

Р.Э. Пашенко, В.К. Иванов, Д.О. Цюпак, Ю.В. Левадный

Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины

12, ул. Акад. Проскуры, Харьков, 61085, Украина

E-mail: r.paschenko@i.ua, ivanov@ire.kharkov.ua, tsyupak87@mail.ru, yulev@ire.kharkov.ua

Частотно-временной анализ радиолокационных отражений от мультироторного БПЛА

Предмет и цель работы. Проведен частотно-временной анализ сигналов доплеровской радиолокационной станции (РЛС) при зондировании беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) мультироторного типа. Широкое использование БПЛА мультироторного типа приводит к необходимости упорядочивания их полетов и контролю за их использованием. Основной конструктивной особенностью таких БПЛА является наличие роторов, обеспечивающих их движение, число которых может изменяться в зависимости от конструкции.

Методы и методология работы. Предложена методика экспериментальных исследований вращающихся роторов БПЛА с использованием доплеровской РЛС. Описаны условия и состав измерительно-информационной системы, используемой при проведении эксперимента.

Результаты работы. В результате проведенного анализа установлено, что с увеличением угловой частоты вращения ротора период доплеровского сигнала (ДС) уменьшается (частота повышается), однако частота фиксируемого ДС меньше, чем угловая частота вращения, задаваемая с пульта управления БПЛА (чем больше частота вращения, тем больше отличие этих частот). Выявлены особенности структуры (формы) ДС и их спектров, которые усложняются при увеличении частоты вращения роторов и их количества. Исследованы особенности ДС при различном направлении вращения роторов (в одну сторону или в разные) при схожем их геометрическом расположении. При этом показано влияние направления вращения на форму временной реализации ДС и его спектр.

Заключение. Выявленные отличия в форме доплеровских сигналов могут быть в дальнейшем использованы для распознавания типа БПЛА, а также при построении моделей доплеровских сигналов, отраженных от БПЛА. Ил. 11. Библиогр.: 7 назв.

Ключевые слова: радиолокационная станция (РЛС), доплеровская РЛС, беспилотный летательный аппарат, доплеровский сигнал, временная реализация сигнала, спектр сигнала.

В последние десятилетия стремительно развивается и расширяется парк беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), особенно БПЛА мультироторного типа, так называемых мультикоптеров [1]. Такие БПЛА имеют малые габариты, а при их конструировании широко используются слабо отражающие электромагнитные волны материалы (пластмасса, стекловолокно, графен, пенопласт и т. д.). За счет этого они имеют небольшую эффективную отражающую способность, что затрудняет их обнаружение и распознавание. Основной конструктивной особенностью таких БПЛА является наличие

роторов, которые обеспечивают их движение, число которых может изменяться в зависимости от конструкции. Наибольшее распространение получили БПЛА с тремя, четырьмя и шестью роторами. Также существуют БПЛА с восьмью, двенадцатью и большим количеством роторов [2].

Расширение области использования БПЛА мультироторного типа приводит к необходимости упорядочивания их полетов и контроля за их использованием. С 1 июня 2018 года Государственная авиационная служба Украины ввела Временный порядок использования



Рис. 1. Измерительно-информационная установка

воздушного пространства Украины, в котором определены правила и ограничения на полеты дистанционно пилотируемых воздушных судов без предварительного согласования [3]. Вес таких воздушных судов не должен превышать 20 кг, разрешенная высота полетов – 120 м, дальность полетов «в зоне видимости» без ограничений. Полеты запрещены над объектами, которые определены МВД, Госпогранслужбой, СБУ, Нацполицией, Нацгвардией, Управлением государственной охраны и другими военными формированиями, правоохранительными структурами [3].

Для осуществления контроля за соблюдением этих правил необходимо создать систему обнаружения и распознавания мультироторных БПЛА. При этом целесообразно использовать не только визуальные средства наблюдения, но и радиолокационные, в частности доплеровские РЛС.

При зондировании БПЛА с различным числом роторов возникают трудности с анализом отраженных радиолокационных сигналов. Для исследования особенностей таких сигналов необходимо проведение комплекса экспериментов с БПЛА, имеющих разное количество роторов. В дальнейшем использовать особенности отраженных сигналов для распознавания типа мультироторного БПЛА. Экспериментальное

исследование сигналов, отраженных от движущихся объектов, показывает, что различная сложность движения (тип движущегося объекта) приводит к различным формам сигнала [4]. При этом форма сигналов не является гладкой, что обусловлено особенностями движения частей объекта, а также воздействием помех и шумов. Практический интерес представляет оценка характеристик доплеровских сигналов при зондировании различного количества роторов БПЛА и скорости их вращения, результаты которой в дальнейшем могут быть использованы для распознавания типа БПЛА и при построении моделей сигналов, отраженных от БПЛА.

Цель работы – оценить частотно-временные характеристики сигналов доплеровской РЛС при зондировании различного количества роторов БПЛА и скорости их вращения.

1. Экспериментальное исследование вращающихся роторов БПЛА. При проведении экспериментальных исследований доплеровских сигналов использовалась измерительно-информационная установка (система), фотография которой показана на рис. 1. Измерительно-информационная система (ИИС) создана на базе РЛС *IPS-154*, разработанной фирмой *InnoSenT* [5], с использованием персонального компьютера типа *Notebook Samsung P29* и измерителя дальности *Laser Distance Meter* китайского производства.

Радиолокационная станция *IPS-154 (CW-Doppler Radar)* представляет детектор движения или так называемую доплеровскую РЛС. Конструктивно РЛС имеет разнесенные плоскостные передающую и приемную антенные решетки с диаграммой направленности в горизонтальной (азимутальной) плоскости 45° , а в вертикальной (угломестной) – 38° . Подавление боковых лепестков составляет 13 дБ. Такая конструкция антенной системы позволяет обеспечить непрерывное излучение сигнала на несущей частоте $f_n = 24$ ГГц (длина волны $\lambda \approx 12$ мм).

Радиолокационная станция имеет следующие характеристики, указанные производителем [5]: питающее напряжение 5,5 В (можно обеспечить питание РЛС через *USB*-порт компьютера), пиковая мощность передатчика – до 100 мВт, полоса пропускания приемника – до 50 кГц, габаритные размеры РЛС $\sim 44 \times 30 \times 8,3$ мм.

В качестве объекта исследований использовался БПЛА с тремя роторами (рис. 2), разработанный в ООО «КБ АВИА» Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ» [6]. На БПЛА установлены двухлопастные роторы (пропеллеры) из пластика с углом наклона 4,7° и длиной 320 мм. Расстояния между роторами данного БПЛА одинаковы и составляют 975 мм.

В процессе проведения экспериментов ИИС фиксировала доплеровские сигналы с выхода РЛС в цифровой форме с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) встроенной звуковой карты персонального компьютера *Notebook Samsung P29*. Частота дискретизации АЦП составляла $f_{\text{дискр}} = 22,050$ кГц ($t_{\text{дискр}} = 1/f_{\text{дискр}} \approx 45,4$ мкс). Запись осуществлялась при 16-битном квантовании по уровню (динамический диапазон 96,33 дБ, соответствующий 65536 уровням; 1 уровень $\approx 0,00147$ дБ). Показания датчика (доплеровские сигналы РЛС) представлялись в виде табличных цифровых данных (уровней сигнала) и записывались в постоянную память компьютера в виде *wav*-файла. Также предусмотрена возможность преобразования файла данного формата в *txt*-файл.

Типовой измеритель дальности *Laser Distance Meter* использовался для определения расстояния от РЛС до объекта исследования (до БПЛА). Расстояние трассы зондирования РЛС–БПЛА составляло 5 м и не изменялось в ходе экспериментов.

При проведении экспериментов исследовались доплеровские сигналы (ДС), полученные при вращении одного, двух (при разной геометрической конфигурации) и трех роторов. Изменялась мощность работы двигателей БПЛА, которая составляла 15, 30, 45 и 60 %

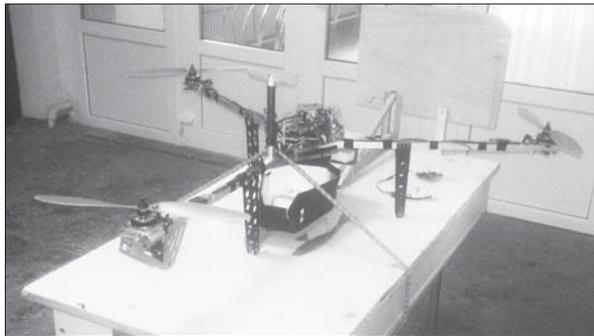


Рис. 2. Объект исследования – БПЛА с тремя роторами

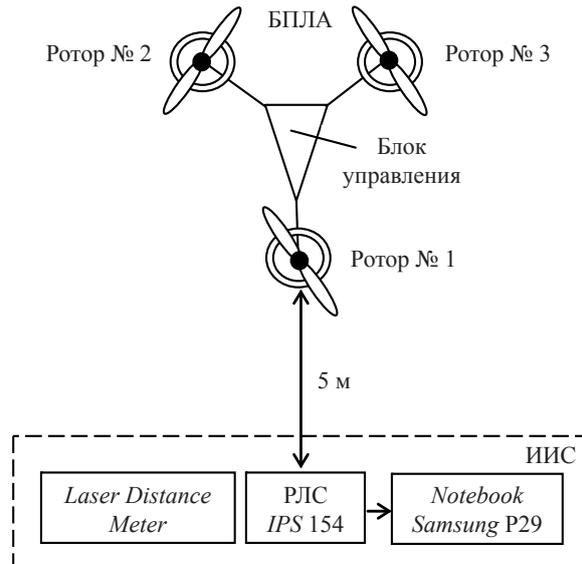


Рис. 3. Структурная схема проведения эксперимента

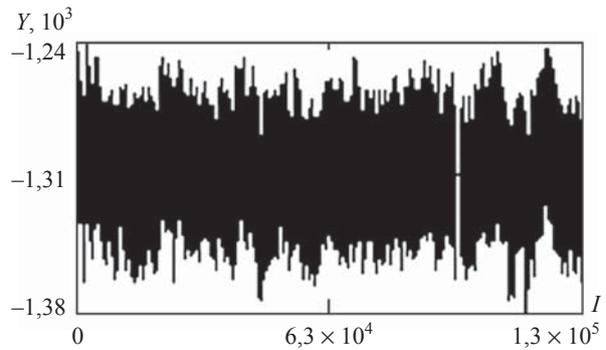


Рис. 4. Пример записанного доплеровского сигнала

от максимальной. Данные мощности соответствовали частотам (скоростям) вращения роторов: $f_{p1} = 750$ об/мин, $f_{p2} = 1500$ об/мин, $f_{p3} = 2250$ об/мин, $f_{p4} = 3000$ об/мин. Управление мощностью работы двигателей осуществлялось с помощью пульта дистанционного управления БПЛА. Рассмотренные выше частоты (скорости) соответствуют следующим угловым частотам (скоростям) вращения роторов: $\omega_{p1} \approx 75$ рад/с, $\omega_{p2} \approx 150$ рад/с, $\omega_{p3} \approx 225$ рад/с и $\omega_{p4} \approx 300$ рад/с (1 об/мин $\approx 1/10$ рад/с) [7].

На рис. 3 показана структурная схема проведения эксперимента. На рис. 4 показан пример записанного сигнала при зондировании одного вращающегося ротора № 1 с частотой 750 об/мин ($\omega_{p1} \approx 75$ рад/с). По оси абсцисс (I) отложено число точек записанного сигнала, а по оси ординат (Y) – уровень доплеровского сигнала (число уровней дискретизации). Запись по времени составляла $t_{\text{зап}} = 5,75$ с и при указанной

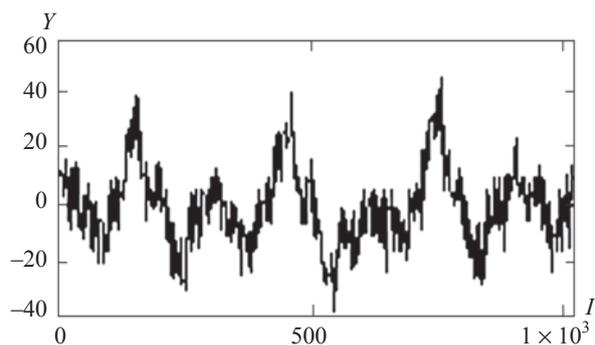


Рис. 5. Доплеровский сигнал, соответствующий четвертому «окну» исходного сигнала

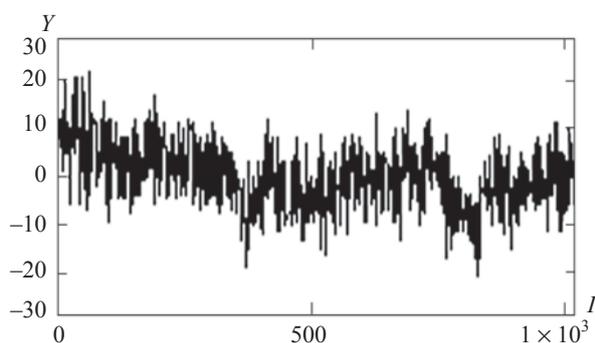


Рис. 6. Доплеровский сигнал, соответствующий фону на трассе зондирования

частоте дискретизации составила $N = 126\,799$ точек ($t_{\text{дискр}} = t_{\text{зап}} / N \approx 45,4$ мкс).

Как видно на рис. 4, провести анализ особенностей полученного ДС не представляется возможным, поэтому при дальнейшей работе использовалась «оконная» обработка длинного исходного сигнала (временного ряда).

При проведении анализа вращения винтов БПЛА с использованием доплеровской РЛС из исходных временных рядов вырезались выборки размером $2^{10} = 1024$ точек ($1024 \times 45,4$ мкс $\sim 46,2$ мс). Размер выборки определялся исходя из необходимости дальнейшего расчета быстрого преобразования Фурье (БПФ). Для расчета БПФ проводилась нормировка исходного ДС относительно его среднего значения (вычислялось среднее значение сигнала в «окне», которое затем вычиталось из значения сигнала в каждой точке).

На рис. 5 показан нормированный ДС, «вырезанный» из длинного временного ряда, соответствующий четвертому «окну» (с 3073 по 4096 точку) исходного сигнала.

Как видно на рис. 5, такая предварительная обработка позволяет анализировать временные

реализации ДС, а также осуществлять их спектральный анализ. Характер поведения ДС показывает, что при приближении передней (первой) лопасти ротора к РЛС частота излучаемого сигнала увеличивается и получается максимальное значение ДС.

При удалении передней лопасти ротора от РЛС частота сигнала уменьшается, и получается минимальное значение ДС. Так как ротор имеет две лопасти, то процесс, описанный для передней лопасти, должен повторяться и для задней (второй) лопасти, но с меньшей амплитудой, так как она находится дальше. При небольших скоростях вращения ротора данный эффект проявляется на временной реализации ДС в виде двух последовательных максимальных и минимальных значений сигнала. Также необходимо отметить, что, так как ротор вращается некоторое время, то и отмеченный эффект повторяется несколько раз, т. е. ДС является периодическим. Период ДС, показанного на рис. 5, составляет ≈ 300 точек временного ряда, что соответствует $T_{\text{ДС1}} = 300 \times 45,4$ мкс $\approx 13,62$ мс. Данному периоду соответствует частота ДС, равная $f_{\text{ДС1}} = 1/T_{\text{ДС1}} \approx 73,42$ 1/с. Полученное численное значение частоты ДС близко к численному значению угловой частоты вращения ротора ($\omega_{\text{р1}} \approx 75$ рад/с). Таким образом, частоту доплеровского сигнала, полученного с помощью РЛС, можно поставить в соответствие угловой частоте вращения ротора. Также необходимо отметить, что уровень максимальных значений ДС больше ($40 \times 0,00147 \approx 0,059$ дБ), чем минимальных ($25 \times 0,00147 \approx -0,037$ дБ). Однако некоторые минимальные уровни ДС также приближаются к $-0,059$ дБ.

При проведении эксперимента был записан доплеровский сигнал на трассе зондирования (фоновый ДС), «оконная» обработка которого показана на рис. 6. Данный сигнал также нормировался.

Анализ временной реализации фонового доплеровского сигнала показывает, что он отличается от ДС при зондировании вращающегося ротора (рис. 5) и имеет в основном высокочастотные составляющие, которые характерны для шумового сигнала.

Также на временной реализации данного сигнала наблюдается наличие некоторой низкочастотной составляющей.

Анализ ДС, приведенных на рис. 5 и 6, показывает, что ДС при зондировании одного вращающегося ротора № 1 содержит высокочастотные составляющие ДС фона, т. е. ДС фона накладывается на исследуемый ДС. Рассмотрим структуры доплеровских сигналов, полученных в ходе проведения эксперимента. Спектральный анализ этих сигналов будет рассмотрен ниже.

2. Анализ временных реализаций доплеровских сигналов при различном числе роторов БПЛА и скоростях их вращения. На рис. 7, а–в показаны нормированные доплеровские сигналы, состоящие из 1024 точек (размер «окна») при вращении ротора № 1 с угловыми частотами 150 рад/с (а), 225 рад/с (б) и 300 рад/с (в).

Анализ временных реализаций сигналов показывает, что, как и ожидалось, с увеличением частоты вращения ротора частота доплеровского сигнала $f_{ДС}$ увеличивается (период уменьшается). Так, при увеличении угловой частоты в два раза с 75 рад/с до 150 рад/с число периодов в «окне» также удваивается с трех (рис. 5) до шести (рис. 7, а). При этом период ДС, показанного на рис. 7, а, составляет ≈ 180 точек временного ряда, что соответствует $T_{ДС2} = 180 \times 45,4 \text{ мкс} \approx 8,17 \text{ мс}$. Полученное значение периода ДС при вращении ротора на частоте $\omega_{р2} \approx 150 \text{ рад/с}$ показывает, что оно не строго в два раза меньше периода ДС на частоте $\omega_{р1} \approx 75 \text{ рад/с}$, а несколько больше. Частота ДС будет равна $f_{ДС2} \approx 122,37 \text{ 1/с}$. Это позволяет сделать вывод, что угловая частота вращения ротора не всегда совпадает с частотой, показываемой на пульте управления БПЛА.

При дальнейшем увеличении частоты вращения ротора до $\omega_{р3} \approx 225 \text{ рад/с}$ число периодов ДС в «окне» продолжает увеличиваться (рис. 7, б), однако оно не увеличилось в три раза по сравнению с $\omega_{р1} \approx 75 \text{ рад/с}$ (рис. 5) и составило 7,5 периода. При этом период ДС составляет ≈ 130 точек временного ряда, что соответствует $T_{ДС3} = 130 \times 45,4 \text{ мкс} \approx 5,902 \text{ мс}$, а частота ДС равна $f_{ДС3} \approx 169,44 \text{ 1/с}$. Такое значение частоты будет еще больше не совпадать с угловой частотой, задаваемой с пульта управления БПЛА.

Уровни максимальных и минимальных значений ДС с увеличением частоты вращения

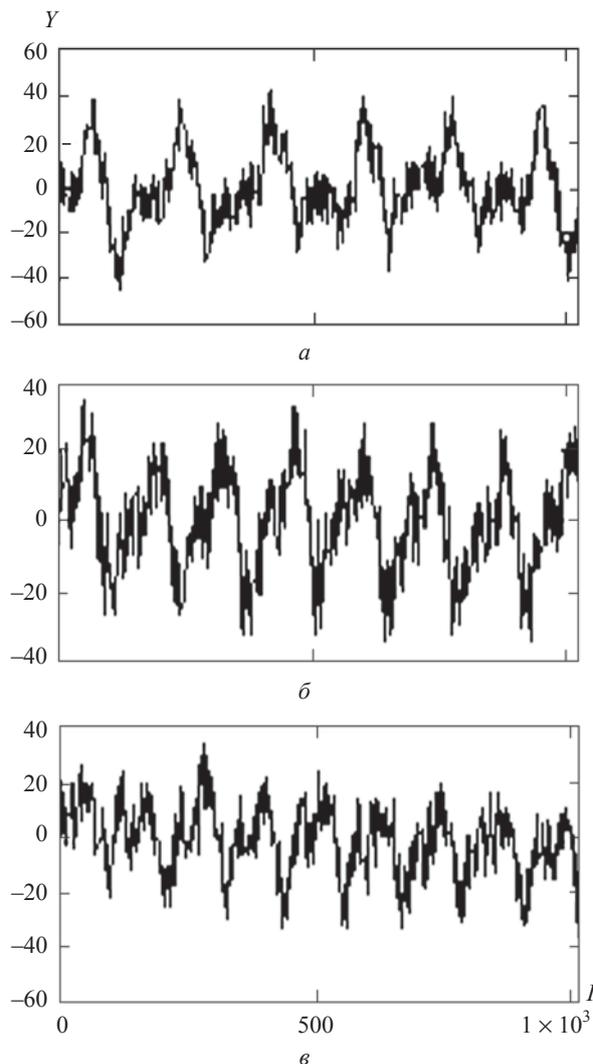


Рис. 7. Доплеровские сигналы, соответствующие четвертым «окнам» исходных сигналов, при вращении одного ротора № 1 с угловыми частотами 150 рад/с (а), 225 рад/с (б) и 300 рад/с (в)

($\omega_{р2} \approx 150 \text{ рад/с}$ и $\omega_{р3} \approx 225 \text{ рад/с}$) не изменяются и равны соответственно $\approx 0,059 \text{ дБ}$ и $\approx -0,037 \text{ дБ}$, при наличии минимальных уровней, близких к $-0,059 \text{ дБ}$. Также с увеличением частоты вращения ротора наблюдается изменение формы ДС, в частности, становится более крутым спад сигнала, а сигнал, обусловленный вращением второй лопасти, смещается вправо.

При увеличении частоты вращения ротора до $\omega_{р4} \approx 300 \text{ рад/с}$ число периодов ДС в «окне» увеличивается до девяти (рис. 7, в), однако это не в четыре раза больше по сравнению с $\omega_{р1} \approx 75 \text{ рад/с}$ (рис. 5). При этом период ДС составляет ≈ 115 точек временного ряда, что соответствует $T_{ДС4} = 115 \times 45,4 \text{ мкс} \approx 5,221 \text{ мс}$,

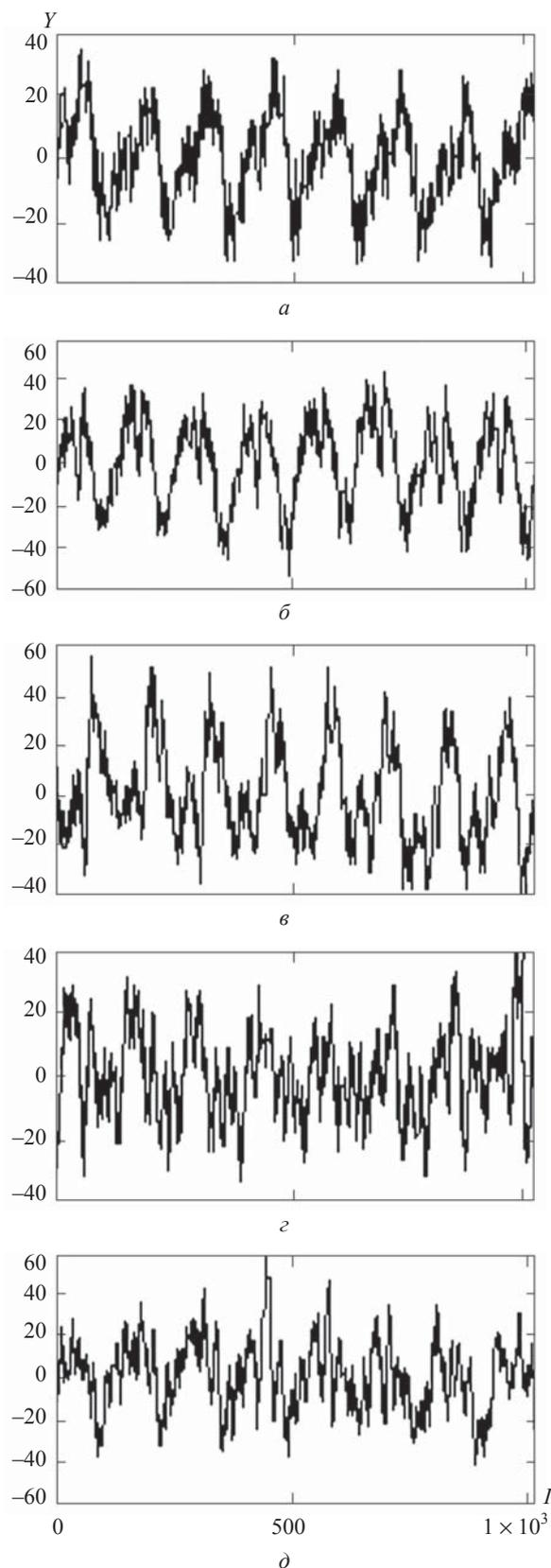


Рис. 8. Доплеровские сигналы, соответствующие вращению одного ротора № 1 (а), двух роторов № 1 и № 2 (б), двух роторов № 1 и № 3 (в), двух роторов № 2 и № 3 (г), трех роторов (д) с частотой 225 рад/с

а частота ДС равна $f_{ДС4} \approx 191,53$ 1/с. Таким образом, тенденция к увеличению расхождения частоты ДС и угловой частоты вращения ротора, задаваемой с пульта управления БПЛА, сохраняется.

С увеличением частоты вращения ротора до $\omega_{р4} \approx 300$ рад/с также наблюдается трансформация формы ДС. В одном периоде появляются приблизительно два одинаковых по уровню максимума, обусловленные вращением первой и второй лопастей ротора. При меньших частотах вращения эти максимумы были не равнозначны.

Таким образом, анализ доплеровских сигналов показал, что с увеличением угловой частоты вращения ротора период ДС уменьшается (частота повышается), однако частота фиксируемого ДС меньше, чем угловая частота вращения, задаваемая с пульта управления БПЛА. При этом, чем больше частота вращения, тем больше отличия этих частот. Необходимо отметить, что при небольших значениях угловой частоты вращения ротора ($\omega_{р1} \approx 75$ рад/с) ей можно поставить в соответствие частоту ДС, полученную с помощью РЛС. Особый интерес представляет форма ДС, так при увеличении частоты вращения ротора становится более крутым спад сигнала, а сигнал, обусловленный вращением второй лопасти, смещается вправо. При очень больших частотах вращения (>300 рад/с) в одном периоде сигнала проявляются приблизительно два одинаковых по уровню максимума.

Рассмотрим временные реализации ДС сигналов при различном числе вращающихся роторов при одной частоте вращения. На рис. 8, а–д показаны нормированные ДС, соответствующие вращению одного ротора № 1 (а), двух роторов № 1 и № 2 (б), двух роторов № 1 и № 3 (в), двух роторов № 2 и № 3 (г) и трех роторов (д) при частоте вращения 225 рад/с (обозначения роторов см. рис. 3).

Анализ временной реализации ДС при зондировании одного ротора № 1 был проведен выше. Доплеровский сигнал при зондировании двух роторов № 1 и № 2 (рис. 8, б) отличается по форме от ДС при зондировании только одного ротора № 1 (рис. 8, а). В каждом периоде максимумов ДС наблюдается разделение сигнала на два практически одинаковых мак-

симула. Минимумы ДС не имеют такой характерной формы, как максимумы. При этом периодичность ДС не изменяется ($T_{ДС} \approx 6,0$ мс). Необходимо отметить, что роторы № 1 и № 2 вращались в одну сторону и появление двух максимумов, скорее всего, обусловлено их различным расстоянием до РЛС.

Таким образом, появление двух максимумов ДС можно считать естественным вкладом частоты вращения второго ротора № 2 в ДС ротора № 1 и может быть отличительным признаком количества роторов, которые вращаются в одном направлении. Период между двумя максимумами составляет 27 точек $T_{\text{макс}} = 1,23$ мс ($f_{\text{макс}} = 815,88$ Гц). При более детальном изучении формы каждого из максимумов можно увидеть, что они также состоят из двух составляющих. Период между двумя составляющими 16 точек $T_{\text{сост}} = 0,73$ мс ($f_{\text{сост}} = 1376,65$ Гц). Это, скорее всего, обусловлено наличием двух лопастей ротора.

Доплеровский сигнал при зондировании двух роторов № 1 и № 3 (рис. 8, в) отличается от ДС двух роторов № 1 и № 2 (рис. 8, б), так как эти роторы вращаются в разные стороны. За счет этого форма сигнала не имеет двух хорошо разделяемых максимумов, происходит уменьшение («разрушение») одного из максимумов. Кроме того, в этом случае такая же форма характерна для минимумов ДС. Периодичность ДС также не изменяется $T_{ДС} \approx 6,0$ мс. Но за счет того, что изменилось поведение минимумов сигнала, максимальные значения ДС становятся почти в два раза уже по времени. Детальное изучение формы минимумов сигнала показывает, что две его составляющие находятся на расстоянии 36 точек $T_{\text{мин}} = 1,63$ мс ($f_{\text{макс}} = 611,85$ Гц).

Таким образом, направление вращения роторов (в одну сторону или в разные) при схожем их геометрическом расположении оказывает влияние на форму временной реализации ДС.

На рис. 8, г показан ДС при другом геометрическом расположении роторов. Роторы № 2 и № 3 были расположены на одинаковом расстоянии от РЛС, но под разными азимутами (рис. 3). Их совместное вращение в разные стороны приводит к тому, что форма ДС и поведение его максимальных и минимальных уровней сходны с вращением двух роторов № 1 и № 3.

Однако существуют отличия, так два максимума ДС практически одинаковые по уровню («разрушения» одного из них не происходит). Также вращение роторов в разные стороны приводит к более сложной структуре (форме) минимальных уровней сигнала при той же периодичности сигнала.

Таким образом, различное геометрическое расположение вращающихся роторов приводит к различным формам сигнала.

На рис. 8, д показан ДС при одновременном вращении всех трех роторов. Временной анализ данного ДС показывает, что структура сигнала имеет отличительные особенности, по сравнению с ДС при зондировании одного и двух роторов. Так, в максимумах сигнала проявляются три парных максимума. При этом центральный максимум, как правило, самый большой. Такое поведение ДС обусловлено количеством роторов (три) и их геометрическим расположением по отношению к РЛС (см. рис. 3, один ротор ближе, два сзади). Периодичность сигнала не изменяется, так как частота вращения роторов осталась прежней ($T_{ДС} \approx 6,0$ мс). Период между соседними максимумами составляет 27 точек $T_{\text{макс}} = 1,23$ мс (как и при вращении двух роторов). Минимальные составляющие имеют такую же структуру, но характер разделения трех составляющих не так отчетливо проявляется, как при исследовании максимумов.

Таким образом, анализ временных реализаций ДС, отраженных от БПЛА, показывает, что структура (форма) сигналов зависит от числа роторов, направления их вращения и геометрического расположения относительно РЛС. Отличия в форме сигнала могут быть использованы для распознавания типа БПЛА. Исследуем спектральные характеристики ДС, которые были представлены выше.

3. Спектральный анализ доплеровских сигналов, отраженных от БПЛА. Быстрое преобразование Фурье позволяет рассчитать дискретный спектр, в котором каждое значение амплитуды находится относительно соседних на равных по частоте промежутках. Величина этих промежутков между дискретами зависит от частоты дискретизации и количества отсчетов в выборке сигнала (частота сигнала кратна шагу, который равняется отношению частоты дискретизации к количеству отсчетов). Для

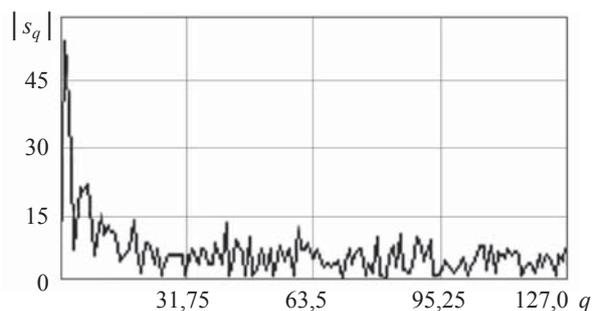


Рис. 9. Спектр доплеровского сигнала, соответствующего фону на трассе зондирования

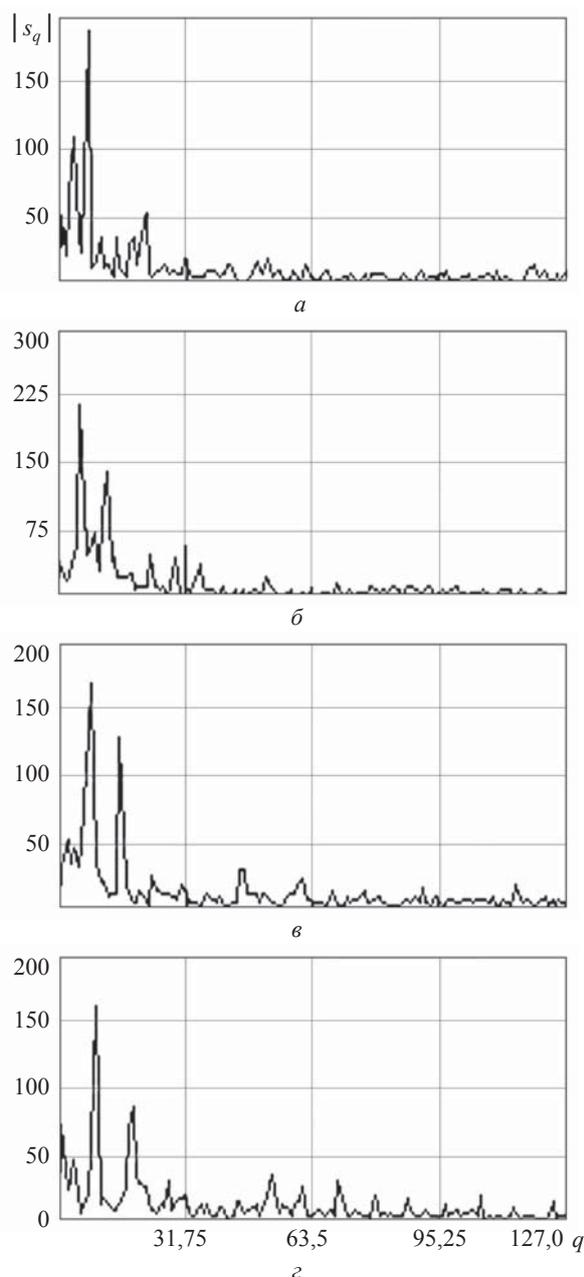


Рис. 10. Спектры доплеровских сигналов, соответствующие вращению одного ротора № 1 со скоростью 75 рад/с (а), 150 рад/с (б), 225 рад/с (в) и 300 рад/с (г)

описанных выше условий проведения экспериментов частота дискретизации ДС составляла $f_{\text{дискр}} = 22,050$ кГц, а количество отсчетов в рассматриваемых ДС – $N = 1024$ точек. Для таких условий шаг между дискретами частоты на спектрах равняется

$$\Delta f_c = f_{\text{дискр}} / N = 22050 / 1024 \approx 21,5 \text{ Гц},$$

т. е. точность определения частоты ДС (разрешение по частоте) будет составлять $\Delta f_c = 21,5$ Гц.

На рис. 9 приведен спектр ДС на трассе зондирования (фонового ДС), на котором видно, что спектр фонового ДС содержит один максимум (≈ 50 уровней) на 2-3 дискрете, что составляет ≈ 50 Гц. Данный максимум соответствует, скорее всего, частоте сигнала электрической сети на месте проведения эксперимента. В дальнейшем спектр занимает весь частотный диапазон почти равномерно (до 15 уровней), что подобно спектру шума. Элементы спектра фонового ДС будут присутствовать и на спектрах ДС при зондировании БПЛА. На рисунке введены следующие обозначения: $|s|$ – амплитуда спектра, q – количество дискрет спектра.

На рис. 10, а–г показаны спектры ДС при зондировании одного вращающегося ротора № 1 с угловыми частотами 75 рад/с (а), 150 рад/с (б), 225 рад/с (в) и 300 рад/с (г).

Как видно на рис. 10, на всех спектрах присутствуют две максимальные (основные) гармоники, а также элементы фонового спектра слева и справа от них. При вращении ротора с угловой частотой $\omega_{p1} \approx 75$ рад/с (рис. 10, а) частота первой гармоники ДС равна $f_{\text{ДС1}} \approx 3,5 \times 21,5 = 75,25$ 1/с, а частота второй – в два раза больше $f_{\text{ДС2}} \approx 7,0 \times 21,5 = 150,5$ 1/с. Это значение близко к численному значению угловой частоты вращения ротора. Также, как и при анализе временных реализаций ДС, анализ их спектров показывает, что с увеличением угловой частоты вращения ротора частоты первых гармоник увеличиваются (рис. 10, б–г). Так, при вращении ротора с $\omega_{p2} \approx 150$ рад/с частоты основных гармоник составляют $f_{\text{ДС1}} \approx 129$ 1/с и $f_{\text{ДС2}} \approx 258$ 1/с, соответственно, при $\omega_{p3} \approx 225$ рад/с – $f_{\text{ДС1}} \approx 172$ 1/с и $f_{\text{ДС2}} \approx 344$ 1/с, а при $\omega_{p4} \approx 300$ рад/с – $f_{\text{ДС1}} \approx 193,5$ 1/с и $f_{\text{ДС2}} \approx 387$ 1/с.

Как следует из этих данных, частоты первых гармоник несколько меньше угловых частот

вращения роторов и с увеличением угловой частоты вращения эта разница увеличивается. Средние значения частот между первой и второй гармониками приближаются к угловой частоте вращения ротора.

Так, при вращении ротора с $\omega_{p2} \approx 150$ рад/с среднее значение частоты основных гармоник составляет $f_{ДСр} \approx (129 + 258) / 2 = 193,5$ 1/с, при $\omega_{p3} \approx 225$ рад/с – $f_{ДСр} \approx 258$ 1/с, а при $\omega_{p4} \approx 300$ рад/с – $f_{ДСр} \approx 290,25$ 1/с. Также необходимо отметить, что частоты вторых гармоник ДС практически при всех угловых частотах вращения ротора в два раза больше частот первых гармоник ДС.

Таким образом, спектральный анализ ДС при увеличении угловой частоты вращения ротора показал, что спектр имеет две основные гармоники, частота которых увеличивается. При этом частоты вторых гармоник ДС в два раза больше частот первых. При небольших значениях угловой частоты вращения ротора ($\omega_{p1} \approx 75$ рад/с) ей можно поставить в соответствие частоту первой гармоники ДС, а при больших ($\omega_{p4} \approx 300$ рад/с) – среднее значение частот первой и второй гармоник.

Рассмотрим спектры ДС при различном числе вращающихся роторов. На рис. 11, а–г показаны спектры ДС при зондировании одного ротора № 1 (а), двух роторов № 1 и № 2 (б), двух роторов № 1 и № 3 (в), двух роторов № 2 и № 3 (г) и трех роторов (д) на скорости 225 рад/с.

На рис. 11 видно, что при одинаковой частоте вращения роторов (225 рад/с) на всех спектрах частота первой основной гармоники не изменяется и равна $f_{ДС1} \approx 172$ 1/с. Также на всех спектрах присутствуют элементы фонового спектра слева и справа от основных гармоник. Анализ спектра ДС при вращении двух роторов № 1 и № 2 в одну сторону (рис. 11, б) показывает, что появляется шесть дополнительных гармоник на кратных $f_{ДС1} \approx 172$ 1/с частотах.

При этом амплитуды первой и второй гармоник увеличиваются в два и полтора раза, соответственно, по сравнению со спектром ДС при зондировании одного ротора № 1 (рис. 11, а). Такое поведение спектра ДС обусловлено взаимным влиянием вращения двух роторов в одну сторону.

Спектр ДС при вращении двух роторов № 1 и № 3 в разные стороны (рис. 11, в) отличается

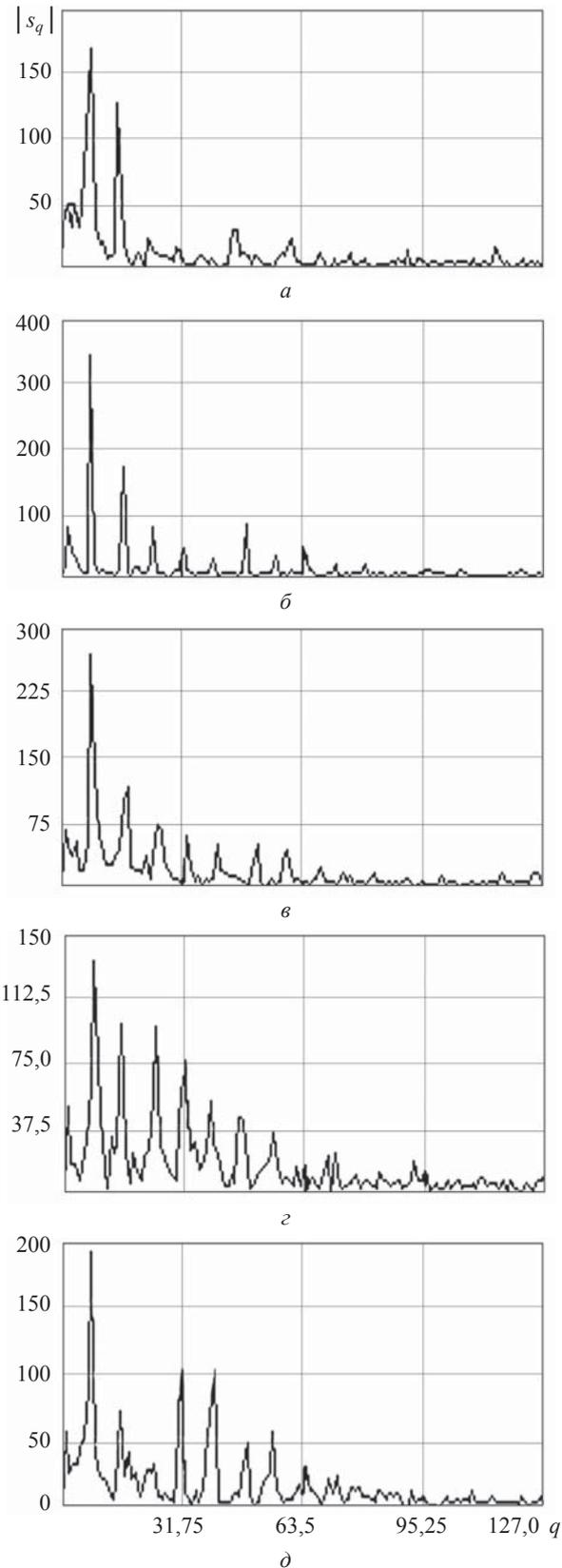


Рис. 11. Спектры доплеровских сигналов, соответствующие вращению одного ротора № 1 (а), двух роторов № 1 и № 2 (б), двух роторов № 1 и № 3 (в), двух роторов № 2 и № 3 (г) и трех роторов (д) на скорости 225 рад/с

от спектров ДС, рассмотренных выше. Так, амплитуда первой гармоники увеличивается только в полтора раза, а не в два, а второй гармоники – даже уменьшается; также изменяются ширина гармоник и их форма. При этом амплитуды гармоник уменьшаются по закону, близкому к экспоненциальному. Кроме того, нарушается кратность частот гармоник частоте $f_{ДС1} \approx 172$ 1/с. Такое поведение гармоник спектра говорит о более сложном характере ДС и обусловлено разносторонним вращением роторов, которое приводит к тому, что взаимное их влияние является несинхронным.

Спектр ДС при вращении двух роторов № 2 и № 3 в разные стороны (рис. 11, з) при измененной конфигурации их расположения (на одной линии, перпендикулярной направлению на РЛС, см. рис. 3) также имеет некоторые отличия. Так, амплитуда первой гармоники уменьшается, а гармоники становятся шире. При этом семь первых гармоник располагаются на частотах, кратных частоте $f_{ДС1} \approx 172$ 1/с, а восьмая «разрушается».

Уменьшение амплитуд гармоник происходит уже не по закону, близкому к экспоненциальному. Такой характер спектра обусловлен направлением вращения роторов, а также их взаимным расположением.

При зондировании трех вращающихся роторов спектр ДС (рис. 11, д) становится более «изрезанным». Первая гармоника остается без изменения, а вторая и третья гармоники искажаются (изменяют форму и уменьшают амплитуду). Амплитуды четвертой и пятой гармоник

практически одинаковы и возрастают по сравнению со спектрами ДС, рассмотренных выше. Гармоники с шестой по восьмую включительно не изменяются.

Также необходимо отметить, что с увеличением числа роторов в спектрах ДС (рис. 11, з и д) возрастает уровень и сложность высокочастотных составляющих, т. е. увеличивается сложность ДС.

Таким образом, спектры ДС зависят от числа зондируемых роторов, их геометрического расположения и направления вращения (синфазное или противофазное).

Выводы. Проведены экспериментальные исследования доплеровских сигналов при зондировании различного количества роторов БПЛА и скорости их вращения. Оценены их временные и спектральные характеристики. Установлено, что с увеличением угловой частоты вращения ротора период ДС уменьшается (частота повышается), однако частота фиксируемого ДС меньше, чем угловая частота вращения, задаваемая с пульта управления БПЛА (чем больше частота вращения, тем больше отличие этих частот). Выявлены особенности структуры (формы) ДС и их спектров, которые усложняются при увеличении частоты вращения ротора и их количества. Исследованы особенности ДС при различном направлении вращения роторов при схожем их геометрическом расположении. Результаты исследований в дальнейшем могут быть использованы для распознавания типа БПЛА, а также при построении моделей доплеровских сигналов, отраженных от БПЛА.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Различные виды мультикоптеров. URL: <https://rcdrone.livejournal.com/5115.html>
2. Асмаков С. Современные мультикоптеры: многообразие моделей и проблема выбора. *КомпьютерПресс*. URL: <https://compress.ru/post/20160601-m-copters-choice>
3. Госавиаслужба Украины пересмотрела ограничения на полеты дронов в сторону увеличения веса, дальности и высоты полета. URL: <https://interfax.com.ua/news/general/533582.html>
4. Pashchenko R., Ivanov V., Tsyupak D. On radar signals analysis using the fractal dimension. *4th Int. Scientific-Practical Conf. "Problems of Infocommunications. Science and Technology"* (PICS&T-2017) (Kharkov, 10–12 Oct. 2017). Ukraine, Kharkov, 2017. Paper 84.
5. K-Band CW Transceiver IPS-154. URL: <https://www.innosent.de/en/sensors/ips-series/cw-ips-154/>
6. ООО «КБ АВИА». URL: <http://www.kb-avia.com/index.html>
7. Оборот в минуту. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Оборот_в_минуту.

Стаття надійшла 15.07.2019

REFERENCES

1. Different types of multicopters. Available at: <https://rcdrone.livejournal.com/5115.html> (in Russian)
2. Asmakov S. Modern multicopters: variety of models and problem of choice. *ComputerPress*. Available at: <https://compress.ru/post/20160601-m-copters-choice> (in Russian).

3. State Aviation Administration of Ukraine revised limits on flights of drones toward gain in weight, distance and height of flight. Available at: <https://interfax.com.ua/news/general/533582.html> (in Russian).
4. Pashchenko, R., Ivanov, V., Tsyupak, D., 2017. On radar signals analysis using the fractal dimension. In: *4th Int. Scientific-Practical Conf. "Problems of Infocommunications. Science and Technology"* (PICS&T-2017): proc. Kharkov, Ukraine, 10–12 Oct. 2017. Paper 84.
5. K-Band CW Transceiver IPS-154. Available at: <https://www.innosent.de/en/sensors/ips-series/cw-ips-154/>
6. LTD "KB AVIA" (in Russian): <http://www.kb-avia.com/index.html> (in Russian).
7. Turn in a minute. Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/Turn_in_minute (in Russian).

Received 15.07.2019

R.E. Pashchenko, V.K. Ivanov, D.O. Tsyupak, U.V. Levadnyi

O.Ya. Usikov IRE of NASU
12, Acad. Proskura St., Kharkiv, 61085, Ukraine

FREQUENCY-TIME ANALYSIS OF RADAR REFLECTIONS FROM A MULTIROTOR PILOTLESS VEHICLE

Subject and Purpose. A frequency-time analysis is given to Doppler radar signals as applied to probing of pilotless flying vehicles of multicopter type. A wide employment of multicopter vehicles calls for their flight regulations and control. The main design features of the vehicles of the type are their rotors. They provide the vehicle motion, and their number varies depending on the vehicle design.

Methods and Methodology. An experimental methodology with the Doppler radar employment is suggested for studying the rotating rotors of the flying vehicle. The parameters and composition of the measuring and data system employed are presented.

Results. According to the performed analysis, the Doppler signal period decreases (frequency rises) as the angular frequency of the rotor rotation increases. However, the Doppler signal frequency measured is lower than the rotation angular frequency held by the vehicle control panel, and the higher is the rotation frequency, the more these frequencies differ. The structural (form) and spectral features of Doppler signals have been studied. And they become more complicated with increase in rotor rotation frequency and rotor number. The Doppler signal features have been examined for different directions of the rotor rotation (the same or opposite directed), the geometrical arrangement being the same. The sense of rotation is shown to have effect on the shape of time-base Doppler signal and its spectrum.

Conclusion. The revealed differences in the form of Doppler signals can be used at a later time for the identification of the flying vehicle as well as for the simulation of Doppler signals reflected from the flying vehicle.

Key words: radar, Doppler radar, pilotless flying vehicle, Doppler signal, time-base realization of signal, signal spectrum.

R.E. Пащенко, В.К. Иванов, Д.О. Цюпак, Ю.В. Левадний

ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАН України
12, вул. Акад. Проскури, Харків, 61085, Україна

ЧАСТОТНО-ЧАСОВИЙ АНАЛІЗ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ ВІДБИТТІВ ВІД МУЛЬТИРОТОРНОГО БПЛА

Предмет і мета роботи. Проведений частотно-часовий аналіз сигналів доплерівської радіолокаційної станції (РЛС) при зондуванні безпілотних літальних апаратів (БПЛА) мультироторного типу. Широке використання БПЛА мультироторного типу приводить до необхідності впорядкування їх польотів і контролю за їх використанням. Основною конструктивною особливістю таких БПЛА є наявність роторів, які забезпечують їх рух, число яких може змінюватися залежно від конструкції.

Методи і методологія роботи. Запропоновано методику експериментальних досліджень роторів БПЛА, що обертаються, з використанням доплерівської РЛС. Описано умови і склад інформаційно-виміральної системи, яка використовувалася під час проведення експерименту.

Результати роботи. У результаті проведеного аналізу встановлено, що із збільшенням кутової частоти обертання ротора період доплерівського сигналу (ДС) зменшується (частота підвищується), але частота ДС, що фіксується, менше ніж кутова частота обертання, що задається з пульта керування БПЛА. При цьому чим більша частота обертання, тим більше відмінності цих частот. Виявлено особливості структури (форми) ДС та їх спектрів, які ускладнюються при збільшенні частоти обертання ротора та їх кількості. Досліджені особливості ДС при різному напрямі обертання роторів (в один бік або у різні) при схожому їх геометричному розташуванні. Показано вплив напрямку обертання на форму часової реалізації ДС та її спектр.

Висновок. Виявлені відмінності у формі доплерівських сигналів можуть бути використані для розпізнавання типу БПЛА, а також для побудови моделей доплерівських сигналів, відбитих від БПЛА.

Ключові слова: радіолокаційна станція (РЛС), доплерівська РЛС, безпілотний літальний апарат, доплерівський сигнал, часова реалізація сигналу, спектр сигналу.