

EDN: FXRPNM

УДК 623.76

On the Issue of Detecting Small and Inconspicuous Unmanned Aerial Vehicles by Surveillance Radars

Vasilii N. Ratushniak*,
Dmitrii D. Dmitriev and Artiom M. Mekaev
Siberian Federal University
Krasnoyarsk, Russian Federation

Received 24.01.2025, received in revised form 04.02.2025, accepted 05.02.2025

Abstract. The article provides an analysis of the use of modern unmanned aerial vehicles(UAV), their characteristics, as well as the features of detecting unmanned aerial vehicles and cruise missiles by surveillance radars, as the most complex air targets from the point of view of radar theory. The acute problematic issues of building a radar detection system as a whole and possible ways to solve them are described. One of the scientific and technical problems in the all-round radar proposed for solution is the development of methods for integrating various UAV detection means in the radar structure, such as acoustic, optical-electronic and radio engineering, operating in different wavelength ranges. Methods for integrating the above-mentioned various UAV detection means in surveillance radars will improve the quality of detection and determination of radar portraits of air objects.

Keywords: surveillance radar, low-element antenna arrays, unmanned aerial vehicle, cruise missile, counteraction to unmanned aerial vehicles, radar efficiency.

Citation: Ratushniak V.N., Dmitriev D.D., Mekaev A.M. On the Issue of Detecting Small and Inconspicuous Unmanned Aerial Vehicles by Surveillance Radars. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2025, 18(2), 258–270. EDN: FXRPNM



К вопросу об обнаружении малоразмерных и малозаметных беспилотных летательных аппаратов обзорными радиолокационными станциями

В. Н. Ратушняк, Д. Д. Дмитриев, А. М. Мекаев
Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, Красноярск

Аннотация. В статье приводится анализ применения современных беспилотных летательных аппаратов, их характеристики, а также особенности обнаружения беспилотных летательных аппаратов и крылатых ракет обзорными радиолокационными станциями как самых сложных воздушных целей с точки зрения теории радиолокации. Описаны острые проблемные вопросы построения системы радиолокационного обнаружения в целом и возможные пути их решения. Одной из научно-технических проблем в РЛС кругового обзора, предлагаемой к решению, является разработка методов комплексирования в структуре РЛС различных средств обнаружения БПЛА, таких как акустические, оптико-электронные и радиотехнические, работающих в различных диапазонах длин волн. Способы комплексирования выше упомянутых различных средств обнаружения БПЛА в составе обзорных РЛС обеспечат повышение показателей качества обнаружения и определения радиолокационных портретов воздушных объектов.

Ключевые слова: обзорная радиолокационная станция, малоэлементные антенные решетки, беспилотный летательный аппарат, крылатая ракета, противодействие беспилотным летательным аппаратам, эффективность применения РЛС.

Цитирование: Ратушняк В. Н. К вопросу об обнаружении малоразмерных и малозаметных беспилотных летательных аппаратов обзорными радиолокационными станциями / В. Н. Ратушняк, Д. Д. Дмитриев, А. М. Мекаев // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2025, 18(2). С. 258–270. EDN: FXRPNM

Введение

Неоспоримой важнейшей особенностью боевых действий в современных конфликтах является массовое применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и крылатых ракет. Будущие военные конфликты невозможно представить без массового, многоэтапного и многоэшелонированного применения групп от легких до тяжелых разведывательных, ударных, транспортных БПЛА, «БПЛА-камикадзе» и др. БПЛА как новый вид вооружения появились достаточно давно, пройдя многолетний путь от БПЛА, созданных на элементной базе старых реактивных истребителей, до новейших специализированных БПЛА нескольких классов – стратегических разведывательных, оперативно-тактических, разведывательно-ударных и тактических разведывательно-ударных. В связи с выводением БПЛА в отдельный класс вооружения, а в некоторых странах беспилотные системы различного класса выведены в ранг как отдельный род войск, огромное значение имеет накопление, систематизация и изучение опыта применения БПЛА в условиях реальных конфликтов, который служит в дальнейшем формированию научно-технических решений по усовершенствованию как средств радиолокации, средств уничтожения и подавления БПЛА, так и самих БПЛА [1–3, 5,6].

Отдельного внимания заслуживают информационно-управляющие системы беспилотных аппаратов, объединяющие системы обнаружения, распознавания и идентификации объектов в различных диапазонах (например, системы технического зрения, радиолокационные и ги-

дроакустические станции), системы автоматического управления, системы поддержки принятия решений, навигации, оценки состояния бортового радиотехнического комплекса, системы диагностики и самодиагностики, контроля состояния бортового радиотехнического комплекса и окружающей среды, оценки внешних угроз и внутренних от аварий на борту, например, объединенные в сеть интеллектуальные датчики облучения, давления, вибрации, пожара, обледенения, средства сбора и передачи телеметрической информации [4].

Анализ публикаций в области противодействия БПЛА показывает, что данный класс воздушных целей успешно может преодолевать многочисленные зоны ответственности ПВО развитых стран, и задача обнаружения и огневого поражения различных классов БПЛА является достаточно комплексной и сложной. Сложность заключается в их малой заметности во многих диапазонах длин волн, малой эффективной отражающей поверхности (ЭПР), малой высоте полета, высокой автономности систем управления, навигации, связи, но вместе с этим БПЛА сочетают в себе высокую грузоподъемность полезной нагрузки со значительно большей дальностью полета, а также способность реализовывать заданный маршрут на протяжении всего полета.

Тактика и стратегия применения БПЛА, исходя из прошедших и настоящих конфликтов, в общем выглядят следующим образом: на первом этапе – разведка противника, на этапе нанесения первого удара – вскрытие и уничтожение средств ПВО, на третьем – уничтожение самолетов и вертолетов пилотируемой авиации на земле и в воздухе, на заключительном – уничтожение бронетехники и живой силы сухопутных войск, объектов тыла и критической государственной инфраструктуры [1–3, 5, 6].

Очевидно, что как развитие беспилотных систем, так и средств защиты от них – это государственная задача! На период до 2030 года и на перспективу до 2035 года разработана «Стратегия развития беспилотной авиации РФ» от 21 июня 2023 г. № 1630-р, в рамках реализации перечня поручений Президента Российской Федерации. Очевидная цель «стратегии» – занять лидерскую нишу в развитии технологий производства различных беспилотных систем военного, специального и гражданского назначения. Пока в мировом масштабе вклад России в развитие беспилотных технологий выглядит довольно скромно. По итогам 2022 года объем российского рынка беспилотных авиационных систем (БАС) и услуг с их применением составил около 50 млрд рублей. Это менее 1 % мирового рынка. В настоящее время ведутся научные исследования и внедряются образцы беспилотных систем и средств защиты от них в нашей стране такими организациями, как Концерн Автоматика, Ростех, АО НПП Алмаз, Росэлектроника, Ростех), ZALA (Концерн Калашников), ООО АнтиДрон, КБ Аэростат, НИИ Вектор, концерн Вега, Росэлектроника, Ростех, ООО НПО Горизонт, ООО Дискавери Инжиниринг, Информационные технологии и решения, ООО Микроэлектроника, СД-Техно (Dedrone GmbH, СТЦ (Специальный технологический центр), ООО ТАИП, ТГУ (ФИТ и АО НИИ ПП), и многие другие.

Интенсивность развития отрасли беспилотной авиации будут определять следующие факторы, характеризующие преимущества беспилотных авиационных систем:

- широкое разнообразие размеров и способов применения беспилотных авиационных систем;
- универсальность и возможность оперативной корректировки назначения применения беспилотных авиационных систем;

- более высокое соотношение максимальной взлетной массы и массы полезной нагрузки, мобильность и маневренность при располагаемых габаритах и массе;
- более высокая временная и экономическая эффективность применения, сопоставимая с крупноразмерными пилотируемыми средствами;
- относительная простота в освоении управления и технологий применения беспилотных авиационных систем для персонала;
- заменимость наземного экипажа, а также способность контроля и управления одним составом летного экипажа полетом нескольких беспилотных авиационных систем;
- отсутствие рисков для жизни членов летного экипажа вне зависимости от времени суток, погодных и экологических условий, включая работу в условиях химических или радиационных заражений [4].

Таким образом, в развитых странах наблюдается взрывной рост и устойчивая тенденция развития рынка беспилотных систем и активного использования беспилотных технологий, в первую очередь военного назначения, а также в различных гражданских сферах. Вследствие этого фактора бурно разрабатываются и внедряются все более эффективные средства обнаружения, мониторинга, поражения и подавления БПЛА с наиболее совершенными универсальными способами обнаружения БПЛА противника в различных условиях, вне зависимости от местности, климата, времени суток и года.

1. Особенности обнаружения беспилотных летательных аппаратов обзорными радиолокационными станциями

Анализ ТТХ БПЛА стран НАТО показывает, что ударные БПЛА большой дальности с точки зрения их обнаружения и поражения средствами ПВО по своим параметрам весьма подобны современным крылатым ракетам (КР). Исключительным отличием БПЛА от КР является диапазон скоростей полета, который у БПЛА составляет 120–270 км/ч, а у КР 700–1100 км/ч. Дальность действия современных ударных БПЛА может достигать 800–2500 км. Современные ударные БПЛА сочетают в себе высокую грузоподъемность со значительно большей дальностью полета, а также способность изменять курс и высоту на протяжении всего полета. Очень высокая дальность применения позволяет производить их запуск, оставаясь далеко за пределами зон ПВО, нанося точные удары по наземным целям.

В большинстве случаев БПЛА решают следующие основные задачи [1–3, 5–7]:

- ведение наблюдения и разведки, в том числе и в реальном масштабе времени;
- нанесение ударов по наземным/надводным целям самостоятельно или носимыми средствами поражения;
- постановка радиоэлектронных помех;
- целеуказание для других средств поражения, а также корректировка их применения;
- транспортировка и доставка грузов и средств в заданный район;
- ретрансляция данных между удаленными абонентами сетей связи;
- отвлечение внимания или использование их в качестве ложных воздушных целей.

БПЛА многоразового применения: по своему предназначению БПЛА подразделяются на разведывательные, разведывательно-ударные, транспортные, БПЛА – носители средств во-

оружия, разделяющиеся БПЛА, БПЛА – перехватчики, БПЛА – ложные цели, барражирующие «БПЛА-камикадзе» (рис. 1).

Группы БПЛА по принципу построения боевого порядка могут быть [10]:

– упорядоченными (строй, стая, рой): боевой порядок строится на основе алгоритма управления группой, который реализуется внутри группы или по командам с наземного/воздушного ПУ;

– неупорядоченными: боевой порядок определяется последовательностью старта БПЛА и индивидуальными алгоритмами функционирования и программой полета каждого аппарата.

Очевидно, что чем выше автономность и неоднородность группы БПЛА, тем более сложные задачи она может выполнять.

Все вышеперечисленные средства радиолокации играют ключевую роль в решении задач в области обеспечения обороны и безопасности государства, в создании единого радио-

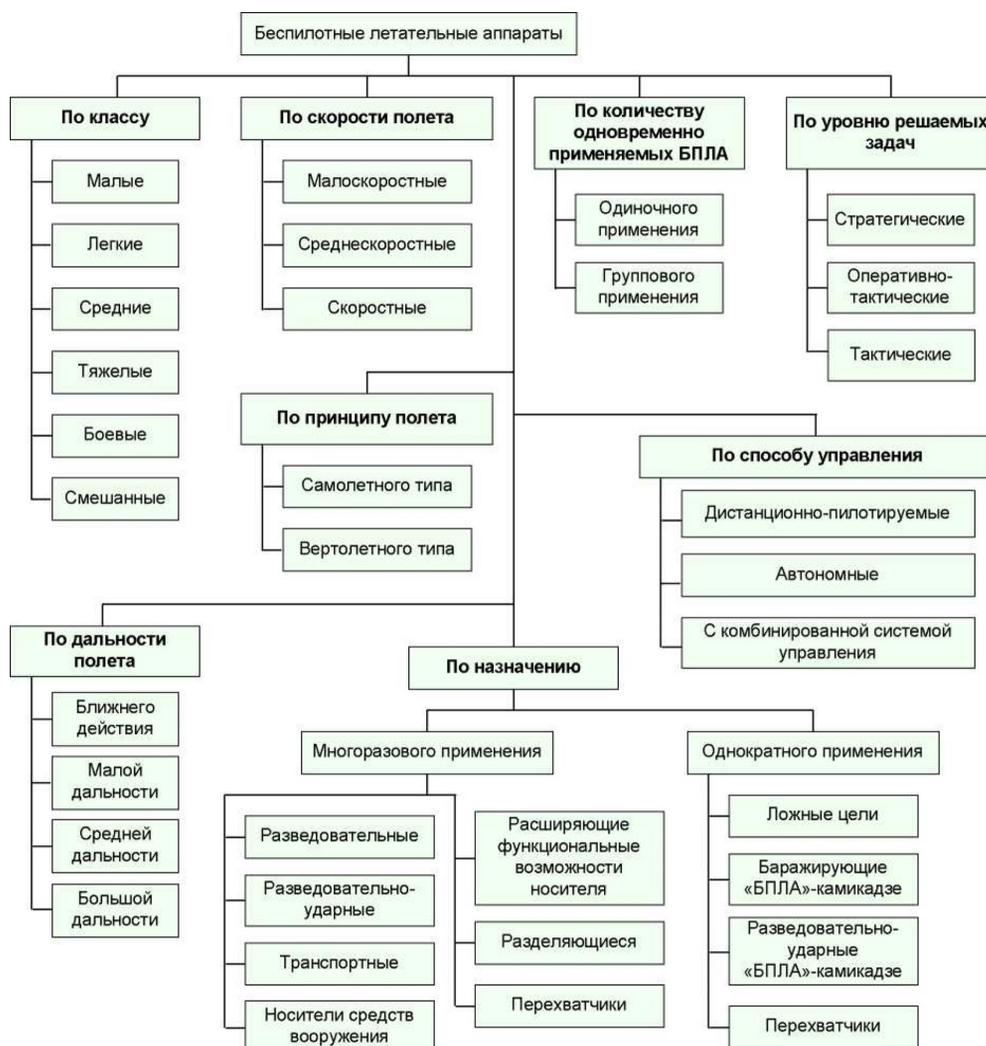


Рис. 1. Классификация БПЛА [1]

Fig. 1. Classification of UAVs [1]

локационного поля страны по обнаружению вражеских воздушных объектов, в том числе и БПЛА. Радиолокационное поле активных средств радиолокации кругового или секторного обзора радиотехнических подразделений является материальной основой, которая обеспечивает решение задач радиолокационной разведки, выдачи разведывательной и боевой информации.

Как радиолокационные объекты БПЛА характеризуются прежде всего значением ЭПР, у малых БПЛА ЭПР составляет порядка 0,05–0,5 м², легких и средних – 0,5–3 м², тяжелых – 3–10 м². Вместе с этим в большинстве случаев проблем с обнаружением у обзорных РЛС средних и тяжелых БПЛА не возникает ввиду достаточной плотности потока мощности отраженного сигнала от них в точке приема, а сами этапы критерийной обработки радиолокационной информации, такие как обнаружение, измерение текущих координат, распознавание, для таких БПЛА стандартные, как и для большинства воздушных объектов.

Основные трудности по радиолокационному контролю возникают с малоразмерными БПЛА, значение ЭПР которых менее 0,1 м². Современные технологии изготовления БПЛА позволяют массово использовать радиопоглощающие и прозрачные для радиоволн материалы (пластиковые, композитные, деревянные), в том числе и по причине их высокой дешевизны. Применение металлических частей в конструкциях минимально, включая и использование в силовых установках электрических двигателей вместо двигателей внутреннего сгорания. Кроме того, еще одним способом повышения скрытности БПЛА является использование специальной геометрической формы и конструкции, выполненной из радиопоглощающих материалов, минимизирующей отражение зондирующего сигнала в точке стояния РЛС.

Еще одним аспектом скрытности БПЛА является высота и траектория полета над водной или земной поверхностью. Как известно из радиолокации, дальность прямой видимости воздушных объектов вычисляется по формуле

$$D_{\text{пр. вид}} = k_{\text{кз}} \left(\sqrt{h_{\text{а}}} + \sqrt{h_{\text{ц}}} \right), \quad (1)$$

где $k_{\text{кз}}$ – коэффициент учитывающий кривизну Земли (3,57 для дм-, см-диапазона волн, 4,12 для метрового с учетом рефракции), $h_{\text{а}}$, $h_{\text{ц}}$ – высота антенны РЛС и цели соответственно.

Основным ограничением фактической дальности действия РЛС относительно маловысотных и малоразмерных БПЛА будет именно дальность прямой радиовидимости, которая зависит от высоты размещения электрического центра антенны над поверхностью Земли. Полет по заданному маршруту БПЛА с возможностью изменять курс и высоту на протяжении всего полета на предельных малых высотах с огибанием рельефа (особенно используя практику полета по руслам рек, ущельям, ложбинам) предельно сокращает их дальность обнаружения обзорными РЛС. Кроме того, в тактике применения малоразмерных ударных БПЛА на начальном и на всем маршруте используется высокая маневренность и заранее продуманная оптимальная траектория полета, учитывая рельеф местности и углы закрытия РЛС. На конечном участке при подлёте БПЛА к цели он делает горку и атакует сверху либо поражает с ходу в самые уязвимые места объекта.

В статье [6] указываются усредненные расчетные дальности для обнаружения малоразмерных БПЛА на малых и предельно малых высотах со стороны РЛС, принятых на вооружение, при различных значениях ЭПР БПЛА и составляют:

– для РЛС МВ диапазона: 8–14 км для БПЛА с ЭПР около 0,1 м²; 0,1–1,5 км для БПЛА с ЭПР около 0,01 м²;

– для РЛС ДЦМВ диапазона: 9–16 км для БПЛА с ЭПР около 0,1 м²; 0,8–2 км для БПЛА с ЭПР около 0,01 м²;

– для РЛС СВМ диапазона: 12–25 км для БПЛА с ЭПР около 0,1 м²; 1,4–2,8 км для БПЛА с ЭПР около 0,01 м² [6].

Более того, традиционные обзорные РЛС не способны обнаруживать БПЛА с ЭПР порядка 0,01 м² и меньше и практически неспособны проводить эффективное обнаружение малоразмерных, маловысотных воздушных объектов даже в беспомеховой обстановке. Фактическая дальность обнаружения, с учетом углов закрытия и рельефом местности в точках стояния РЛС, малоразмерных БПЛА на малых и предельно малых высотах будет составлять еще меньше от усредненных расчетных значений, что ведет к резкому дефициту времени для реагирования по таким воздушным объектам и не всегда позволяет обеспечить участие в управлении огнем группировок ПВО при организации и ведении обстрела малоразмерных БПЛА.

Таким образом, в современных реалиях использование противником малоразмерных БПЛА требует незамедлительных мер по повышению обнаружения и сопровождения РЛС данного класса воздушных объектов. Для повышения эффективности в соответствии с формулой радиолокации (2) РЛС существует возможность вирировать такими параметрами, как средняя и импульсная мощность зондирующего сигнала, его длительность и период повторения (для импульсных РЛС), частота сигнала и использования нескольких поддиапазонов, вид модуляции, размер антенны и форма диаграммы направленности:

$$r_{\text{ц макс}} = 4 \sqrt{\frac{\Delta G_A A_{\text{эфф}} \sigma_{\text{ц}}}{(4\pi)^2 \gamma N_0}} F(\varepsilon, \beta), \quad (2)$$

Учитывая специфику технических и конструктивных особенностей каждой РЛС, не всегда можно найти компромисс между выбором значений технических параметров и технических решений РЛС, чтобы улучшить многие их характеристики, поскольку они обратно взаимосвязаны, и при этом придать уникальные возможности в целом РЛС.

В настоящее время система контроля воздушного пространства России образована из серийно выпускаемых обзорных РЛС:

– радиотехнических войск (РТВ) – РЛС П-18М, 5Н84АПМ «Оборона», ПРВ-13, ПРВ-17 «Линейка», 39Н6 «Каста-2–2», 22Ж6М, 55Ж6 «Небо», 55Ж6Т «Небо-Т», 55Ж6У «Небо-У», 55Ж6М «Небо-М», 1Л119 «Небо-СВУ», 59Н6–1 «Противник-ГЕ», 64Л6 «Гамма-С1», 48Я6-К1 «Подлёт-К1» и др.;

– сухопутных войск – РЛС 1Л13 «Небо-СВ», «Небо-СВУ», «Каста-2–2», «Обзор-3», «Имбирь», «Купол», «Гармонь» и др.;

– гражданской системы управления воздушным движением (УВД) – РЛС «Корень» различных модификаций («Корень-АС», «Корень-С», «Корень-СК»), «Малахит», 69Ж6 «Сопка», 12А6 «Сопка-2» и др.

Существующие в настоящее время обзорные РЛС практически не способны обнаруживать такие ВО по нескольким основным причинам:

- наличие «мертвых» воронок на больших углах места, обусловленных особенностями формирования ДН антенной системой;
- малая скорость полета БПЛА приводит к подавлению отраженных от них сигналов системами селекции движущихся целей (СДЦ);
- вращение антенной системы РЛС обуславливает доплеровскую модуляцию сигналов, отраженных от неподвижных объектов и, как следствие, большое количество ложных целей;
- малые значения ЭПР целей вследствие малых размеров и применения композитных материалов обуславливают низкую вероятность обнаружения полезных сигналов на фоне мощных отражений от местных предметов.

2. Способы технических и организационных мероприятий по улучшению ведения радиолокационной разведки БПЛА обзорными РЛС

К организационным мероприятиям по улучшению ведения радиолокационной разведки БПЛА обзорными РЛС можно отнести:

1. Оптимальное размещение средств радиолокации в едином радиолокационном поле в зависимости от рубежей обороны, периметров охраняемых объектов, с учетом рельефа местности и подстилающей поверхности.
2. Применение РЛС различного назначения и диапазонов волн, работающих в единой системе ПВО.
3. Увеличение количества РЛС, в том числе и маловысотных в радиолокационном поле, для понижения его сплошной нижней границы.

При наличии достаточных средств радиолокации и комплексов средств автоматизации организационные мероприятия по созданию сплошного маловысотного радиолокационного поля не сложно реализовать, в отличие от технических мероприятий, к которым можно отнести:

1. Уменьшение или устранение «мертвой» воронки РЛС.

Радиус «мертвой» воронки зависит от конструктивных возможностей радиолокатора (максимального угла подъема раскрытия антенны в вертикальной плоскости), а также от высоты полета цели (рис. 2). С одной стороны, необходимо выбрать минимальный угол места (ϵ_{\min}) как можно более близким к нулю, с другой – необходимо оторвать ДНА от земли, так как облучение земной поверхности в сантиметровом диапазоне волн приводит к сильной изрезанности зоны обнаружения (ЗО) на малых углах места вследствие интерференции прямого и отраженного от неровной поверхности лучей.

В метровом и нижней части дециметрового диапазона волн ЗО формируется с учетом влияния земли и значение ϵ_{\min} для ровного участка. Максимальный угол места ϵ_{\max} ЗО для исключения «мертвой» воронки желательно было бы выбирать равным 90° или близким к нему. Однако это привело бы к значительному усложнению конструкции антенной системы. В настоящее время считается целесообразным выбор значений ϵ_{\max} порядка $30..45^\circ$. Организационно «мертвые» воронки устраняются из радиолокационного поля путем соседних РЛС, позиции которых находятся на достаточном удалении, при котором зона обнаружения другого радиолокатора перекрывала собой «мертвую» воронку и слепую зону соседнего.

Одним из технических вариантов решения данной проблемы является внедрение в состав РЛС мобильной и малогабаритной, радиолокационной станции вертикального зондирования

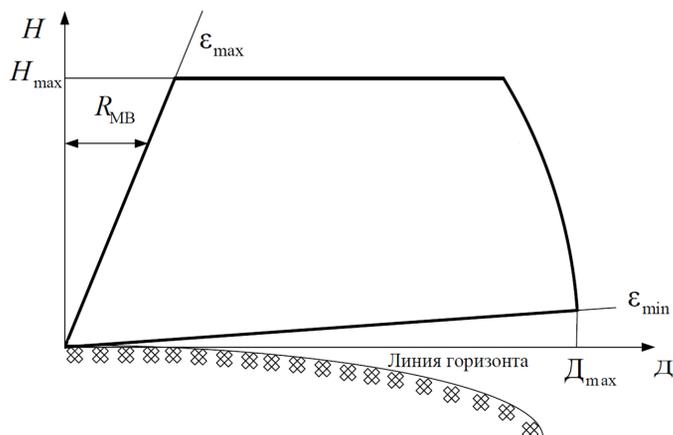


Рис. 2. Сечение зоны обнаружения обзорной РЛС вертикальной плоскостью

Fig. 2. Cross section of the detection zone of the surveillance radar with a vertical plane

(РЛС ВЗ), которая перекрывает слепые зоны «мертвых» воронок основных РЛС (рис. 3) и в со-
 пряжении с ними формирует сплошное радиолокационное поле [8, 9].

Временная задержка отраженного сигнала, угол наклона диаграммы направленности от вертикальной оси и сдвиг по частоте, обусловленный эффектом Доплера, дают точную информацию о наклонной дальности, высоте и скорости перемещения БПЛА. Анализ параметров отраженных сигналов позволяет получать в реальном масштабе времени радиолокационную информацию, а физические принципы, положенные в основу функционирования этих станций, позволяют проводить непрерывные радиолокационные измерения независимо от погодных условий. РЛС ВЗ с малоэлементной антенной решеткой требует решения серьезных проблем, связанных прежде всего с уменьшением энергетического потенциала из-за общего снижения отношения сигнал/шум на входе приемника за счет малой апертуры антенны и небольшой импульсной мощности зондирующего сигнала. Указанное обстоятельство не позволяет применять стандартные алгоритмы подавления отражений от местных предметов и выделения на их фоне полезных сигналов. В подобных условиях наиболее перспективными методами будут адаптивная компенсация мешающих сигналов с использованием череспери-

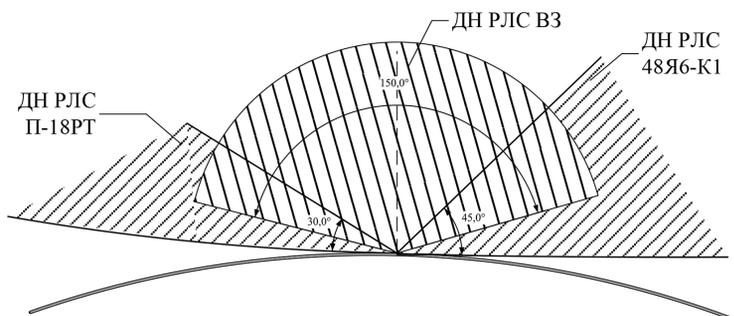


Рис. 3. Радиолокационное поле радиотехнического подразделения с учетом зоны обнаружения РЛС ВЗ

Fig. 3. The radar field of the radio engineering unit, taking into account the detection zone of the VZ radar

одных автокомпенсаторов или с учетом достаточно низкой динамики принимаемых сигналов составление «карты местных предметов». Перспективным подходом в обработке сигналов с низким отношением сигнал/шум в приложении к РЛС ВЗ является применение специальных зондирующих сигналов. Одним из вариантов таких сигналов являются смычки сложных шумоподобных сигналов (коды Баркера, М-последовательности) для компенсации боковых лепестков автокорреляционной функции при их последующей обработке. Измерение угловых координат может производиться тремя способами – электронного сканирования диаграммой направленности; фазовых и суммарно-разностных методов. С учетом минимального числа антенн электронное сканирование малоэффективно по причине очень пологой пеленгационной характеристики, определяемой шириной ДН, поэтому дальнейшему рассмотрению подлежат фазовые и суммарно-разностные методы измерения угловых координат. Данные методы измерения угловых координат БПЛА с использованием неподвижной малоэлементной антенной решетки обеспечивают погрешность измерения азимута и угла места цели с погрешностью менее $1,5^\circ$, при этом позволяют реализовать РЛС ВЗ с высокой мобильностью и малым энергопотреблением.

2. Применение специальных зондирующих сигналов, которые могут помимо стандартных радиолокационных параметров отраженного сигнала давать еще информацию о частоте несущих винтов БПЛА. Это все возможные многочастотные, возбужденные по периоду повторения и длительности импульса, сложные сигналы (ФКМ с различными кодами последовательности, ЛЧМ и НЧМ сигналы). Данные параметры сигналов необходимы для выполнения заданных требований к энергетике сигнала, отношению сигнал/шум в приемных каналах РЛС с учетом соразмерности частоты зондирующих сигналов с линейными размерами БПЛА, разрешающим способностям РЛС по координатам и скорости. В данных условиях наиболее перспективными методами цифровой обработки сигналов будут являться компенсации боковых лепестков автокорреляционной функции при их последующей обработке, адаптивная пространственная и временная компенсация мешающих сигналов с использованием цифровых автокомпенсаторов, составление «карты местных предметов» и компенсации отражений от подстилающей поверхности.

3. Для увеличения дальности прямой радиовидимости маловысотных малоразмерных БПЛА целесообразно увеличивать высоту подъема электрического центра антенны.

Вариантов подъема антенн, приёмо-передающей аппаратуры или в целом РЛС достаточно много, начиная от компактных мачтовых устройств до подъемных вышек, а также в последнее время в научных публикациях все больше рассматриваются для этого привязные и автономные аэростаты с большой грузоподъемностью и сроком подъема спецоборудования РЛС на высоту.

4. Использовать более короткие волны зондирующих сигналов с тем, чтобы сильнее «прижать» к земле первый лепесток диаграммы направленности. Дальность локации средних и тяжелых БПЛА с габаритными линейными размерами может быть увеличена также при существенном увеличении длины волны вследствие неучтенных рефракции и дифракции радиоволн от земной поверхности. По маловысотным воздушным объектам дальность определяется корнем не четвертой, а восьмой степени из произведения энергетических параметров радиолокатора, это связано с более интенсивным убыванием электромагнитного поля вблизи водной и земной поверхности, по сравнению с распространением радиоволн в свободном пространстве.

5. Комплексование в составе РЛС различных радиотехнических средств разведки.

Данный способ позволит существенно повысить эффективность решения задачи обнаружения и распознавания БПЛА в ближней зоне обзора РЛС, за счет сбора информации от радиолокационного канала, оптико-электронных средств обнаружения, мониторинга и пеленгации источников радиоизлучения в широком диапазоне частот от 200 МГц до 6 ГГц, акустической разведки и распознавания типа БПЛА, обработки этой информации в едином программном обеспечении РЛС, что позволит автоматически производить автозахват цели и ее сопровождение по всему маршруту полета БПЛА. Комплексование в РЛС всех этих средств активной, полуактивной и пассивной радиолокации дает широкие возможности задействовать преимущества каждого средства мониторинга пространства в отдельности и компенсировать недостатки в целом при различных условиях ведения радиолокационной разведки. Дополнительные средства разведки и мониторинга предоставляют получение информации исходя из панорамного спектрального анализа сигналов (от акустического до оптического диапазона длин волн!) в течение реального времени. Обработка большого объема получаемой информации о воздушных объектах при комплексовании данных средств осуществляется нейросетевыми алгоритмами в интеллектуальном вычислительном комплексе, который сравнивает из всего массива получаемых данных с имеющейся базой портретов различных классов БПЛА и определяют с высокой точностью не только траекторную информацию, но и идентифицируют принадлежность БПЛА к конкретному классу.

Заключение

Таким образом, в статье рассмотрены основные проблемные вопросы обнаружения, получения траекторной информации, распознавания и идентификации БПЛА с учетом их низкой ЭПР, профиля, скорости и высоты полета на фоне подстилающей поверхности для существующих и новых РЛС кругового обзора. Предложенные различные способы технических и организационных мероприятий по улучшению ведения радиолокационной разведки БПЛА сводятся к такому построению системы ПВО, при котором каждая отдельно взятая обзорная РЛС этой системы ПВО обладала бы активной, полуактивной и пассивной радиолокацией, системой технического зрения за счет использования интеллектуальных вычислительных комплексов, оптимальным подбором ряда технических характеристик, начиная от зондирующих сигналов и заканчивая конструктивным исполнением антенных систем и т.д.

Добавление в состав существующих образцов РЛС, принятых на вооружение, средств радиотехнических средств разведки БПЛА, акустических, оптико-электронных и РЛС ВЗ технически не представляет больших трудностей. Суммарно придаваемые к РЛС комплексы разведки имеют малое энергопотребление, массогабаритные характеристики, быстрое время развертывания и свертывания, что не ухудшает боевые возможности РЛС. Наряду с этим комплексование данных средств разведки и мониторинга предоставляет получение оперативной информации о БПЛА исходя из панорамного спектрального анализа сигналов (от акустического до оптического диапазона длин волн!) в течение реального времени, что повышает живучесть самой РЛС и эффективность всесторонней разведки пространства, особенно при массовом, многоэтапном применении групп от легких до тяжелых разведывательных и ударных БПЛА.

Список литературы / References

- [1] Макаренко С. И., Тимошенко А. В., Васильченко А. С. Анализ средств и способов противодействия беспилотным летательным аппаратам. Часть I. Беспилотный летательный аппарат как объект обнаружения и поражения. *Системы управления, связи и безопасности*, 2020, 1, 109–146 [Makarenko S. I., Timoshenko A. V., Vasilchenko A. S. Analysis of means and methods of countering unmanned aerial vehicles. Part 1. An unmanned aerial vehicle as an object of detection and destruction. *Control, communications and security systems*, 2020, 1, 109–146 (In Rus.)].
- [2] Макаренко С. И., Иванов М. С. *Сетецентрическая война – принципы, технологии, примеры и перспективы*: монография. СПб.: Научно-технические технологии, 2018. 898 с. [Makarenko S. I., Ivanov M. S. *Network-centric warfare – principles, technologies, examples and prospects*. Saint Petersburg, 2018. 898 p. (In Rus.)]
- [3] Еремин Г. В., Гаврилов А. Д., Назарчук И. И. Малоразмерные беспилотники – новая проблема для ПВО. *Отвага* [Электронный ресурс], 2015, 6(14), (дата доступа 16.10.2019) [Eremin G. V., Gavrilov A. D., Nazarchuk I. I. Small-sized drones – a new problem for air defense. *Courage* [Electronic resource], 2015, 6(14)]. URL: <http://otvaga2004.ru/armiyavpk/armiyavpk-vzglyad/malorazmernye-bespiilotniki/>
- [4] *Стратегия развития беспилотной авиации РФ на период до 2030 года и на перспективу до 2035 года* от 21 июня 2023 г. № 1630-р [The strategy for the development of unmanned aircraft of the Russian Federation for the period up to 2030 and for the future up to 2035 dated June 21, 2023, No. 1630-R. (In Rus.)].
- [5] Бугаков И. А., Сорокин А. Д., Хомяков А. В. Показатели эффективности применения группы беспилотных летательных аппаратов при решении задачи воздушной разведки в условиях противодействия противника. *Известия Института инженерной физики*, 2019, 1(51), 65–68 [Bugakov I. A., Sorokin A. D., Khomyakov A. V. Indicators of the effectiveness of the use of a group of unmanned aerial vehicles in solving the problem of aerial reconnaissance in the conditions of enemy counteraction. *Proceedings of the Institute of Engineering Physics*, 2019, 1(51), 65–68 (In Rus.)].
- [6] Карташов В. М., Олейников В. Н., Шейко С. А., Бабкин С. И., Коротцев И. В., Зубков О. В. Особенности обнаружения и распознавания малых беспилотных летательных аппаратов. *Радиотехника*, 2018, 195, 235–243 [Kartashov V. M., Oleinikov V. N., Sheiko S. A., Babkin S. I., Koryttsev I. V., Zubkov O. V. Features of detection and recognition of small unmanned aerial vehicles. *Radio Engineering*, 2018, 195, 235–243 (In Rus.)].
- [7] Афонин И. Е., Макаренко С. И., Михайлов Р. Л. Описательная модель боевых потенциалов сторон в конфликте системы воздушно-космической обороны со средствами воздушно-космического нападения. *Системы управления, связи и безопасности*, 2022, 3, 41–66 [Afonin I. E., Makarenko S. I., Mikhailov R. L. Descriptive model of the combat potentials of the parties to the conflict of the aerospace defense system with means of aerospace attack. *Management, communication and security systems*, 2022, 3, 41–66]. DOI: 10.24412/24109916–2022–3–41–66 (In Rus.)
- [8] Владимиров В. М., Ратушняк В. Н., Вяхирев В. А., Тяпкин И. В. Особенности сканирования атмосферы и построения радиолокационных станций вертикального зондирования с малоэлементной антенной решеткой. *Космические аппараты и технологии*, 2019, 3(4), 237–242 [Vladimirov V. M., Ratushnyak V. N., Vyakhirev V. A., Tyapkin I. V. Features of atmospheric scanning

and the construction of vertical sensing radar stations with a low-element antenna array. *Spacecraft and Technologies*, 2019, 3(4), 237–242 (In Rus.)).

[9] Dmitriev D.D. Ratushniak V.N., Vladimirov V.M., Fateev Y.L. Methods for Radar Atmospheric Sensing Using Radars with Low-Element Antenna Arrays. *Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies, MWENT 2020 – Proceedings* 9067446