

Буцев Сергей Васильевич, д.т.н., с.н.с. ФГБУ «ЦНИИ ВКС» Минобороны России  
Зебзеев, Антон Александрович к.т.н., майор, начальник НИО ФГБУ «ЦНИИ ВКС»  
Минобороны России.

УДК 621.396.96

## **ПАССИВНЫЕ МЕТОДЫ ОБНАРУЖЕНИЯ БПЛА: ОБЗОР И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ**

И. М. Берестов, М. Д. Лучин

«Самарский национальный исследовательский университет имени  
академика С.П. Королёва», ООО «КВАДРО КОД», г. Самара

Стремительно развиваются беспилотные системы, в частности беспилотные летательные аппараты (БПЛА), задача их обнаружения и локализации становится необходимым компонентом механизмов обеспечения безопасности воздушного пространства. Очевидно, что решение проблемы обнаружения и локализации востребовано не только в сфере гражданского применения. Перспективным направлением решения поставленной задачи являются пассивные радиолокационные системы.

Распределённая сеть пассивных детекторов – возможный инструмент решения задачи локализации, использующий сигнал бортового передатчика. Для локализации при помощи сети пассивных детекторов применяют методы, основанные на мощностных, временных, угловых и доплеровских принципах:

1. Методы, основанные на мощности принятого сигнала (RSSI), такие как алгоритм ближайшего, поиска среднего, взвешенного поиска среднего, круговой и гиперболической латерации [1], обладают низкой вычислительной сложностью, простотой аппаратной реализации, возможностью развёртывания в существующей инфраструктуре, выгодны с экономической точки зрения, однако они зависимы от модели затухания, обладают сравнительно малой точностью [1, 2].

2. Методы, основанные на временных характеристиках (Time Of Arrival/Time Difference Of Arrival) заключаются в анализе времени отправления и прихода сигнала и разнице во времени прихода соответственно. Сложны в реализации, требуют точной синхронизации, дороги, но обладают высокой точностью [2].

3. Методы, основанные на угле прихода сигнала (направлении на источник) требуют системы направленных антенн и заключаются в анализе сигналов, полученных антенными решётками, вычислительно сложными алгоритмами, такими как MUSIC и ESPRIT [3, 4]. Обладают высокой точностью, но накапливают ошибку.

4. Методы, основанные на эффекте Доплера, определяют АОА путем анализа изменения частоты сигнала при вращении антенны или переключении между элементами антенной решетки [5].

Возможность комбинации перечисленных методов открывает возможности по извлечению общих достоинств и компенсации недостатков для достижения требуемых характеристик систем [2], так, например, комбинируют RSSI и АОА методы, снижая вычислительную сложность и повышая точность локализации.

В современных системах пассивной когерентной локации (ПКЛ) в качестве основного источника «подсвета» используются сигналы цифрового телевидения стандарта DVB-T2 [6, 7]. Его использование позволяет эффективно решать задачу обнаружения малоразмерных объектов без использования собственных передающих устройств.

При анализе такого сигнала возникает ряд серьезных физических и технических сложностей:

1. Зависимость от материалов: Пластиковые винты практически не отражают сигнал, в то время как углепластиковые создают четкий радиолокационный отклик [8].

2. Сходство с биообъектами: Из-за малой ЭПР и особенностей движения сигналы от «пластиковых» дронов по своим характеристикам становятся практически идентичны сигналам от птиц [8].

3. Маскировка помехами: Прямой сигнал от телевизионной вышки значительно превосходит по мощности отраженный сигнал от БПЛА, что создает эффект «ослепления» приемника [7].

4. Вычислительная сложность: Корреляционная обработка сигналов для построения карт «дальность-скорость» требует значительных вычислительных ресурсов [6, 7].

Для преодоления описанных проблем в современной пассивной радиолокации уже применяется ряд эффективных методов анализа:

1. Микродоплеровский анализ: Метод основан на изучении сигнала, искаженного вращением винтов. Движение лопастей вызывает колебания эффективной площади рассеяния (ЭПР), что создает в спектре характерные «боковые лепестки» вокруг частоты корпуса объекта. Параметры пиков напрямую зависят от геометрии и скорости вращения винта. Особенности отражения от углепластика позволяют надежно отличать объект от птиц [8].

2. Вычисление взаимной функции неопределенности (ВФН): Для поиска целей система сравнивает опорный сигнал от телевышки с сигналом, отраженным от объекта. В результате строятся карты «дальность – доплеровская частота», формирующие радиолокационный «портрет» БПЛА [6, 8]. Вычислительная сложность метода преодолевается использованием GPU для обработки данных в реальном времени [7].

3. Алгоритмы обработки DVB-T2: Чтобы убрать помехи и мощный прямой сигнал, используются адаптивные фильтры (LMS, NLMS, LSL) [7].

Применяются детекторы, анализирующие саму структуру сигнала DVB-T2: они распознают специфические защитные интервалы и пилот-сигналы, что повышает надежность обнаружения.

Таким образом, наиболее перспективным подходом к решению задачи обнаружения и сопровождения БПЛА является комбинирование методов пассивной локации. Комбинация анализа отраженных сигналов внешних источников подсвета, например, DVB-T2, с распределенной сетью детекторов, обрабатывающих собственное излучение дронов, позволяет объединить достоинства обоих методов: высокую точность когерентной обработки и надежность триангуляции по сигналу бортового передатчика БПЛА.

#### Список использованных источников

- 1.Цымблер М. Л., Миниахметов Р. М., Рогов А. А. Обзор алгоритмов локального позиционирования мобильных устройств. – Вестник ЮУрГУ, 2013.
- 2.Bachevsky S. V., Fokin G. A., Simonov A. N., Sevidov V. V. Positioning of radio emission sources with unmanned aerial vehicles using TDOA-AOA measurement processing. – Journal of Physics, 2019.
- 3.Kim M., Ichige K., Arai H. Implementation of FPGA based fast DOA estimator using unitary MUSIC algorithm. – Proceedings of Vehicular Technology Conference, 2003.
- 4.Tayem N. M., Raza S. A., Omer M. et al. Hardware implementation of a proposed QR-TLS DOA estimation method and music, esprit algorithms on NI-PXI platform. – PIER C, 2013.
- 5.Ahmed N. Radio Direction Finding, Theory and Practices. – University of Engineering and Technology, Lahore, 2016.
- 6.Pölonen K. Signal Processing Methods for Multicarrier Passive Radar and Communication Systems. – Aalto University, 2016.
- 7.Barkhatov A., Vorobev E., Kononov A. Experimental Results of DVB-T2 Passive Coherent Location Radar. – IEEE, 2017.
- 8.Воробьев Е. Н. Распознавание воздушных целей в пассивном когерентном локаторе. – Диссертация канд. техн. наук, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2022.

Берестов Иван Михайлович, студ. гр. 6305-010302D, техник ООО «КВАДРО КОД», [ivantcharkin@yandex.ru](mailto:ivantcharkin@yandex.ru)

Лучин Михаил Дмитриевич, студ. гр. 6305-010302D, техник ООО «КВАДРО КОД», [luchin.md@4code.ru](mailto:luchin.md@4code.ru)

УДК 535.421, 621.391.63, 004.85

### **ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННАЯ НЕЙРОСЕТЬ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ НА ОСНОВЕ 4F-СХЕМЫ С ФИКСИРОВАННОЙ ФАЗОВОЙ МАСКОЙ**

А.С. Шнитко, Р.В. Скиданов

«Самарский национальный исследовательский университет имени  
академика С.П. Королёва», г. Самара