

УДК 530.1.537.86 + 621.396.96

Р.Э. Пашенко¹, Д.О. Цюпак¹, И.А. Ратайчук², О.А. Барданова³¹ Институт радиофизики и электроники имени А.Я. Усикова НАН Украины, Харьков² Национальный аэрокосмический университет имени Н.Е. Жуковского "ХАИ", Харьков³ Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков

АНАЛИЗ ФОРМЫ ФАЗОВЫХ ПОРТРЕТОВ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ВРЕМЕНИ ЗАДЕРЖКИ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ БПЛА МУЛЬТИРОТОРНОГО ТИПА

Проведен анализ изменения формы фазовых портретов при их построении с различными временами задержки. Рассмотрена возможность использования изменения формы фазовых портретов, построенных при различных временах задержки, для распознавания БПЛА. Предложен метод распознавания БПЛА мультироторного типа с использованием формы фазовых портретов, построенных при различных временах задержки. Метод позволяет распознать БПЛА мультироторного типа, а также определить характер его движения.

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

Постановка проблемы и анализ литературы

В настоящее время для анализа различных процессов, структур и сигналов, в которых известен только один параметр, все большее распространение получает метод построения фазовых портретов (ФП) на псевдофазовой плоскости (ПФП) [1 – 3]. Псевдофазовая плоскость, на которой строятся фазовые портреты, представляет собой плоскость с координатами $[x(t), x(t+T)]$, т.е. на этой плоскости строится зависимость амплитуды сигнала от этой же величины в другой момент времени, опережающий данный момент времени на постоянную величину T [1, 2]. Сигнал $x(t+T)$ связан с производной $\dot{x}(t)$ и результат имеет те же свойства, что и при использовании действительной фазовой плоскости $[x(t), \dot{x}(t)]$ [2].

Исследование отраженных сигналов от движущихся объектов показывает, что различная сложность движения приводит к различным формам сигнала. Особенности формы сигналов, которые невозможно или затруднительно исследовать аналитически, поддаются наглядному представлению и качественному исследованию с помощью преобразования исходного сигнала в другую плоскость анализа – в псевдофазовую плоскость [3].

Наиболее трудной задачей при построении ФП на ПФП является выбор времени задержки T . Подходы к выбору T описаны [2]. Простейший способ – это выбрать T близким к первому нулю автокорреляционной функции для исходного временного ряда. Второй способ [2] требует вычисления спектра мощности временного ряда, т.е. быстрого преобразования Фурье автокорреляционной функции. Если в спектре мощности присутствуют кратные пики, то

задержка T выбирается равной четверти периода самой высокой из доминирующих частот. Третий способ [4] основан на вычислении средней взаимной информации между двумя измерениями, при этом T выбирается близким к первому минимуму данной функции.

В работе [5] показано, что преобразование исходного временного ряда в ПФП и построение ФП при выборе T близким к первому нулю автокорреляционной функции, позволяет проанализировать форму сигналов с выхода канала фазового детектирования РЛС. Также в [5] отмечается, что форма ФП сигналов, полученных при зондировании БПЛА, отличается от формы ФП фоновых сигналов. 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 объекта зондирования использовался БПЛА мультироторного типа с тремя винтами, разработанный в ООО "КБ АВИА" Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского "ХАИ" [7], 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 [5]. 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" строился ФП при временной задержке $T = 50$ точек, что близко к первому нулю автокорреляционной функции исходного временного ряда.

На рис. 1 показаны ФП фоновых сигналов (а), а также ФП сигналов при зондировании зависшего (б)

и движущегося (в) БПЛА. Номер “окна” обозначен слева вверху 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).

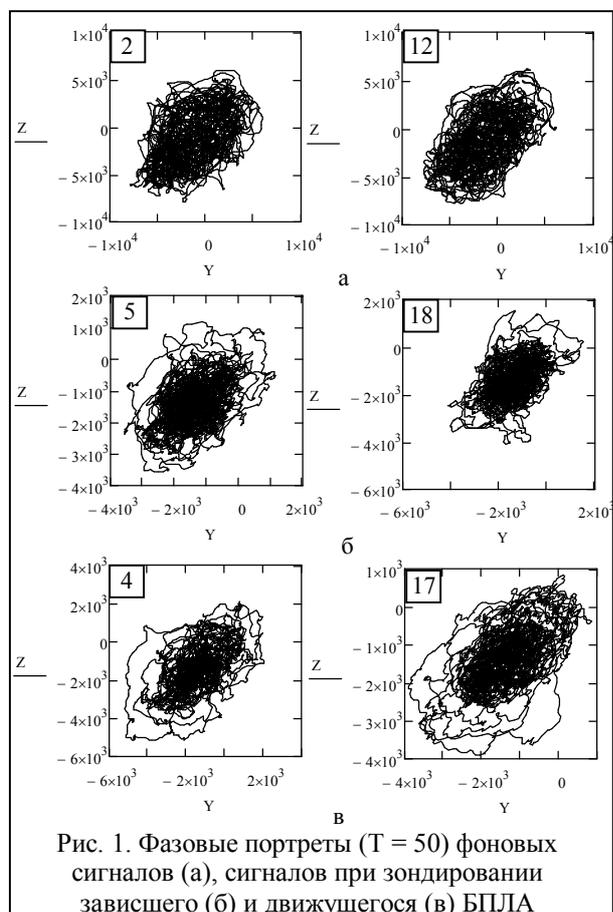


Рис. 1. Фазовые портреты ($T = 50$) фоновых сигналов (а), сигналов при зондировании зависшего (б) и движущегося (в) БПЛА

На рис. 1 видно, что ФП фонового сигнала представляют сгруппированные в определенной области ПФП фазовые траектории в виде “клубка ниток”. На ФП сигналов, обусловленных зависанием и движением БПЛА, 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 отделения фазовой траектории от “клубка ниток”. При этом на краях ФП движущегося БПЛА наблюдается более сложный характер поведения фазовой траектории, чем при зависании БПЛА. Это обусловлено тем, что в этом случае сигнал модулируется и вращением винтов, и движением БПЛА.

Таим образом, форма ФП сигналов, полученных при зондировании БПЛА, отличается от формы ФП фоновых сигналов. Формы ФП, построенные при времени задержки $T = 50$, позволяют разделить фон и движущийся объект, однако, не позволяют определить тип движущегося БПЛА и характер движения.

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

Анализ изменения формы фазовых портретов фонового сигнала

Выше отмечалось, что ФП сигналов, показанных на рис. 1, построены при временной задержке $T = 50$ точек. Рассмотрим поведение фазовой траектории (проведем анализ изменения формы ФП) при других значениях временной задержки T . Для анализа выберем ФП в одном из “окон”, который является характерным для фонового сигнала [5], например, в 12-м “окне”. Временную задержку T будем изменять с дискретностью 50 точек временного ряда. Фазовые портреты сигнала с выхода головных телефонов при различных значениях временной задержки T показаны на рис. 2 (величина временной задержки обозначена слева вверху на ФП).

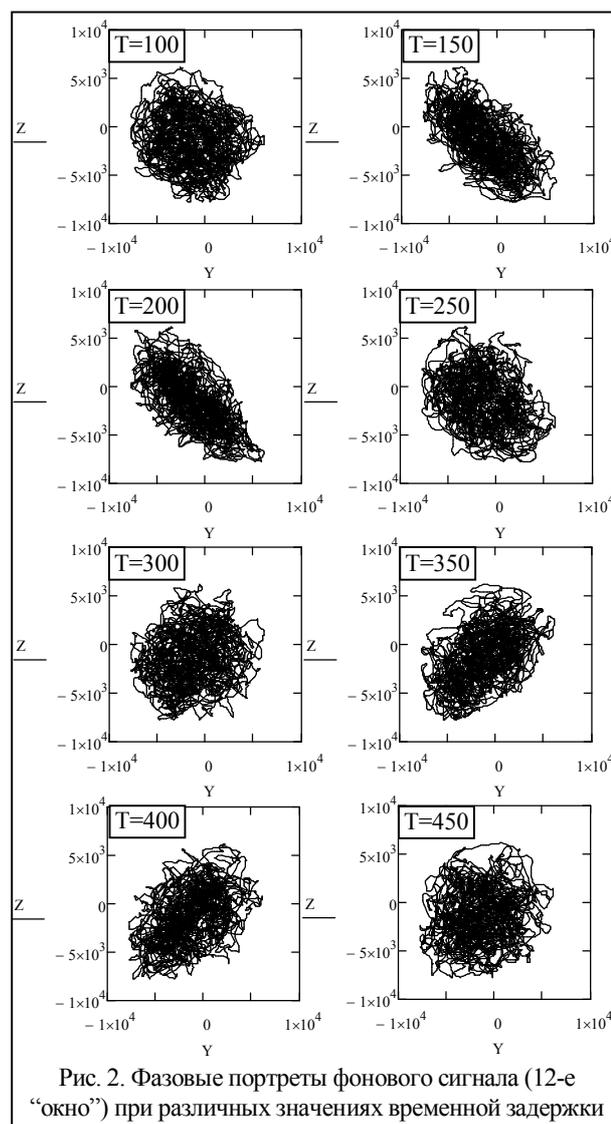


Рис. 2. Фазовые портреты фонового сигнала (12-е “окно”) при различных значениях временной задержки

Как видно из анализа формы ФП, показанных на рис. 2, движение изображающей точки по случайной траектории практически не зависит от изменения временной задержки. При этом фазовые траектории группируются в определенной области ПФП в виде “клубка ниток”. Такая форма ФП объясняется случайной модуляцией по амплитуде, частоте и фазе синусоидальных сигналов с выхода головных телефонов. Наиболее четко форма ФП – “клубок ниток” проявляется при временных задержках $T = 100$, $T = 300$ и $T = 450$ точек, т.е. приблизительно через 200 точек. При величинах временной задержки $T = 150$, $T = 200$ и $T = 350$, $T = 400$ точек, кроме случайного движения изображающей точки, также наблюдается некоторое удлинение и поворот (влево или вправо) ФП вдоль большой оси эллипса. Эллипсовидная форма ФП обусловлена синусоидальным характером фонового сигнала, который в свою очередь определяется его модуляцией источником питания РЛС.

Таким образом, при изменении величины временной задержки общая форма фазового портрета фонового сигнала изменяется не сильно, и может быть охарактеризована как случайное движение изображающей точки по фазовой траектории, а форма ФП может быть названа “клубок ниток”.

Изменение формы фазовых портретов при зондировании БПЛА мультироторного типа

Также как и при анализе изменения формы ФП фонового сигнала, рассмотрим поведение фазовой траектории при значениях временной задержки отличных от $T = 50$ точек при зондировании зависшего БПЛА. Для анализа выберем ФП в одном из “окон”, характерных для сигнала при зависании БПЛА [5], например, в 18-м “окне”. Условия обработки ФП будем принимать такими же, как и при обработке ФП фонового сигнала (T изменяется с дискретностью 50 точек).

Фазовые портреты сигнала с выхода головных телефонов, обусловленного зависанием БПЛА, при различных значениях временной задержки T показаны на рис. 3 (величина временной задержки обозначена слева внизу на ФП). Как видно из анализа формы ФП, показанных на рис. 3, движение изображающей точки по фазовой траектории зависит от величины временной задержки. При этом фазовая траектория, обусловленная фоном, группируется в центре ФП в виде “клубка ниток”, а обусловленная зависанием БПЛА – располагается на краях ФП. Кроме того, при величинах временной задержки $T = 100$, $T = 150$, $T = 200$, $T = 350$ и $T = 400$ точек, фазовая траектория, обусловленная БПЛА, концентрируется в трех областях ПФП, обозначенных на рис. 3 окружностями. Расположение этих областей

имеет треугольную форму, напоминающую форму БПЛА мультироторного типа с тремя винтами. Также при $T = 200$ и $T = 400$ наблюдается общее удлинение ФП вдоль большой оси эллипса (сужение вдоль малой оси) и поворот ФП, соответственно, влево и вправо. При этом фазовые траектории, обусловленные зависанием БПЛА, концентрируются на концах большой полуоси эллипса (сверху и снизу). В то же время при величинах временной задержки $T = 250$, $T = 300$ и $T = 450$ точек наблюдается концентрация фазовой траектории, обусловленной БПЛА, в четырех областях ПФП.

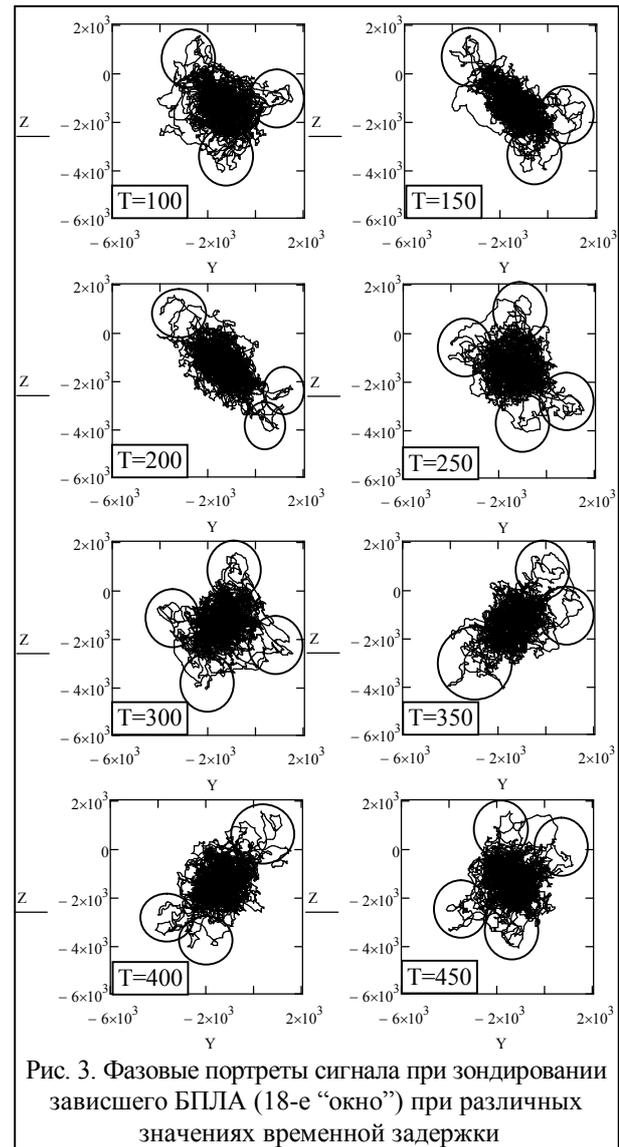


Рис. 3. Фазовые портреты сигнала при зондировании зависшего БПЛА (18-е “окно”) при различных значениях временной задержки

Таким образом, при изменении времени задержки проявляется концентрация фазовой траектории, обусловленной БПЛА, в трех областях ПФП. Наиболее четко треугольная форма ФП наблюдается при временных задержках $T = 100$, $T = 150$ и $T = 350$ точек. Такой концентрации не наблюдается при обработке ФП фонового сигнала (см. рис. 2), что может быть использовано при распознавании БПЛА

мультироторного типа. Также необходимо отметить, что при временной задержке $T = 50$ точек треугольная форма ФП выражена слабо (см. рис. 1, б). Рассмотрим форму ФП сигналов, обусловленных зависанием БПЛА, в других “окнах”, например, в 5-м, 15-м, 20-м и 25-м “окнах” при значении временной задержки $T = 150$ точек (рис. 4). Номер “окна” обозначен справа сверху на ФП.

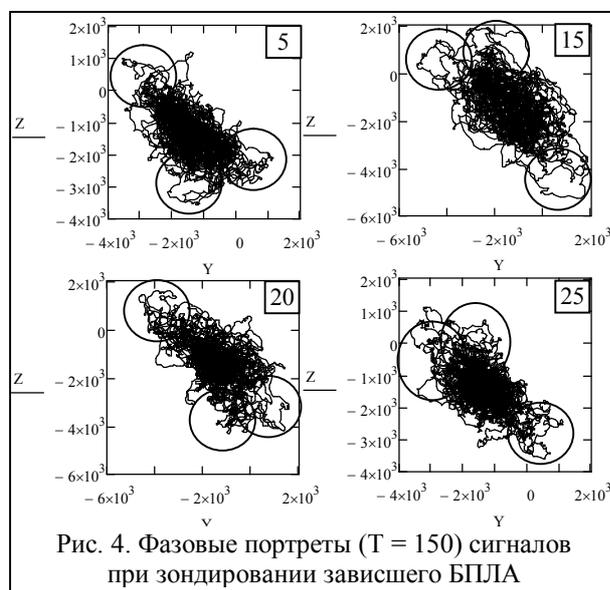


Рис. 4. Фазовые портреты ($T = 150$) сигналов при зондировании зависшего БПЛА

Как видно на рис. 4, при временной задержке $T = 150$ точек в этих “окнах” также наблюдается, в той или иной мере, концентрация фазовой траектории в трех областях ПФП (треугольная форма ФП).

Далее рассмотрим изменение формы ФП при значениях временной задержки отличных от $T = 50$ точек при зондировании движущегося БПЛА в направлении к РЛС и от нее. Анализ ФП проводился для всех “окон” в диапазоне изменения времени задержки от $T = 50$ до $T = 450$ с дискретностью 50 точек. На рис. 5 показаны ФП сигналов с выхода головных телефонов в характерных для движения БПЛА “окнах” [5], при различных значениях временной задержки T (величина временной задержки и номер “окна” обозначены сверху и внизу на ФП). При этом на левых рисунках была выбрана временная задержка $T = 150$ точек при которой наблюдалась треугольная форма ФП при зондировании зависшего БПЛА (см. рис. 3 и 4). На правых рисунках показаны ФП при различных временных задержках, при которых наблюдается треугольная форма ФП.

Анализ левых рисунков ($T = 150$) показывает, что при таком времени задержки форма ФП сигналов, обусловленных движением БПЛА, имеет слабо выраженную треугольную форму. При таком значении T больше напоминает форму – “веретено” (распределение фазовой траектории вдоль большой оси эллипса и концентрации отдельных ее элементов на краях ФП). Анализ правых рисунков показывает, что при других временах задержки от $T = 300$ до $T = 400$ то-

чек в форме ФП проявляется концентрация элементов фазовой траектории в трех областях напоминающих треугольное расположение винтов БПЛА.

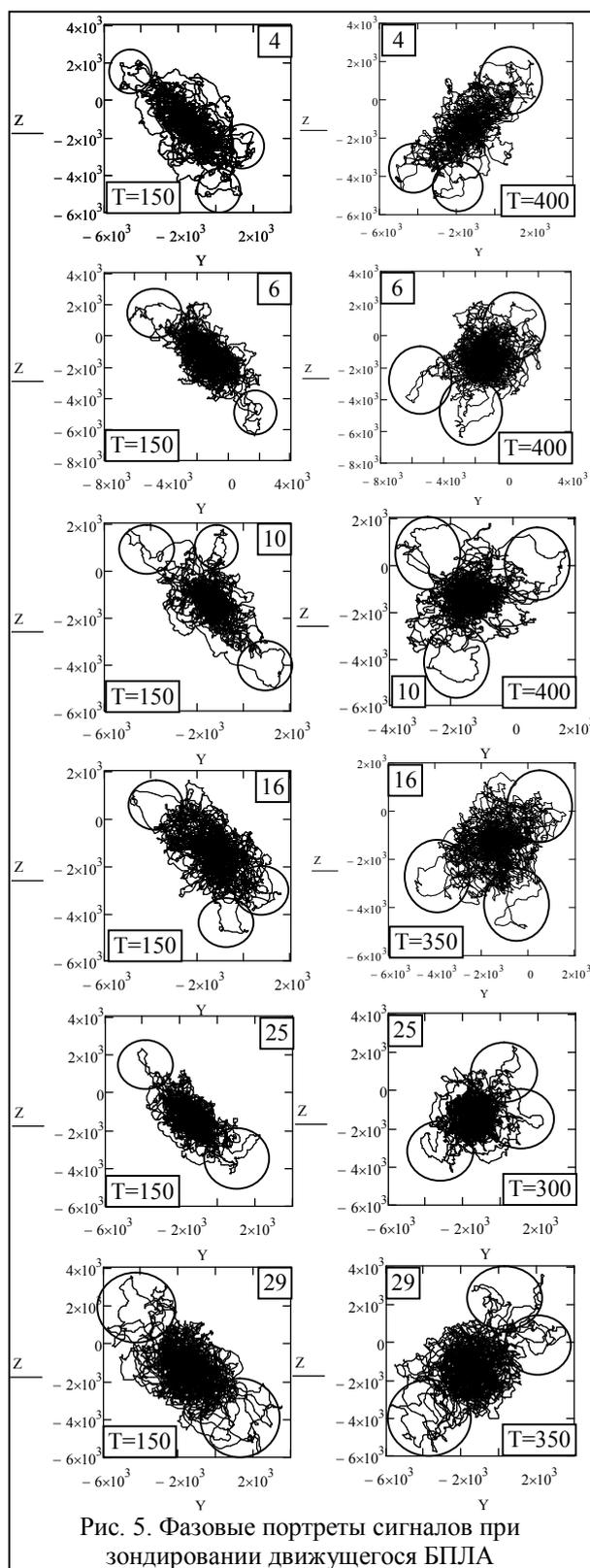


Рис. 5. Фазовые портреты сигналов при зондировании движущегося БПЛА

Однако необходимо отметить, что такая форма ФП проявляется не всегда, появляется дополнительно отделение фазовой траектории от “клубка ниток” в других областях ПФП (см. правые ФП на рис. 5).

Такое поведение фазовой траектории обусловлено движением БПЛА, т.е. вращение винтов приводит к концентрации фазовой траектории в трех областях на краях ФП, а движение БПЛА – к отделению фазовой траектории от ФП фонового сигнала. При анализе ФП зависшего БПЛА такого поведения фазовой траектории не наблюдается.

Таким образом, треугольная форма ФП при движении БПЛА проявляется при больших временах задержек, чем при зависании БПЛА. Также при движении БПЛА форма ФП усложняется по сравнению с зависанием БПЛА. Все это может быть использовано при распознавании характера движения БПЛА.

В результате проведенного анализа можно предложить новый метод распознавания БПЛА мультироторного типа с использованием формы фазовых портретов, построенных при различных временах задержки. Упрощенная структурная схема предлагаемого метода показана на рис. 6.

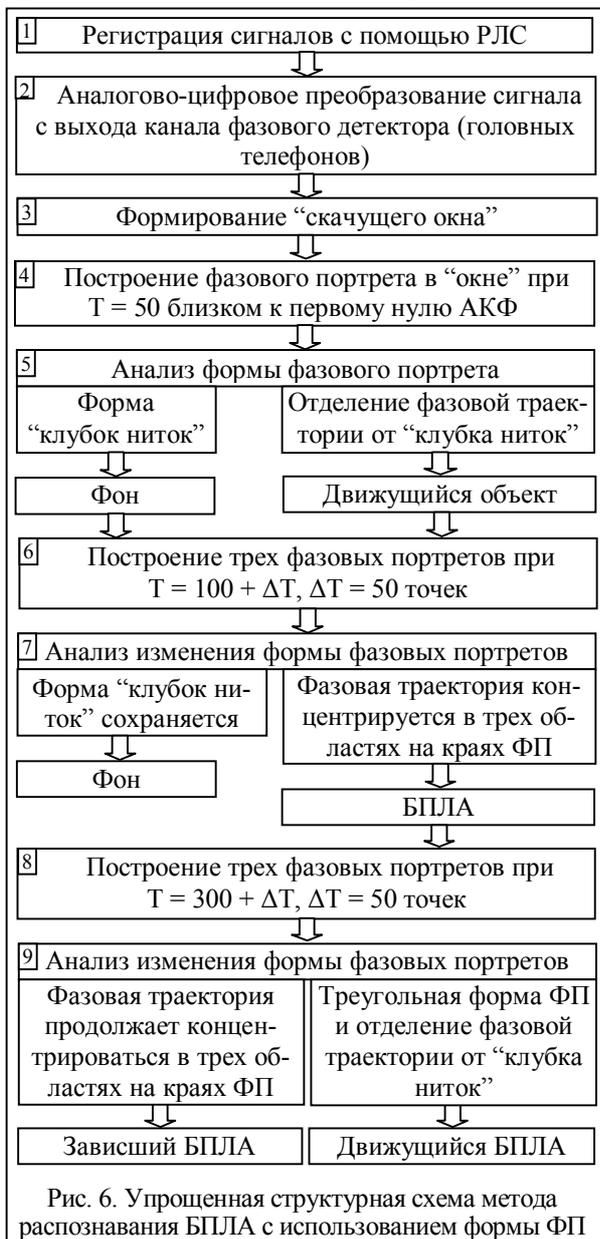


Рис. 6. Упрощенная структурная схема метода распознавания БПЛА с использованием формы ФП

В начале сигнал доплеровской частоты в аналоговом виде регистрируется штатными средствами РЛС (1), затем он с помощью АЦП преобразовывается в цифровой временной ряд (2). После этого временной ряд анализируется с помощью "окна" определенного размера (N_0), которое перемещается ("скачет") на $M = k \cdot N_0$ элементов (точек), где k – коэффициент "скачка". Первое положение "окна" содержит значения с 1-го до N_0 -го элемента анализируемой выборки, второе – с $(k \cdot N_0 + 1)$ -го до $(k + 1) \cdot N_0$ -го, третье – с $(2k \cdot N_0 + 1)$ -го до $(2k + 1) \cdot N_0$ -го и т.д. (3).

На четвертом этапе (4) строится ФП в "окне" при $T = 50$, что для рассмотренных выше сигналов близко к первому нулю автокорреляционной функции. Проведя качественный анализ формы ФП (5), оператор принимает решение о том, сигнал является фоновым или обусловлен движущимся объектом, т.е. на этом этапе осуществляется предварительное распознавание движущегося объекта.

Для повышения качества распознавания строятся три ФП в том же "окне" при других значениях временной задержки с дискретностью 50 точек (6), т.е. при $T = 100, 150$ и 200 точек. Качественный анализ изменения формы ФП (7) позволяет оператору принять решение о типе движущегося объекта. Если форма ФП практически не изменяется, то сигнал в "окне" является фоновым. А если фазовая траектория концентрируется в трех областях на краях ФП, то сигнал в "окне" обусловлен БПЛА мультироторного типа с тремя винтами.

Построение трех ФП при больших временах задержки (8) $T = 300, 350$ и 400 точек позволяет определить характер движения БПЛА. На девятом этапе (9), если формы ФП подобны формам, наблюдаемым при $T = 100, 150$ и 200 , то оператор принимает решение, что сигнал соответствует зависшему БПЛА, а если треугольная форма ФП усложняется и наблюдается дополнительное отделение фазовой траектории от фонового ФП, то сигнал обусловлен движущимся БПЛА.

Выводы

1. Форма фазового портрета фонового сигнала при изменении величины временной задержки практически не изменяется, и может быть охарактеризована как случайное движение изображающей точки по фазовой траектории.

2. При изменении временной задержки на краях ФП сигналов, полученных при зависании БПЛА, проявляется концентрация фазовой траектории в трех областях ФП.

3. Усложнение треугольной формы ФП при дополнительном отделении фазовой траектории от фонового ФП при увеличении временной задержки характеризует сигнал, обусловленный движением БПЛА.

4. Предложен метод распознавания БПЛА мультироторного типа с использованием формы фазовых портретов, построенных при различных временах задержки, который позволяет распознать БПЛА мультироторного типа, а также определить характер его движения.

5. При проведении дальнейших исследований целесообразно оценить возможность использования величины фрактальной размерности фазовых портретов, построенных при разных временах задержки, для распознавания БПЛА.

Список литературы

1. Берже П. Порядок в хаосе. О детерминистском подходе к турбулентности / П. Берже, И. Помо, К. Видадь. – М.: Мир, 1991. – 368 с.

2. Малинецкий Г.Г. Современные проблемы нелинейной динамики / Г.Г. Малинецкий, А.Б. Потапов. – М.: Едиториал УРСС, 2002. – 360 с.

3. Пащенко Р.Э. Формирование фрактальных сигналов / Р.Э. Пащенко. – Х.: ХООО “НЭО “ЭкоПерспектива”, 2005. – 298 с.

4. Fraser A.M. Independent coordinates for strange attractors from mutual information / A.M. Fraser, H.L. Swinney // Phys. Rev. – 1986. – A 33. – P. 1134-1140.

5. Распознавание БПЛА мультироторного типа с использованием фазовых портретов / Р.Э. Пащенко, В.И. Кортунюк, Д.О. Цюпак, О.А. Барданова // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2013. – №4(13). – С. 68-72.

6. Изделие 1РЛ133. Техническое описание. БД 1.400.009 ТО. – 1974. – 232 с.

7. ООО “КБ АВИА” [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://www.kb-avia.com/index.html>.

Поступила в редколлегию 4.12.2014

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

АНАЛІЗ ФОРМИ ФАЗОВИХ ПОРТРЕТІВ ПРИ ЗМІНІ ЧАСУ ЗАТРИМКИ ДЛЯ РОЗПІЗНАВАННЯ БПЛА МУЛЬТИРОТОРНОГО ТИПУ

Р.Е. Пашченко, Д.О. Цюпак, І.О. Ратайчук, О.А. Барданова

Проведений аналіз зміни форми фазових портретів при їх побудові з різним часом затримки. Розглянута можливість використання зміни форми фазових портретів, побудованих при різному часі затримки, для розпізнавання БПЛА. Запропонований метод розпізнавання БПЛА мультироторного типу з використанням форми фазових портретів, побудованих при різному часі затримки. Метод дозволяє розпізнати БПЛА мультироторного типу, а також визначити характер його руху.

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

ANALYSIS FORM OF PHASE PORTRAITS AT A CHANGE TIME DELAY FOR RECOGNITION BPLA MULTIROTOR TYPE

R.E. Paschenko, D.O. Cupak, I.A. Ratajchuk, O.A. Bardanova

The analysis change form of phase portraits is conducted at their construction with different sometimes delays. Possibility of the use change form of phase portraits, built at different times delay is considered, for recognition BPLA. The method of recognition BPLA multirotor type is offered with the use form phase portraits, built at different times delay. A method allows to recognize BPLA multirotor type, and also to define character his motion.

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