

Полеты во сне и наяву

En Flying in Dreams and in Reality

O. A. Vasiliev,
PhD (Eng.), General Director
rsjet@mail.ru

V. V. Trifonov,
PhD (Eng.), Deputy Director
info@radioservice.ru

Radioservice Co.

There is a software-hardware complex for protecting important objects from unauthorized entry of unmanned aerial vehicles (UAV) that presents in the article. The structure of a radar with a continuous chirp probe signal has been substantiated. The parameters of the optoelectronic system and the test results, in particular, of the thermal imaging system is represented. A powerful jammer of UAV control and video transmission channels is described.

Keywords: unmanned aerial vehicle (UAV), radar, optoelectronic system, video camera, thermal imager, machine vision, Johnson criterion, electronic jamming

В статье представлен программно-аппаратный комплекс защиты важных объектов от несанкционированного проникновения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Обоснована структура радара с непрерывным зондирующим ЛЧМ-сигналом. Приведены параметры опико-электронной системы и результаты испытаний, в частности, тепловизионной системы. Описан мощный подавитель каналов управления и передачи видео БПЛА.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат (БПЛА), радар, опико-электронная система, видеокамера, тепловизор, машинное зрение, критерий Джонсона, радиоэлектронное подавление

Олег Александрович Васильев,
кандидат технических наук,
генеральный директор
rsjet@mail.ru

Владимир Викторович Трифонов,
кандидат технических наук,
заместитель директора
info@radioservice.ru

ООО НПФ «Радиосервис»

Стремительное развитие технологий беспилотной авиации значительно повысило автономность, дальность действия и спектр решаемых беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) задач. Современные БПЛА способны выполнять сложные задачи без непосредственного участия оператора. Грузоподъемность аппаратов позволяет вооружать таковые как малоразмерными боеприпасами, так и разнообразной разведывательной аппаратурой, в связи с чем особенно остро встает вопрос защиты важных объектов от их несанкционированного проникновения за охраняемый периметр. При этом малый размер, высокая маневренность и автономность БПЛА создают необходимость в разработке сложных многоступенчатых автоматизированных комплексов обнаружения, распознавания и подавления их бортовых систем.

Анализ представленных на рынке и в Интернете программно-аппаратных комплексов защиты от несанкционированных БПЛА показывает, что в его состав практически в обязательном порядке входят:

- радар и (или) система радиомониторинга;
- опико-электронная система (ОЭС);
- система радиоэлектронного подавления (РЭП);
- управляющий компьютер или АРМ с ПО для обработки информации и управления комплексом.

Архитектура комплекса может быть различной и включать прочие экзотические опциональные составляющие, в целом, лишь удорожающие его аппаратную часть. Наиболее полная информация по подобным комплексам дана в работе [1].

Напомним, что основными функциями системы являются:

- обнаружение БПЛА;
- распознавание или классификация БПЛА;
- идентификация БПЛА;
- сопровождение (трекинг) БПЛА;
- доступное воздействие на нарушителя.

Основываясь на результатах анализа и проведенных исследованиях, учитывая многолетний опыт разработок в области радиолокации, ра-

диомониторинга и систем РЭП, компания «Радиосервис» осуществляет разработку собственного комплекса «Антидрон-RS». Комплекс может выполнять все приведенные выше функции на базе радара, системы радиомониторинга, ОЭС с возможностью дополнительного подключения к видеоканалу тепловизионного канала, а также прекрасно зарекомендовавшей себя программируемой системы радиоэлектронного подавления RS6000/AD. Представим более подробно каждую составляющую комплекса. Начнем с радара, решающего задачу всепогодного обнаружения БПЛА.

Радар

Анализ показывает, а простая логика подсказывает, что для надежного обнаружения БПЛА на подлете к охраняемому объекту лучше всего использовать радар, располагаемый на некоторой высоте над поверхностью земли, например, на небольшой вышке или на крыше здания для того, чтобы уменьшить фоновые переизлучения от внешних объектов: зданий, деревьев и т. п. (по-научному – от подстилающей поверхности). Такие радары обычно используются в системах охраны территорий, государственных границ, важных объектов и т. д. Эти радары в основном двухкоординатные и определяют направление на цель (азимут) и дальность до цели.

Остановимся пока на рассмотрении, главным образом, коммерческих дронов или, по международной классификации [2], малых БПЛА, которые имеют очень низкую эффективную площадь рассеяния (ЭПР), лежащую в пределах (0,01–0,1 м²). Отметим, что сигнал, отраженный от фона, то есть от окружающих построек, машин, деревьев и т. д., может превышать полезный на 30 дБ и более.

Исходя из этого, приемный тракт радара должен обладать высоким динамическим диапазоном. Как показано в работе [3], для различения столь малых целей требуется радар с использованием сверхкоротких импульсов длительностью менее 10 нс. Альтернативным вариантом является

использование радара с непрерывным зондирующим сигналом. Для сохранения энергетических характеристик и получения высокого разрешения используется расширение спектра зондирующего сигнала, например, с помощью линейной частотной модуляции – ЛЧМ-сигнал. Описанный принцип построения радара используется в современных автомобильных системах парковки, роботах, вертолетных высотомерах при посадке в сложных условиях и, само собой разумеется, в беспилотных летательных аппаратах и транспортных средствах.

Отметим, что радары с ЛЧМ-сигналами хорошо работают на небольших расстояниях – практически от нуля до единиц километров, что вполне подходит для локации малых БПЛА. Диапазон рабочих частот простирается от единиц гигагерц до 100 ГГц и выше. Для решения поставленных задач нами была выбрана архитектура именно ЛЧМ-радара и рассмотрены возможности использования ряда серийно выпускаемых радаров подобного типа, например, MRS-1000 разработки АО НПФ «Микран». Его технические характеристики приведены в табл. 1.

У этого радара довольно громоздкая линейная антенная решетка с радиусом обметания не менее 1 м, зато

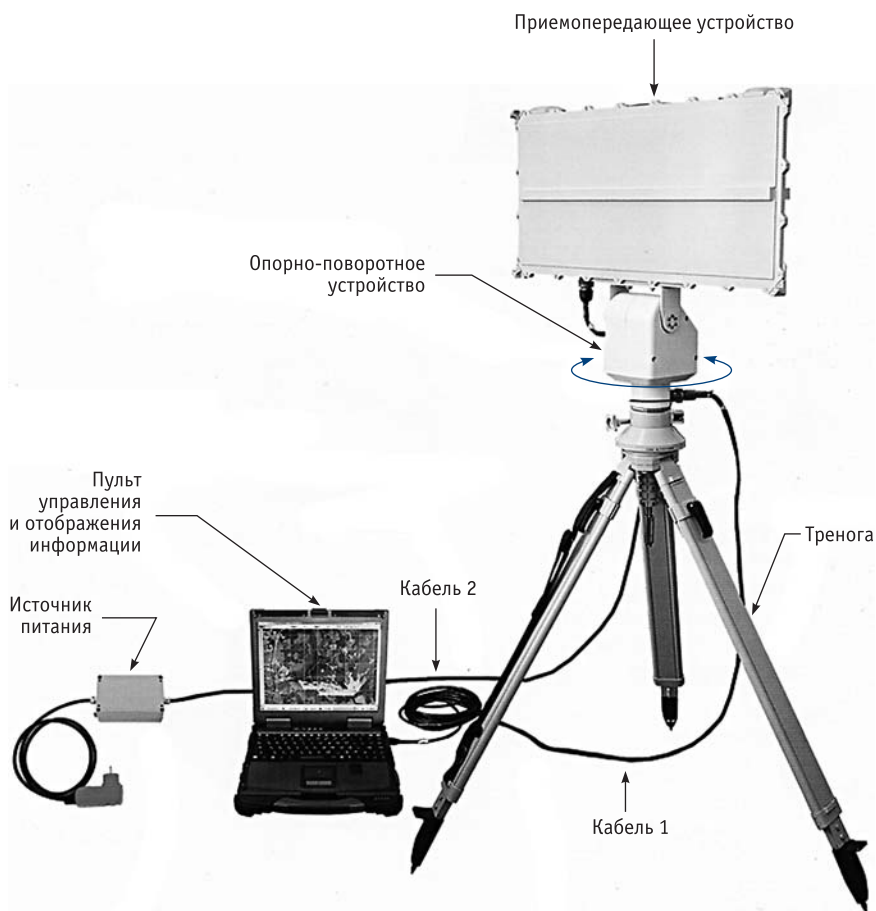
довольно высокая точность в азимутальной плоскости. Для определения угла места требуется дополнительно использовать оптическую систему.

Более высокими характеристиками обладает радар «Сова», представляемый НПО «Стрела» как гражданская продукция, однако и цена его существенно выше. Внешний вид прибора приведен на рис. 1, а основные технические характеристики – в табл. 2.

Изложим вкратце принцип работы радара с зондирующим ЛЧМ-сигналом. Формируемый с помощью технологии прямого синтеза (DDS) сигнал с внутримпульсной линейной частотной модуляцией подается на делитель мощности, где разветвляется на два канала. С выхода одного канала зондирующий ЛЧМ-сигнал излучается передающей антенной в направлении контролируемого пространства в виде узконаправленного по азимутальной координате луча. Отраженный сигнал принимается приемной антенной с параметрами идентичными параметрам передающей антенны. После усиления в приемном тракте входной сигнал подается на смеситель, на опорный вход которого поступает сигнал с выхода второго канала делителя мощности. Выходной сигнал

Таблица 1. Технические характеристики радара MRS-1000

Характеристика	Значение
Скорость кругового обзора пространства, об./мин.	от 12 до 24
Максимальная разрешающая способность по дальности, м, не более	3
Разрешающая способность по направлению, град., не более	1
Рабочая частота, МГц	9400
Длительность импульса, мс, не более	2,85
Период повторения импульсов, мс, не более	3,5
Девияция частоты, МГц, не более	96
Максимальная выходная мощность передатчика, Вт, не более	1
Чувствительность приемника, дБм, не более	минус 132
Поляризация передающей и приемной антенн	горизонтальная
Ширина диаграммы направленности антенного устройства в горизонтальной плоскости, град., не более	1
Ширина диаграммы направленности антенного устройства в вертикальной плоскости, град., не более	30
Интерфейс обмена данными	Ethernet 100Base-T



Источник: <http://bastion-karpenko.ru/index/>

Рис. 1. Внешний вид радара «Сова»

Таблица 2. Технические характеристики радара «Сова»

Характеристика	Значение
Зона обзора:	
• по дальности, км	0,1–20
• по азимуту, град.	360
• по углу места, град.	+/- 18
Сектор обзора по азимуту, град.	24–360
Дальность обнаружения движущихся целей, км:	
• БЛА DJI Phantom 4	4
• человек	8
• грузовой автомобиль	20
Рабочий диапазон, ГГц	13,4–13,6
Время непрерывной работы, ч	24
Класс защиты	IP66
Рабочая температура эксплуатации, °С	от –30 до +50
Масса, кг	30
Масса фазированной антенной решетки вместе с приемо-передатчиком (без опорно-поворотного устройства), кг	8
Точность определения азимута цели, град.	+/- 0,5
Ошибка по дальности цели, м, не более	3

смесителя поступает на устройство цифровой обработки сигнала, где производится его преобразование в цифровую форму, после чего с помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье рассчитывается спектр принятого сигнала. При этом амплитуда каждой из составляющих спектра пропорциональна эффективной площади рассеяния цели, а частота – его дальности. Полученные данные передаются через интерфейс Ethernet на управляющий системой компьютер для дальнейшей обработки и принятия решения.

Оптико-электронная система

Обнаружив радаром движущуюся цель, управляющий компьютер или сервер отображает местоположение цели на карте и осуществляет точное наведение на нее комбинированной ОЭС, видеокамеры и тепловизора, установленных соосно на опорно-поворотном устройстве (рис. 2).

В качестве ОЭС видимого диапазона при этом используется цифровая PTZ (Pan-tilt-zoom) видеокамера с разрешением не ниже Full HD (1920×1080 пикселей) с чувствительностью 0,01 люкс и 30-кратным трансфокатором. В роли тепловизора выступает ОЭС, работающая в ИК-диапазоне 8–14 микрон с неохлаждаемым микроболометрическим приемником излучения, размерностью 640×480 пикселей и чувствительностью 50 миллиКельвинов. Дальность действия ОЭС является результатом комбинации многих факторов, включая размер цели, фокусное расстояние объектива, атмосферные условия и др.

Говоря о разрешении тепловизора и видеокамеры, надо иметь в виду количество пикселей, которые формируют изображение. Здесь, как и в фотографии, чем больше пикселей, тем выше качество. Камера с высоким разрешением позволит различить мелкие детали и объекты, кроме того, у нее шире поле обзора, а значит, вы увидите больше и лучше поймете ситуацию.

Процесс обнаружения, распознавания и идентификации объекта зависит от ряда случайных факторов и является вероятностным, поэтому

необходим критерий, позволяющий с определенной степенью достоверности принимать решение о выполнении этих задач. В качестве такового широко применяется критерий Джонсона [4], названный по имени американского ученого Джона Джонсона, сформулировавшего его в 1957 году. Суть критерия состоит в том, что выделяется несколько уровней восприятия изображения, нижний из которых (соответствующий обнаружению объекта) соответствует какому-либо размытому пятну на фоне помех, а высший уровень – точной идентификации объекта и определению его специфических особенностей. Между ними находится ряд промежуточных уровней восприятия. При этом предполагается, что объект характеризуется некоторым минимальным (критическим) размером, вдоль которого ведется анализ его изображения с целью выявления характерных геометрических признаков объекта. Один из вариантов критерия Джонсона представляет собой зависимость между числом пикселей, которое занимает изображение цели на матричном фотоприемнике ОЭС, и вероятностью решения задач наблюдения. Впоследствии данные, полученные Джонсоном, были откорректированы [5], в результате чего был получен стандарт промышленности для одномерного восприятия изображения объекта:

1) *обнаружение* – чтобы определить факт наличия объекта в поле зрения, минимальное из его измерений должно быть представлено на операторском экране двумя или более пикселями;

2) *распознавание* – распознать объект – значит классифицировать его по типу, то есть оператор или программа должны определить по изображению, что именно попало в кадр, например, облако, птица или БПЛА (считается достаточным, чтобы критический размер объекта составлял 8 и более пикселей);

3) *идентификация* – этот термин нередко используется для определения принадлежности объекта по принципу «свой – чужой», то есть санкционирован или нет, например, полет БПЛА над данной территорией

(чтобы идентифицировать цель, ее критический размер должен быть представлен 16 и более пикселями).

Эти критерии обеспечивают высокую вероятность того, что оператор или программа примут верное решение, исходя из «картинки» на экране.

Для оценки других величин вероятности восприятия вычислены множители для пересчета вероятности восприятия. Так, для идентификации объекта с вероятностью 0,95 необходимо, чтобы на его критическом размере уложилось $16 \times 2 = 32$ пикселя.

Проиллюстрируем вышеприведенные теоретические положения на конкретных примерах.

В ходе разработки комплекса «Антидрон-RS» были проведены полевые испытания ОЭС с видео- и тепловизионными камерами по обнаружению и идентификации низколетящих БПЛА в условиях типичного городского ландшафта при следующих условиях наблюдения:

- температура окружающей среды, $T = 14^\circ\text{C}$;
- относительная влажность, $P = 75\%$;
- метеорологическая дальность видимости (МДВ), $D = 10$ км;
- темное время суток – 1 час после наступления астрономических сумерек;
- климат умеренный.

На рис. 3 (а, б) представлены тепловизионные изображения БПЛА на мониторе при дальности наблюдения $L = 125$ м, фокусном расстоянии объектива тепловизора $f' = 265$ мм и различных сюжетах фоно-целевой обстановки. Размер изображения БПЛА по горизонтали составляет 45 пикселей, и его не сложно идентифицировать как DJI Phantom 4.



а



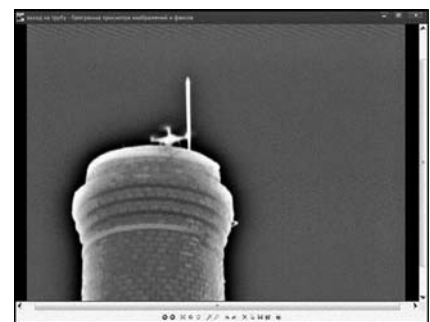
Рис. 2. Внешний вид комбинированной ОЭС

Полевые испытания комбинированной ОЭС в составе комплекса «Антидрон-RS» показали, что дальность обнаружения БПЛА этой системой составляет, в зависимости от размеров летательного аппарата, условий наблюдения и температурного контраста цели, от 500 до 1000 м в видимом диапазоне спектра и до 500 м в инфракрасном.

В общем случае оптико-электронная система может выполнять обнаружение и селекцию как автономно, так и по данным, поступающим после обработки радиолокационной информации, либо по пеленгу от системы радиомониторинга. Конструктивно такая комбинированная ОЭС монтируется на опорно-поворотном устройстве соосно с аппаратурой РЭП.

Радиоэлектронное подавление (РЭП)

В ходе выполнения полета информационные каналы БПЛА доступны для средств радиотехниче-



б

Рис. 3. Тепловизионные изображения БПЛА на экране монитора

ской разведки и уязвимы для средств радиоэлектронного подавления. К таким информационным каналам относятся:

- канал передачи команд с пункта управления на БПЛА;
- канал передачи данных (видео и телеметрии) с БПЛА на пункт управления;
- канал приема БПЛА сигналов спутниковых радионавигационных систем.

При получении информации о приближающемся БПЛА требуется принять соответствующие меры по его идентификации. Если БПЛА представляет угрозу, то есть не идентифицирован как легальный, то защитные действия могут включать методы РЭП. Процесс подавления, реакция БПЛА и выбор частот подавления были описаны нами год назад [6], поэтому основное внимание в данном разделе уделим описанию используемого в комплексе «Антидрон-RS» программируемого подавителя RS6000/AD.

Напомним, если рассматривать только коммерческие БПЛА, то проблем с выбором частот не наблюдается, так как нелегальные диапазоны, в которых работают линии

управления, передачи видео и телеметрии, хорошо известны, также как и частоты GNSS (глобальной навигации). Обычно подавляют диапазоны 2,4–2,483 ГГц и 5,725–5,875 ГГц, широко используемые БПЛА компании DJI (около 60 % мирового рынка), и два-три диапазона глобальной навигации, например, L1, L2 GPS, и L3 GLONASS.

Успех зависит от выбора структуры сигнала подавления, его мощности и, в большой степени, от направленности антенн [6]. Мощность подавителей обычно простирается от единиц до сотен ватт. На сайте компании «Радиосервис» представлены системы РЭП с дистанционно изменяемыми параметрами. Специально для подавления радиолиний управления и передачи видео БПЛА компания модернизировала одно из самых популярных своих изделий – программируемый широкополосный цифровой джаммер RS 6000/AD (рис. 4).

RS 6000/AD способен подавлять до 12 частотных полос шириной до 125 МГц, каждая из которых может быть выбрана в диапазоне частот от 400 до 6000 МГц, с отдельной регулировкой выходной мощности

в каждом канале. Все настройки можно сохранить и в случае необходимости восстановить из файла (последние настройки сохраняются при следующем включении питания). Система содержит переключаемые фильтры для подавления гармоник и других побочных излучений. При создании сигнала используются упомянутые выше технологии прямого синтеза сигналов DDS и мультиплексирования каналов во времени, что позволяет достичь высокой эффективности подавления, значительно уменьшить энергопотребление, а также минимизировать габаритные размеры и массу аппаратуры, свести до минимума вредное воздействие излучения на оператора и находящихся в зоне работы подавителя людей.

Такие технологии позволяют создать компактную систему подавления, использующую всего три широкополосные или направленные антенны. Представленная система содержит три 4-канальных модуля, состоящих из четырех DDS-формирователей, FPGA и коммуникационного контроллера. Каждый модуль имеет собственный IP-адрес, что позволяет контролировать его



Рис. 4. Программируемый подавитель RS 6000/AD

Таблица 3. Технические характеристики программируемого подавителя RS 6000/AD

Характеристика	Значение
Диапазон частот подавления, МГц	400–6000
Число каналов подавления	12
Регулируемая полоса частот канала, МГц	0–120
Выходная мощность в непрерывном режиме, Вт	120
Суммарная эффективная мощность в режиме мультиплексирования, Вт	480
Регулировка выходной мощности, дБ	30
Антенная система	Комбинация широкополосных и направленных антенн
Управление	Ethernet
Температурный диапазон, °С	От –10 до +55
Масса (12 каналов с антеннами), кг	13 ~ 15
Габаритные размеры, см	45×30×20

дистанционно (например, включать и выключать подавление), а также задавать нужные полосы частот и уровни мощности, используя Ethernet или соединения Wi-Fi.

RS 6000/AD используется как интеллектуальный блокиратор, который активируется только в случаях, когда системой обнаружен несанкционированный сигнал или радаром и ОЭС зафиксирован полет БПЛА и проведены операции его распознавания и идентификации. В блокиратор через USB-2.0 либо Ethernet заранее загружаются его установки для каждого канала:

- частота сигнала подавления и ширина спектра этого сигнала, или f_{start} и f_{stop} ;
- скорость изменения частоты или индекс модуляции;
- уровень аттенюации отдельно по каналам (0–30 дБ).

Все величины связаны, даются рекомендации для подавления различного типа сигналов. Установки можно менять в процессе работы джаммера. Основные технические

характеристики RS 6000/AD приведены в табл. 3.

Заключение

Задача интеграции разнородной аппаратуры в единый комплекс всегда вызывает немало трудностей как при написании общего программного обеспечения, так и при конструкторской проработке системы. В нашем случае приходится также решать проблемы размещения в пространстве радара, ОЭС, аппаратуры РЭП с антенной системой на опорно-поворотных устройствах. Все должно быть продумано, чтобы облегчить установку комплекса на территории заказчика. При наличии уже эксплуатируемой на объекте охранной системы необходимо сделать так, чтобы комплекс защиты от БПЛА грамотно дополнял ее основные функции.

К сожалению, пандемия задержала натурные испытания комплекса, но надеемся на их проведение в период «весна – осень» 2021 года. Ну

что ж, «во сне» полетали, пора переходить к полетам наяву!

ЛИТЕРАТУРА

1. Michel A. H. Report: Counter-Drone Systems. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://dronecenter.bard.edu/counter-drone-systems/> (дата обращения: 10.01.2021).
2. Lykou G., Moustakas D., Gritzalis D. Defending Airports from UAS: A Survey on Cyber-Attacks and Counter-Drone Sensing Technologies [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mdpi.com/journal/sensors/> (дата обращения: 10.01.2021).
3. Ананенков А. Е., Марин Д. В., Нурдин В. М., Распоруев В. В., Соколов П. В. К вопросу о наблюдении малоразмерных беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. – 2016. – № 91 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://trudymai.ru/published.php?ID=75662/> (дата обращения: 11.01.2021).
4. Ллойд Дж. Системы тепловидения. – М.: Мир. – 1978. – 414 с.
5. Якушичев Ю. Г., Тарасов В. В. Инфракрасные системы «смотрящего» типа. – М.: Логос. – 2004. – 430 с.
6. Васильев О. А. Тихий дрон // Защита информации. Инсайд. – 2020. – № 1 (91). – С. 26.

СЕЛЕКТИВНЫЙ ИНДИКАТОР ПОЛЯ RAKSA-120



Предназначен для обнаружения и поиска радиопередающих устройств негласного съема информации: радиомикрофонов с аналоговой, цифровой и широкополосной модуляцией, телефонов стандартов GSM 850/900E/1800/1900, UMTS 850/900/1800/1900/2100 (3G), CDMA 450 (A-H)/800/1900, DECT, устройств Bluetooth и Wi-Fi, беспроводных видеокамер, радиомаяков систем слежения и др.

Технические характеристики:

- диапазон измеряемых частот 40 ÷ 3800 МГц;
- время цикла сканирования не более 1,5 с;
- динамический диапазон 50 дБ;
- размеры 77×43×18 мм.

Отличительные особенности:

- обнаружение сигналов на фоне значительных помех;
- прослушивание сигналов через динамик;
- журнал событий тревоги;
- бесшумная индикация тревоги (вибровознок).



ООО «РАКСА»

117186, Москва, ул. Нагорная, д. 22, корп. 3, оф. 53,
тел./факс: +7 (495) 997-04-15,
e-mail: info@raksa.ru, <http://www.raksa.ru>

На правах рекламы