон и композиционные материалы, которые снижают отражение от них электромагнитных волн. Основной конструктивной особенностью мультироторных БПЛА является количество роторов, которые обеспечивают их движение. Наиболее распространенными являются мультироторные БПЛА с тремя, четырьмя и шестью роторами. Также существуют БПЛА с восьмью, двенадцатью и большим количеством роторов.

Увеличение количества типов таких БПЛА привело к необходимости обеспечения контроля за выполнением правил их эксплуатации. В связи с этим актуальной задачей становится задача создания системы обнаружения и распознавания мультироторных БПЛА не только визуально, а и с использованием технических средств, в частности инфракрасных и радиолокационных.

Экспериментальное исследование сигналов с выхода канала фазового детектора когерентно-импульсной РЛС при зондировании движущихся объектов показывает, что характер движения (тип движущегося объекта) приводит к сложным формам сигнала. Особенности формы сигналов могут быть наглядно и качественно исследованы с использованием фазовых портретов (ФП) [1; 2]. При построении фазового портрета осуществляется преобразо-

вание исходного сигнала на псевдофазовую плоскость: $[x(t), x(t+T)]$ – плоскость зависимости амплитуды сигнала в различные моменты времени. В работе [3] показано, что форма ФП сигналов, полученных при зондировании мультироторного БПЛА с тремя роторами, отличается от формы ФП фоновых сигналов. Также в [3] проведен анализ изменения формы ФП сигналов с выхода канала фазового детектирования РЛС при различных временах задержки, а также рассмотрена возможность использования изменения формы ФП для распознавания мультироторных БПЛА.

Количественно оценить сложность формы ФП можно с использованием фрактального метода [1; 2]. При этом степень сложности ФП определяется с помощью характеристического коэффициента – фрактальной размерности D (ФР). Большому значению ФР будет соответствовать большая изрезанность ФП (степень заполнения плоскости). Для менее сложных форм ФП фрактальная размерность будет меньше. 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 роторами. В работе [5] рассмотрена возможность использования величины ФР фазовых портретов в качестве признака распознавания мультироторного БПЛА, в также проведен анализ изменения величины ФР фазовых портретов, построенных при различных временах задержки. Кроме того, в работе [5] предложен метод распознавания БПЛА

мультироторного типа с использованием фрактальных размерностей ФП, построенных при различных временах задержки.

Представляет практический интерес оценить возможность использования разработанного метода распознавания для определения типа мультироторного БПЛА, которые отличаются количеством роторов, на них расположенных.

Цель статьи: рассмотреть возможность использования величин фрактальных размерностей фазовых портретов при их построении с различными временами задержки для распознавания типа мультироторного БПЛА.

Краткое описание проведения экспериментальных исследований

В качестве объектов зондирования использовались мультироторные БПЛА с тремя и шестью роторами, построенные в ООО “КБ АВИА” Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского “ХАИ” [6], показанные на рис. 1. При этом БПЛА зависали на высоте 20 м и двигались на высоте 30 м в направлении к РЛС и от нее.



Рис. 1. Фотографии БПЛА, используемых при проведении эксперимента

В ходе проведения экспериментальных исследований использовалась когерентно-импульсная РЛС 1РЛ133 “Кредо” сантиметрового диапазона (простой сигнал, $\lambda = 2$ см, $\tau_{\text{и}} = 0,4$ мкс) [7]. Сигналы с выхода головных телефонов оцифровывались и записывались в память компьютера. Затем записанные сигналы обрабатывались с помощью “скачущего окна”, размеры “окна” и величина “скачка” равнялись 10 000 точек, что соответствовало по времени 0,5 секунды.

На первом этапе обработки полученных экспериментально сигналов для каждого положения “окна” строился фазовый портрет. Порядок построения ФП на псевдофазовой плоскости приведен в [1; 2].

В работе [3] показано, что форма ФП фонового сигнала при изменении величины временной задержки практически не изменяется, и может быть охарактеризована как случайное движение изображающей точки по фазовой траектории (форма “клубок ниток”).

На рис. 2 показаны ФП сигналов с выхода головных телефонов при различных значениях T (величина временной задержки обозначена внизу на ФП). Слева показаны ФП сигналов при зондирова-

нии БПЛА с тремя роторами (18-е “окно”), а справа – с шестью (7-е “окно”). Области отделения фазовой траектории от фона отмечены окружностями. На изображениях ФП по оси абсцисс отложены значения записанного сигнала (Y), а по оси ординат сдвинутые на T точек значения этого же сигнала (Z).

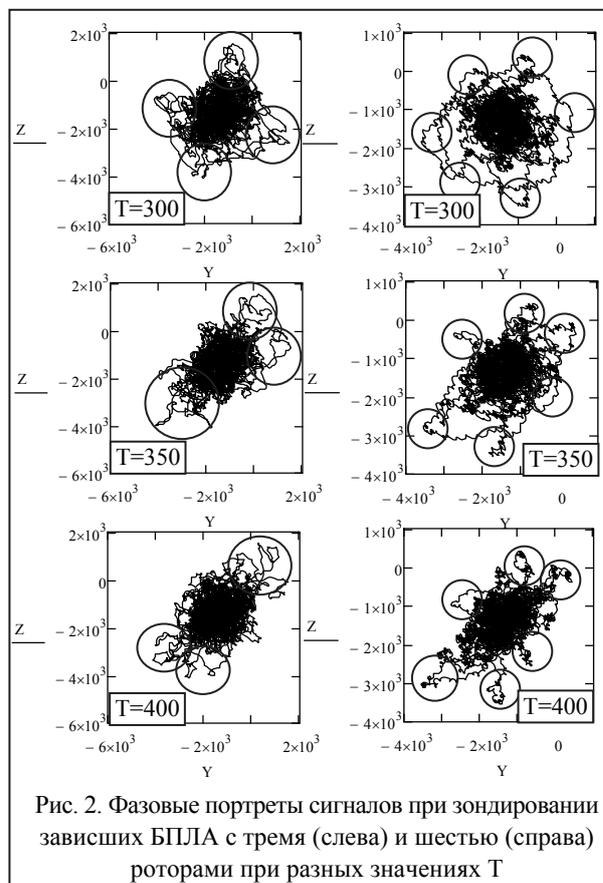


Рис. 2. Фазовые портреты сигналов при зондировании зависших БПЛА с тремя (слева) и шестью (справа) роторами при разных значениях T

Фазовые портреты сигналов при зондировании движущихся БПЛА при различных значениях временной задержки T показаны на рис. 3. Так же как и на рис. 2, слева показаны ФП сигналов при зондировании БПЛА с тремя роторами (17-е “окно”), а справа – с шестью (14-е “окно”).

Анализ форм ФП показывает, что при изменении временной задержки фазовые траектории, обусловленные фоном, группируются в центре ФП в виде “клубка ниток”, а обусловленные зависанием и движением БПЛА – располагаются на краях ФП. При этом фазовая траектория сигнала при зондировании БПЛА с тремя роторами группируется в трех областях ФП, а при зондировании БПЛА с шестью роторами – в шести областях, что соответствует количеству роторов, расположенных на БПЛА.

Необходимо отметить, что формы ФП при движении БПЛА, также как и при зависании, имеют форму, напоминающую в некотором роде форму мультироторных БПЛА с тремя и шестью роторами. Однако в отличие от ФП сигналов, обусловленных зависанием, это сходство несколько размыто. Более сложный характер поведения фазовой траектории

обусловлен как движением БПЛА, так и вращением роторов.

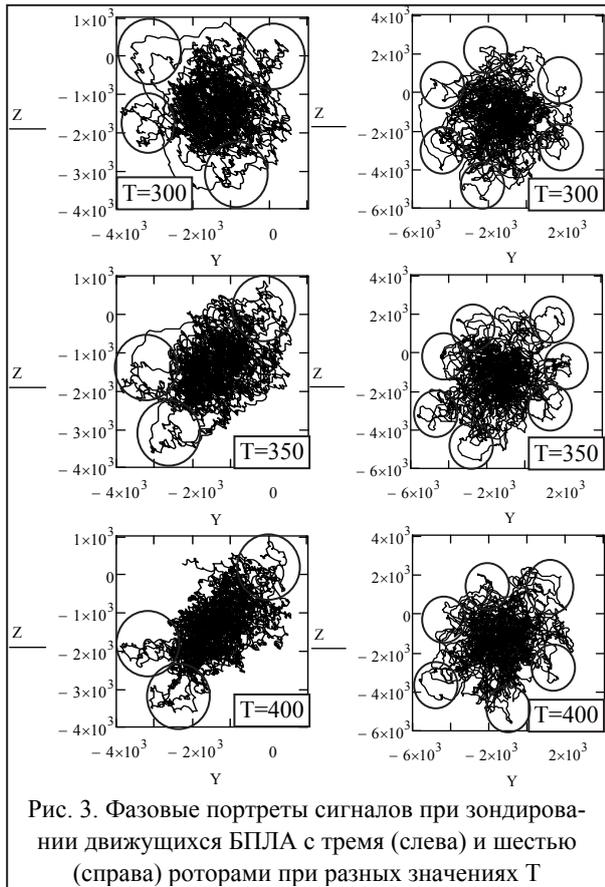


Рис. 3. Фазовые портреты сигналов при зондировании движущихся БПЛА с тремя (слева) и шестью (справа) роторами при разных значениях T

Таким образом, различия в форме ФП могут быть использованы как один из признаков распознавания типа мультироторного БПЛА, например, для определения является ли БПЛА с тремя или шестью роторами.

На втором этапе обработки с помощью специальной программы определялись численные значения ФР фазовых портретов при их построении с различными временами задержки. Фрактальная размерность определялась с использованием метода покрытия [1].

При вычислении ФР изображение ФП покрывалось квадратами с длиной стороны ϵ_1 , и подсчитывалось во сколько квадратов попали известные точки ФП. В результате этого получили одно значение $N(\epsilon_1)$. Затем изображение ФП покрывалось квадратами с другими длинами сторон $\epsilon_2 = \epsilon_1/2$, $\epsilon_3 = \epsilon_1/4$ и т.д. В результате этого были получены значения $N(\epsilon_2)$, $N(\epsilon_3)$ и т.д. После получения этих значений строилась зависимость $\log N(\epsilon)$ от $\log(1/\epsilon)$. Оценивание фрактальной размерности по полученным данным сводилась к поиску “наиболее линейного” участка зависимости $\log N(\epsilon)$ от $\log(1/\epsilon)$; построению на этом участке линейной аппроксимации, например, по методу наименьших квадратов (МНК); определению фрактальной размерности, как тангенса угла наклона прямой МНК.

На рис. 4 показан график зависимости $\log N(\epsilon)$ от $\log(1/\epsilon)$ при линейной аппроксимации по 14 точкам с использованием МНК.



Рис. 4. Построение прямой МНК по 14 точкам

На рис. 4 видно, что такое построение прямой МНК не позволило качественно аппроксимировать все 14 точек, т.е. фрактальная размерность будет определяться с большой ошибкой. Также на рис. 4 видно, что линейный участок полученной зависимости составляют первые восемь точек, а после восьмой точки график изгибается и переходит в установившийся режим. Поэтому в дальнейшем аппроксимация проводилась по первым восьми точкам, т.е. на линейном участке графика. Это позволило повысить точность определения ФР и уменьшить время ее вычисления.

На рис. 5 показан график зависимости $\log N(\epsilon)$ от $\log(1/\epsilon)$ при линейной аппроксимации по 8 точкам с использованием МНК.



Рис. 5. Построение прямой МНК по 8 точкам

Как видно на рис. 5, наклон прямой МНК практически совпадает с наклоном графика зависимости $\log N(\epsilon)$ от $\log(1/\epsilon)$. Таким образом, фрактальные размерности ФП определялись как тангенс угла наклона прямой МНК, построенной по первым восьми точкам графика зависимости $\log N(\epsilon)$ от $\log(1/\epsilon)$.

На заключительном этапе обработки исследовалась зависимость величины ФР фазовых портретов при изменении времени задержки T . Также исследовалось изменение величины ФР фазовых портретов при зондировании мультироторных БПЛА с тремя и шестью роторами при их зависании и движении от РЛС и к ней. В результате анализа делался вывод о возможности распознавания типа мультироторных БПЛА.

Оценка фрактальных размерностей фазовых портретов сигналов при зондировании БПЛА с различным числом роторов

Оценим сложность формы фазовых портретов сигналов при зондировании мультироторных БПЛА с тремя и шестью роторами при их зависании и движении от РЛС и к ней. Для этого рассчитаем фрактальные размерности ФП при изменении временной задержки с помощью специальной программы для расчета ФР сигналов и фазовых портретов.

В табл. 1 приведены результаты расчета величин фрактальных размерностей ФП сигналов при зондировании зависших БПЛА с тремя (18-е “окно”) и шестью (7-е “окно”) роторами при различных временах задержки T . Временная задержка T изменялась с дискретностью 25 точек временного ряда. В работе [5] показано, что фрактальная размерность ФП при временной задержке $T = 25$ точек носит аномальный характер, поэтому при $T = 25$ фрактальная размерность ФП не рассчитывалась.

Таблица 1

Величины ФР фазовых портретов сигналов при зондировании зависших БПЛА с тремя и шестью роторами

БПЛА с тремя роторами		БПЛА с шестью роторами	
Значение временной задержки, T	Значение ФР фазовых портретов	Значение временной задержки, T	Значение ФР фазовых портретов
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

Из данных табл. 1 видно, что фрактальные размерности ФП сигналов при зондировании мульти-

роторных БПЛА изменяются при изменении времени задержки. Максимальные и минимальные значения ФР фазовых портретов выделены в таблице серым цветом. Минимальные значения ФР наблюдаются при небольших значениях времени задержки $T \leq 100$ точек, а максимальные значения в диапазоне $150 < T \leq 200$. Ширина диапазона изменения ФР фазовых портретов для зависшего БПЛА с тремя роторами составила $\Delta D_3 = D_{75} - D_{175} = 1,8625 - 1,8377 = 0,0248$, а с шестью – $\Delta D_6 = 0,0257$, т.е. диапазоны приблизительно одинаковы.

Характер изменения величины ФР ФП от значения временной задержки лучше проследить с помощью графической зависимости, показанной на рис. 6 (сплошная линия БПЛА с тремя роторами, пунктирная – с шестью роторами). На рисунке по оси абсцисс отложены значения фрактальной размерности ФП (D), а по оси ординат – значения временной задержки (T).

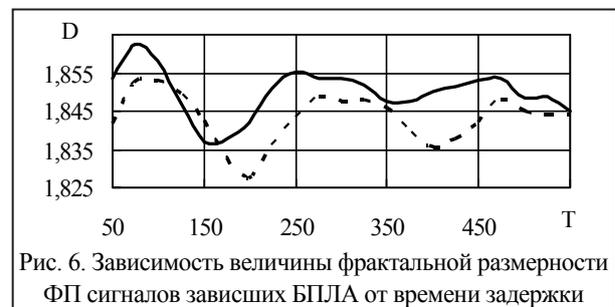


Рис. 6. Зависимость величины фрактальной размерности ФП сигналов зависших БПЛА от времени задержки

На рис. 6 видно, что наибольшие колебания (изменения) ФР ФП наблюдаются при временах задержки $T < 250$ точек временного ряда. При больших временах задержки величина ФР ФП сигналов при зондировании БПЛА с тремя роторами стремится к значению $D_{ср,3} \approx 1,85 \pm 0,005$, а с шестью – к $D_{ср,6} \approx 1,84 \pm 0,005$. Такое поведение ФР обусловлено отличиями и сложностью форм ФП сигналов при зондировании БПЛА с тремя и шестью роторами.

На рис. 2 видно, что ФП сигналов БПЛА с тремя роторами являются более сгруппированными (плотными) и отделение фазовой траектории наблюдается только в 3–4 областях, а ФП сигналов БПЛА с шестью роторами являются менее сгруппированными (разреженными) с 6 областями отделения фазовой траектории. Поэтому величина ФР ФП сигналов БПЛА с тремя роторами больше, чем ФП сигналов БПЛА с шестью роторами.

Таким образом, анализ данных табл. 1 и рис. 6 показывает, что фрактальные размерности ФП сигналов при зондировании зависших БПЛА с тремя и шестью роторами отличаются, что может быть использовано при распознавании типа мультироторных БПЛА.

В табл. 2 приведены результаты расчета величин фрактальных размерностей ФП сигналов при зондировании движущихся БПЛА с тремя (17-е “ок-

но”) и шестью (14-е “окно”) роторами при различных временах задержки T .

Таблица 2

Величины ФР фазовых портретов сигналов при зондировании движущихся БПЛА с тремя и шестью роторами

БПЛА с тремя роторами		БПЛА с шестью роторами	
Значение временной задержки, T	Значение ФР фазовых портретов	Значение временной задержки, T	Значение ФР фазовых портретов
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

Из данных табл. 2 видно, что характер изменения ФР ФП сигналов при зондировании движущихся БПЛА такой же, как и при зондировании зависших БПЛА. Минимальные и максимальные значения ФР фазовых портретов также наблюдаются при небольших значениях времени задержки – $T \leq 100$ и $150 < T \leq 200$ точек, соответственно. Ширина диапазонов изменения ФР фазовых портретов для движущихся БПЛА также отличается не значительно. Соответственно для БПЛА с тремя роторами составила $\Delta D_3 = 0,0283$, а с шестью – $\Delta D_6 = 0,0212$.

На рис. 7 показан характер изменения величины ФР ФП сигналов движущихся БПЛА от значения временной задержки (сплошная линия БПЛА с тремя роторами, пунктирная – с шестью роторами).

На рис. 7 видно, что и при движении БПЛА наибольшие колебания ФР ФП также наблюдаются при временах задержки $T < 250$ точек временного ряда. При больших временах задержки величина ФР ФП сигналов при зондировании БПЛА с тремя роторами стремится к значению $D_{cp,3} \approx 1,86 \pm 0,005$, а с

шестью – к $D_{cp,6} \approx 1,875 \pm 0,005$. Как было показано выше, при зависании БПЛА соответствующие средние значения ФР были меньше. Это обусловлено тем, что при движении БПЛА формы ФП сигналов становятся более сложными.



На рис. 3 видно, что в отличие ФП сигналов зависших БПЛА, ФП сигналов движущихся БПЛА занимают большую часть псевдофазового пространства, что и обуславливает большие значения ФР. Также в отличие от зависших БПЛА, ФП сигналов движущегося БПЛА с шестью роторами становятся более сложными, чем ФП сигналов БПЛА с тремя роторами. Поэтому при движении БПЛА величина ФР ФП сигналов БПЛА с шестью роторами больше, чем ФП сигналов БПЛА с тремя роторами.

Таким образом, анализ данных табл. 2 и рис. 7 показывает, что фрактальные размерности ФП сигналов при зондировании движущихся БПЛА с тремя и шестью роторами, также как и зависших БПЛА, отличаются, что также может быть использовано при распознавании типа мультироторных БПЛА.

Покажем на одном рисунке зависимости изменения величин ФР ФП сигналов зависших и движущихся БПЛА с тремя и шестью роторами от значения временной задержки (рис. 8). На рис. 8 сплошной линией показана зависимость для зависшего БПЛА с тремя роторами, пунктирной – с шестью роторами, штрихпунктирной – движущегося БПЛА с шестью роторами, а точечной – с тремя роторами.



На рис. 8 видно, что при небольших временах задержки $T < 250$ точек для всех рассматриваемых

случаев численные значения ФР ФП сигналов имеют большие колебания. Поэтому при таких временах задержки производить распознавание типа БПЛА с использованием ФР фазовых портретов не целесообразно. Распознавание типа БПЛА возможно при временах задержки $T > 300$ точек с использованием метода описанного в [5]. При этом средние значения ФР ФП сигналов отличаются ($D_{cp,3}^3 \approx 1,85$; $D_{cp,6}^3 \approx 1,84$; $D_{cp,3}^d \approx 1,86$; $D_{cp,6}^d \approx 1,875$), что позволяет определить тип мультироторного БПЛА и характер его движения. Качество распознавания увеличится, если при этом осуществлять анализ формы ФП.

Выводы

1. Величины фрактальных размерностей ФП сигналов при зондировании мультироторных БПЛА изменяются, и с увеличением времени задержки стремятся к установившимся (средним) значениям.

2. Различие в величинах фрактальных размерностей ФП сигналов с выхода головных телефонов, построенных при различных временах задержки, может быть использовано для распознавания типа мультироторного БПЛА с тремя и шестью роторами.

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

4. При проведении дальнейших исследований целесообразно расширить число типов мультироторных БПЛА (с другим числом роторов), а также оценить возможность использования величины фрактальной размерности ФП для распознавания БПЛА не мультироторного типа.

Список литературы

1. Малинецкий Г.Г. *Современные проблемы нелинейной динамики* / Г.Г. Малинецкий, А.Б. Потапов. – М.: Едиториал УРСС, 2002. – 360 с.
2. Пащенко Р.Э. *Формирование фрактальных сигналов* / Пащенко Р.Э. – Харьков: ХООО “НЭО “ЭкоПерспектива”, 2005. – 298 с.
3. 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 // *Збірник наукових праць “Системи обробки інформації”*. – Х.: XV ПС, 2015. – Вип. 1(126). – С. 44-49.
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. Анализ величин фрактальных размерностей фазовых портретов для распознавания БПЛА мультироторного типа / Р.Э. Пащенко, А.С. Фатеев, Д.О. Цюпак, А.А. Романцов // *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. – 2016. – №1(22). – С. 83-87.
6. ООО “КБ АВИА” [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://www.kb-avia.com/index.html>.
7. Изделие 1РЛ133. *Техническое описание*. БД 1.400.009 ТО. – 1974. – 232 с.

Поступила в редколлегию 10.04.2017

Рецензент: д-р техн. наук проф. А.В. Полярус, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків.

РОЗПІЗНАВАННЯ ТИПУ МУЛЬТРОТОРНОГО БПЛА З ВИКОРИСТАННЯМ ФРАКТАЛЬНИХ РОЗМІРНОСТЕЙ ФАЗОВИХ ПОРТРЕТІВ

Р.Е. Пащенко, В.К. Иванов, Д.О. Цюпак, А.О. Молчанов

Проведений аналіз величин фрактальних розмірностей фазових портретів сигналів, побудованих з різними часом затримки, при зондуванні БПЛА з трьома і шістьма роторами. Розглянута можливість використання цих величин для розпізнавання типу мультироторних БПЛА, які відрізняються числом роторів. Показано, що величини фрактальних розмірностей фазових портретів сигналів, при зондуванні завислих і рухомих БПЛА з трьома і шістьма роторами, відрізняються. Чисельні значення фрактальних розмірностей фазових портретів можуть бути використані як ознака розпізнавання типу мультироторного БПЛА і характеру його руху.

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

RECOGNITION TYPE MULTIROTOR BPLA WITH THE USE FRACTAL DIMENSIONS OF PHASE PORTRAITS

R. Paschenko, V. Ivanov, D. Cupak, A. Molchanov

The analysis sizes fractal dimensions of phase portraits of signals, built with different sometimes delays, is conducted, at sounding of BPLA with three and six rotors. Possibility of the use these sizes is considered for recognition type of multirotor BPLA, different a number rotors. Showed that sizes fractal dimensions of phase portraits of signals, at sounding hangings up and locomotive BPLA with three and six rotors is differed. The numeral values fractal dimensions of phase portraits can be used as a sign recognition type of multirotor BPLA and character his motion.

Keywords: unmanned aerial vehicle, BPLA detection, fractal dimension, phase portrait.