

ИССЛЕДОВАНИЕ СИГНАЛЬНЫХ ПРИЗНАКОВ РАСПОЗНАВАНИЯ МАЛЫХ БПЛА В ПОЛУАКТИВНОЙ РЛС

Е.Н.Воробьев

INVESTIGATION OF DISTINCTIVE FEATURES FOR RECOGNITION OF SMALL UAVS IN PASSIVE RADAR

E.N.Vorobyov

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», envorobev@etu.ru

Стремительное развитие малых БПЛА представляет серьезную угрозу для защиты важной инфраструктуры и стратегических объектов, а также безопасности населения. Современные средства полуактивной радиолокации являются перспективным решением задачи обнаружения БПЛА и предупреждения потенциальной угрозы. При этом распознавание малых БПЛА представляет собой сложную задачу, т.к. они имеют схожие с другими целями, в частности с птицами, радиолокационные характеристики и параметры движения. В статье представлены результаты экспериментальных исследований эхосигналов малых БПЛА, наблюдаемых пассивным когерентным локатором, использующим сигналы цифрового эфирного телевидения стандарта DVB-T2 в качестве радиолокационного подсвета. Показаны отличия в характере отклика взаимной функции неопределенности на сигнал, отраженный от БПЛА с различной конфигурацией лопастей пропеллеров. Определены информативные признаки, которые могут быть использованы для распознавания БПЛА в полуактивных РЛС.

Ключевые слова: *пассивный когерентный локатор, обнаружение целей, радиолокационное распознавание, БПЛА*

The rapid development of small UAVs poses a serious threat for critical infrastructure and strategic facilities protection as well as for public security. Modern passive radar technologies offer a promising solution for UAV detection and accident prevention. However, the recognition of small UAV is a challenging task because of the similar recognition features with other non-UAV targets, especially birds. This paper presents the results of the experimental investigations of the echo returns from small UAVs detected by passive coherent radar exploiting signals of digital video DVB-T2 broadcasting for target illumination. The influence of the echo from the UAVs with different configuration of the rotor blades on the structure of cross-ambiguity function is shown. The distinctive features suitable for UAV recognition in passive radar are revealed.

Keywords: *passive coherent radar, target detection, radar recognition, UAV*

Введение

В настоящее время наблюдается стремительное развитие легкомоторной авиации, в частности беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), и, как следствие, увеличивается число связанных с ними авиационных происшествий. Общедоступность и относительная простота управления БПЛА приводит к проблеме контроля несанкционированных полетов и обеспечения безопасности воздушного движения в приземном пространстве. Способность БПЛА к интенсивно маневрирующим полетам на малых высотах с автономной навигацией и дополнительной нагрузкой представляет серьезную угрозу для защиты потенциально опасных и критически важных объектов обеспечения жизнедеятельности (объекты инфраструктуры, энергетики и др.), а также для личной безопасности гражданского населения. Поэтому своевременное обнаружение БПЛА является важной задачей для предупреждения и противодействия потенциальным угрозам.

Современные средства радиолокации являются эффективным инструментом обнаружения БПЛА. Различные активные [1-2], а также полуактивные РЛС [3-5] продемонстрировали способность обнаруживать БПЛА, несмотря на их малые габариты, слабо отражающие материалы и относительно малую эффективную площадь рассеяния (ЭПР). При этом предпочтительным представляется использование

именно средств полуактивной радиолокации. Ключевой особенностью полуактивной РЛС является отсутствие в ее составе собственного передатчика. На приемной позиции полуактивной РЛС регистрируются сигналы, отраженные от цели, однако излученные не собственным, а неким внешним по отношению к системе, сторонним передатчиком [6]. Отсюда следуют ее основные преимущества перед традиционными активными РЛС: меньшая стоимость производства, размещения и эксплуатации; отсутствие необходимости выделения частоты; отсутствие вредного воздействия на окружающую среду и помех другим радиотехническим устройствам; высокая скрытность.

Сегодня полуактивные РЛС главным образом используются для обнаружения, определения координат и сопровождения движущихся целей, в том числе малых БПЛА (с ЭПР 0,001-0,01 м²), что делает их перспективным средством для использования в современных системах обеспечения безопасности и контроля воздушного движения. Однако во многих случаях для оценки степени потенциальной угрозы необходимо не только обнаружить воздушную цель, но и распознать, т.е. принять решение о принадлежности обнаруженной цели к определенному классу. Распознавание малых БПЛА представляет собой сложную задачу, т.к. цели этого класса имеют схожие радиолокационные характеристики и параметры движения с другими целями, в частности с птицами. Возможности распознавания БПЛА с помощью радиолокационных средств активно

исследуются в последние годы. Однако в основном результаты исследований информативных сигнальных признаков БПЛА представлены для активных радиолокаторов, преимущественно работающих в S- и X-диапазонах (8-12 ГГц). Практически отсутствуют данные об информативных признаках БПЛА, наблюдаемых в полуактивных радиолокаторах, работающих в более низких диапазонах частот сторонних источников сигналов цифрового наземного вещания. В свою очередь, использование сторонних передатчиков цифрового телевидения стандартов DVB-T/T2 является наиболее перспективным в задачах обнаружения БПЛА на малых высотах с помощью полуактивных РЛС [7].

Целью работы, представленной в настоящей статье, является экспериментальное исследование сигналов, отраженных от малых БПЛА, полученных с помощью полуактивной РЛС, работающей по сигналам цифрового эфирного телевидения стандарта DVB-T2.

Условия эксперимента

В ходе экспериментальных исследований использовался пассивный когерентный локалатор (ПКЛ), который относится к средствам полуактивной радиолокации и является разновидностью полуактивной РЛС [4,8]. В состав ПКЛ входят: приемная антенная решетка, приемное и вычислительное устройство (рис.1). В качестве стороннего источника радиолокационного подсвета целей используется сигнал первого мультиплекса Санкт-Петербургской телевизионной башни на 45-м канале DVB-T2, транслирующего на частоте 666 МГц с эффективной полосой 7,61 МГц. Расстояние между приемной позицией ПКЛ и передатчиком DVB-T2 сигнала составляет 49,2 км, высота

размещения передатчика — 90 м над уровнем моря. Антенные элементы передатчика и приемника имеют горизонтальную поляризацию. Данный DVB-T2 ПКЛ ранее продемонстрировал возможность уверенного обнаружения малоразмерных БПЛА на расстоянии до 10 км и птиц на расстоянии 20 км [4].

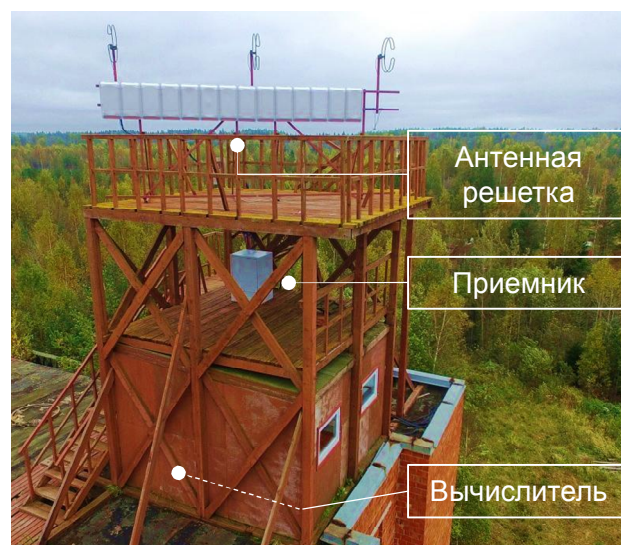


Рис.1. Экспериментальный пассивный когерентный локалатор

Сигналы опорного и одного канала наблюдения были записаны в момент нахождения исследуемой цели в секторе наблюдения ПКЛ. Наборы экспериментальных записей получены для четырёх БПЛА, включая три квадрокоптера разных конфигураций и БПЛА самолетного типа. Первый квадрокоптер DJI Phantom 3 имеет габаритные размеры



Рис.2. Фото экспериментальных БПЛА: квадрокоптер DJI Phantom 3 (а), квадрокоптер на базе DJI F450 (б), квадрокоптер Geoscan 410 (в), и одновинтовой БПЛА самолетного типа Skywalker 190 (г)

40×40×19 см и диаметр лопасти пропеллеров 23 см (рис.2а). Второй квадрокоптер собран на базе рамы DJI F450 и имеет габариты 45×45×22 см с аналогичной длиной лопасти 23 см (рис.2б). Третий — среднеразмерный квадрокоптер Geoscan 401 с габаритами 150×150×43 см и диаметром лопасти 43 см (рис.2в). Другой экспериментальной целью является одновинтовой БПЛА самолетного типа Skywalker 190, выполненный из пенопласта и углепластика с размахом крыльев 190 см и диаметром лопасти 28 см (рис.2г).

Анализ экспериментальных данных

В пассивном когерентном локаторе обнаружение целей и оценка их параметров реализуется в двумерной области «задержка—доплеровский сдвиг частоты» путем анализа взаимной функции неопределенности (ВФН) сигналов опорного канала, антенный элемент которого направлен на сторонний передатчик, и канала наблюдения, в котором присутствуют отражения от целей. На практике ВФН сигналов опорного канала s_{ref} и канала наблюдения s определяется следующим образом [9]:

$$|\Psi(l,d)| = \left| \sum_{n=0}^{N-1} s(n)s_{ref}^*(n-l)e^{-j2\pi dn/N} \right|,$$

где l — дискретизированная задержка; d — дискретизированный частотный сдвиг; N — количество отсчетов принятого сигнала в обрабатываемом блоке; $n=0, N-1$ — номер отсчета сигнала.

В ходе исследований был проведен анализ влияния сигналов (сигнатур), отраженных от БПЛА, на характер отклика ВФН, рассчитанной при времени когерентного накопления 0,27 с. Каждый из экспериментальных БПЛА имеет вращающиеся лопасти, которые могут производить заметные флуктуации ЭПР, приводящие к появлению на ВФН дополнительных модуляционных составляющих вокруг отражения от корпуса БПЛА, так называемого эффекта «пропеллерной модуляции» [10]. При этом частота повторения модуляционных составляющих для одного пропеллера определяется как $f = \pm 2kf_r$, где $k=1,2,\dots$, и f_r — частота вращения винта [11]. На интенсивность

эффекта пропеллерной модуляции влияет материал, из которого изготовлены лопасти пропеллеров БПЛА.

Структура ВФН с откликом на экосигнал от квадрокоптера DJI Phantom 3 с лопастями из пластика показана на рис.3. Мощный одиночный пик, наблюдаемый на задержке $\tau = 2,3$ мкс и частоте Доплера $f_d = 49,5$ Гц, соответствует отражению от корпуса БПЛА. При этом на ВФН не наблюдается составляющих, обусловленных отражением от вращающихся винтов БПЛА, т.к. лопасти сделаны из пластика — материала со слабыми отражающими способностями.

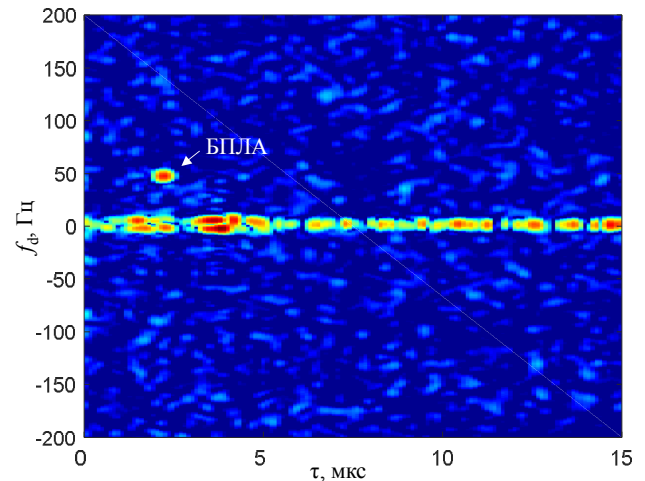


Рис.3. Отклик ВФН на экосигнал от квадрокоптера DJI Phantom с пластиковыми лопастями

В коммерчески доступных БПЛА используются лопасти, выполненные как из чистого пластика, так и из композиционного материала на основе углеродного волокна, так называемого углепластика или карбона. С целью исследования влияния материала лопасти на характер отраженного сигнала, одна из четырех пластиковых лопастей квадрокоптера была заменена на карбоновую. На рис.4а показана ВФН с откликом на сигнал, отраженный от квадрокоптера DJI Phantom 3 с одной лопастью из карбона и тремя лопастями из пластика. Наблюдается мощная составляющая от корпуса БПЛА с более слабыми состав-

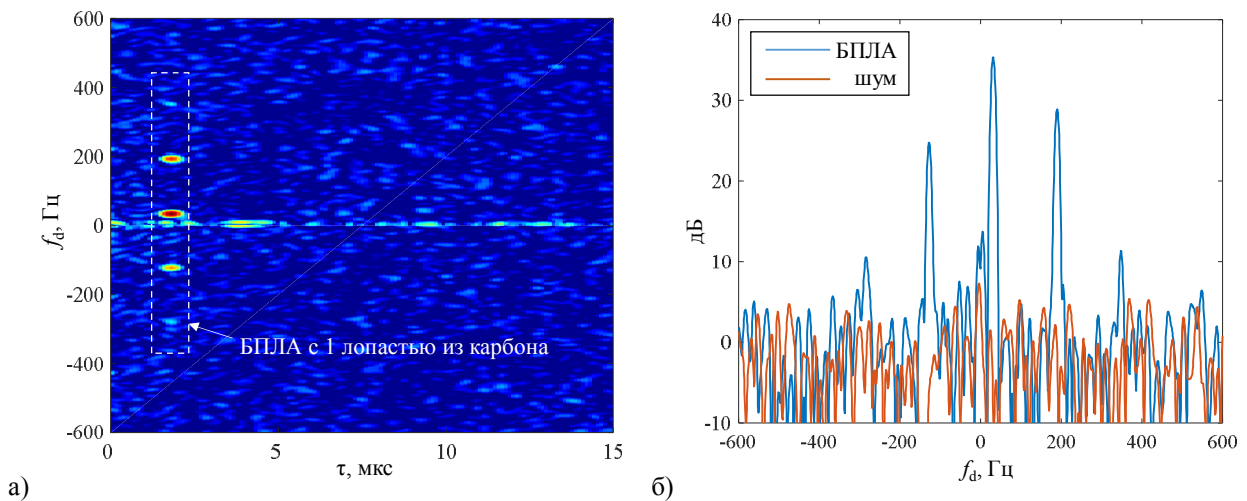


Рис.4. Отклик ВФН (а) и доплеровский спектр (б) экосигнала от квадрокоптера DJI Phantom с одной карбоновой лопастью

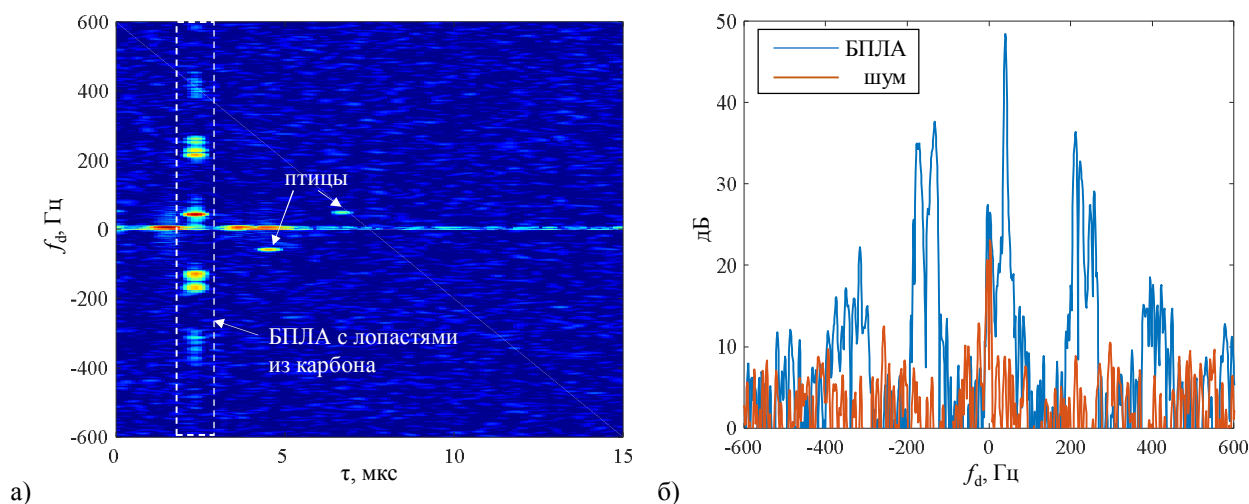


Рис.5. Отклик ВФН (а) и доплеровский спектр (б) эхосигнала от квадрокоптера DJI Phantom с карбоновыми лопастями

ляющими от вращающейся карбоновой лопасти. Извлеченный из ВФН доплеровский спектр показан на рис.4б. Спектральные составляющие, обусловленные вращением винта, хорошо заметны над уровнем шума (красная линия) и могут быть обнаружены. Кроме того, представляется возможным оценить частоту вращения винта квадрокоптера. Частота повторения модуляционных составляющих равна 170 Гц, что соответствует удвоенной частоте вращения пропеллера. Следовательно, пропеллер с лопастью из карбона в этом эксперименте вращается с частотой 85 Гц, что соответствует 5100 об/м и попадает в диапазон реальных значений скорости вращения пропеллера БПЛА этого типа (от 4250 до 5750 об/м [12]).

Структура ВФН и доплеровского спектра сигнала, отраженного от квадрокоптера DJI Phantom 3 со всеми лопастями из карбона, представлены на рис.5. Отклик на эхосигнал от БПЛА с такой конфигурацией лопастей имеет более сложную структуру в следствие отражений от всех вращающихся пропеллеров. При этом оценка частоты вращения каждого пропеллера представляет сложную задачу из-за эффекта наложения и взаимного влияния нескольких составляющих эхосигнала. На ВФН, изображенной на рис.5а, также

наблюдаются отклики от птиц, которые находились в секторе наблюдения ПКЛ во время проведения эксперимента. В отличие от БПЛА с карбоновыми лопастями, отражениям от птиц соответствуют только одиночные отклики. Таким образом, по наличию эффекта пропеллерной модуляции представляется возможным классифицировать обнаруженную цель как БПЛА.

Аналогичная структура ВФН и доплеровского спектра наблюдается при отражении сигнала подсвета от второй исследуемой цели — квадрокоптера DJI F450 с карбоновыми лопастями (рис.6). Составляющая корпуса заметна на задержке $\tau = 2,5$ мкс и частоте Доплера $f_d = -23,44$ Гц. Модуляционные составляющие, обусловленные отражением от вращающихся лопастей, заметно превышают уровень шумов и могут быть обнаружены.

На рис.7 показаны ВФН и доплеровский спектр сигнала, отраженного от квадрокоптера Geoscan 401. На задержке $\tau = 3$ мкс и частоте Доплера $f_d = 37$ Гц наблюдается отражение от корпуса БПЛА, вокруг которого присутствуют дополнительные составляющие, обусловленные отражением сигнала подсвета от вращающихся карбоновых лопастей. Сигнатура этого квадрокоптера содержит больше модуляционных со-

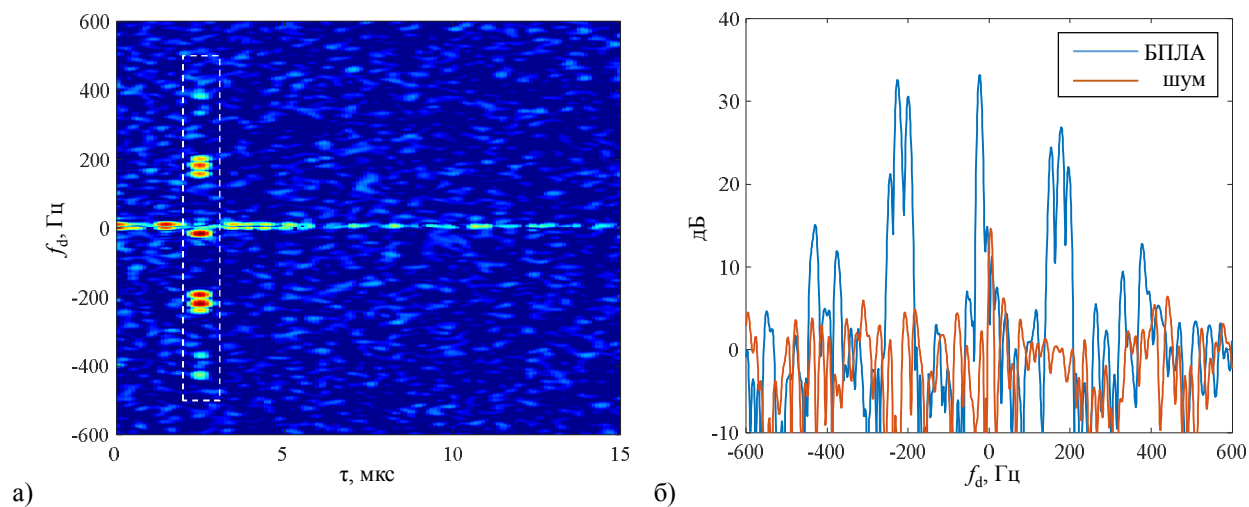


Рис.6. Отклик ВФН (а) и доплеровский спектр (б) эхосигнала от квадрокоптера DJI F450 с карбоновыми лопастями

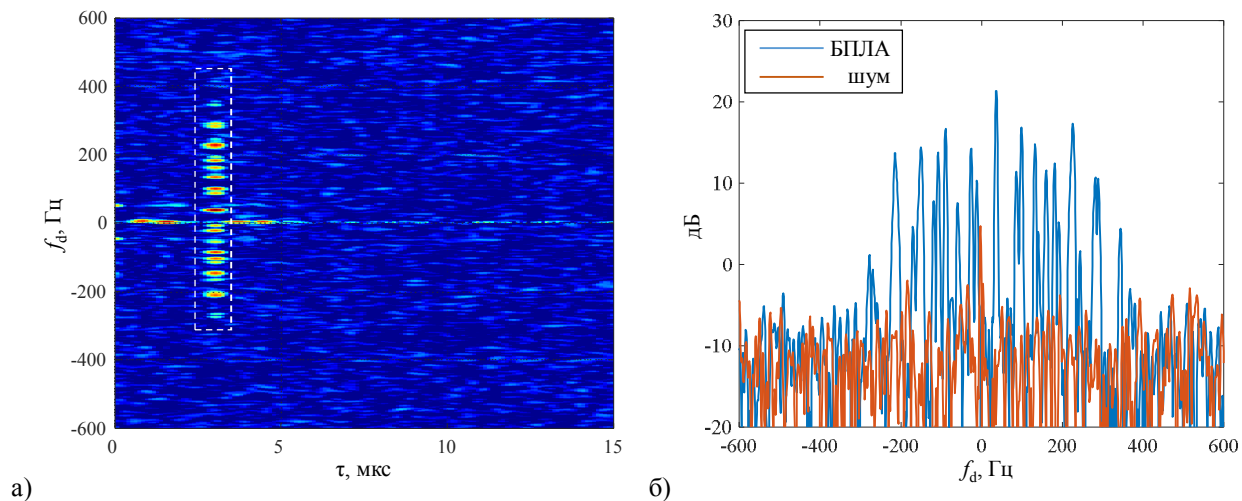


Рис.7. Отклик ВФН (а) и доплеровский спектр (б) эхосигнала от квадрокоптера Geoscan 401 с карбоновыми лопастями

ставляющих с более узким размахом по частоте, чем сигнатура DJI Phantom 3 с карбоновыми лопастями. Это объясняется разной скоростью вращения пропеллеров и длиной лопастей. Такое различие доплеровских сигнатур позволяет осуществлять не только распознавание БПЛА от других целей, но и их классификацию по типу.

Влияние эхосигнала от планера БПЛА самолетного типа Skywalker 190 на отклик ВФН представлено на рис.8 в виде одиночной составляющей с координатами $\tau = 2,3$ мкс и $f_d = 54,69$ Гц. Лопасть пропеллера этого БПЛА выполнена из пластика, поэтому иных составляющих, обусловленных пропеллерной модуляцией, не наблюдалось во время полета при разных углах наблюдения.

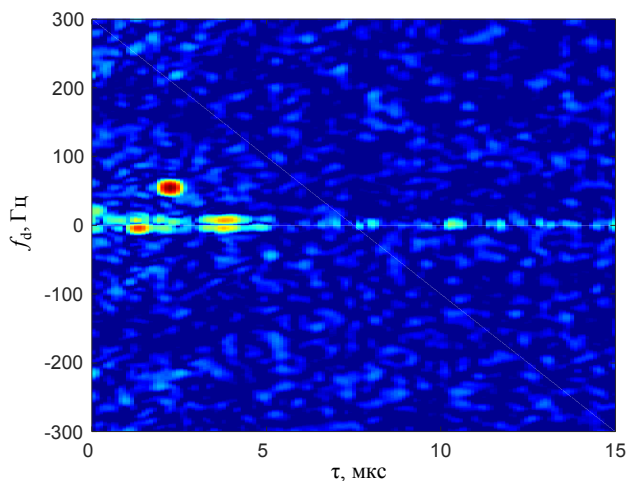


Рис.8. Отклик ВФН на эхосигнал от БПЛА самолетного типа Skywalker 190

Заключение

В ходе экспериментальных исследований был проведен анализ эхосигналов от малых БПЛА, полученных с помощью ПКЛ, работающего по сигналам сторонних передатчиков цифрового вещания стандарта DVB-T2. Результаты исследований показали, что на структуру отраженного сигнала влияет мате-

риал лопастей пропеллеров БПЛА. При отражении сигнала подсвета от БПЛА с карбоновыми лопастями возникает эффект пропеллерной модуляции, характеризующийся наличием дополнительных составляющих вокруг отклика на отражение от корпуса или планера БПЛА. Частота повторения модуляционных составляющих зависит от скорости вращения пропеллера. Этот эффект может быть использован не только для различения БПЛА от других целей, но и для их классификации по типу. В свою очередь, сигнал, отраженный от БПЛА с пластиковыми лопастями, не производит на ВФН дополнительных составляющих помимо отклика от корпуса цели. Аналогичный отклик наблюдается при отражении сигнала подсвета от птиц. Поэтому различие между БПЛА с пластиковыми винтами и птицами путем анализа их отражений только на двумерной поверхности «задержка—доплеровский сдвиг частоты» является сложной задачей.

При подготовке публикации использовались результаты работ по проекту "Разработка многопозиционного комплекса полуактивной радиолокации и радиомониторинга излучающих и радиомолчащих объектов" (Соглашение от 21 ноября 2018 г. №075-11-2018-035) с использованием мер государственной поддержки, предусмотренных постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218.

1. Björklund S. Target Detection and Classification of Small Drones by Boosting on Radar Micro-Doppler // 15th European Radar Conference (EuRAD), Madrid, Spain, 2018. P.182-185.
2. de Quevedo Á.D., Urzaiz F.I., Menoyo J.G. and López A.A. Drone Detection With X-Band Ubiquitous Radar // 19th International Radar Symposium (IRS), Bonn, Germany, 2018. P.1-10.
3. Chadwick A. D. Micro-drone detection using software-defined 3G passive radar // International Conference on Radar Systems (Radar 2017), Belfast, 2017. P.1-6.
4. Knoedler B., Zemhari R. and Koch W. On the detection of small UAV using a GSM passive coherent location system // 17th International Radar Symposium (IRS), Krakow, Poland, 2016. P.1-4.

5. Martelli T., Murgia F., Colone F., Bongioanni C. and Lombardo P. Detection and 3D localization of ultralight aircrafts and drones with a WiFi-based passive radar // International Conference on Radar Systems (Radar 2017), Belfast, 2017. P.1-6.
6. Бархатов А.В., Веремьев В.И., Воробьев Е.Н. и др. Пассивная когерентная радиолокация. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. 163 с.
7. Poullin D. Countering illegal UAV flights: passive DVB radar potentiality // 19th International Radar Symposium (IRS), Bonn, Germany, 2018. P.1-10.
8. Vorobev E., Barkhatov A., Veremyev V. and Kutuzov V. DVB-T2 passive radar developed at Saint Petersburg Electrotechnical University // 22nd International Microwave and Radar Conference (MIKON), Poznan, 2018. P.204-207.
9. Бархатов А. В., Козлов А. С. Быстрое вычисление частотно-временной функции в радиолокационной станции на графических процессорах // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2015. № 5. С.42-47.
10. Shirman Ya.D., Gorshkov S.A., Leshchenko S.P. and др. Методы радиолокационного распознавания и их моделирование. // Научно-технические серии. Радиолокация и радиометрия №2. Радиолокационное распознавание и методы математического моделирования. 2000. №3. С.5-65.
11. Pető T., Bilicz S., Szűcs L. et al. The Radar Cross Section of small propellers on Unmanned Aerial Vehicles // 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Davos, Switzerland, 2016. P.1-4.
12. Brooks D.A., Schwander O., Barbaresco F. et al. Temporal Deep Learning for Drone Micro-Doppler Classification // 19th International Radar Symposium (IRS), Bonn, Germany, 2018. P.1-10.
4. Knoedler B., Zemhari R. and Koch W. On the detection of small UAV using a GSM passive coherent location system. 17th International Radar Symposium (IRS), Krakow, 2016, pp.1-4.
5. Martelli T., Murgia F., Colone F., Bongioanni C. and Lombardo P. Detection and 3D localization of ultralight aircrafts and drones with a WiFi-based passive radar. International Conference on Radar Systems (Radar 2017), Belfast, 2017, pp. 1-6.
6. Barhatov A.V., Verem'ev V.I., Vorob'ev E.N., Kononov A.A., Kovalev D.A., Kutuzov V.M., Mihajlov V.N. Pассивная когерентная радиолокация [Passive coherent radiolocation]. Saint Petersburg, ETU Publ., 2016. 163 p.
7. Poullin D. Countering illegal UAV flights: passive DVB radar potentiality. 19th Int. Radar Symposium (IRS), Bonn, 2018, pp.1-10.
8. Vorobev E., Barkhatov A., Veremyev V. and Kutuzov V. DVB-T2 passive radar developed at Saint Petersburg Electrotechnical University. 22nd International Microwave and Radar Conference (MIKON), Poznan, 2018, pp.204-207.
9. Barkhatov A. V., Kozlov A. S. Radar amplitude-range-doppler surface fast calculation on graphics processing units. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics, 2015, no. 5, pp.42-47.
10. Shirman Ia. D., Gorshkov S. A., Leshchenko S. P., Bratchenko G. D., Orlenko V. M. Metody radiolokatsionnogo raspoznavaniia i ikh modelirovanie [Methods of radar recognition and their simulation]. Nauchno-tehnicheskie serii. Radiolokatsiia i radiometriia no.2. Radiolokatsionnoe raspoznavanie i metody matematicheskogo modelirovaniia – Science-technical series. Radiolocation and radiometry no. 2. Radar recognition and methods for mathematical simulation, 2000, no. 3, pp. 5-65.
11. Pető T., Bilicz S., Szűcs L., Gyimóthy S. and Pávó J. The Radar Cross Section of small propellers on Unmanned Aerial Vehicles. 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Davos, 2016, pp.1-4.
12. Brooks D. A., Schwander O., Barbaresco F., Schneider J. and Cord M. Temporal Deep Learning for Drone Micro-Doppler Classification. 19th International Radar Symposium (IRS), Bonn, 2018, pp. 1-10.

References

1. Björklund S. Target Detection and Classification of Small Drones by Boosting on Radar Micro-Doppler. 15th European Radar Conference (EuRAD), Madrid, 2018, pp.182-185.
2. de Quevedo Á. D., Urzaiz F. I., Menoyo J. G. and López A. A. Drone Detection With X-Band Ubiquitous Radar. 19th International Radar Symposium (IRS), Bonn, 2018, pp.1-10.
3. Chadwick A. D. Micro-drone detection using software-defined 3G passive radar. International Conference on Radar Systems (Radar 2017), Belfast, 2017, pp.1-6.