

УДК 530.1.537.86 + 621.396.96

Р.Э. Пашенко¹, В.И. Кортунув², Д.О. Цюпак¹, О.А. Барданова³¹Институт радиофизики и электроники имени А.Я. Усикова НАН Украины, Харьков²Национальный аэрокосмический университет имени Н.Е. Жуковского "ХАИ", Харьков³Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков

РАСПОЗНАВАНИЕ БПЛА МУЛЬТИРОТОРНОГО ТИПА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФАЗОВЫХ ПОРТРЕТОВ

Рассмотрена возможность использования формы фазовых портретов в качестве признака распознавания БПЛА мультироторного типа. Показано, что форма фазовых портретов сигналов, полученных при зондировании БПЛА, отличается от формы фазовых портретов фоновых сигналов. Однако при зондировании зависящего и движущегося БПЛА формы фазовых портретов сигналов практически не отличаются. Установлено, что различие в характере движения БПЛА можно определить по протяженности и периодичности появления характерных фазовых портретов.

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

Постановка проблемы и анализ литературы

Дешевизна беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) по сравнению с пилотируемой авиацией обусловила их широкое использование, как в военной, так и в гражданской сфере для решения разнообразных задач. Малые габариты, современный уровень технологии производства (применение в конструкциях пластмасс, стекловолокна, пенопласта, картона и др.) позволяет значительно снизить эффективную отражающую способность БПЛА. Все это значительно усложняет их обнаружение и распознавание с использованием радиолокационных средств. Использование маломощных экономичных двигателей позволяет сделать их полет практически бесшумным, что усложняет их распознавание с применением визуальных и инфракрасных средств.

Экспериментальное исследование отраженных сигналов от движущихся объектов показывает, что различная сложность движения (тип движущегося объекта) приводит к различным формам отраженного сигнала. Особенности формы отраженных сигналов, которые невозможно или затруднительно исследовать аналитически, поддаются наглядному представлению и качественному исследованию с помощью преобразования исходного сигнала в другую плоскость анализа.

В последнее время для анализа поведения сложных динамических системы, в которой известен только один параметр, используют метод построения псевдофазовой плоскости (ПФП) с временной задержкой [1 – 3]. В псевдофазовой плоскости строятся фазовые портреты (ФП), т.е. строится зависимость амплитуды сигнала от этой же величины в другой момент времени, отстающий

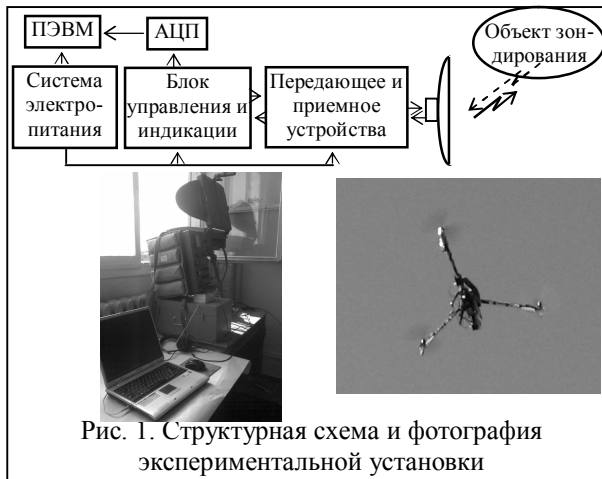
или опережающий данный момент времени на постоянную величину: $[x(t), x(t+T)]$ [1, 2]. Плоскость $[x(t), x(t+T)]$ называется псевдофазовой плоскостью. Сигнал $x(t+T)$ связан с производной $\dot{x}(t)$ и результат имеет те же свойства, что и при использовании действительной фазовой плоскости [4]. Построение ФП в ПФП не требует большого времени для решения дифференциальных уравнений и вычисления углов наклона изоклин, а использование ЭВМ позволяет строить ФП сложных динамических систем практически в реальном масштабе времени.

Преобразование исходного временного ряда в ПФП и построение ФП позволяет проанализировать форму отраженных сигналов [5]. Форма ФП зависит от типа движущегося объекта, что может быть использовано при их распознавании.

Цель статьи: рассмотреть возможность использования формы фазовых портретов в качестве признака распознавания БПЛА.

Краткое описание эксперимента

Для проведения исследований была развернута экспериментальная установка (рис. 1) на базе когерентно импульсной РЛС 1РЛ133 "Кредо" сантиметрового диапазона (простой сигнал, $\lambda = 2$ см, $\tau_n = 0,4$ мкс) [6]. Для сохранения полученной информации с целью ее последующей обработки использовались аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) и персональный компьютер (ПЭВМ). В качестве объекта исследований использовался БПЛА мультироторного типа с тремя винтами, разработанный в ООО "КБ АВИА" Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского "ХАИ" [7]. Сотрудники ООО "КБ АВИА" осуществляли полеты в месте проведения исследований.



Экспериментальные исследования состояли из двух этапов. На первом этапе осуществлялся полет БПЛА, а с помощью РЛС 1РЛ133 “Кредо” осуществлялось его зондирование. Сигнал с выхода фазового детектора (головных телефонов) записывался с помощью АЦП в память компьютера. При этом рассматривалось два вида движения БПЛА – зависание (на высоте 20 м) и движение (на высоте 30 м) БПЛА в направлении к РЛС и от нее.

На втором этапе проводился визуальный анализ записанных сигналов и их компьютерная обработка для решения задачи распознавания БПЛА.

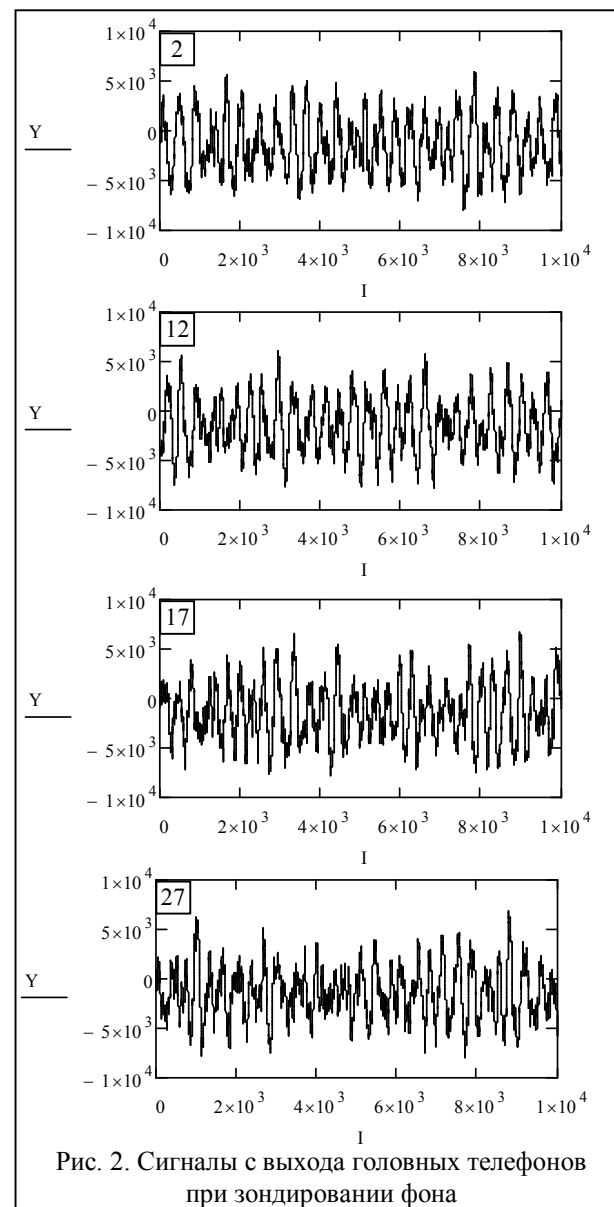
Построение фазовых портретов сигналов, отраженных от фона

Записанный сигнал с выхода головных телефонов при зондировании фона имел длину временного ряда равную 330 800 точкам, что при частоте дискретизации 22,05 кГц соответствует 15,0 секундам. Для анализа фонового 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. Для каждого положения “окна” строился фазовый портрет при временной задержке $T = 50$ точек, что близко к первому нулю автокорреляционной функции исходного временного ряда.

На рис. 2 показаны временные реализации (длиной 10 000 точек) сигналов с выхода головных телефонов для отдельных положений “окна” (номер “окна” обозначен слева сверху на временных реализациях). На изображениях фоновых сигналов по оси абсцисс отложены номера точек записанного сигнала (I), а по оси ординат его амплитуда (Y).

Как видно из анализа данных, показанных на рис. 2, временная структура сигналов, записанных с выхода головных телефонов РЛС, при зондировании фона имеет вид промодулированных по амплитуде, частоте и фазе синусоид. Синусоидальный характер сигнала обусловлен его модуляцией источником питания, а модуляция по амплитуде, частоте и фазе характеризует непосредственно влияние фона (подстилающая

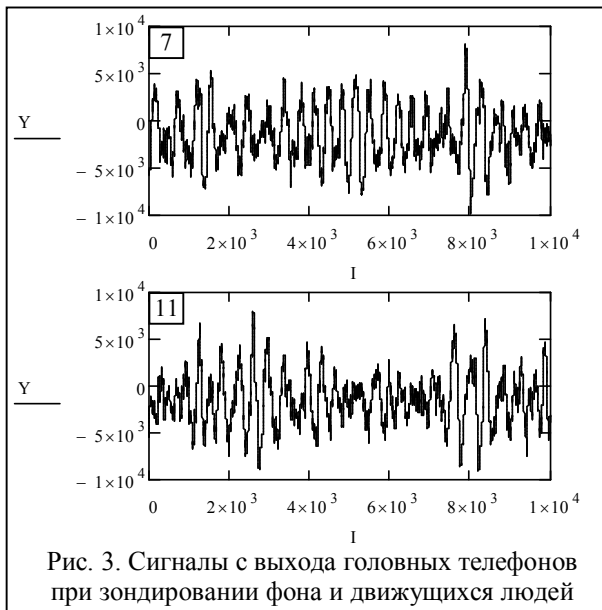
поверхность, движение деревьев под действием ветра, перемещения людей на трассе зондирования и т.д.).



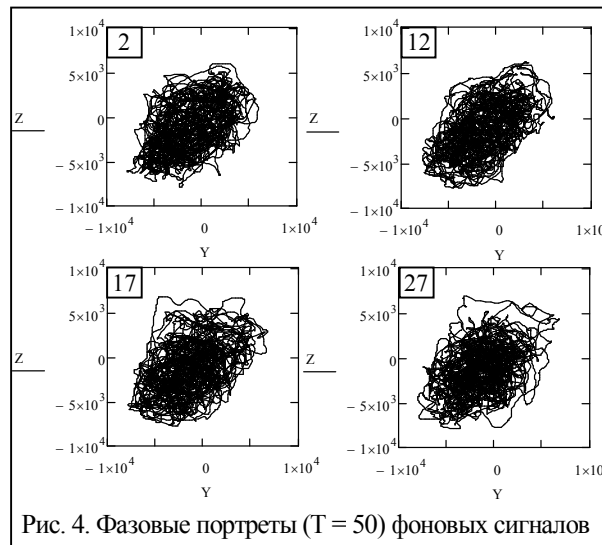
Необходимо отметить, что временные реализации сигналов, отраженных от фона, практически не отличается друг от друга, и провести анализ особенностей фона не представляется возможным.

В тоже время во время экспериментальных исследований кроме фона на трассе зондирования находились и люди (операторы, управляющие полетом БПЛА), которые оказывали воздействие на отраженные фоновые сигналы. На рис. 3 показаны временные реализации сигналов в “окнах”, в которых присутствуют отражения от движущихся людей.

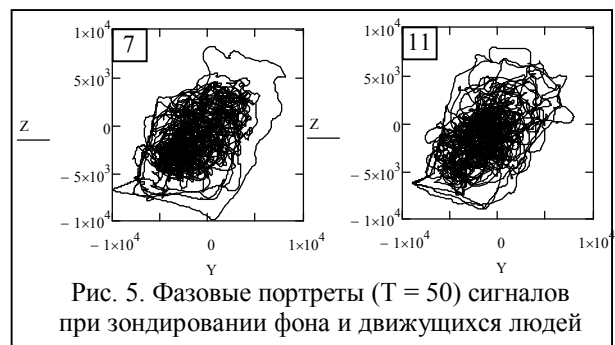
Однако, при сравнении временных реализаций на рис. 2 и рис. 3 определить, какой сигнал характеризует только фон, а какой фон и движение человека нельзя, т.е. по временным реализациям визуально нельзя определить, когда сигнал модулируется и фоном, и движениями человека.



Для решения задачи анализа структуры фоновых сигналов целесообразно поострить их фазовые портреты и оценить структуру ФП. На рис. 4 показаны фазовые портреты сигналов, приведенных на рис. 2, а на рис. 5 – ФП сигналов, приведенных на рис. 3. Номер “окна” обозначен слева вверху на ФП. На изображениях фазовых портретов по оси абсцисс отложены значения записанного сигнала (Y), а по оси ординат сдвинутые на 50 точек значения этого же сигнала (Z).



Как видно на рис. 4 изображающая точка движется по случайной траектории, а фазовый портрет в целом представляет сгруппированную в определенной области псевдофазового пространства фазовую траекторию в виде “клубка ниток”. В тоже время, фазовая траектория сигнала, который характеризует и фон, и движение человека (см. рис. 5), изменяется на краях ФП, и представляют собой движение изображающей точки по характерной траектории, напоминающей в некотором роде “петлю гистерезиса” (особенно это проявляется в нижней левой и верхней правой частях ФП).

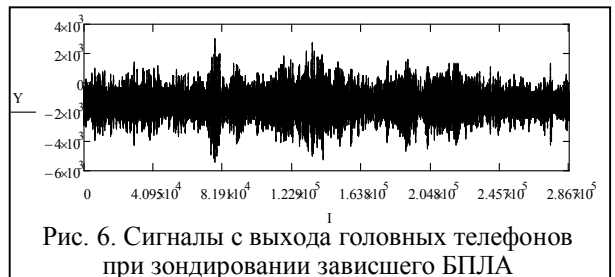


Таким образом, анализ формы фазовых портретов показывает, что структура ФП фоновых сигналов отличается от ФП сигналов, обусловленных фоном и движением человека.

Оценка особенностей сигналов при зондировании БПЛА мультироторного типа

Проведем визуальный анализ цифровых сигналов, записанных при зондировании БПЛА мультироторного типа, а также оценим их структуру с использованием фазовых портретов.

Зафиксированный сигнал с выхода головных телефонов, который был записан во время зависания БПЛА с тремя винтами на высоте 20 м, показан на рис. 6. Исходный временной ряд содержит 286 700 точек, что при частоте дискретизации 22,05 кГц соответствует по времени 13,0 секундам. На рисунке по оси абсцисс отложены номера точек записанного сигнала (I), а по оси ординат его амплитуда (Y).



Визуальный анализ записанного сигнала показывает, что его структура не является однородной, наблюдаются изменения амплитуды, которые больше всего проявляются около 80 000 точки, а также в диапазоне от 120 000 до 150 000 точек. Однако определить, чем вызваны изменения амплитуды сигнала – фоном или движением БПЛА, по временной реализации невозможно.

Проведем анализ структуры полученного временного ряда с использованием ФП. Условия обработки исходного временного ряда будем принимать такими же, как и при обработке фонового сигнала (размер “окна” и величина “скачка” равняются 10 000 точек, временная задержка T = 50 точек). При анализе был обработан весь временной ряд. На рис. 7 показаны ФП сигналов для характерных положений “скачущего окна” (номер “окна” обозначен слева вверху

на ФП). По оси абсцисс отложены значения записанного сигнала (Y), а по оси ординат сдвинутые на 50 точек значения этого же сигнала (Z).

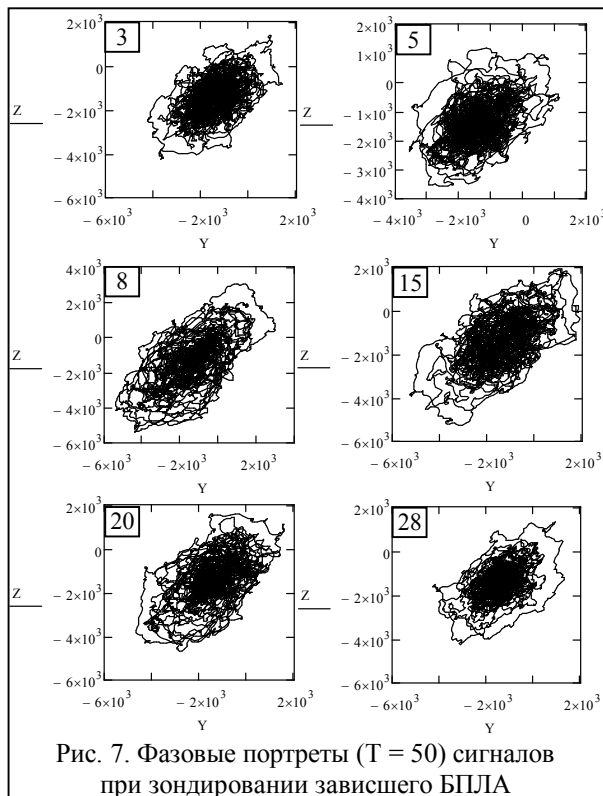


Рис. 7. Фазовые портреты ($T = 50$) сигналов при зондировании зависшего БПЛА

Из анализа данных, приведенных на рис. 7, видно, что форма ФП сигналов, полученных во время зависания БПЛА с тремя винтами, отличается от формы ФП фоновых сигналов (рис. 4) и сигналов, обусловленных движением людей на трассе зондирования (рис. 5). На рис. 7 также видно, что на ФП сигналов, обусловленных зависанием БПЛА, фоновый сигнал концентрируется в центре ФП, а сигнал, который характеризует движение БПЛА, отображается на краях ФП. Но в отличие от ФП, обусловленных движением людей на трассе зондирования, изменение фазовой траектории осуществляется не по “петле гистерезиса”, а в соответствии с модуляцией сигнала, обусловленной вращением винтов и проявляется в виде отделения фазовой траектории от “клубка ниток” и ее неровным характером (модуляцией). Кроме того, необходимо отметить, что характерные ФП проявляются с периодичностью 2-3 положения “окна”, что, скорее всего, объясняется зависанием БПЛА при равномерном вращении винтов.

Таким образом, из проведенного анализа видно, что форма фазовых портретов сигналов, полученных при зондировании зависшего на высоте 20 м БПЛА, отличается от формы ФП фоновых сигналов, т.е. форма фазового портрета может быть признаком распознавания БПЛА мультироторного типа.

Проведем анализ структуры сигнала при движении БПЛА. Зафиксированный сигнал с выхода головных телефонов, который был записан во время

движения БПЛА с тремя винтами на высоте 30 м в сторону к РЛС и от нее, показан на рис. 8. Исходный временной ряд содержит 352 800 точек, что при частоте дискретизации 22,05 кГц соответствует по времени 16,0 секундам.

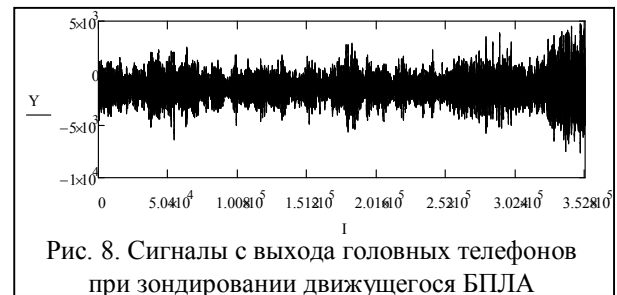


Рис. 8. Сигналы с выхода головных телефонов при зондировании движущегося БПЛА

Визуальный анализ записанного сигнала показывает, что структура сигнала, также как и при зависании БПЛА, не является однородной. По характеру сигнала можно сказать, что он не является фоновым, однако по временной реализации нельзя оценить, чем вызваны изменения амплитуды сигнала.

Проведем анализ структуры полученного временного ряда с использованием ФП. Условия обработки исходного временного ряда будем принимать такими же, как и при обработке фоновых сигналов и сигнала, обусловленного зависанием БПЛА. При анализе был обработан весь временной ряд. На рис. 9 показаны ФП сигналов для характерных положений “скачущего окна”.

Из сравнения данных, приведенных на рис. 7 и 9, видно, что формы ФП сигналов, полученных при зависании БПЛА и во время его движения в направлении к РЛС и от нее, практически не отличаются, т.е. наблюдается отделение фазовой траектории на краях ФП. Это логично и объясняется тем, что модуляция сигнала в основном происходит из-за вращения винтов, а не из-за скорости полета БПЛА, которая во время экспериментов была не высокой. Поэтому можно сказать, что на ФП сигналов, обусловленных движением БПЛА, фоновый сигнал также концентрируется в центре ФП, а сигнал, который характеризует движение БПЛА, отображается на краях ФП. При этом на краях ФП наблюдается более сложный характер поведения фазовой траектории, чем при зависании БПЛА, обусловленный и движением БПЛА и вращением винтов. В тоже время характерные для движения БПЛА ФП проявляются не периодически, а последовательно на протяжении до 10-ти “окон” подряд, т.е. то время когда БПЛА находится в стробе дальности РЛС. В то же время при зависании БПЛА такие ФП проявляются с периодичностью 2-3 положения “окна”. На рис. 9 видно, что в начале исходного временного ряда наблюдается зависание БПЛА, и характерные ФП проявляются с периодичностью 2-3 положения “окна” (2-ое, 4-ое и 6-ое “окна”). Затем в 10-м “окне” наблюдается начало движения БПЛА, что проявляется в особенной форме ФП.

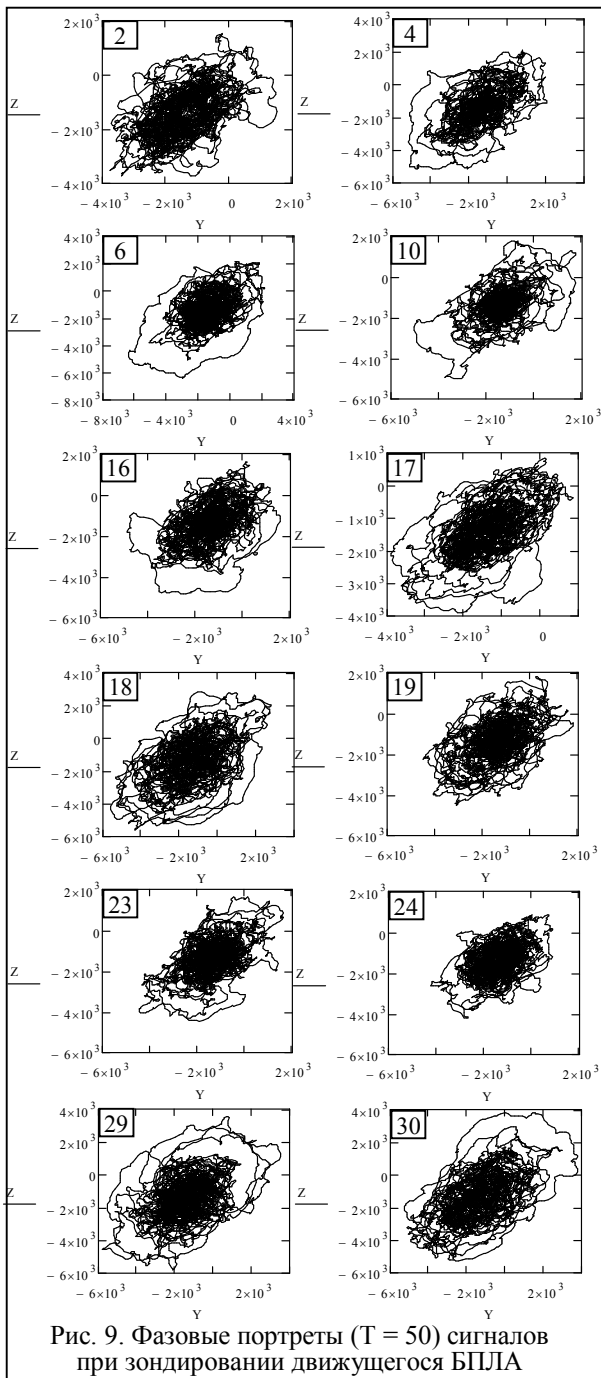


Рис. 9. Фазовые портреты (Т = 50) сигналов при зондировании движущегося БПЛА

Движение БПЛА в дальнейшем характеризуется увеличением протяженности появления характерных ФП – вначале до трех “окон”: 10-ое – 12-ое “окна”, а

затем – до десяти: с 16-го по 25-ое “окна”. В конце исходного временного ряда характерные ФП появляются только в двух “окнах” подряд – 29-ое, 30-ое “окна”, что обусловлено, скорее всего, вылетом БПЛА из строга дальности РЛС. Итак, различие в характере движения БПЛА (зависание или движение в направлении к РЛС и от нее) можно определить по протяженности и периодичности появления характерных фазовых портретов.

Выводы

1. Форма фазовых портретов сигналов, полученных при зондировании БПЛА, отличается от формы ФП фоновых сигналов, т.е. форма фазового портрета может быть признаком распознавания БПЛА мультироторного типа.
2. Формы ФП сигналов, полученных при зависании БПЛА и во время его движения в направлении к РЛС и от нее, практически не отличаются.
3. Различие в характере движения БПЛА можно определить по протяженности и периодичности появления характерных фазовых портретов.
4. При проведении дальнейших исследований целесообразно оценить возможность использования величины фрактальной размерности в качестве признака распознавания БПЛА мультироторного типа.

Список литературы

1. Берже П. Порядок в хаосе. О детерминистском подходе к турбулентности / П. Берже, И. Помо, К. Видаль. – М.: Мир, 1991. – 368 с.
2. Мун Ф. Хаотические колебания: Вводный курс / Ф. Мун. – М.: Мир, 1990. – 312 с.
3. Малинецкий Г.Г. Современные проблемы нелинейной динамики / Г.Г. Малинецкий, А.Б. Потапов. – М.: Едиториал УРСС, 2002. – 360 с.
4. Takens F. Detecting strange attractors in turbulence // F. Takens // Dynamical Systems and Turbulence. Lecture Notes in Mathematics. – Heidelberg: Springer-Verlag, 1981. – P. 366–381.
5. Пащенко Р.Э. Формирование фрактальных сигналов / Р.Э. Пащенко. – Х.: ЭкоПерспектива, 2005. – 298 с.
6. Изделие 1РЛ133. 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 2.12.2013

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

РОЗПІЗНАВАННЯ БПЛА МУЛЬТИРОТОРНОГО ТИПУ ЗА ВИКОРИСТАННЯМ ФАЗОВИХ ПОРТРЕТІВ

Р.Е. Пащенко, В.І. Кортунів, Д.О. Цюпак, О.А. Барданова

Розглянута можливість використання форми фазових портретів як ознаки розпізнавання БПЛА мультироторного типу. Показано, що форма фазових портретів сигналів, отриманих при зондуванні БПЛА, відрізняється від форми фазових портретів фонових сигналів. Але при зондуванні БПЛА, що зависає, форми фазових портретів сигналів практично не відрізняються. Встановлено, що відмінність у характері руху БПЛА можна визначити за протяжністю і періодичністю появи характерних фазових портретів.

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

RECOGNITION UAV OF MULTIROTOR TYPE WITH THE USE PHASE PORTRAITS

R.E. Paschenko, V.I. Kortunov, D.O. Cupak, O.A. Bardanova

Possibility of the use form of phase portraits is considered as sign recognition UAV of multirotor type. It is rotined that the form of phase portraits signals, got at sounding of UAV, differs from the form of phase portraits base-line signals. However at sounding hanging up and locomotive BPLA form of phase portraits signals does not differ practically. It is set that distinction in character motion UAV it is possible to define on an extent and periodicity of appearance characteristic phase portraits.

Keywords: drone, UAV detection, pseudophase plane, phase portrait.