

УДК 530.1.537.86 + 621.396.96

Р.Э. Пашенко¹, В.К. Иванов¹, Д.О. Цюпак¹, И.А. Гергель²¹ 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 ФОРМЫ ФАЗОВЫХ ПОРТРЕТОВ

Проведен анализ форм фазовых портретов сигналов при зондировании БПЛА с тремя и шестью роторами. Рассмотрена возможность использования формы фазовых портретов для распознавания типа мультироторных БПЛА, отличающихся числом роторов. Показано, что форма фазовых портретов сигналов, полученных при зондировании БПЛА с тремя и шестью роторами, напоминают форму размещения на них роторов. Особая форма фазовых портретов может быть использована как признак распознавания типа мультироторного БПЛА.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, распознавание БПЛА, псевдофазовая плоскость, фазовый портрет.

Введение

Постановка проблемы и анализ литературы. В настоящее время стремительными темпами развивается беспилотная авиация, особенно это касается малых беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) мультироторного типа, так называемых коптеров. Увеличение количества таких БПЛА привело к возрастанию потенциальных угроз от их использования. В европейских странах уже разработан свод правил по эксплуатации БПЛА, направленный на упорядочивание их применения, а в США с декабря 2015 года все владельцы малых БПЛА должны их регистрировать в Федеральной авиационной администрации (FAA) [1].

Для обеспечения контроля за выполнением правил эксплуатации мультироторных БПЛА необходима система их обнаружения и распознавания не только визуально, а и с использованием технических средств, в частности радиолокационных.

Экспериментальное исследование отраженных сигналов от движущихся объектов показывает, что различная сложность движения (тип движущегося объекта) приводит к различным формам отраженного сигнала. Для наглядного представления и качественного исследования таких сигналов часто прибегают к преобразованию исходного сигнала в другую плоскость анализа, например, преобразование на псевдофазовую плоскость (ПФП) и построение на ней фазовых портретов (ФП) сигналов [2–3].

В работе [4] показано, что преобразование исходного временного ряда на ПФП и построение ФП позволяет проанализировать форму сигналов с выхода канала фазового детектирования РЛС. Также в [4] отмечается, что форма ФП сигналов, полученных при зондировании мультироторного БПЛА с тремя роторами, отличается от формы ФП фоновых сигналов. При этом показано, что ФП фонового сигнала представляют сгруппированные в определенной области ПФП фазовые траектории в виде “клубка ниток”, а ФП

сигналов, обусловленные зависанием и движением БПЛА, имеют фазовые траектории, которые отделяются от “клубка ниток”. Кроме того, на краях ФП движущегося БПЛА наблюдается более сложный характер поведения фазовой траектории, чем при зависании БПЛА. На основании этого в работе [4] делается вывод, что форму ФП можно использовать как один из признаков распознавания БПЛА мультироторного типа. Однако формы ФП, построенные при времени задержки, равном первому нулю автокорреляционной функции ($T = 50$), не позволяют определить тип движущегося БПЛА и характер движения.

В работе [5] проведен анализ изменения формы ФП сигналов с выхода канала фазового детектирования РЛС при различных временах задержки. Также в [5] отмечается, что при изменении величины временной задержки форма ФП фонового сигнала практически не изменяется, и может быть охарактеризована как случайное движение изображающей точки по фазовой траектории. В тоже время в форме ФП сигналов, полученных при зависании и движении БПЛА, при изменении временной задержки на краях ФП проявляется концентрация элементов фазовой траектории в трех областях напоминающих треугольное расположение роторов БПЛА. Кроме того, в работе [5] предложен метод распознавания БПЛА мультироторного типа с использованием формы 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 формы фазовых портретов в качестве признака распознавания типа мультироторного БПЛА при их построении с различными временами задержки.

Анализ формы фазовых портретов при зондировании БПЛА с различным числом роторов

Для получения отраженных сигналов использовалась экспериментальная установка на базе когерентно импульсной РЛС 1РЛ133 “Кредо” сантиметрового диапазона (простой сигнал, $\lambda = 2$ см, $\tau_{\text{и}} = 0,4$ мкс) [6]. В качестве объектов зондирования использовались БПЛА мультироторного типа с тремя и шестью роторами, разработанные в ООО “КБ АВИА” Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского “ХАИ” [7], показанные на рис. 1.

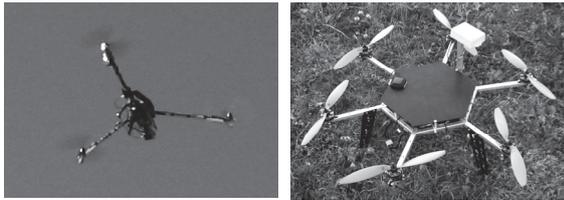


Рис. 1. Фотографии БПЛА, используемых при проведении эксперимента

Краткое описание эксперимента и некоторые исходные временные реализации приведены в [4]. В ходе эксперимента БПЛА зависали на высоте 20 м и двигались на высоте 30 м в направлении к РЛС и от нее. 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.

Построим ФП при временной задержке $T = 50$ точек, что близко к первому нулю автокорреляционной функции исходного временного ряда. На рис. 2 показаны ФП фоновых сигналов (а), а также ФП сигналов при зондировании зависшего (слева) и движущегося (справа) БПЛА с тремя (б) и шестью (в) роторами. Номер “окна” обозначен слева сверху на ФП. На изображениях ФП по оси абсцисс отложены значения записанного сигнала (Y), а по оси ординат сдвинутые на 50 точек значения этого же сигнала (Z).

Анализ формы ФП, представленных на рис. 2, показывает, что форма ФП фонового сигнала имеет вид “клубка ниток”, а формы ФП сигналов, обусловленных зависанием и движением БПЛА, как с тремя так и шестью роторами, отличаются от фоновых отделением фазовых траекторий от “клубка ниток”. Такие формы ФП обусловлены вращением роторов и движением БПЛА. Однако, формы ФП сигналов от БПЛА с тремя роторами практически не отличаются от форм ФП БПЛА с шестью роторами.

Таким образом, формы ФП, построенные при времени задержки $T = 50$, позволяют разделить фон и движущийся объект (также объект с подвижными частями), однако, не позволяют определить тип БПЛА, которые отличаются числом роторов.

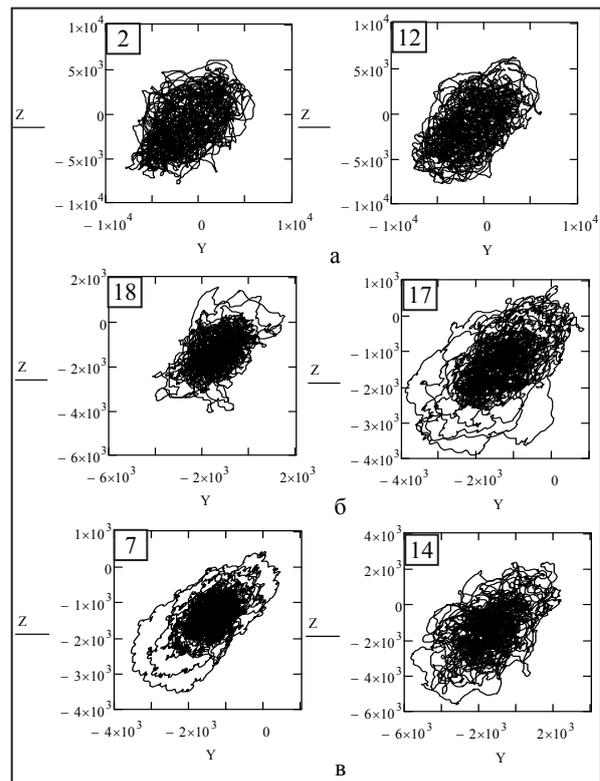


Рис. 2. Фазовые портреты ($T = 50$) фонового сигнала (а) и сигналов при зондировании зависшего (слева) и движущегося (справа) БПЛА с тремя (б) и шестью (в) роторами

Проанализируем изменения формы ФП сигналов при зондировании БПЛА разных типов, если использовать другие значения временной задержки T . Временную задержку T будем изменять с дискретностью 50 точек временного ряда. Для анализа будем выбирать ФП в одном из “окон”, которое выбирается из длинной реализации при зондировании БПЛА с тремя и шестью роторами. Вначале рассмотрим ФП сигналов при зависании БПЛА данных типов.

Зависание БПЛА на высоте 20 м. Фазовые портреты сигналов с выхода головных телефонов при различных значениях T показаны на рис. 3 (величина временной задержки обозначена внизу на ФП). Слева показаны ФП сигналов при зондировании БПЛА с тремя роторами (18-ое “окно”), а справа – с шестью (7-е “окно”). Области отделения фазовой траектории от фона отмечены окружностями.

Анализ формы ФП, представленных на рис. 3, показывает, что при изменении временной задержки в движении изображающей точки по случайной траектории начинает проявляться определенная закономерность. При этом фазовые траектории, обусловленные фоном, группируются в центре ФП в виде “клубка ниток”, а обусловленные зависанием БПЛА – располагаются на краях ФП.

Необходимо отметить, что при величине временной задержки равной $T = 150$ появляются отличия в форме ФП сигналов при зондировании БПЛА с тремя и шестью роторами.

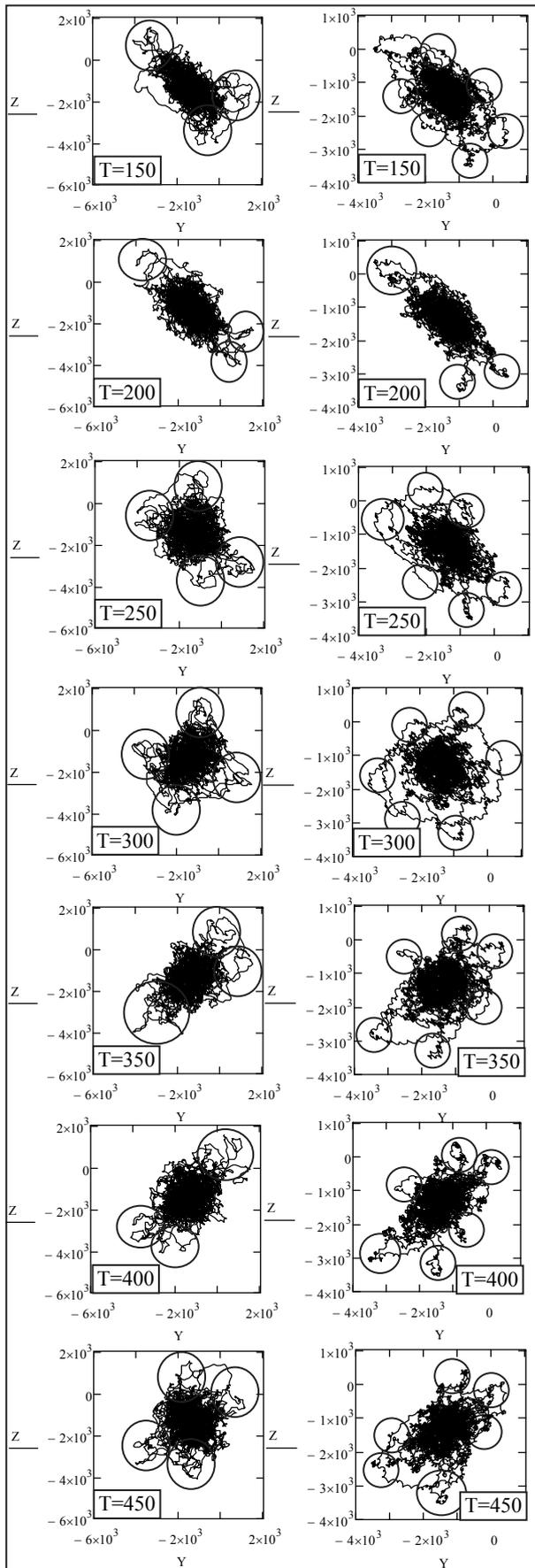


Рис. 3. Фазовые портреты сигналов при зондировании зависших БПЛА с тремя (слева) и шестью (справа) роторами при разных значениях T

Так в первом случае фазовая траектория имеет особенности в трех областях ФП, а во втором случае – в шести областях, что соответствует количеству роторов, расположенных на БПЛА. Однако при $T = 200$ ФП при зондировании БПЛА с тремя и шестью роторами практически не отличаются, и в обоих случаях форма ФП напоминает “веретено”.

При увеличении времени задержки, отмеченная выше особенность фазовой траектории вновь проявляется. Так при $T = 250$ ФП сигналов БПЛА с тремя и шестью роторами отличаются количеством характерных областей зависящих от числа роторов.

Особый интерес представляет форма ФП при величинах временной задержки больше $T \geq 300$ точек временного ряда. При $T = 300$ особенности фазовой траектории, обусловленные БПЛА с шестью роторами, располагаются в шести областях практически равномерно вокруг “клубка ниток” в виде “кружева”. Такое поведение фазовой траектории значительно отличается от построенного ФП БПЛА с тремя роторами.

При $T = 350$ и $T = 400$ установленные особенности ФП сохраняются – на краях ФП происходит группировка элементов фазовой траектории в трех и шести областях ПФП. Как уже отмечалось выше, такие формы ФП напоминают формы БПЛА с тремя и шестью роторами. Особенно отличия в форме ФП наблюдаются при $T = 400$. Также необходимо отметить, что при $T = 450$ формы ФП также отличаются, однако эти отличия не так значительны.

Таким образом, из проведенного анализа видно, что форма ФП сигналов, полученных при зондировании БПЛА с тремя и шестью роторами на высоте 20 м, при увеличении времени задержки существенно отличаются от формы ФП фоновых сигналов и друг от друга. Формы ФП, обусловленных зависанием БПЛА, при величинах временной задержки $T \geq 300$ точек временного ряда, напоминают формы БПЛА с тремя и шестью роторами. Особая форма ФП может быть использована как отличительный признак при распознавании типа зависшего мультироторного БПЛА – с тремя или шестью роторами.

Рассмотрим форму ФП сигналов при движении БПЛА с тремя и шестью роторами.

Движение БПЛА на высоте 30 м. Также как и при анализе изменения формы ФП при зависании БПЛА, рассмотрим поведение фазовой траектории при значениях временной задержки отличных от $T = 50$ точек. При этом рассмотрим временные задержки от $T = 300$ до $T = 450$ (с дискретностью 50 точек), которые предлагается использовать в представленном в [5] методе распознавания БПЛА.

Фазовые портреты сигналов с выхода головных телефонов при различных значениях временной задержки T показаны на рис. 4 (величина временной задержки обозначена внизу на ФП). Слева показаны ФП сигналов при зондировании БПЛА с тремя роторами (17-е “окно”), а справа – с шестью (14-е “окно”).

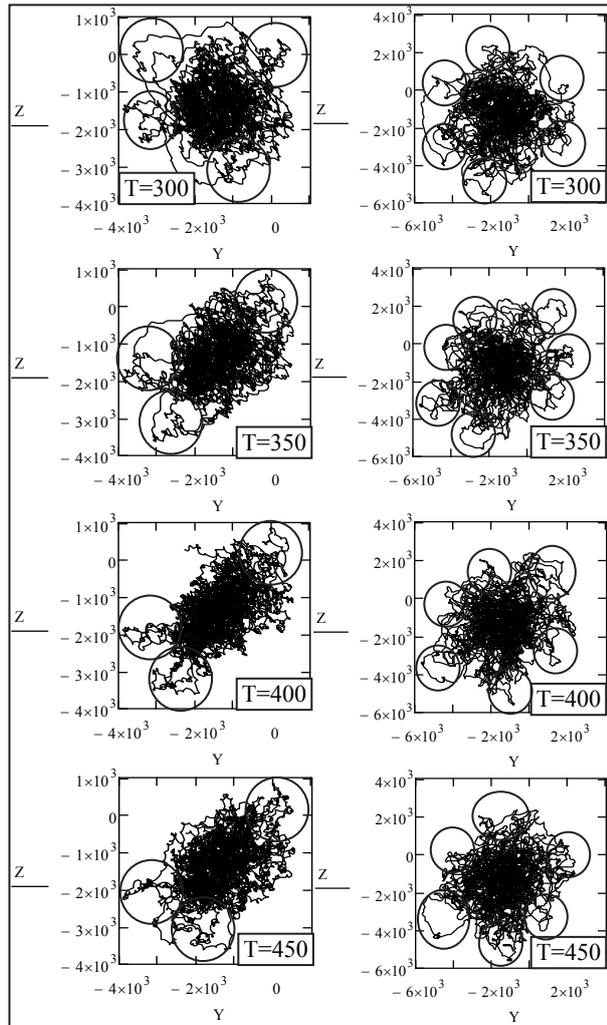


Рис. 4. Фазовые портреты сигналов при зондировании движущихся БПЛА с тремя (слева) и шестью (справа) роторами при разных значениях T

Анализ ФП, приведенных на рис. 4, показывает, 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 БПЛА, это сходство несколько размыто при малых значениях времени задержки. Это можно объяснить именно движением БПЛА. Так при $T = 300$ формы ФП при зондировании БПЛА с тремя и шестью роторами похожи. Однако при увеличении времени задержки до $T = 350$ и $T = 400$ проявляется концентрация элементов фазовой траектории в трех (левые рисунки) и шести (правые рисунки) областях, напоминающих расположение роторов БПЛА мультироторного типа. При $T = 450$ рассмотренные особенности ФП сохраняются, но при движении БПЛА с шестью роторами группировки элементов фазовой траектории не такая четкая.

Таким образом, такие различия в форме ФП могут быть использованы как один из признаков распознавания типа мультироторного БПЛА, на-

пример, для определения является ли БПЛА с тремя или шестью роторами.

Также необходимо отметить, что из сравнения данных, приведенных на рис. 3 и рис. 4, видно, что формы ФП сигналов, полученных при зависании БПЛА и во время движения БПЛА, имеют некоторые отличия. Прежде всего, при зависании БПЛА на краях ФП наблюдается изменение фазовой траектории в виде “кружева”, а при движении БПЛА такого поведения фазовой траектории нет. Кроме того, в отличие от зависания БПЛА, где наблюдается отделение небольшого количества элементов фазовой траектории от “клубка ниток” (фоновый сигнал), при движении БПЛА на краях ФП фазовая траектория формируется из большего количества элементов отделившихся от фона. Также структура ФП, обусловленная фоновым сигналом (в центре ФП), представляет собой “не тугой” “клубок ниток” – фазовые траектории не везде плотно заполняют центр ФП. Это, скорее всего, объясняется тем, что модуляция сигнала происходит не только вращением винтов, но и перемещением БПЛА.

Для проверки проявления характерных особенностей ФП рассмотрим формы ФП сигналов при зависании и движении БПЛА в других “окнах” исходных реализаций. На рис. 5 показаны ФП зависших БПЛА с тремя (левые рисунки) и шестью (правые рисунки) роторами, а на рис. 6 – ФП при движении БПЛА этих двух типов. Номер “окна” обозначен сверху, а величина временной задержки внизу на ФП. Значения временной задержки выбирались от $T = 350$ до $T = 450$ при которых особенности проявлялись в рассмотренных выше “окнах”.

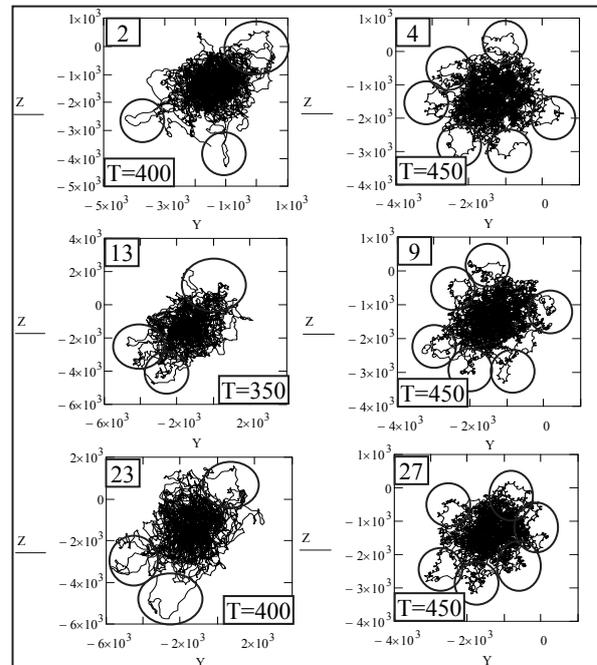


Рис. 5. Фазовые портреты сигналов при зондировании зависших БПЛА с тремя (слева) и шестью (справа) роторами в разных “окнах”

Сравнительный анализ левых и правых ФП на рис. 5 показывает, что ФП сигналов при зондировании зависших БПЛА с тремя и шестью роторами имеют существенные отличия. В рассматриваемых “окнах” также проявляются особенности поведения фазовой траектории, которые отмечались выше, т.е. они группируются в трех и шести областях ФП соответственно.

При зондировании зависшего БПЛА с шестью роторами характерные формы ФП лучше проявляются при $T = 450$, а БПЛА с тремя роторами при меньших значения временной задержки.

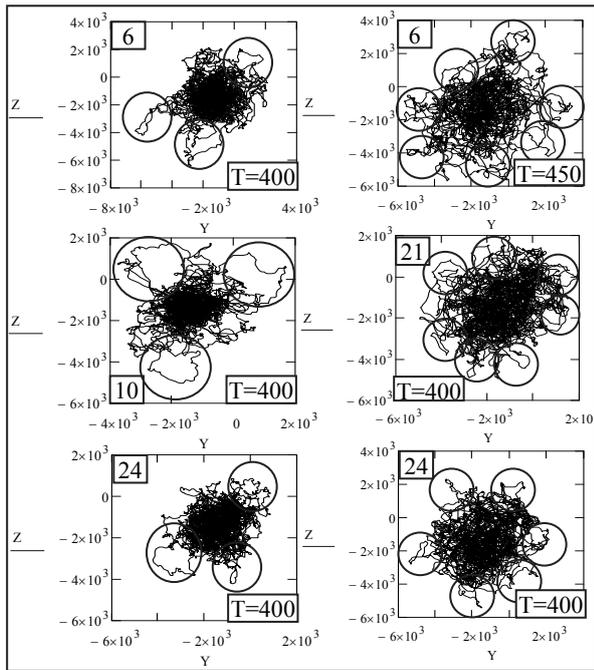


Рис. 6. Фазовые портреты сигналов при зондировании движущихся БПЛА с тремя (слева) и шестью (справа) роторами в разных “окнах”

Характерные формы ФП также проявляются и при зондировании движущихся БПЛА с тремя и шестью роторами (рис. 6). При этом форма ФП усложняется по сравнению с зависанием БПЛА. На краях ФП наблюдается более сложный характер поведения фазовой траектории, обусловленный и движением БПЛА и вращением роторов. Все это может быть

использовано при распознавании не только типа мультироторного БПЛА, но и характера его движения.

Выводы

1. Формы фазовых портретов сигналов, полученных при зондировании БПЛА с тремя и шестью роторами, существенно отличаются.

2. Формы фазовых портретов напоминают в некотором роде форму размещения роторов на БПЛА с тремя и шестью роторами.

3. Особая форма фазовых портретов может быть использована как один из отличительных признаков при распознавании типа мультироторного БПЛА – с тремя или шестью роторами, а также характера их движения.

4. При проведении дальнейших исследований целесообразно оценить возможность использования величины фрактальной размерности фазовых портретов для распознавания типа мультироторного БПЛА.

Список литературы

1. В США разработали систему регистрации малых беспилотников [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ato.ru/content/v-ssha-razrabotali-sistemu-registracii-malyh-bespilotnikov>.
2. Малинецкий Г.Г. Современный проблемы нелинейной динамики / Г.Г. Малинецкий, А.Б. Полянов. – М.: Едиториал УРСС, 2002. – 360 с.
3. Пащенко Р.Э. Формирование фрактальных сигналов / Р.Э. Пащенко. – Х.: ХООО “НЭО “ЭкоПерспектива”, 2005. – 298 с.
4. Распознавание БПЛА мультироторного типа с использованием фазовых портретов / Р.Э. Пащенко, В.И. Кортунов, Д.О. Цюпак, О.А. Барданова // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2013. – № 4(13). – С. 68-72.
5. 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.: ХУ ПС. – 2015. – Вип. 1(126). – С. 44-49.
6. Изделие ПР.Л133. Техническое описание. БД 1.400.009 ТО. – 1974. – 232 с.
7. ООО “КБ АВИА” [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.kb-avia.com/index.html>.

Поступила в редколлегию 12.01.2017

Рецензент: д-р техн. наук проф. А.В. Полярус, Национальный аэрокосмический университет имени Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Харьков.

РОЗПІЗНАВАННЯ ТИПУ МУЛЬТРОТОРНОГО БПЛА З ВИКОРИСТАННЯМ ФОРМИ ФАЗОВИХ ПОРТРЕТІВ

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

Проведений 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 числом роторів. Показано, що форма фазових портретів сигналів, отриманих при зондуванні БПЛА з трьома і шістьма роторами, нагадують форму розміщення на них роторів. Особлива форма фазових портретів може бути використана як ознака розпізнавання типу мультироторного БПЛА.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, розпізнавання БПЛА, псевдофазова площина, фазовий портрет.

RECOGNITION TYPE MULTIROTOR BPLA WITH THE USE FORM PHASE PORTRAITS

R. Paschenko, V. Ivanov, D. Cupak, I. Gergel

The analysis forms phase portraits of signals is conducted at sounding BPLA with three and six rotors. Possibility of the use form phase portraits is considered for recognition type multirotor BPLA with different number rotors. Showed that form phase portraits of signals, got at sounding BPLA with three and six rotors, remind the form placing on them rotors. The special form phase portraits can be used as a sign of recognition type multirotor BPLA.

Keywords: aircraft aircraft, recognition of BPLA, pseudophase plane, phase portrait.