

Особенности обнаружения беспилотных воздушных судов с применением посадочного радиолокатора

Е. А. Рубцов^{1✉}, А. В. Федоров¹, Н. В. Поваренкин², Аль-Рубой Мудар³

¹Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации, Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

³Министерство обороны Ирака, Командование ВВС, Багдад, Ирак

✉ rubtsov.spb.guga@rambler.ru

Аннотация

Введение. В последние годы увеличилось количество инцидентов, связанных с беспилотными воздушными судами (БВС), поэтому их обнаружение в аэродромной зоне является важной задачей. Ее можно решить с помощью специализированных средств наблюдения, однако это потребует проведения процедур сертификации, подтверждающих эффективность и безопасность их применения. В связи с этим в ближнесрочной перспективе целесообразно использовать штатные средства. В секторе захода на посадку эту задачу может решить посадочный радиолокатор. Малая эффективная площадь рассеяния (ЭПР) БВС приводит к уменьшению максимальной дальности действия и появлению слепых зон, в пределах которых аппарат не может быть обнаружен.

Цель работы. Анализ возможности обнаружения БВС с помощью посадочного радиолокатора, оценка максимальной дальности обнаружения, слепых зон и разработка рекомендаций по их уменьшению.

Материалы и методы. Использован аналитический метод определения максимальной дальности обнаружения для посадочного радиолокатора с учетом особенностей БВС, а также метод оценки дальности обнаружения низколетящей цели с учетом влияния подстилающей поверхности.

Результаты. На примере посадочного радиолокатора RP-5G определены максимальные дальности обнаружения, которые составили 380, 2730, 4480 и 14 350 м для БВС с ЭПР 0.01, 0.05, 0.1 и 0.5 м². Протяженность слепой зоны RP-5G составила 4620, 2270 и 1019 м для БВС с ЭПР 0.01, 0.05 и 0.1 м². При ЭПР аппарата 0.5 м² и более слепая зона отсутствует.

Заключение. Выражения для расчета максимальной дальности обнаружения и слепых зон, а также полученные результаты помогут в оценке особенностей наблюдения БВС в аэродромной зоне (секторе посадки). Для наблюдения аппаратов с ЭПР более 0.5 м² возможно применение штатных посадочных радиолокаторов. Для БВС с ЭПР 0.1...0.5 м² целесообразно внедрить модернизированные посадочные радиолокаторы с увеличенной энергией зондирующего импульса.

Ключевые слова: безопасность полетов, беспилотное воздушное судно, посадочный радиолокатор, эффективная площадь рассеяния, обнаружение, слепая зона

Для цитирования: Особенности обнаружения беспилотных воздушных судов с применением посадочного радиолокатора / Е. А. Рубцов, А. В. Федоров, Н. В. Поваренкин, Аль-Рубой Мудар // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25, № 3. С. 51–61. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-3-51-61

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 28.03.2022; принята к публикации после рецензирования 16.05.2022; опубликована онлайн 28.06.2022



Features of Unmanned Aircraft Detection Using Precision Approach Radar

Evgeny A. Rubtsov^{1✉}, Andrey V. Fedorov¹, Nikolay V. Povarenkin², Al-Rubaye Mudher³

¹Saint Petersburg State University of Civil Aviation, St Petersburg, Russia

²Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St Petersburg, Russia

³Iraqi ministry of defense, Air force command, Baghdad, Iraq

✉ rubtsov.spb.guga@rambler.ru

Abstract

Introduction. The increasing number of incidents involving unmanned aerial vehicles (UAVs) makes their detection in the aerodrome area an important task, which can be solved by specialized surveillance means. However, the application of such means requires certification procedures confirming the effectiveness and safety of their use. Therefore, in the short term, it seems reasonable to use standard technologies. In the approach sector, this task can be solved by precision approach radar systems. The small radar cross-section (RCS) of UAVs leads to a decrease in the maximum range and the appearance of blind spots, within which the vehicle cannot be detected.

Aim. Analysis of the possibility of detecting UAVs using a precision approach radar, assessing the maximum detection range, blind spots and developing recommendations for their reduction.

Materials and methods. An analytical method was used for determining the maximum detection range for a precision approach radar, taking into account UAV characteristics. A method for estimating the detection range of a low-flying target, taking into account the influence of the underlying surface, was also used.

Results. Using the example of the precision approach radar RP-5G, the maximum detection ranges were determined, which amounted to 380, 2730, 4480 and 14350 m for UAVs with an RCS of 0.01, 0.05, 0.1 and 0.5 m², respectively. The length of the blind spots of the RP-5G was 4620, 2270, 1019 m for UAVs with an RCS of 0.01, 0.05, 0.1 m², respectively. Under the vehicle RCS of 0.5 m² and greater, no blind spots are observed.

Conclusion. Analytical expressions for calculating the maximum detection range and blind spots were obtained. The results can be used when assessing specific features of UAV observation in the aerodrome area (landing sector). Standard precision approach radar systems can be used when surveying UAVs with an RCS greater than 0.5 m². For UAVs with an RCS of 0.1...0.5 m², modernized precision approach radar systems with an increased probing pulse energy should be implemented.

Keywords: flight safety, unmanned aircraft, precision approach radar, radar cross section, detection, blind spot

For citation: Rubtsov E. A., Fedorov A. V., Povarenkin N. V., Al-Rubaye Mudher. Features of Unmanned Aircraft Detection Using Precision Approach Radar. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2022, vol. 25, no. 3, pp. 51–61. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-3-51-61

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 28.03.2022; accepted 16.05.2022; published online 28.06.2022

Введение. С ростом количества беспилотных воздушных судов (БВС) возрастает частота происшествий и инцидентов, среди которых особое место занимает опасное сближение с пилотируемыми воздушными судами и вмешательство в работу аэродромов.

С каждым годом фиксируется рост количества происшествий и потенциально опасных ситуаций в аэродромной зоне, связанных с полетами БВС. Первая подобная потенциально опасная ситуация была зафиксирована в июле 2014 г. в аэропорту Хитроу (Великобритания), когда неопознанное БВС пролетело менее чем в

6 м от заходящего на посадку Airbus A320. В целом, в Великобритании число подобных инцидентов в 2014–2015 гг. составило 35 случаев, а в 2018–2019 гг. уже 290 случаев [1]. В Германии в 2017 г. было зафиксировано 88 потенциально опасных случаев с участием БВС и 158 случаев – в 2018 г. [2]. Особенно опасны столкновения БВС с пилотируемыми воздушными судами. Так, в сентябре 2020 г. произошло столкновение любительского аппарата с вертолетом департамента полиции Лос-Анжелеса, в результате чего вертолет получил значительные повреждения и потребовалась

экстренная посадка. Особую опасность представляет полет БВС в секторе захода воздушных судов на посадку, так как повреждение самолетов, находящихся на малой высоте и имеющих сравнительно небольшую скорость, с большой вероятностью приведет к серьезному инциденту или катастрофе.

Для защиты важных объектов, в том числе аэропортов, производители БВС обеспечивают на программном уровне запрет выполнения полетов в запрещенных зонах, что подразумевает невозможность нарушения воздушного пространства аэропортов законопослушными гражданами [3]. При этом существуют способы снятия этих ограничений внесением изменений в программный код продукта (прошивку).

Таким образом, актуальной становится задача обнаружения БВС-нарушителей, выполняющих полет в аэродромной зоне, особенно в секторе захода воздушных судов на посадку. В настоящее время разработаны и прошли испытания специализированные средства наблюдения для обнаружения БВС, в которых применяются следующие способы обнаружения [4]:

- применение тепловизоров и температурных сканеров инфракрасного диапазона;
- применение оптических камер и сканеров;
- применение специализированных радиолокационных станций;
- осуществление радиомониторинга;
- акустическое обнаружение БВС.

Для обеспечения наблюдения в темное время суток и в сложных метеоусловиях целесообразно применять радиолокационные средства. При этом возможны 2 варианта решения проблемы обнаружения БВС: применение специализированных радиолокационных систем либо применение штатных радиолокационных систем (с возможной их доработкой для обнаружения БВС с требуемыми характеристиками).

В качестве примера специализированного радиолокатора можно привести систему Robin Radar Systems IRIS, способную обнаруживать БВС, с размерами, соответствующими DJI Inspire, DJI Phantom и DJI Mavic Mini на удалениях 4, 3.4 и 0.8 км соответственно. В радиолокаторе применяется непрерывный сигнал с частотной модуляцией X-диапазона

(8900...9650 МГц), мощность передатчика составляет 12 Вт на антенну. Для применения в аэродромной зоне необходимо оценить возможное влияние данной системы на работу средств радиотехнического обеспечения полетов (РТОП) и авиационной электросвязи (АС) [5].

Существуют системы полуактивной радиолокации, включающие в себя антенную систему, устройства приема и обработки сигналов и комплект вычислительных средств. Эти средства как правило используют для обнаружения цели сигналы цифрового эфирного телевидения стандарта DVB-T2 и сигналы FM-радиовещания. В качестве примера можно привести пассивный когерентный локационный комплекс (ПКЛ) производства АО «НИИ "Вектор"» [6].

Дальность действия ПКЛ составляет 7 км при эффективной площади рассеяния (ЭПР) цели 0.01 м² и 21 км при ЭПР 0.5 м², причем отмечено, что эти данные верны для передатчика с эквивалентной излучаемой мощностью 1 кВт и при оптимальных расстояниях между передатчиком и целью. При уменьшении мощности передатчика, а также при увеличении расстояния между целью и передатчиком дальность обнаружения ПКЛ снижается.

Важным плюсом систем пассивной радиолокации является отсутствие в комплекте аппаратуры передатчика. Однако следует отметить необходимость оптимального размещения антенных систем, которые, при несоблюдении требований Методики оценки влияния застройки приаэродромной территории на работу средств РТОП и АС (приказ Росавиации № 748-П), могут привести к ухудшению характеристик средств РТОП и АС в пределах четвертой подзоны приаэродромной территории.

Вторым вариантом решения проблемы обнаружения БВС в аэродромной зоне является применение штатных средств наблюдения, в частности посадочной радиолокационной станции (ПРЛС). ПРЛС обеспечивает наблюдение за воздушным пространством в зоне пересечения наиболее распространенных высот полета любительских БВС с этапами полета воздушных судов (ВС). Посадочные радиолокаторы эксплуатируются в ряде аэропортов по всему миру, поэтому применение ПРЛС снимает необходимость в разработке нового оборудова-

ния и включения его в систему управления воздушным движением [7]. В статье рассматривается возможность применения ПРЛС для обнаружения малоразмерных целей в секторе захода на посадку и анализируются особенности, связанные с обнаружением БВС.

Методы. Для оценки возможности обнаружения БВС при помощи ПРЛС необходимо проанализировать максимальную дальность, на которой радиолокатор способен обнаружить цель с заданными параметрами, т. е. зону действия радиолокатора. Для упрощенной оценки максимальной дальности обнаружения воспользуемся основным уравнением радиолокации [8]:

$$R_{\max} = 4 \sqrt{\frac{G_t A_r \sigma E_t}{(4\pi)^2 \zeta N_0}}, \quad (1)$$

где G_t – коэффициент усиления антенны радиолокатора в направлении максимума диаграммы направленности; A_r – эффективная площадь антенны; σ – ЭПР цели; E_t – энергия зондирующего импульса; ζ – порог обнаруживаемости цели (определяется вероятностями правильного обнаружения и ложной тревоги); N_0 – шумовая составляющая сигнала (в отсутствие активных помех может быть аппроксимирована белым шумом).

Приведенные в (1) параметры находятся исходя из эксплуатационных характеристик либо являются общепринятыми константами. Коэффициент усиления рассчитывается как

$$G_t = \frac{4\pi A_r}{\lambda^2}, \quad (2)$$

где λ – длина волны зондирующего импульса.

Шумовая составляющая сигнала определяется как

$$N_0 = kTF, \quad (3)$$

где $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж · К⁻¹ – постоянная Больцмана; T – шумовая температура приемника (в нормальных условиях может быть принята равной 300 К); F – коэффициент шума.

Энергия зондирующего импульса находится как

$$E_t = P_t \tau,$$

где P_t – импульсная мощность передатчика; τ – длительность зондирующего импульса.

Выражение (1) может применяться для первоначальной оценки максимальной дальности обнаружения БВС. При наблюдении низколетящих целей необходимо учитывать пассивные помехи, вызванные отражением радиоволн от подстилающей поверхности и местных объектов, а также изменения ЭПР цели, вызванные влиянием подстилающей поверхности (ПП) [9].

Для обнаружения цели в этих условиях необходимо обеспечить требуемое отношение мощностей сигналов, отраженных от БВС ($R_{\text{БВС}}$) и от подстилающей поверхности ($R_{\text{ПП}}$). Примем для дальнейших расчетов требуемое отношение равным 20 дБ [10].

Из основного уравнения радиолокации мощность отраженного от БВС сигнала находится как [8]

$$R_{\text{БВС}} = \frac{P_t G_t A_r \sigma_{\text{БВС}}}{(4\pi)^2 R_{\text{БВС}}^4 \zeta N_0},$$

где $\sigma_{\text{БВС}}$ – ЭПР беспилотного воздушного судна; $R_{\text{БВС}}$ – расстояние между ПРЛС и БВС.

Мощность сигнала, отраженного от подстилающей поверхности, находится как

$$R_{\text{ПП}} = \frac{P_t G_{\text{ПП}} A_r \sigma_y S_{\text{ПП}}}{(4\pi)^2 R_{\text{ПП}}^4 \zeta N_0},$$

где $G_{\text{ПП}}$ – коэффициент усиления антенны радиолокатора в направлении облучения подстилающей поверхности; σ_y – удельная ЭПР подстилающей поверхности; $S_{\text{ПП}}$ – площадь участка подстилающей поверхности, отражающая зондирующие сигналы; $R_{\text{ПП}}$ – расстояние между ПРЛС и центром отражающей площадки.

Экспериментальные значения удельной ЭПР земной поверхности, покрытой травой, показывают, что для радиоволны длиной 3 см при углах скольжения $\theta = 10 \dots 30^\circ$ она составляет $-28 \dots -25$ дБ. Характер изменчивости удельной ЭПР, выраженной в децибелах, для различных видов земной поверхности может быть аппроксимирован формулой [11]

$$\sigma_y = -20 + \frac{10 \lg \theta}{25 - 1.5 \lg \lambda}.$$

Площадь участка подстилающей поверхности, отражающая сигнал, может быть представлена в виде эллипса, большая a и малая b полуоси которого находятся как

$$a = \frac{0.5(d + 0.5\lambda) [K(K + 4h_{\text{ПРЛС}}h_{\text{БВС}})]^{0.5}}{K + (h_{\text{ПРЛС}} + h_{\text{БВС}})^2},$$

$$b = \frac{a [K + (h_{\text{ПРЛС}} + h_{\text{БВС}})^2]^{0.5}}{d + 0.5\lambda},$$

где $d = r_1 + r_2$; r_1 – расстояние от антенны ПРЛС до центра отражающей площадки (для низколетящей цели можно принять равным $R_{\text{ПП}}$); r_2 – расстояние от БВС до центра отражающей площадки; $K = l(d + 0.25l)$; $h_{\text{ПРЛС}}$ – высота антенны ПРЛС; $h_{\text{БВС}}$ – высота полета БВС.

Таким образом, отношение мощностей сигналов, отраженных от БВС и от подстилающей поверхности, можно выразить как

$$\frac{P_{\text{БВС}}}{P_{\text{ПП}}} = \frac{G_t \sigma_{\text{БВС}} R_{\text{ПП}}^4}{G_{\text{ПП}} \sigma_y S_{\text{ПП}} R_{\text{БВС}}^4}. \quad (4)$$

Выражение (4) позволит учесть пассивные помехи, вызванные влиянием подстилающей поверхности при наблюдении низколетящей цели.

Результаты. Для проведения расчетов рассмотрим типовые характеристики ПРЛС и БВС. В настоящее время в мире эксплуатируется достаточно большое количество ПРЛС. Наиболее распространенными являются: RP-5G в модификациях RP-5GI и RP-5NG (производства чешских компаний T-CZ и NRTS); GCA-22AL (производства литовской компании Litaktak); PAR-2090 (производства итальянского концерна Leonardo); PAR-E (производства чешской компании ELDIS) [12–16]. Также стоит упомянуть ПРЛС, применяемые на аэродромах государственной авиации: ПРЛ-27СМ (производства НПО "ЛЭМЗ") и PAR-2020 (производства компании L3HARRIS) [17, 18].

Для анализа выберем применяемый в России и за рубежом радиолокатор RP-5G. Длина

волны зондирующего импульса $\lambda = 3.2$ см. Эффективная площадь антенны радиолокатора составляет 0.15 м^2 . Отсюда коэффициент усиления G_t , рассчитанный по (2) равен 2088.8. Для вероятности правильного обнаружения 0.9 и вероятности ложной тревоги 10^{-6} порог обнаруживаемости цели радиолокатора RP-5G $\zeta = 5$. Коэффициент шума F для радиолокатора RP-5G равен 4 дБ, отсюда, исходя из (3), шумовая составляющая сигнала $N_0 = 1.66 \cdot 10^{-20}$ Дж. Импульсная мощность передатчика P_t для радиолокатора RP-5G равна 350 Вт. Передатчик радиолокатора RP-5G может генерировать импульсы длительностью $0.3 \cdot 10^{-6}$ и $30 \cdot 10^{-6}$ с. Первый импульс позволяет обеспечить высокую разрешающую способность при обнаружении ВС на удалении 300...5000 м; второй импульс применяется для обеспечения наблюдения ВС на дальностях 5000...40 000 м.

Важной задачей является оценка дальности обнаружения ВС (в том числе беспилотных) с малыми ЭПР с помощью конкретного посадочного радиолокатора RP-5G. Согласно рекомендациям ИКАО посадочный радиолокатор должен обеспечивать обнаружение ВС, обладающих ЭПР не менее 5 м^2 . Максимальные дальности действия, найденные с применением (1), равны 10 590 и 33 488 м для короткого и длинного импульсов соответственно, что позволяет обеспечить сплошную зону действия без слепых зон. Большой интерес представляет оценка зоны действия ПРЛС при обнаружении БВС. Для решения этой задачи проанализируем типовые ЭПР беспилотных аппаратов.

В последние годы было опубликовано значительное количество научных работ, в которых представлены ЭПР БВС, полученные различными способами [19]. Часть работ посвящена проблемам обнаружения аппаратов средствами противовоздушной обороны (ПВО). В частности, в [20] указано, что типовые ЭПР малых БВС составляют $0.01 \dots 0.5 \text{ м}^2$, при этом дальность обнаружения радиолокационными средствами ПВО составляет:

1) для средств наблюдения дециметрового диапазона:

– 9...16 км для БВС с ЭПР примерно 0.1 м^2 ;
 – 0.8...2 км для БВС с ЭПР примерно 0.01 м^2 ;
 2) для средств наблюдения сантиметрового диапазона:
 – 12...25 км для БВС с ЭПР примерно 0.1 м^2 ;
 – 1.4...2.8 км для БВС с ЭПР примерно 0.01 м^2 .

Также интерес представляют работы, направленные на анализ ЭПР конкретных моделей БВС. В [21, 22] произведен анализ ЭПР беспилотного аппарата "Орлан-10", а также дальности его обнаружения комплексом "Оса-АКМ". Среднее значение ЭПР "Орлан-10", полученное усреднением по всей круговой диаграмме с учетом горизонтальной поляризации и отсутствия воздушного винта, составляет 0.396 м^2 ; медианное значение ЭПР, полученное усреднением по всей круговой диаграмме (для вероятности обнаружения 0.5), при горизонтальной поляризации составляет 0.036 м^2 . Средняя ЭПР воздушного винта составляет около 0.00066 м^2 , однако при определенных углах наблюдения может резко возрасти – до 0.12 м^2 [22].

В [23] произведен достаточно глубокий анализ ЭПР любительских БВС. Были получены трехмерные измерения характеристик ЭПР девяти БВС, а также ЭПР литий-ионных полимерных батарей (Li-Po). Исследования любительских БВС показали, что небольшие аппараты имеют очень низкую ЭПР и трудно обнаруживаются существующими радиолокаторами [24–26]. Также ЭПР небольших БВС и птиц похожи на определенных частотах, что может привести к увеличению ложных обнаружений [27, 28]. В [29] были измерены ЭПР для трех аппаратов: Trimble zx5, DJI Inspire 1 Pro, DJI Phantom 4 Pro. На частоте 15 ГГц среднее ЭПР Trimble zx5, DJI Inspire 1 и DJI Phantom 4 Pro составляет 0.0364, 0.0377 и 0.0314 м^2 соответственно. На частоте 25 ГГц средняя ЭПР

Trimble zx5, DJI Inspire 1 и DJI Phantom 4 Pro составляет 0.1087, 0.0778 и 0.0576 м^2 соответственно. Такие низкие значения ЭПР в первую очередь связаны с конструктивными материалами аппаратов (пластик и углеродное волокно).

Примем для дальнейших расчетов среднюю ЭПР беспилотного воздушного судна в диапазоне $0.01...0.5 \text{ м}^2$. Подставив характеристики радиолокатора RP-5G и значения средних ЭПР беспилотных воздушных судов в (1), получим по 2 значения максимальной дальности обнаружения БВС: для длительности зондирующего импульса $30 \cdot 10^{-6}$ и $0.3 \cdot 10^{-6}$ с. Минимальные дальности действия ПРЛС приняты 300 и 5000 м согласно техническим характеристикам радиолокатора RP-5G. Результаты расчета максимальной дальности и протяженности слепых зон представлены в табл. 1.

Анализ табл. 1 показывает, что БВС будут обнаружены радиолокатором RP-5G на сравнительно небольших удалениях: от 7080 до 18 827 м (для ЭПР $0.01...0.5 \text{ м}^2$). Немаловажным является наличие слепых зон для целей с ЭПР менее 0.5 м^2 . При переключении на короткие импульсы ($\tau = 0.3 \cdot 10^{-6}$ с) зона действия радиолокатора, в пределах которой возможно обнаружение БВС, уменьшится до 2239...3981 м (для аппаратов с ЭПР $0.01...0.1 \text{ м}^2$ соответственно), а протяженность слепой зоны составит 2761...1019 м. В пределах слепой зоны обнаружение БВС не гарантируется и аппарат-нарушитель может быть пропущен. Данный факт осложняется тем, что на эти удаления приходится высоты принятия решений для первой категории посадки, а также для неточного захода на посадку. Имея информацию о наличии и размерах слепых зон бес-

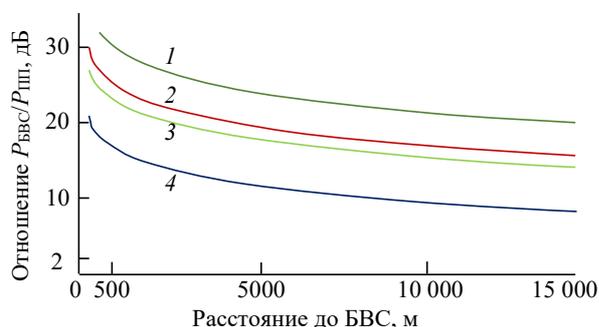
Табл. 1. Результаты расчета максимальной дальности и протяженности слепых зон радиолокатора RP-5G

Tab. 1. Calculation results of the maximum range and blind spots of the RP-5G radar

ЭПР БВС, м^2	Дальность действия при $\tau = 0.3 \cdot 10^{-6}$ с, м		Дальность действия при $\tau = 30 \cdot 10^{-6}$ с, м		Слепые зоны ПРЛС (расстояния, на которых БВС не будет обнаружен), м
	min	max	min	max	
0.01	300	2239	5000	7080	2761 (2239...5000)
0.05	300	3348	5000	10 587	1652 (3348...5000)
0.1	300	3981	5000	12 590	1019 (3981...5000)
0.5	300	5954	5000	18 827	Отсутствует

пилотный аппарат злоумышленника может незаметно выйти на траекторию захода на посадку пилотируемого ВС и спровоцировать опасную ситуацию, которая может закончиться серьезным инцидентом или катастрофой. В связи с этим актуальной является задача разработки рекомендаций по уменьшению слепых зон существующих систем наблюдения и по разработке перспективных систем, не имеющих слепых зон при наблюдении БВС.

Для учета влияния подстилающей поверхности на возможность обнаружения низколетящей цели оценим отношение мощностей сигналов, отраженных от БВС и от подстилающей поверхности $P_{\text{БВС}}/P_{\text{ПП}}$, по (4). При этом примем высоту фазового центра антенны ПРЛС равной 3 м, удаление БВС от радиолокатора – от 300 до 15 000 м. Также примем, что БВС движется по траектории захода на посадку пилотируемых ВС, т. е. с углом глиссады, равным 3° . Графики зависимости отношения $P_{\text{БВС}}/P_{\text{ПП}}$ от расстояния до БВС представлены на рисунке. Дальности действия при учете вли-



Зависимость отношения $P_{\text{БВС}}/P_{\text{ПП}}$ от расстояния до БВС с ЭПР: 1 – 0.5; 2 – 0.1; 3 – 0.05; 4 – 0.01 м²

Dependence of the $P_{\text{UAV}}/P_{\text{surface}}$ ratio on the distance to the UAV with RCS: 1 – 0.5; 2 – 0.1; 3 – 0.05; 4 – 0.01 м²

Табл. 2. Дальность действия радиолокатора RP-5G при требуемом отношении $P_{\text{БВС}}/P_{\text{ПП}}$ и скорректированные слепые зоны

Tab. 2. RP-5G radar range at the specified $P_{\text{UAV}}/P_{\text{surface}}$ ratio and the corrected blind spots

ЭПР БВС, м ²	Дальность действия при отношении $P_{\text{БВС}}/P_{\text{ПП}} = 20$ дБ, м	Скорректированные слепые зоны ПРЛС, м
0.01	380	4620 (380... 5000)
0.05	2730	2270 (2730... 5000)
0.1	4480	Коррекция не требуется

яния подстилающей поверхности (при требуемом отношении $P_{\text{БВС}}/P_{\text{ПП}} = 20$ дБ) для БВС с ЭПР менее 0.1 м² оказываются меньше дальностей, найденных с применением (1), что вызывает необходимость коррекции слепых зон радиолокатора RP-5G (табл. 2). Для беспилотных воздушных судов с ЭПР 0.1 м² и более коррекция слепых зон не требуется и их значения можно брать из табл. 1.

Обсуждение. Расчеты выявили наличие слепых зон при обнаружении БВС с помощью радиолокатора RP-5G. Для БВС с ЭПР менее 0.1 м² существенное влияние на дальность обнаружения оказывает сигнал, отраженный от подстилающей поверхности, что характерно для случая обнаружения низколетящей цели. Наблюдение таких объектов потребует внедрения специализированных средств либо разработки новых посадочных радиолокаторов, учитывающих указанные особенности и способных обнаруживать цели с малыми ЭПР на требуемом удалении. Для БВС с ЭПР 0.1 м² и более уменьшить размер слепых зон без внесения изменений в конструкцию антенн можно повысив энергию зондирующего импульса E_t , для чего требуется увеличить импульсную мощность передатчика P_t и/или увеличить длительность зондирующего импульса τ (при этом стоит рассмотреть возможность применения внутриимпульсной модуляции для повышения разрешающей способности). В дальнейших исследованиях предполагается анализ возможности модернизации существующих ПРЛС и разработка требований к перспективным средствам наблюдения для решения задачи гарантированного обнаружения БВС во всей зоне действия.

Заключение. В настоящее время в России посадочными радиолокаторами оборудованы аэродромы экспериментальной авиации, государственной авиации, а также аэродромы совместного базирования. На аэродромах гражданской авиации ПРЛС, как правило, отсутствует, при этом нарушение со стороны БВС воздушного пространства именно этих аэродромов может привести к наиболее нежелательным последствиям. В связи с этим актуальной явля-

ется рекомендация внедрения посадочных радиолокаторов на аэродромах гражданской авиации, а также расширения функционала ПРЛС для решения задач обнаружения беспилотных аппаратов. В настоящей статье на примере радиолокатора RP-5G было показано, что существующие ПРЛС способны обнаруживать любительские БВС, однако зона действия будет иметь слепые зоны, размеры которых составят 4620 (380...5000), 2270 (2730...5000) и 1019 (3981...5000) м для беспилотных воздушных судов с ЭПР 0.01, 0.05 и 0.1 м² соответственно. Для БВС с ЭПР 0.5 м² слепая зона отсутствует, максимальная дальность обнаружения составляет 14 350 м.

Для обнаружения БВС с ЭПР менее 0.1 м² целесообразно применять специализированные средства, прошедшие необходимые процедуры

сертификации, подтверждающие эффективность и безопасность их применения в аэродромной зоне, а также новые посадочные радиолокаторы, разработанные с учетом необходимости наблюдения малоразмерных низколетящих целей.

Для обнаружения БВС с ЭПР 0.1...0.5 м² целесообразно внедрить на аэродромах гражданской авиации модернизированные ПРЛС с увеличенной энергией зондирующего импульса E_t , что позволит уменьшить размер слепой зоны.

Для обнаружения БВС с ЭПР более 0.5 м² возможно применение штатных ПРЛС, например RP-5G, при этом необходимо учитывать ограничения по максимальной дальности действия (расчетное значение максимальной дальности действия с учетом влияния подстилающей поверхности составило 14 350 м).

Авторский вклад

Рубцов Евгений Андреевич – постановка задачи, анализ ЭПР беспилотных аппаратов, выполнение расчетов.
Федоров Андрей Валерьевич – анализ потенциальных конфликтных ситуаций с БВС, обоснование актуальности исследования.

Поваренкин Николай Владимирович – теоретический анализ.

Аль-Рубой Мудар – анализ характеристик посадочных радиолокаторов, оценка практических результатов.

Author's contribution

Evgeny A. Rubtsov, problem statement, unmanned vehicles radar cross-section analyzing, performing calculations.
Andrey V. Fedorov, analysis of potential conflict situations with unmanned aircraft, substantiation of the relevance of the study.

Nikolay V. Povarenkin, theoretical analysis.

Al-Rubaye Mudher, analysis of precision approach radar characteristics, evaluation of practical results.

Список литературы

1. Drone disruption at airports. URL: <https://www.wtwco.com/en-US/News/2019/08/willistowers-watson-launches-drone-disruption-action-plan> (дата обращения 20.03.2022)
2. Drone sighting temporarily halts air traffic in Frankfurt. URL: <https://www.poandpo.com/news/drone-sighting-temporarily-halts-air-traffic-in-frankfurt-1052019529> (дата обращения 20.03.2022)
3. GEO ZONE MAP. URL: <https://www.dji.com/ru/flysafe/geo-map> (дата обращения 20.03.2022)
4. Кудряков С. А., Книжниченко Н. В., Рубцов Е. А. Вопросы обеспечения безопасного использования беспилотных авиационных систем // Вестн. Санкт-Петерб. гос. ун-та гражданской авиации. 2019. № 1 (22). С. 72–84.
5. Robin Radar Systems IRIS. URL: <https://www.robinradar.com/iris-counter-drone-radar?hsLang=en> (дата обращения 20.03.2022)
6. Полуактивная радиолокация. Пассивный когерентный локационный комплекс. URL: <https://etu.ru/ru/nii-prognoz/napravleniya-issledovaniy/poluaktivnaya-radiolokaciya> (дата обращения 20.03.2022)
7. Рубцов Е. А., Тюников П. Г. Определение эффективной площади рассеяния беспилотных воздушных судов при наблюдении с помощью посадочного радиолокатора // Актуальные проблемы и перспективы развития гражданской авиации: сб. тр. IX Междунар. науч.-практ. конф., Иркутск, Россия, 15–22 окт. 2020. С. 273–279.
8. Belous A. Handbook of Microwave and Radar Engineering. Springer, 2021. 973 p. doi: 10.1007/978-3-030-58699-7
9. Грибков А. С., Грибков В. С., Громов А. Н. Радиолокационные характеристики объектов. Методы исследования / под ред. С. М. Нестерова. М.: Радиотехника, 2015. 311 с.
10. Кхьюнг Н. В. Обоснование возможности применения посадочного радиолокатора для обнаружения метеобразований // Тр. МФТИ. 2021. Т. 13, № 1 (49). С. 71–82. doi: 10.53815/20726759_2021_13_1_71

11. Миллиметровая радиолокация: методы обнаружения негауссовских сигналов / Н. С. Акиншин, Р. П. Быстров, В. Л. Румянцев, А. В. Соколов. М.: Радиотехника, 2010. 528 с.
12. Radar PAR RP-5NG. URL: <https://www.nrtscz.cz/radar-par-rp-5ng/> (дата обращения 20.03.2022)
13. Precision approach radar RP-5GI. URL: <https://www.tcz.cz/radar-systems/precision-approach-radar-rp-5gi/?lang=en> (дата обращения 20.03.2022)
14. GCA-22ML. URL: <https://www.litaktak.com/product/atc-systems/GCA-22ML/> (дата обращения 20.03.2022)
15. PAR 2090C Precision Approach Radar. URL: <https://electronics.leonardo.com/en/products/par2090c> (дата обращения 20.03.2022)
16. PAR-E Precision Approach Radar. URL: <https://www.eldis.cz/en/par-e-fixed> (дата обращения 20.03.2022)
17. Модуль посадочного радиолокатора ПРЛ-27СМ. URL: https://aviationunion.ru/konkurs/docs/2017/7/Nom_7_LEMZ.pdf (дата обращения 20.03.2022)
18. Precision Approach Radar (PAR-2020). URL: <https://www.l3harris.com/sites/default/files/2020-11/l3harris-precision-approach-radar-2020-sell-sheet-sas.pdf> (дата обращения 20.03.2022)
19. Radar Countermeasures for Unmanned Aerial Vehicles / C. Clemente, F. Fioranelli, F. Colone, G. Li. London: The Institution of Engineering and Technology, 2021. 432 p.
20. Макаренко С. И. Противодействие беспилотным летательным аппаратам. СПб.: Научно-техническое издательство «Лань», 2020. 204 с.
21. Сухаревский О. И., Василец В. А., Ряполов И. Е. Оценивание параметров зон обнаружения беспилотного летательного аппарата "Орлан-10" радиолокационными средствами самоходного зенитного ракетного комплекса 9К33МЗ "ОСА-АКМ" // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. 2016. № 4 (25). С. 33–38.
22. Radar scattering characteristics of a UAV model in X-band / O. Sukharevsky, V. Vasylets, V. Orlenko, I. Rypolov // IET Radar, Sonar and Navigation. 2020. Vol. 14, № 4. P. 532–537. doi: 10.1049/iet-rsn.2019.0243
23. Analyzing Radar Cross Section Signatures of Diverse Drone Models at mmWave Frequencies / V. Semkin, J. Haarla, T. Pairon, C. Slezak, S. Rangan, V. Viikari, C. Oestges // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 48958–48969. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2979339
24. Micro-UAV Detection and Classification from RF Fingerprints Using Machine Learning Techniques / M. Ezuma, F. Erden, C. K. Anjinappa, O. Ozdemir, I. Guvenc // IEEE Aerospace Conf. Big Sky. Saint Petersburg and Moscow, Russia, 2–9 March 2019. IEEE, 2019. P. 1–13. doi: 10.1109/AERO.2019.8741970
25. Detection, Tracking and Interdiction for Amateur Drones / I. Guvenc, F. Koohifar, S. Singh, M. L. Sichitiu, D. Matolak // IEEE Communications Magazine. 2018. Vol. 56, № 4. P. 75–81. doi: 10.1109/MCOM.2018.1700455
26. Micro-UAV Detection with a Low-Grazing Angle Millimeter Wave Radar / M. Ezuma, F. Erden, C. K. Anjinappa, W. A. Gulzar, I. Guvenc // IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS), Orlando, FL, 20–23 Jan. 2019. IEEE, 2019. P. 1–4. doi: 10.1109/RWS.2019.8714203
27. Rahman S., Robertson D. A. In-flight RCS measurements of drones and birds at k-band and w-band // IET Radar, Sonar and Navigation. 2018. Vol. 13, № 2. P. 300–309.
28. Interference of radar detection of drones by birds / J. Gong, J. Yan, D. Li, D. Kong // Progress In Electromagnetics Research. 2019. Vol. 81. P. 1–11.
29. Ezuma M., Funderburk M., Guvenc I. Compact-Range RCS Measurements and Modeling of Small Drones at 15 GHz and 25 GHz // Proc. IEEE Radio Wireless Symp. (RWS), San Antonio, TX, 26–29 Jan. 2020. IEEE, 2020. P. 1–4. doi: 10.1109/RWS45077.2020.9050049

Информация об авторах

Рубцов Евгений Андреевич – кандидат технических наук (2015), доцент кафедры "Радиоэлектронные системы" Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. Автор более 100 научных работ. Сфера научных интересов – радиотехническое обеспечение полетов пилотируемых и беспилотных воздушных судов, управление воздушным движением.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации, ул. Пилотов, д. 38, Санкт-Петербург, 196210, Россия
E-mail: rubtsov.spb.guga@rambler.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2126-0015>

Федоров Андрей Валерьевич – кандидат педагогических наук (2004), доцент (2012), и. о. заведующего кафедрой "Радиоэлектронные системы" Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. Автор более 50 научных работ. Сфера научных интересов – цифровая обработка сигналов, радиолокация, управление воздушным движением, безопасность полетов.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации, ул. Пилотов, д. 38, Санкт-Петербург, 196210, Россия
E-mail: fav1309@yandex.ru

Поваренкин Николай Владимирович – кандидат технических наук (2000), доцент (2007), заведующий кафедрой "Радиотехнические системы" Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. Автор более 50 научных работ. Сфера научных интересов – цифровая обработка сигналов; радиолокация; управление воздушным движением.

Особенности обнаружения беспилотных воздушных судов

с применением посадочного радиолокатора

Features of Unmanned Aircraft Detection Using Precision Approach Radar

Адрес: Институт радиотехники, электроники и связи, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, ул. Большая Морская, д. 67 а, Санкт-Петербург, 190000, Россия
E-mail: povarenkin.nv@guar.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8535-5905>

Аль-Рубой Мудар – кандидат технических наук (2016), начальник по обучению Отдела управления воздушным движением Министерства обороны Ирака. Автор более 10 научных работ. Сфера научных интересов – радиоэлектронные средства наблюдения, управление воздушным движением.

Адрес: Министерство обороны Ирака, Командование BBC, Отдел управления воздушным движением, Зеленая зона (Багдад), 10069, Ирак
E-mail: 0394061@mail.ru

References

1. Drone Disruption at Airports. Available at: <https://www.wtwco.com/en-US/News/2019/08/willistowers-watson-launches-drone-disruption-action-plan> (accessed 20.03.2022)
2. Fernsby C. Drone Sighting Temporarily Halts Air Traffic in Frankfurt. Post Online Media. Available at: <https://www.poandpo.com/news/drone-sighting-temporarily-halts-air-traffic-in-frankfurt-1052019529> (accessed 20.03.2022)
3. GEO ZONE MAP. Available at: <https://www.dji.com/ru/flysafe/geo-map> (accessed 20.03.2022)
4. Kudryakov S. A., Knizhnicenko N. V., Rubtsov E. A. Issues of Ensuring the Safe Use of Unmanned Aircraft Systems. Bulletin of the Saint Petersburg State University of Civil Aviation. 2019, no. 1 (22), pp. 72–84. (In Russ.)
5. Robin Radar Systems IRIS. Available at: <https://www.robinradar.com/iris-counter-drone-radar?hsLang=en> (accessed 20.03.2022)
6. Semi-Active Radar. Passive Coherent Location Complex. Available at: <https://etu.ru/ru/nii-prognoz/napravleniya-issledovaniy/poluaktivnaya-radiolokaciya> (accessed 20.03.2022) (In Russ.)
7. Rubtsov E. A., Tunikov P. G. Determination of the Effective Scattering Area of Unmanned Aircraft Using a Precision Approach Radar. Actual problems and prospects of civil aviation development: Proc. of the IX Intern. Scientific and Practical Conf., Irkutsk, 15–22 Okt. 2020, pp. 271–277. (In Russ.)
8. Belous A. Handbook of Microwave and Radar Engineering. Springer, 2021, 973 p. doi: 10.1007/978-3-030-58699-7
9. Gribkov A. S., Gribkov V. S., Gromov A. N. *Radio-lokatsionnye kharakteristiki ob"ektov. Metody issledovaniya* [Radar Characteristics of Objects. Research Methods]. Ed. by S. M. Nesterov. Moscow, *Radiotekhnika*, 2015, 312 p. (In Russ.)
10. Khuong N. V. Justification of the Possibility of Using a Landing Radar to Detect Meteorological Formations. Proc. of MIPT. 2021, vol. 13, no. 1 (49), pp. 71–82. doi: 10.53815/20726759_2021_13_1_71
11. Akinshin N. S., Bystrov R. P., Rumyantsev V. L., Sokolov A. V. *Millimetrovaya radiolokatsiya: metody obnaruzheniya negaussovskikh signalov* [Millimeter Radar: Techniques for Detecting Non-Gaussian Signals]. Moscow, *Radiotekhnika*, 2010, 528 p. (In Russ.)
12. Radar PAR RP-5NG. Available at: <https://www.nrtscz.cz/radar-par-rp-5ng/> (accessed 20.03.2022)
13. Precision approach radar RP-5GI. Available at: <https://www.tcz.cz/radar-systems/precision-approach-radar-rp-5gi/?lang=en> (accessed 20.03.2022)
14. GCA-22ML. Available at: <https://www.litaktak.com/product/atc-systems/GCA-22ML/> (accessed 20.03.2022)
15. PAR 2090C Precision Approach Radar. Available at: <https://electronics.leonardo.com/en/products/par2090c> (accessed 20.03.2022)
16. PAR-E Precision Approach Radar. Available at: <https://www.eldis.cz/en/par-e-fixed> (accessed 20.03.2022)
17. Precision approach radar module PRL-27SM. Available at: https://aviationunion.ru/konkurs/docs/2017/7/Nom_7_LEMZ.pdf (accessed 20.03.2022) (In Russ.)
18. Precision Approach Radar (PAR-2020). Available at: <https://www.l3harris.com/sites/default/files/2020-11/13harris-precision-approach-radar-2020-sell-sheet-sas.pdf> (accessed 20.03.2022)
19. Clemente C., Fioranelli F., Colone F., Li G. *Radar Countermeasures for Unmanned Aerial Vehicles*. London, The Institution of Engineering and Technology, 2021, 432 p.
20. Makarenko S. I. *Protivodeistvie bespilotnym letatel'nyim apparatam* [Countering Unmanned Aerial Vehicles]. Saint Petersburg, *High-tech technologies*, 2020, 204 p. (In Russ.)
21. Sukharevsky O. I., Vasylets V. A., Ryapolov I. E. Evaluation of the Parameters of the Detection Zones of the Orlan-10 Unmanned Aerial Vehicle by Radar Means of the 9K33M3 OSA-AKM Self-Propelled Anti-Aircraft Missile System. Science and Technology of the Air Forces of Ukraine. 2016, no. 4 (25), pp. 33–38. (In Russ.)
22. Sukharevsky O., Vasylets V., Orlenko V., Ryapolov I. Radar Scattering Characteristics of a UAV Model in X-band. IET Radar, Sonar and Navigation. 2020, vol. 14, no. 4, pp. 532–537. doi: 10.1049/iet-rsn.2019.0243
23. Semkin V., Haarla J., Pairen T., Slezak C., Rangan S., Viikari V., Oestges C. Analyzing Radar Cross

Section Signatures of Diverse Drone Models at mmWave Frequencies. IEEE Access. 2020, vol. 8, pp. 48958–48969. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2979339

24. Ezuma M., Erden F., Anjinappa C. K., Ozdemir O., Guvenc I. Micro-UAV Detection and Classification from RF Fingerprints Using Machine Learning Techniques. IEEE Aerospace Conf. Big Sky, MT, USA, 2–9 March 2019, pp. 1–13. doi: 10.1109/AERO.2019.8741970

25. Guvenc I., Koohifar F., Singh S., Sichertiu M. L., Matolak D. Detection, Tracking, and Interdiction for Amateur Drones. IEEE Communications Magazine. 2018, vol. 56, no. 4, pp. 75–81. doi: 10.1109/MCOM.2018.1700455

26. Ezuma M., Erden F., Anjinappa C. K., Gulzar W. A., Guvenc I. Micro-UAV Detection with a Low-

Grazing Angle Millimeter Wave Radar. IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS). Orlando, FL, USA, 20–23 Jan. 2019, pp. 1–4. doi: 10.1109/RWS.2019.8714203

27. Rahman S., Robertson D. A. In-flight RCS Measurements of Drones and Birds at k-band and W-Band. IET Radar, Sonar and Navigation. 2018, vol. 13, no. 2, pp. 300–309.

28. Gong J., Yan J., Li D., Kong D. Interference of Radar Detection of Drones by Birds. Progress in Electromagnetics Research. 2019, vol. 81, pp. 1–11.

29. Ezuma M., Funderburk M., Guvenc I. Compact-Range RCS Measurements and Modeling of Small Drones at 15 GHz and 25 GHz. Proc. IEEE Radio Wireless Symp. (RWS). San Antonio, TX, USA, 26–29 Jan. 2020, pp. 1–4. doi: 10.1109/RWS45077.2020.9050049

Information about the authors

Evgeny A. Rubtsov, Cand. Sci. (Eng.) (2015), Associate Professor of the Department "Radio-Electronic systems" of Saint Petersburg State University of Civil Aviation. The author of more than 100 scientific publications. Area of expertise: communications, Navigation and Surveillance maintenance of manned and unmanned aircraft, air traffic control.

Address: Saint Petersburg State University of Civil Aviation, 38, Pilotov St., St Petersburg 196210, Russia
E-mail: rubtsov.spb.guga@rambler.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2126-0015>

Andrey V. Fedorov, Cand. Sci. (Ped.) (2004), Associate Professor (2012), Serving Chief of Department "Radio-Electronic systems" of Saint Petersburg State University of Civil Aviation. The author of more than 50 scientific publications. Area of expertise: digital signal processing, radiolocation, air traffic control, flight safety.

Address: Saint Petersburg State University of Civil Aviation, 38, Pilotov St., St Petersburg 196210, Russia
E-mail: fav1309@yandex.ru

Nikolay V. Povarenkin, Cand. Sci. (Eng.) (2000), Associate Professor (2007), Chief of Department "Radio-Electronic equipment" of Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation. The author of more than 50 scientific publications. Area of expertise: digital signal processing, radiolocation, air traffic control.

Address: Institute of Radio Engineering, Electronics and Communications, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67a, Bolshaja Morskaja St., St Petersburg 190000, Russia
E-mail: povarenkin.nv@guap.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8535-5905>

Al-Rubaye Mudher, Cand. Sci. (Eng.) (2016), Supervisor in Control Training of Iraqi Ministry of Defense Air control section. The author of more than 10 scientific publications. Area of expertise: radio electronic surveillance aids, air traffic control.

Address: Iraqi ministry of defense, Air force command, Air control section, Green Zone, Baghdad 10069, Iraq.
E-mail: 0394061@mail.ru