

УВЕЛИЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ НА ДОГОННЫХ КУРСАХ В ИМПУЛЬСНО-ДОПЛЕРОВСКИХ БОРТОВЫХ РЛС С МАЛОЙ ВЫСОТОЙ ПОЛЕТА НОСИТЕЛЯ

Бестугин Александр Роальдович,
Институт радиотехники и инфокоммуникационных технологий (ГУАП), г. Санкт-Петербург, Россия,
freshguap@mail.ru

Рыжиков Максим Борисович,
Институт радиотехники и инфокоммуникационных технологий (ГУАП), г. Санкт-Петербург, Россия,
maxrmb@yandex.ru

Новикова Юлиана Александровна,
Институт радиотехники и инфокоммуникационных технологий (ГУАП), г. Санкт-Петербург, Россия,
nov-jliana@yandex.ru

Киршина Ирина Анатольевна,
Институт радиотехники и инфокоммуникационных технологий (ГУАП), г. Санкт-Петербург, Россия,
zлата@yandex.ru

DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-4-11-16

Manuscript received 12 March 2023;
Accepted 14 April 2023

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского Научного Фонда, проект № 22-19-00058

Ключевые слова: методы обнаружения, бортовая радиолокационная станция, фазированная антенная решетка, методика оценки дальности

Постановка проблемы. Эффективность решения задачи предупреждения о возможных столкновениях воздушных судов малой авиации или беспилотных летательных аппаратов, предназначенных для освоения труднодоступных территорий, зависит от времени заблаговременного обнаружения случаев полетов с пересекающимися траекториями. В результате проведенного сравнительного анализа методов радиолокационного обнаружения с учетом различий сигнально-помеховой обстановки, характерной для бортовых импульсно-доплеровских РЛС для целей на догонных курсах, в вариантах исполнения: "Multiple Input - Multiple Output" (MIMO), с совместной апостериорной обработкой результатов (САОРИ) и в традиционной РЛС с активными или пассивными фазированными антенными решетками показано, что последние имеют энергетические преимущества. Поэтому для данной категории импульсно-доплеровских РЛС также предложена методика оценки максимальной дальности обнаружения на нескольких кадрах, позволяющая выбрать логику работы с ее увеличением. **Методы исследования.** В работе активно использовался математический аппарат теории антенных решеток и радиолокационного обнаружения при заданных требованиях к вероятностям правильного обнаружения, ложной тревоги и выбранной модели флуктуаций отражен-

ного полезного сигнала. **Цель.** Обосновать преимущества традиционного технического решения с фазированными антенными решетками для обнаружения на догонных курсах по сравнению с другими методами и выработать рекомендации по поиску условий, которые позволяют повысить дальность обнаружения. **Результаты.** Приведены результаты моделирования, показывающие улучшение условий радиолокационного обнаружения в бортовых РЛС с фазированными антенными решетками при нахождении спектра отраженного сигнала в области доплеровских частот, где расположен и спектр отраженного сигнала от земной поверхности по сравнению с методами пространственной обработки в РЛС MIMO и САОРИ. Разработана методика расчета дальности обнаружения на нескольких смежных кадрах и показано, что в этом случае достигается большая дальность по сравнению со случаем обнаружения на одном кадре. **Практическая значимость.** Результаты работы могут быть использованы в малогабаритных бортовых импульсных РЛС маловысотных носителей с целью увеличения времени заблаговременного предупреждения о наличии на траектории полета других воздушных судов. Эта задача представляется особенно актуальной при полетах носителей РЛС в труднодоступных, осваиваемых территориях.

Информация об авторах:

Бестугин Александр Роальдович, д.т.н., профессор, директор института "Институт радиотехники и инфокоммуникационных технологий", ГУАП, г. Санкт-Петербург, Россия

Рыжиков Максим Борисович, к.т.н., доцент, кафедра "Радиотехнических и оптико-электронных комплексов", ГУАП, г. Санкт-Петербург, Россия

Новикова Юлиана Александровна, к.ф.-м.н., доцент, кафедра "Физики", ГУАП, г. Санкт-Петербург, Россия

Киршина Ирина Анатольевна, к.э.н., доцент, "Кафедра конструирования и технологий электронных и лазерных средств", ГУАП, г. Санкт-Петербург, Россия

Для цитирования:

Бестугин А.Р., Рыжиков М.Б., Новикова Ю.А., Киршина И.А. Увеличение эффективности обнаружения воздушных судов на догонных курсах в импульсно-доплеровских бортовых РЛС с малой высотой полета носителя // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Том 17. №4. С. 11-16.

For citation:

Bestugin A.R., Ryzhikov M.B., Novikova Y.A., Kirshina I.A. (2023) Increasing the effectiveness of aircraft detection on catch-up courses in pulse-Doppler airborne radars with a low carrier flight altitude. *T-Comm*, vol. 17, no.4, pp. 11-16. (in Russian)

Введение. Постановка задачи исследования

С точки зрения различий условий обнаружения радиолокационных воздушных целей (ВЦ) на встречных курсах (в передней полусфере цели – в ППС) и на догонных курсах (в задней полусфере цели – в ЗПС) целесообразно предусмотреть поочередную смену серий кадров с приоритетом обнаружения ВЦ в ППС или в ЗПС, решая таким образом задачу всеракурсного обнаружения. Причиной различий является доплеровское смещение частоты отраженного сигнала от ВЦ на догонных курсах в область частот, которую занимают сигналы, возникающие вследствие переотражений от земной поверхности и приходящие по боковым лепесткам диаграммы направленности антенны или по основному лучу. Данную ситуацию иллюстрирует рисунок 1.

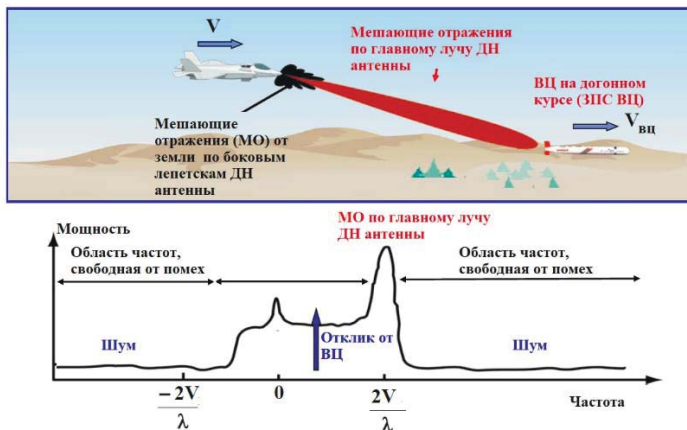


Рис. 1. Обнаружение ВЦ на догонных курсах с наличием отклика цели в той части спектра, которая занята переотражениями от земной поверхности

Достоинство кадров с высокой частотой повторения импульсов (ВЧПИ) – возможность дальнего радиолокационного обнаружения (за относительно малое время можно накопить большое число импульсов), достоинство кадров с со средней частотой повторения импульсов (СЧПИ) – меньший уровень накапливаемой мощности при переотражениях от земли и возможность обнаружения в области частот, в которой лежит спектр мешающих отражений, приходящих по боковым лепесткам диаграммы направленности (ДН) антенны [1].

Если взять за основу методику определения дальности, представленную в [1], то можно увидеть, что при одинаковой длительности импульса для кадров с ВЧПИ, на которых накапливается больше импульсов $N_{ппс}$ и для кадров с СЧПИ – с меньшим числом импульсов $N_{зпс}$ различие между дальностью в ППС $R_{ппс}$ и в ЗПС $R_{зпс}$ определяется через коэффициент влияния переотражений от земной поверхности $\alpha_{мо}$:

$$R_{зпс} = \frac{R_{ппс}}{\sqrt[4]{\alpha_{мо} (h, F_{чпи}, UBL) \frac{N_{ппс}}{N_{зпс}}}},$$

который в свою очередь зависит от высоты полета h , от уровня боковых лепестков (УБЛ) ДН антенны UBL , значения частоты повторения импульсов $F_{чпи}$ для кадров с СЧПИ.

На основании открытых данных для бортовых РЛС X -диапазона длин волн [2]: «Копье-М» ($R_{ппс}=72$ км, $R_{зпс}=32$ км);

РЛС «БАРС» ($R_{ппс}=250$ км, $R_{зпс}=60$ км); РЛС «ЖУК-МСФЭ» ($R_{ппс}=250$ км, $R_{зпс}=60$ км) можно сделать вывод, что диапазон различий в дальностях обнаружения на встречных и догонных курсах составляет от 2,2 до 4. Это говорит о том, что требования к режиму обнаружения ВЦ на догонных курсах устанавливаются с привязкой к определенному диапазону высот полета носителя и с ориентацией на их уровень бокового излучения.

Различия в условиях обнаружения на догонных курсах характерны не только для случая применения антенн с отличающимся уровнем бокового излучения, но и при использовании разных методов обнаружения радиолокационных целей. Целью исследований был сравнительный анализ эффективности методов обнаружения ВЦ на догонных для бортовых РЛС, выполненных с использованием принципов Multiple Input Multiple Output (MIMO) с совместной апостериорной обработкой результатов измерений (САОРИ) по отношению к традиционному техническому решению с применением активных фазированных антенных решеток (АФАР). После получения результатов, подтверждающих эффективность обнаружения на догонных курсах с АФАР, оценивалась возможность улучшения дальности обнаружения при использовании логики поиска ВЦ на нескольких смежных кадрах просмотра зоны обзора.

1. Сравнение методов радиолокационного обнаружения

Теоретическим различиям между методами обнаружения в импульсно-доплеровских РЛС посвящены источники [3,4]. В [5,6] изложены теоретические основы функционирования, особенности формирования зондирующих и алгоритмы обработки приемных сигналов для РЛС MIMO и РЛС с САОРИ, в [6-8] для них более подробно рассматриваются задачи реализации обзора по угловым координатам и требования к антенным решеткам (АР). В работе [9] решена задача оптимизации цифровой ДН на прием.

Учитывая научно-технический задел, представленный в указанных источниках, под решениями для РЛС MIMO и САОРИ будем подразумевать те, в основе которых лежит излучение независимых зондирующих сигналов одним элементом АР. В основе данных методов лежит следующий принцип работы.

Каждая одиночная антенна (или смежная группа излучателей на раскрыве) излучает пространственно-независимые, ортогональные между собой сигналы (например, с частотным разделением). Так РЛС просматривает заданную зону обзора. В этом случае не происходит формирование диаграммы направленности в АР посредством создания соответствующего амплитудно-фазового распределения, отвечающим за ширину луча и определенный УБЛ.

Отдельный элемент АР или малая группа излучателей характеризуются широким диапазоном углов излучения, который должен охватывать все угловые направления в зоне обзора. Максимальный угловой сектор за время излучения пачки зондирующих сигналов соответствует ДН одного излучателя, которая определяется через длину волны, тип излучателя и геометрические размеры. В зарубежных публикациях о РЛС подобного типа, также часто можно встретить их под названием (Radar Impulse Aperture Synthesis, сокращенно RIAS) [3, 8].

При этом на прием реализуется цифровое диаграммообразование для получения отраженных сигналов с каждого из угловых направлений, которые были задействованы на излучение. Энергетические соотношения, которые характеризуют прием сигнала, отраженного от воздушного судна (ВС), осуществляющего полет относительно носителя РЛС на догонных курсах и обнаружение которого производится в частотной области на фоне аддитивной смеси из спектральной плотности мощности шумовой компоненты и соответствующего распределения по спектру мощности для переотражений от земной поверхности, приходящих по боковым лепесткам ДН можно найти в [1]. Рекомендации по выбору параметров зондирующих сигналов представлены в [10, 11].

Решение основного уравнения радиолокации для рассматриваемого случая требует оценки отношения мощности S , которая содержится в полезном (отраженном от ВС импульсе), к сумме мощности внутриприемного шума N и мощности переотражений от земной поверхности R . Представив его в следующем виде:

$$I = \frac{S}{N + R} = \frac{S}{N \left(1 + \frac{R}{N}\right)} \approx \frac{S}{N \alpha_{\text{МО}}}, \quad (1)$$

можно проанализировать, каким образом изменяется I при применении технологии зондирования МИМО в условиях маловысотного полета, когда $R \gg N$. Для этого оценим изменение сигнальной, помеховой и шумовой компоненты.

Во-первых, вместо традиционного (характерного для РЛС с ФАР/АФАР) импульса в РЛС МИМО используется короткий импульс, допустим уменьшенный от импульса традиционной РЛС в M – раз, поэтому (1) при $R \gg N$ трансформируется следующим образом

$$I = \frac{S}{MN + \frac{R}{M}} = \frac{\frac{S}{M}}{N + \frac{R}{M^2}} \approx \frac{\frac{S}{M}}{N \left(\frac{\alpha_{\text{МО}}}{M}\right)} = \frac{S}{N \alpha_{\text{МО}}}. \quad (2)$$

Во-вторых, наблюдается падение мощности помех, которое связано с пропорциональным уменьшением площади, участвующей в формировании соответствующего сигнала переотражений [1], но оно же сопровождается и падением мощности полезного сигнала. Поэтому с точки зрения изменения временных параметров зондирующего сигнала, условия обнаружения не улучшаются по сравнению с применением случая РЛС с ФАР/АФАР.

Излучение на передачу в РЛС МИМО в W^2 раз ниже, где $W = N_{\text{рлс}}/N_{\text{mimo}}$, где N_{mimo} – число излучателей на передачу на секторе поверхности антенны МИМО РЛС, $N_{\text{рлс}}$ – число излучателей на всем раскрыве.

Оно же меньше и в сторону помехи от земли, но тут возникает существенное различие. В традиционной РЛС МИМО на излучение используется один парциальный, близкий к изотропному излучатель. В силу этого излучение в нижнюю полусферу существенно выше, так как в классической АР оно происходит в области боковых лепестков, характеризующихся УБЛ, который ниже коэффициента направленного действия на величину УВЛ [дБ].

Для маловысотного полета при требованиях обнаружения другого ВС на относительно малых дальностях, где необходимо избежать столкновения на догонном курсе, целесообразно рекомендовать достаточно низкий УБЛ. При этом, чтобы достичь аналогичного снижения мощности переотражений от земли в РЛС МИМО путем формирования цифровой диаграммы направленности на прием, УБЛ должен составить уже 2УБЛ , что неизменно приведет к падению усиления в направлении на максимум ДН, то есть ухудшит показатели обнаружения. В [9] анализируются результаты синтеза приемной цифровой ДН РЛС МИМО в случае приема каждым излучателем и при модернизации приема группами излучателей для уменьшения УБЛ и достижения максимальной энергетической эффективности. Результаты сравнения приемных ДН до и после оптимизации, а также исходной ФАР приведены на рисунке 2.

При сохранении ширины основного луча уровень боковых лепестков в классической МИМО антенне выше, что еще более усиливает наличие помех от земли. Максимальный уровень бокового излучения с оптимизированной приемной ДН в РЛС МИМО оказывается примерно на 10 дБ лучше, чем у классической ФАР, при этом если учесть что на излучение у нее УБЛ не менее минус 13,5 дБ, а в ФАР достигается УБЛ порядка минус 23 дБ, то из всей процедуры оптимизации удалось выиграть не более 0,5 дБ по уменьшению помех от земли.

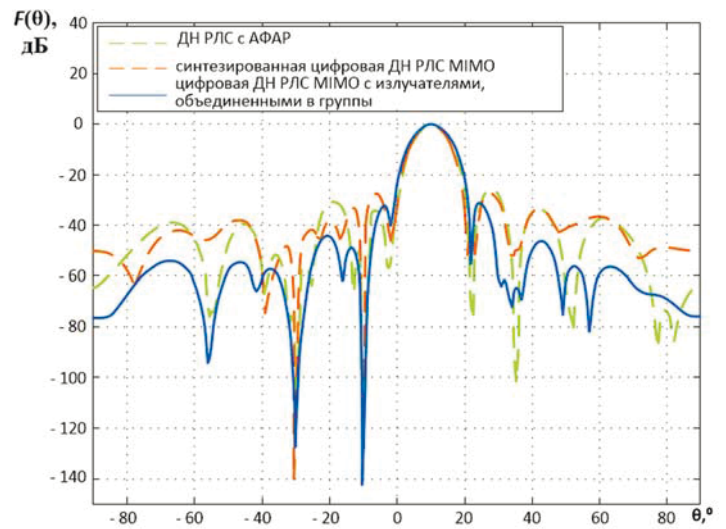


Рис. 2. Сравнение приемных диаграмм направленности РЛС МИМО, с оптимизацией параметров приема путем разбиения на подобласти в сравнении с классическим решением (при одинаковой ширине луча)

Фактически выигрыш по энергетике отсутствует, так как мощность излучаемого сигнала меньше. Поэтому применение РЛС типа МИМО или модифицированных МИМО с приемом сегментами антенного раскрыва при всей сложности реализации и обработки не улучшает условий обнаружения ВС на догонных курсах, но и приводит к уменьшению дальности обнаружения на встречных курсах на кадрах с СЧПИ.

Далее рассмотрим применение РЛС с САОРИ. Многочастотная РЛС САОРИ реализует многоканальное зондирование пространства набором простых узкополосных

сигналов разной частоты. При этом увеличение энергии сигнала для получения соответствующего энергетического потенциала, сравнимого с РЛС с ФАР, достигается путем увеличения длительности импульса для каждого отдельного излучателя.

Теперь, вместо традиционного (характерного для РЛС с ФАР/АФАР) импульса мы имеем длинный импульс, допустим увеличенный в Z раз, а на приемной стороне сохраняется необходимость широкополосного приема, так как также реализуется цифровое синтезирование ДН. Тогда (1) трансформируется к виду

$$I = \frac{SZ}{ZN + RZ} = \frac{S}{N\alpha_{\text{МО}}} \quad (3)$$

Как и в случае приема сигналов в РЛС ММО при реализации цифровой ДН на приемной стороне, уровень боковых лепестков в РЛС САОРИ должен составить 2 UBL [дБ], что также приведет к падению усиления в максимуме ДН на ВЦ и ухудшит показатели ее обнаружения на догонных курсах. При типовом излучении и приеме с уровнем боковых лепестков порядка минус 23 дБ, в цифровой ДН САОРИ нужно реализовать УБЛ в минус 46 дБ.

Возьмем для примера амплитудное распределение на раскрыве антенны с Nz излучателями вида косинус в заданной степени s с пьедесталом h [12]

$$A[j] = h + (h-1) \left[\cos \left(\frac{j - \frac{(Nz-1)}{2} \pi}{\frac{(Nz-1)}{2}} \right) \right]^s,$$

при $h=0,1$ и $s=1$ получаем УБЛ, равный минус 23 дБ, а при оптимизированном амплитудном распределении $s \approx 3, h=0$, характерном для РЛС с САОРИ, достигается УБЛ, равный минус 46 дБ, см рис. 3. При этом основной луч ДН РЛС САОРИ имеет такой же уровень излучения, как ДН ФАР классической ФАР в области ее максимальных боковых лепестков, что говорит об отсутствии снижения уровня максимальной помехи с данных угловых направлений, в то время как КНД в сторону ВЦ уменьшается на 4,4 дБ, что говорит об общем падении соотношения I по сравнению с РЛС с классической ФАР/АФАР.

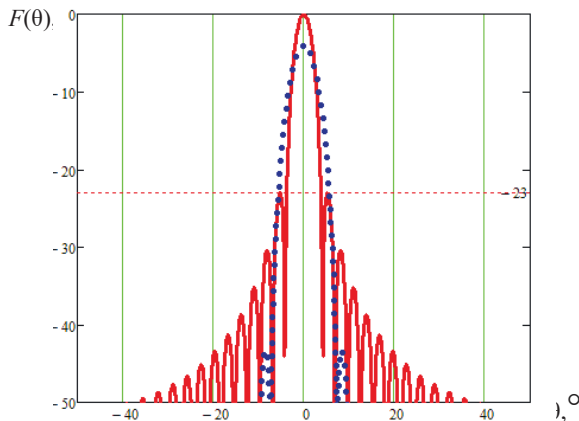


Рис. 3. Сравнение приемных ДН в классической ФАР (сплошная линия) и оптимизированной (точечная кривая) в РЛС САОРИ

Поэтому не рекомендуется использовать технологию РЛС САОРИ и ММО с целью обнаружения на догонных курсах, поскольку они отличаются худшим показателем по отношению мощности полезного сигнала к мощности аддитивной смеси внутриприемного шума и мощности переотражений от земли.

2. Оценка улучшения дальности обнаружения при применении логики поиска цели на нескольких кадрах обзора

Увеличить дальность обнаружения как на встречных, так и на догонных курсах можно за счет применения методов обнаружения, известных как обнаружение на этапе сопровождения (то же, что с накоплением вероятности правильного обнаружения) [1].

Для расчета потенциальной дальности обнаружения в случае поиска ВЦ на смежных кадрах модифицируем универсальную методику расчета, применимую как для кадров с СЧПИ, так и для кадров с ВЧПИ. Оценить мощность полезного отраженного от ВЦ сигнала S , на входе приемника БРЛС в зависимости от дальности до нее R , можно по следующему соотношению [1]:

$$S(R) = \frac{P_{\text{имп}} \lambda^2 G^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4 L_{\text{рлс}}} 10^{-0,1 I_{\text{атм}} R},$$

где $P_{\text{имп}}$ – мощность в импульсе, излучаемом с поверхности антенны; λ – длина волны; G – коэффициент усиления антенны; σ – эффективная площадь рассеяния ВЦ; $L_{\text{рлс}}$ – общие потери в РЛС; $I_{\text{атм}}$ – удельное двухстороннее затухание в атмосфере.

На основании [1] порог для обнаружения в спектральной области может быть вычислен следующим образом:

$$P_{\text{пор}} = P_{\text{ш}} \alpha_{\text{МО}} K_p / N_{\text{бпф}},$$

$P_{\text{ш}}$ – мощность шумов на входе приемника, которая рассчитывается по соотношениям, представленным в [13]; K_p – коэффициент различимости. Величина $\alpha_{\text{МО}}$ рассчитывается по формуле [10]:

$$\alpha_{\text{МО}} = 1 + \frac{\bar{P}_{\text{з.ф.}}}{P_{\text{ш}} / N_{\text{бпф}}},$$

где $N_{\text{бпф}}$ – база быстрого преобразования Фурье (БПФ); $\bar{P}_{\text{з.ф.}}$ – оценка средней мощности помехи от земной поверхности в пределах одного частотного фильтра [10].

Согласно [1], если значение $\alpha_{\text{МО}}$ оценивают при условии нахождения ВЦ на плоскости «дальность – доплеровская частота» вне областей альтиметровых высот, областей сильных мешающих отражений от земной поверхности и переотражений по основному лучу, то оно может быть выбрано из диапазона значений $\alpha_{\text{МО}} \in [3-5]$.

Коэффициент различимости при обнаружении ВЦ пачкой $N_{\text{имп}}$ когерентных импульсов может быть определен в соответствии с [1]:

$$K_p = \frac{q_{\text{ср}}}{N_{\text{имп}}}$$

Среднее значение энергетического отношения сигнал/шум $q_{\text{ср}}$, в одном частотном фильтре и дискрете дальности определяется, исходя из требования обеспечения заданной вероятности правильного обнаружения $P_{\text{по}}$, при определенной вероятности ложной тревоги $P_{\text{лт}}$, для случая приема отраженного сигнала, флуктуирующего по амплитуде со случайной начальной фазой. Для данного случая справедливо соотношение [13]:

$$q_{\text{ср}} = 2 \left(\frac{\ln(P_{\text{лт}})^{-1}}{\ln(P_{\text{по}})^{-1}} - 1 \right).$$

При таком подходе для обеспечения $P_{\text{по}} = 0,7$, $P_{\text{лт}} = 10^{-7}$ требуется отношение сигнал/шум $q_{\text{ср}}$ не менее 90. Для снижения порогового уровня при выполнении требований по заданным значениям $P_{\text{по}}$ и $P_{\text{лт}}$ и требуемой дальности постановки на сопровождение можно использовать принцип накопления вероятности правильного обнаружения и уменьшения вероятности ложной тревоги за счет n – кратного подтверждения наличия цели в n или в m – кадрах повторного обнаружения ВЦ. При таком подходе подтверждение наличия цели производится в ограниченном подтверждающем объеме – интервале угловых направлений $\Delta N_{\text{аз}}$, частотных фильтров $\Delta N_{\text{ф}}$ и дискретов дальности $\Delta N_{\text{д}}$. Из [1,13] получение оценки сниженной величины порога $q_{0\text{ср}}$ можно произвести по формулам:

$$q_{0\text{ср}} = 2 \left(\frac{\ln(F(n))^{-1} + \ln(\Delta N_{\text{аз}} \Delta N_{\text{ф}} \Delta N_{\text{д}})}{\ln(D(n))^{-1}} \right);$$

$$1 - (1 - D(n))^n = P_{\text{по}};$$

$$F(n) = \sqrt[n]{P_{\text{лт}}}.$$

Такой подход позволяет путем выбора критериев подтверждения («2» из «2», «3» из «3») снизить значение величины $q_{\text{ср}}$ до значения $q_{0\text{ср}}$ и получить более высокую оценку максимальной дальности обнаружения (на первом кадре в последовательности).

Снизить требования к вероятностям ложной тревоги и правильного обнаружения в элементе обнаружения можно и посредством n – кратного подтверждения наличия цели в m – кадрах повторного обнаружения ВЦ (n и m – целые числа, б/р, такие что $n \leq m$).

При использовании логики «2» из «3», «3» из «4» и т.п. требуемые вероятности правильного обнаружения $D(n)=P$ и ложной тревоги $F(n)=P^*$ находятся из уравнений:

$$\left(\sum_{k=n}^m C_m^k P^k (1-P)^{m-k} \right) - P_{\text{по}} = 0;$$

$$\left(\sum_{k=n}^m C_m^k (P^*)^k (1-P^*)^{m-k} \right) - P_{\text{лт}} = 0,$$

где C_m^k – число сочетаний. Начальное приближение к оценке дальности обнаружения $R_{\text{макс}}$ находится графическим методом как точка пересечения кривой, характеризующей падение отраженной от ВЦ мощности от дальности, и прямой, соответствующей установленному пороговому уровню.

Итоговую оценку дальности обнаружения на n -ом кадре можно найти по формуле:

$$R_{\text{обн}} = R_{\text{макс}} - n T_n N_{\text{имп}} K_{\text{обр}} V_{\text{сбл}} N_{\text{л}},$$

где T_n – период зондирующих импульсов; $K_{\text{обр}}$ – коэффициент запаса по времени, используемого для выполнения обработки радиолокационной информации, (больше единицы); $V_{\text{сбл}}$ – максимальная скорость сближения с целью; $N_{\text{л}}$ – число лучей в зоне обзора. Например, при подтверждающем объеме порядка $\Delta N_{\text{аз}} \Delta N_{\text{ф}} \Delta N_{\text{д}} \approx 140$ при использовании логики «2» из «2» дальность обнаружения вырастает на 20%.

Заключение

Результаты исследований показывают, что использование в бортовых импульсно-доплеровских РЛС антенн типа ФАР или АФАР в условиях полетов на малых высотах и обнаружении ВС на догонных курсах дает энергетический выигрыш в отношении мощности сигнала к мощности аддитивной смеси переотражений от земли и внутриприемного шума, по сравнению с использованием методов обнаружения САОРИ или ММО. Этот выигрыш может составлять до 5 дБ. Увеличить дальность обнаружения на всех ракурсах при использовании ФАР/АФАР можно за счет выбора логики обнаружения цели в нескольких смежных кадрах.

Литература

1. Дудник П.И., Кондратенков Г.С., Табарский Б.Г. Авиационные радиолокационные комплексы и системы. М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2006. 1112 с.
2. Спасский Н. Энциклопедия «Оружие и технологии России. XXI век». Том 10. «Авиационное вооружение и авионика». М.: Оружие и технологии, 2005. 766 с.
3. Li J., Stoica P. Mimo Radar Signal Processing. New Jersey. John Wiley & Sons, 2009. 445 p.
4. Вовшин Б.М. Сверхширокополосная радиолокация воздушных объектов с безынерционным обзором пространства: дис. д-ра техн. наук. М., 2005. 418 с.
5. Вовшин Б.М., Иммореев И.Я. Влияние дисперсионных свойств ФАР на отношение сигнал/шум в РЛС с широкополосными сигналами // Радиотехника. 1985. № 7. С. 74-92.
6. Чапурский В.В. Избранные задачи теории сверхширокополосных радиолокационных систем. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. 279 с.
7. Скосырев В.Н., Осипов М.Л. Особенности и свойства короткоимпульсной радиолокации // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. 1991. № 4(37). С. 21-30.
8. Dorey J., Blanshard Y, Cristophe F. Le Project RIAS: une approche nouvelle du radar surveillance aerienn // Coloque International Sur le Radar. Paris. April 1984. P. 505-510.
9. Hassanien A., Vorobyov S.A. Transmit/receive beamforming for MIMO radar with colocated antennas // 2009 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 2009, pp. 2089-2092.
10. Ryzhikov M.B., Kovregin V.N., Novikova Y.A. Selection of Pulse Repetition Frequency in Radar for Flight Prediction to Detect Flight Trajectories of Small Aircraft and Unmanned Aerial Vehicles at Low Altitudes // 2022 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems, WECONF 2022 - Conference Proceedings, 2022. 5 p.
11. Рыжиков М.Б. Радиолокационное обнаружение в системах предупреждения о столкновениях воздушных судов на догонных курсах // Успехи современной радиоэлектроники. 2013. № 2. С. 24-28.
12. Хансен П.С. Фазированные антенные решетки. М.: Техносфера. 2012, 558 с.
13. Ширман Я. Д. Теоретические основы радиолокации. М.: Советское радио, 1970, 560 с.

INCREASING THE EFFECTIVENESS OF AIRCRAFT DETECTION ON CATCH-UP COURSES IN PULSE-DOPPLER AIRBORNE RADARS WITH A LOW CARRIER FLIGHT ALTITUDE

Aleksandr R. Bestugin, Institute of Radio Engineering and Infocommunication Technologies (SUAI), St. Petersburg, Russia, freshguap@mail.ru

Maksim B. Ryzhikov, Institute of Radio Engineering and Infocommunication Technologies (SUAI), St. Petersburg, Russia, maxrmb@yandex.ru

Yuliana A. Novikova, Institute of Radio Engineering and Infocommunication Technologies (SUAI), St. Petersburg, Russia, Nov-Jliana@yandex.ru

Irina A. Kirshina, Institute of Radio Engineering and Infocommunication Technologies (SUAI), St. Petersburg, Russia, zlata@yandex.ru

This work was supported by the Russian Science Foundation under grant no № 22-19-00058

Abstract

Problem statement. The effectiveness of solving the problem of warning about possible collisions of small aircraft or unmanned aerial vehicles intended for the development of hard-to-reach territories depends on the time of early detection of another aircraft on intersecting trajectories. As a result of the comparative analysis of radar detection methods carried out in the article, taking into account the differences in the signal-interference situation characteristic of on-board pulse-Doppler radars for targets on catch-up courses in versions "multiple input - multiple output", "with joint a posteriori processing of results" and in traditional radar with active or passive phased antenna arrays have shown that the latter have energy advantages. Therefore, for this category of pulse-Doppler radars, a method for estimating the detection range on several frames is presented, which allows you to choose the logic of operation with an increase in the detection range. **Research methods.** The theory of antenna arrays and the theory of radar detection for pulse-Doppler radars were actively used in the work with the specified requirements for the probabilities of correct detection, false alarm and the selected model of fluctuations of the reflected useful signal. **Purpose.** To substantiate the advantages of technical solutions based on a traditional technical solution with phased antenna arrays for detection on catch-up courses and to develop recommendations for finding conditions that allow to increase the detection range. **Results.** The simulation results are presented, showing an improvement in the conditions for radar detection in onboard pulse-Doppler radars when finding the spectrum of the reflected radar signal in the Doppler frequency range, on which the spectrum of the reflected signal from the Earth's surface is superimposed when using radar with phased antenna arrays compared with spatial processing methods in MIMO and radars with joint a posteriori processing of results. A method for calculating the detection range on several adjacent frames has been developed and it is shown that in this case a longer range is achieved compared to the case of detection on a single frame. **Practical significance.** The results of the work can be used in small-sized onboard pulse radars of low-altitude carriers in order to increase the time of early warning of the presence of other aircraft on the flight path. This task seems to be especially relevant when flying radar carriers in hard-to-reach, developed territories.

Keywords: Detection methods, airborne radar, phased array antenna, range estimation technique

References

1. P.I. Dudnik, G.S. Kondratenkov, B.G. Tatarsky (2006). Aviation radar complexes and systems. VVIA named after Prof. N.E. Zhukovsky, Moscow, Russia.
2. N. Spassky. (2005), Encyclopedia "Weapons and technologies of Russia. XXI century". Vol. 10. *Aviation armament and avionics, Weapons and Technologies*, Moscow, Russia.
3. J. Li, P. Stoica (2009), MIMO Radar Signal Processing, John Wiley & Sons, New Jersey, USA.
4. B.M. Vovshin (2005), Sverkhshirokopolosnaya radiolokatsiya vozdushnykh obyektov s bezynertsionnym obzorom prostranstva dis. d-ra tekhn. nauk [Ultra-wideband radar of aerial objects with an inertialess survey of space] Moscow, Russia.
5. B.M. Vovshin, I.Ya. Immoreyev (1985), Influence of dispersion properties of headlamps on the signal-to-noise ratio in radar with broadband signals, *Radiotekhnika*. No. 7, pp. 74-92.
6. V.V. Chapurskiy (2012), Selected problems of the theory of ultra-wideband radar systems. MGTU im. N.E. Baumana, Moscow, Russia.
7. V.N. Skosyrev, M.L. Osipov (1991), Features and properties of short-pulse radar, *Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University*, No.4. Vol. 37, pp. 21-30.
8. J. Dorey, Y. Blanshard, F. Cristophe (1984), Le Project RIAS: une approche nouvelle du radar sursurveillance aerienne, *Coloque International Sur le Radar*, pp. 505-510.
9. A. Hassanien, S.A. Vorobyov (2009), Transmit/receive beamforming for MIMO radar with colocated antennas. *2009 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, pp. 2089-2092.
10. M.B. Ryzhikov, V.N. Kovregin, Y.A. Novikova (2022), Selection of Pulse Repetition Frequency in Radar for Flight Prediction to Detect Flight Trajectories of Small Aircraft and Unmanned Aerial Vehicles at Low Altitudes. *2022 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems*, 5 p.
11. M.B. Ryzhikov (2013), Radar detection in aircraft collision warning systems on catch-up courses. *Successes of modern radio electronics*. No. 2, pp. 24-28.
12. R.S. Hansen, (2012), Phased antenna arrays, Moscow: Tekhnosfera.
13. Ya.D. Shirman (1970), Theoretical foundations of radar, Moscow: Soviet Radio.

Information about authors:

Aleksandr R. Bestugin, Dr. Sc. (Tech.), Professor, Director of the Institute of "Institute of Radio Engineering and Infocommunication Technologies", SUAI, St. Petersburg, Russia

Maksim B. Ryzhikov, Ph.D. (Tech.), Associate Professor, Department "Radio-engineering and Fiber-optic Complexes", SUAI, St. Petersburg, Russia

Yuliana A. Novikova, Ph.D. (Phys.-Math.), Associate Professor, Department "Physics", SUAI, St. Petersburg, Russia

Irina A. Kirshina, Ph.D. (Econ), Associate Professor, Department "Department of Design and Technologies of Electronic and Laser Devices", SUAI, St. Petersburg, Russia