

ДИНАМИКА, БАЛЛИСТИКА, УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

УДК 621.396.969.34+531.14

DOI: 10.34759/vst-2019-4-191-199

СКРЫТНОЕ ДВИЖЕНИЕ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ В ЗОНЕ ОБНАРУЖЕНИЯ БОРТОВОЙ ДОПЛЕРОВСКОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ ПО ПРЯМОЛИНЕЙНЫМ ТРАЕКТОРИЯМ

Кирсанов А.П.

*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,
ул. Мясницкая, 20, Москва, 101000, Россия
e-mail: ki@hse.ru*

Статья поступила в редакцию 02.09.2019

Рассматривается возможность скрытного движения воздушного объекта (ВО) в зоне обнаружения радиолокационной станции (РЛС) воздушного базирования, работающей в импульсно-доплеровском режиме для обнаружения низколетящих воздушных объектов на фоне подстилающей поверхности. Предметом статьи являются прямолинейные траектории скрытного движения ВО, т. е. такие прямолинейные траектории, при движении по которым объект не обнаруживается из-за близости радиальных составляющих скорости ВО и подстилающей поверхности. Такие траектории характеризуются простотой расчета и лёгкостью реализации. Представлены формулы для вычисления моментов пересечения границ зоны резекции, в которой воздушные объекты не обнаруживаются доплеровской РЛС воздушного базирования. Построены области в зоне обнаружения импульсно-доплеровской РЛС, в которые объект может попасть, двигаясь по прямолинейным скрытным траекториям. Исследованы их формы и размеры в зависимости от положения и параметров движения ВО относительно РЛС. Найдены условия, когда возможны неограниченные области достижимости по прямолинейным скрытным траекториям, и условия существования прямолинейных скрытных траекторий выхода воздушного объекта в место положения бортовой доплеровской РЛС.

Ключевые слова: зона обнаружения доплеровской РЛС, скрытная траектория, прямолинейное движение.

Введение

Самолеты дальнего радиолокационного обнаружения (ДРЛО), оснащенные мощной РЛС, являются эффективным средством контроля воздушного пространства [1, 2]. Размещение РЛС на летательном аппарате (ЛА) даёт ряд преимуществ по

сравнению с наземными РЛС. В первую очередь это возможность обнаруживать и сопровождать воздушные объекты, летящие на малых и предельно малых высотах. При этом (во-вторых) следует отметить значительную площадь, на которой такое обнаружение обеспечивается одним самолетом ДРЛО.

Вместе с тем РЛС самолетов ДРЛО имеют некоторые особенности. Одна из них — это подвижность зоны обзора бортовой РЛС, которая перемещается вместе с самолетом ДРЛО. Вторая особенность — существование для каждого ВО таких областей в зоне обнаружения РЛС самолетов ДРЛО (зависящих от направления движения ВО), в которых низколетящие воздушные объекты не обнаруживаются [3]. Эти области обусловлены необходимостью использования доплеровского режима работы РЛС для обнаружения ВО на фоне подстилающей поверхности. Из-за этой особенности в зоне обнаружения доплеровской РЛС самолетов ДРЛО существуют такие скрытные траектории, при движении по которым ВО не обнаруживаются бортовой РЛС [4].

Вопросы сопровождения ЛА доплеровскими РЛС воздушного базирования с учетом их возможного попадания в зоны резекции рассмотрены в работах [5—13]. Возможности скрытного наведения в зоне обзора доплеровской РЛС исследовались в [14]. Задачи планирования малозаметных для РЛС траекторий ЛА, а также траекторий с учетом различных ограничений, в том числе тех, выполнение которых обеспечивает невозможность обнаружения ЛА бортовыми доплеровскими РЛС, рассматривались в [15—20]. Многие из предлагаемых в этих работах траекторий, а также почти все траектории рассмотренного в [4] класса скрытных траекторий (кроме нескольких особых траекторий) являются криволинейными. Несмотря на то, что в [21] показано, что движение по таким траекториям возможно с учетом маневренных характеристик летательных аппаратов (за исключением незначительной по размерам области вблизи самолета ДРЛО), использование прямолинейных скрытных траекторий (где это возможно) предпочтительнее.

В [22] найдены отдельные (особые) прямолинейные траектории, по которым возможно достаточно длительное скрытное движение. Такое движение возможно только при некоторых соотношениях скоростей ВО и РЛС самолета ДРЛО, которые не выполняются для многих практически важных ситуаций. Некоторые из прямолинейных скрытных траекторий в системе координат, связанной с самолетом ДРЛО, проходят через место расположения РЛС. В то же время в каждой точке зоны обзора бортовой РЛС существует сектор направлений, в которых прямолинейное скрытное движение возможно в течение некоторого времени. В ряде случаев такого ограниченного по времени скрытного движения достаточно для достижения цели полета.

В данной работе исследуются области в зоне обзора доплеровской РЛС самолета ДРЛО, в которые можно попасть по скрытным прямолинейным траекториям из различных начальных положений. Анализируются размеры и форма таких областей для различных скоростей полета ВО и самолета ДРЛО.

Секторы невидимых направлений движения и секторы резекции

Далее будет рассмотрена ситуация, когда самолет ДРЛО движется прямолинейно с постоянной скоростью w . С самолетом ДРЛО связывается подвижная прямоугольная система координат на плоскости Z_1OZ_2 , в которой описывается движение ВО в горизонтальной плоскости. Центр этой подвижной системы находится в месте расположения самолета ДРЛО, а координатная ось OZ_1 направлена вдоль вектора скорости самолета ДРЛО, как это показано на рис. 1. Наряду с подвижной системой координат будет использоваться неподвижная земная система, оси которой удобно считать параллельными осям подвижной системы. Несмотря на то, что движение ВО рассматривается как движение на плоскости, предполагается, что ВО летит на достаточно малой высоте и его обнаружение бортовой доплеровской РЛС самолета ДРЛО производится на фоне подстилающей поверхности. В [4] показано, что ВО не обнаруживается доплеровской РЛС самолета ДРЛО из-за близости радиальных

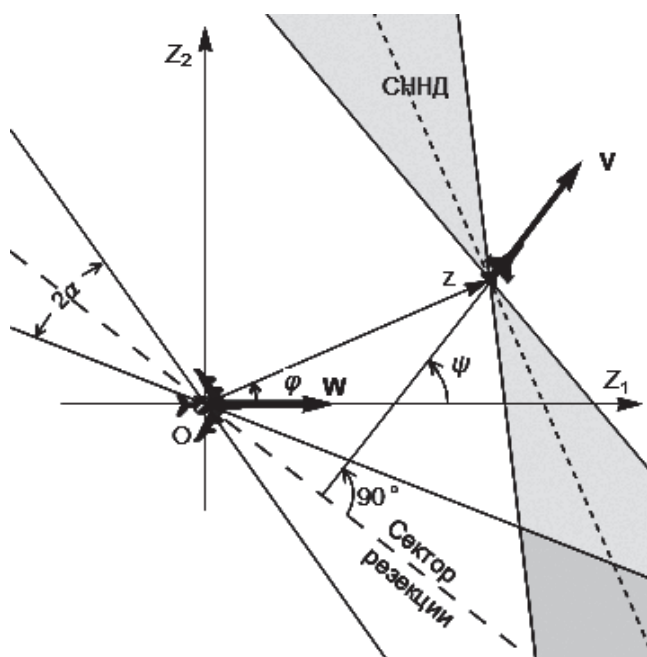


Рис. 1. Схема расположения сектора резекции и сектора невидимых направлений движения

составляющих скоростей ВО и подстилающей поверхности, если выполняется неравенство

$$|(V, z)| \leq v_{\min} |z|, \quad (1)$$

где $z = \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \end{pmatrix}$ — вектор, определяющий положение

ВО в системе координат $Z_1 O Z_2$, связанной с самолетом ДРЛО (рис. 1); $|z|$ — длина вектора z ;

$V = v \begin{pmatrix} \cos \psi \\ \sin \psi \end{pmatrix}$ — вектор скорости ВО в неподвижной

земной системе координат; ψ — угол между вектором скорости ВО и осью OZ_1 , отсчитываемый против часовой стрелки; (V, z) — скалярное произведение векторов V и z ; v_{\min} — минимальное (по абсолютной величине) значение разности радиальных скоростей ВО и подстилающей поверхности, при котором возможно обнаружение воздушного объекта бортовой доплеровской РЛС самолета ДРЛО.

Из данного неравенства следуют два важных вывода.

Во-первых, если вектор z удовлетворяет неравенству (1), вектор $\lambda \cdot z$ также удовлетворяет этому неравенству для любого числа λ . Это означает, что множество точек, в которых ВО не обнаруживается доплеровской РЛС на фоне подстилающей поверхности (при фиксированном векторе скорости ВО V), имеет вид секторов, образованных двумя пересекающимися прямыми линиями. Точка пересечения этих прямых (общая вершина двух секторов) находится в месте положения бортовой РЛС самолета ДРЛО (точка O на рис. 1). Далее в тексте эти секторы будут называться *секторами* или *зонами резекции*. Ориентация и размер зоны резекции зависят от вектора скорости ВО V . Общая биссектриса секторов резекции всегда перпендикулярна вектору скорости ВО V . Угловой размер 2α каждого сектора зависит от скорости ВО $v = |V|$ и определяется по формуле:

$$2\alpha = 2 \arcsin \frac{v_{\min}}{v}.$$

Во-вторых, для каждого возможного положения ВО (вектора z) имеется сектор направлений, двигаясь в котором ВО не будет обнаруживаться доплеровской РЛС самолета ДРЛО. Этот сектор называется сектором невидимых направлений движения (СННД) воздушного объекта. Расположение

СННД полностью определяется положением ВО. Вершина СННД находится в месте текущего положения ВО (на рис. 1 задается вектором z). Биссектриса (ось симметрии) сектора невидимых направлений движения перпендикулярна вектору z (линии визирования «самолет ДРЛО — ВО»). Угловой размер СННД совпадает с угловым размером сектора резекции и равен 2α .

Из условия невидимости (1) и определений сектора резекции и СННД следует, что расположение ВО в секторе резекции эквивалентно нахождению вектора скорости ВО в СННД, а расположение ВО на границе сектора резекции эквивалентно тому, что вектор скорости ВО направлен вдоль одной из границ СННД. На рис. 1 вектор скорости ВО расположен вне СННД.

Варианты прямолинейных скрытных траекторий

Если ВО движется по одному из направлений, находящемуся в СННД (вектор скорости ВО лежит в СННД), то ВО не обнаруживается бортовой РЛС самолета ДРЛО не только в текущий момент, но и не может быть обнаружен до его выхода из зоны резекции. Различным направлениям движения ВО в пределах СННД соответствуют различные длительности скрытного прямолинейного движения. Для нахождения длительности скрытного движения необходимо знать моменты входа ВО в зону резекции и выхода из неё.

В момент выхода из зоны резекции ВО пересекает границу зоны. Условие пересечения воздушным объектом границы зоны резекции является ортогональность вектора z , описывающего положение ВО, единичному вектору e , перпендикулярному границе. Это условие формализуется в виде равенства нулю скалярного произведения $(e, z) = 0$.

Из того, что биссектриса зоны резекции перпендикулярна вектору скорости ВО, а границы зоны резекции повернуты относительно биссектрисы на углы $\pm \alpha$, следует, что векторы, ортогональные границам зоны резекции, имеют вид

$$e_1 = \begin{pmatrix} \cos(\psi + \alpha) \\ \sin(\psi + \alpha) \end{pmatrix}, \quad e_2 = \begin{pmatrix} \cos(\psi - \alpha) \\ \sin(\psi - \alpha) \end{pmatrix}.$$

Положение ВО в момент времени t при движении по прямолинейной траектории в относительной системе координат (подвижной системе координат $Z_1 O Z_2$, связанной с самолетом ДРЛО) описывается вектором

$$z(t) = (V - W)t + z_0,$$

где $z_0 = \begin{pmatrix} z_{01} \\ z_{02} \end{pmatrix}$ – вектор, описывающий положение

ВО в момент времени $t = 0$; $\rho = |z_0|$;

$$V = v \begin{pmatrix} \cos \psi \\ \sin \psi \end{pmatrix}, \quad W = \begin{pmatrix} w \\ 0 \end{pmatrix} \text{ – векторы скорости ВО}$$

и самолета ДРЛО в земной системе координат.

Условие пересечения воздушным объектом границ зоны резекции в момент t запишется в виде уравнения

$$(e_{1,2}, z(t)) = (e_{1,2}, (V - W)t + (e_{1,2}, z_0)) = 0.$$

Из этого уравнения определяются моменты t_1 и t_2 пересечения двух границ зоны резекции:

$$t_{1,2} = - \frac{(e_{1,2}, z_0)}{(e_{1,2}, (V - W))}.$$

Вычислив скалярные произведения в числителе и знаменателе этой дроби с учетом выражений для векторов z_0, V, W, e_1, e_2 , получим

$$\begin{aligned} t_1 &= \frac{\rho \cdot \cos(\psi - \varphi + \alpha)}{w \cdot \cos(\psi + \alpha) - v \cdot \cos(\alpha)}; \\ t_2 &= \frac{\rho \cdot \cos(\psi - \varphi - \alpha)}{w \cdot \cos(\psi - \alpha) - v \cdot \cos(\alpha)}. \end{aligned} \quad (2)$$

Положительное значение величины t_1 или t_2 означает, что пересечение ВО соответствующей границы зоны резекции произойдет в будущем, т. е. после текущего момента $t = 0$. Если моменты t_1 или t_2 отрицательны, то пересечение воздушным объектом соответствующей границы произошло до текущего момента $t = 0$.

При $\mu = \frac{v}{w} \cdot \cos \alpha > 1$ или, что эквивалентно, при

$v^2 > w^2 + v_{\min}^2$ знаменатели выражений для t_1 и t_2 отрицательны для всех направлений движения ψ . Поэтому знак произведения $t_1 \cdot t_2$ совпадает со знаком выражения

$$\cos(\psi - \varphi + \alpha) \cos(\psi - \varphi - \alpha) = \cos^2(\psi - \varphi) - \sin^2 \alpha.$$

Условие нахождения ВО в зоне резекции (1) может быть записано в виде

$$|\cos(\psi - \varphi)| < \sin \alpha.$$

Следовательно, при $\mu > 1$ нахождение ВО в зоне резекции эквивалентно тому, что моменты t_1 и t_2 имеют разные знаки. На рис. 2, а показана ситуация, когда ВО в начальный момент $t = 0$ находится в зоне резекции и $t_1 < 0 < t_2$.

Время $t_c = \max\{t_1, t_2\}$ при $\mu > 1$ – время скрытного движения ВО по прямолинейной траектории из положения, которое занимал ВО в зоне резекции

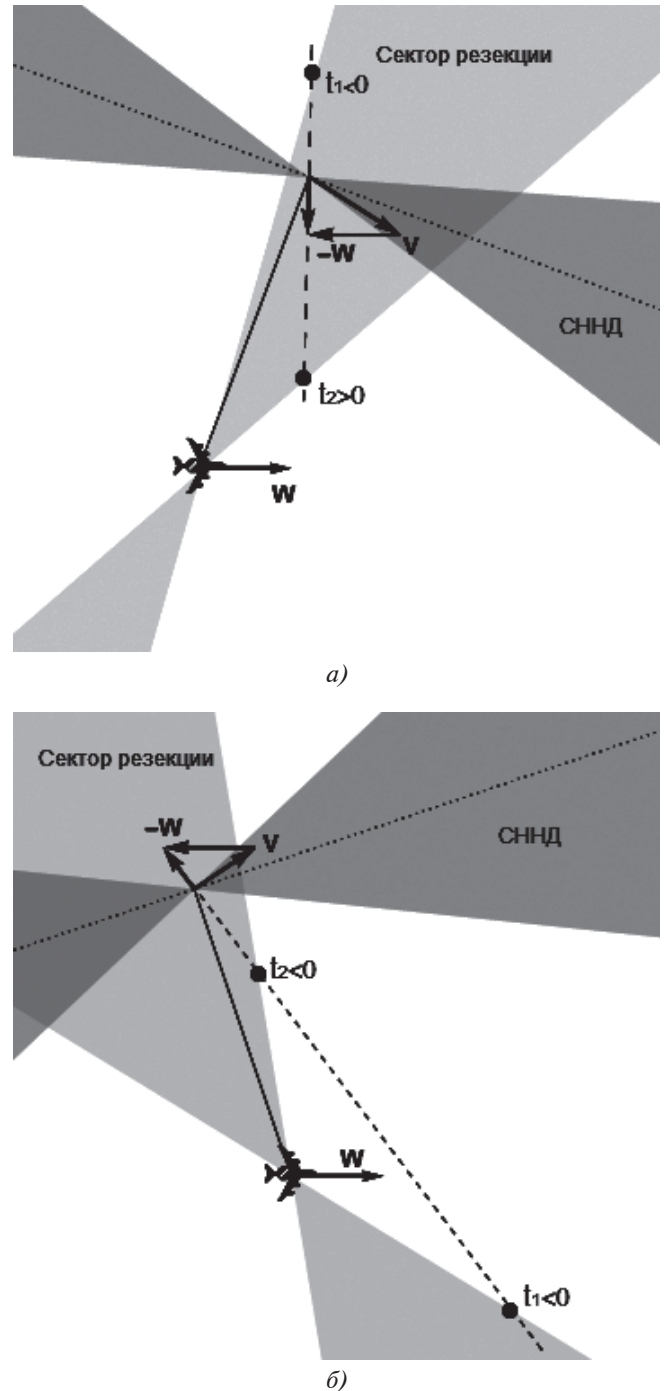


Рис. 2. Варианты скрытных траекторий движения воздушного объекта в секторе резекции

ции в начальный момент $t = 0$, до выхода из зоны резекции. Это время зависит от положения ВО, описываемого вектором z (или соответствующими полярными координатами ρ , ϕ), его скорости v и направления движения, описываемого углом ψ . Зная время t_c , длину l прямолинейной скрытной траектории ВО до выхода из зоны резекции вычисляем по формуле $l = vt_c$.

Для ВО, находящегося в момент $t = 0$ вне сектора резекции, моменты t_1 и t_2 имеют одинаковые знаки. В случае положительных значений t_1 и t_2 ВО при дальнейшем прямолинейном движении пересечет сектор резекции (войдет в сектор резекции и выйдет из него). При отрицательных t_1 и t_2 ВО останется вне сектора резекции в процессе всего дальнейшего прямолинейного движения.

Если $\mu = \frac{v}{w} \cdot \cos\alpha < 1$, то при любом положении

ВО относительно самолета ДРЛО существуют такие направления прямолинейного движения, что возможны все комбинации знаков t_1 и t_2 : обе величины положительны, обе величины отрицательны, величины t_1 и t_2 имеют разные знаки. Наиболее интересен случай, когда $t_1 < 0$ и $t_2 < 0$. В этом случае ВО, находящийся в начальный момент в зоне резекции, может в дальнейшем скрытно перемещаться в зоне резекции неограниченное время, удаляясь от самолета ДРЛО по прямолинейной траектории. Одна из таких траекторий показана на рис. 2,б. Такое движение возможно не при всех угловых положениях ВО относительно самолета ДРЛО, задаваемых углом ϕ , и направлениях движения ВО, задаваемых углом ψ .

Для того чтобы наглядно описать совокупность значений ϕ и ψ , при которых соответствующая прямолинейная траектория обладает некоторым свойством, пару углов ϕ и ψ удобно представлять в виде точки на плоскости. Так, на рис. 3 в виде полос, наклоненных на 45° , изображены области, соответствующие расположению ВО в текущий момент в секторе резекции. Эти области обозначены надписями «Зона резекции».

Все точки на плоскости параметров ϕ и ψ , которым соответствует неограниченное по времени скрытное движение по прямолинейной траектории, образуют параллелограммы, обозначенные буквами А и С.

Среди прямолинейных траекторий, для которых моменты t_1 и t_2 пересечения границ зоны резекции положительны, особого внимания заслуживают те, для которых $t_1 = t_2$. Это объясняется тем,

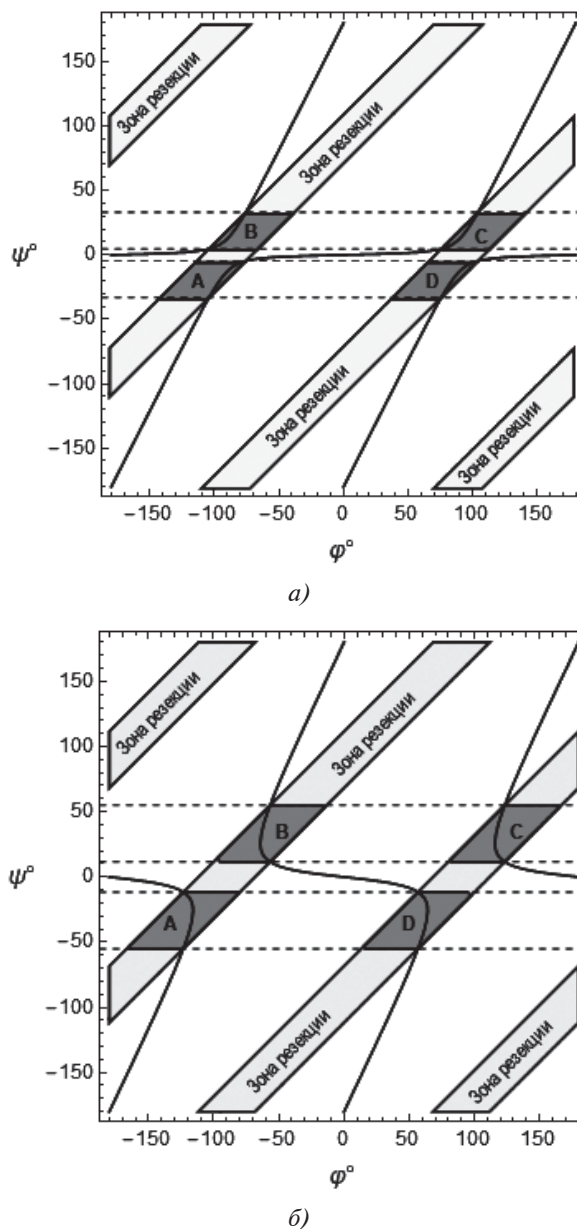


Рис. 3. Области параметров ϕ и ψ , которым соответствуют различные виды прямолинейных траекторий

что прямолинейная траектория может пересекать обе границы зоны резекции в один и тот же момент времени только в точке пересечения этих границ, т. е. в месте, где находится самолет ДРЛО.

Из условия $t_1 = t_2$ следует уравнение

$$w \sin \phi + v \sin(\psi - \phi) = 0,$$

которое задает в неявном виде кривую на плоскости параметров ϕ и ψ , все точки которой, т. е. пары (ϕ, ψ) , соответствуют проходящим через место расположения самолета ДРЛО прямолинейным траекториям. Эта кривая состоит из двух ветвей, вид которых зависит от соотношения скоростей w и v . При выполнении неравенства

$$w < v < \sqrt{w^2 + v_{\min}^2}$$

кривая имеет такой вид, как на рис. 3,а, а при $v < w$ — как на рис. 3,б. Оба варианта рис. 3 соответствуют значениям $w = 600$ км/ч и $v_{\min} = 200$ км/ч. Рис. 3,а соответствует значению $v = 615$ км/ч, рис. 3,б — значению $v = 540$ км/ч.

Часть ветви этой кривой, которой соответствуют положительные равные значения t_1 и t_2 , при $\mu < 1$ проходит через области на плоскости параметров φ и ψ , соответствующие движению ВО в секторе резекции. На рис. 3 эти области в виде параллелограммов обозначены буквами В и Д. Иными словами, при некоторых положениях ВО относительно самолета ДРЛО (углах φ) существуют скрытные прямолинейные траектории, проходящие через начало относительной системы координат, т.е. через место положения самолета ДРЛО. В земной системе координат такие траектории выводят ВО точно на самолет ДРЛО методом параллельного сближения [23].

Следует отметить, что при $\mu > 1$ не существует скрытных прямолинейных траекторий, проходящих через место положения самолета ДРЛО.

Области в зоне обнаружения доплеровской РЛС, достижимые по прямолинейным скрытным траекториям

Представляют интерес области в зоне обнаружения доплеровской РЛС, состоящие из точек, в которые ВО может попасть из некоторого начального положения, двигаясь скрытно по прямолинейным траекториям по направлениям, входящим в СННД. Далее такие области будут называться областями достижимости по скрытным прямоли-

нейным траекториям. На рис. 4,а показаны области достижимости в неподвижной земной системе координат, а на рис. 4,б — области достижимости в подвижной системе координат, связанной с самолетом ДРЛО. Области изображены для различных начальных положений ВО относительно самолета ДРЛО и $\mu > 1$. Различные начальные положения ВО отмечены на рисунке точками. Самолет ДРЛО в начальный момент находится в центре системы координат и в дальнейшем движется вдоль горизонтальной оси с постоянной скоростью 600 км/ч.

Области достижимости состоят из двух частей в форме лепестков. Одна часть соответствует векторам скорости ВО из СННД, «вращающим» описывающий положение ВО вектор z по часовой стрелке. Другая часть соответствует противоположно направленным векторам. Форма и размеры показанных на рис. 4 областей достижимости соответствуют скорости ВО 800 км/ч и расстояниям начальных точек до самолета ДРЛО, равным 250 и 150 км. Из рис. 4,а видно, что максимальные длины скрытных траекторий для различных начальных положений ВО различны и достигают 300 км. Такое продолжительное скрытное движение по прямолинейной траектории возможно, когда вектор скорости ВО незначительно отличается от вектора скорости самолета ДРЛО и, следовательно, величина относительной скорости $|V - W|$, с которой воздушный объект пересекает сектор резекции, мала.

Области достижимости увеличиваются в размерах пропорционально расстоянию начальной точки от положения самолета ДРЛО. Это следует из того, что расстояние ρ от ВО до самолета ДРЛО в начальный момент $t = 0$ входит в качестве мно-

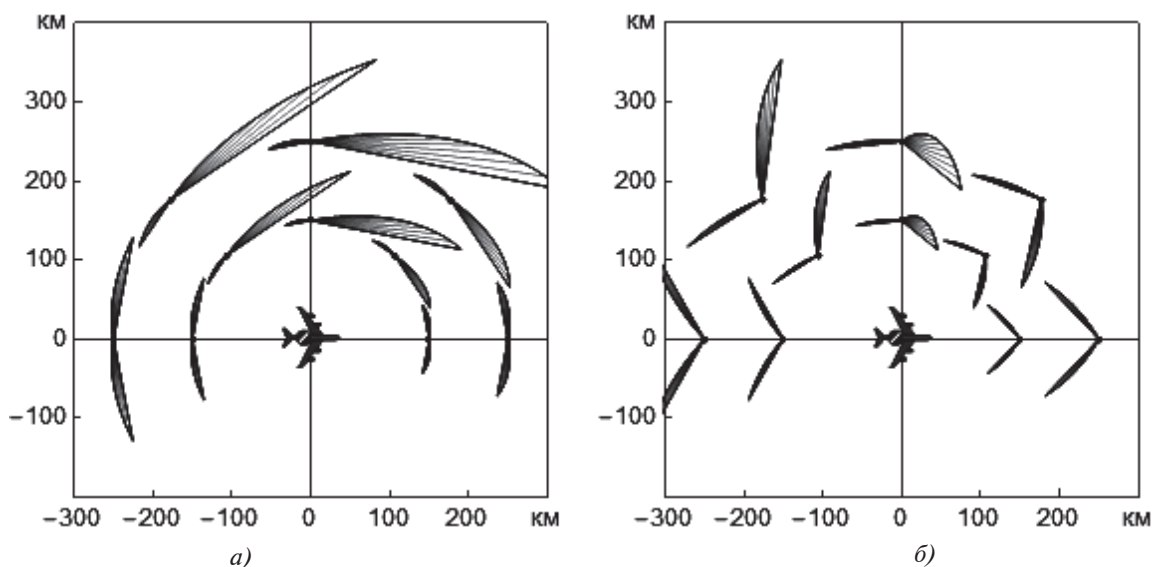


Рис. 4. Области достижимости в земной и подвижной системах координат из различных начальных положений

жителя в формулы (2) для вычисления величин t_1 и t_2 .

Размер области достижимости зависит также от скорости ВО. Чем больше эта скорость, тем меньше размер области. Такая зависимость объясняется уменьшением углового размера зоны резекции при увеличении скорости ВО в соответствии с формулой (1).

Из-за того, что в случае $\mu < 1$ при некоторых положениях ВО относительно самолета ДРЛО возможно неограниченное по времени скрытное движение ВО, области достижимости могут быть неограниченными.

Выводы

Исследованы возможные варианты скрытного движения воздушных объектов по прямолинейным траекториям в зоне обнаружения доплеровской РЛС воздушного базирования (самолета ДРЛО). Установлено, что любое положение ВО относительно самолета ДРЛО может быть началом прямолинейной скрытной траектории при соответствующем выборе направления движения. Найдено соотношение между скоростями ВО, самолета ДРЛО и минимальным значением радиальной составляющей скорости целей, обнаруживаемых импульсно-доплеровской РЛС самолета ДРЛО, при выполнении которого существуют прямолинейные скрытные траектории выхода ВО непосредственно на самолет ДРЛО по методу параллельного сближения. Кроме того, при выполнении этого условия возможно неограниченное по времени прямолинейное скрытное движение ВО с удалением от самолета ДРЛО.

Рассмотрены области достижимости в зоне обнаружения РЛС самолета ДРЛО, куда ВО могут попасть, двигаясь по прямолинейным скрытным траекториям. Исследованы размеры и форма этих областей в зависимости от параметров движения ВО и самолета ДРЛО, а также расстояния начала скрытных траекторий до самолета ДРЛО. Установлено, что размеры этих областей увеличиваются пропорционально расстоянию от самолета ДРЛО. В частности, при удалении начальной точки траекторий от самолета ДРЛО на расстояние 250 км протяженность таких областей достигает 300 км. Размеры областей достижимости увеличиваются также при уменьшении скорости ВО. При скорости ВО меньше некоторого критического значения, зависящего от скорости самолета ДРЛО, области достижимости могут стать неограниченными.

Важность исследования прямолинейных скрытных траекторий заключается, во-первых, в

том, что такие траектории характеризуются простотой расчета и лёгкостью реализации и, во-вторых, в том, что из фрагментов таких простых траекторий могут быть сформированы более сложные скрытные траектории.

Полученные результаты могут быть использованы для выполнения штурманских расчетов движения ВО в зоне обзора доплеровских РЛС воздушного базирования.

Библиографический список

1. *Верба В.С.* Авиационные комплексы радиолокационного дозора и наведения. Принципы построения, проблемы разработки и особенности функционирования. — М.: Радиотехника, 2014. — 528 с.
2. *Long M.W.* Airborne Early Radar Warning System Concepts. — SciTech, 2004. — 519 p.
3. *Гандурин В.Б., Курсанов А.П.* Особенности зоны обнаружения низколетящих воздушных объектов доплеровской радиолокационной станции // Радиотехника. 2007. № 10. С. 42–46.
4. *Курсанов А.П.* Траектории скрытного движения воздушного объекта в зоне обнаружения бортовой доплеровской радиолокационной станции // Автоматика и телемеханика. 2014. № 9. С. 144–155.
5. *Gordon N., Ristic B.* Tracking airborne targets occasionally hidden in the blind Doppler // Digital Signal Processing. 2002. Vol. 12. No. 2-3, pp. 383–393. DOI: 10.1006/dspr.2002.0439
6. *Han W., Tang Z., Zhu Z.* Method of target tracking with Doppler blind zone constraint // Journal of Systems Engineering and Electronics. 2013. Vol. 24. No. 6, pp. 889–898. DOI: 10.1109/JSEE.2013.00103
7. *Wu W., Liu W., Jiang J., Gao L., Wei Q., Liu C.* GM-PHD filter-based multi-target tracking in the presence of Doppler blind zone // Digital Signal Processing. 2016. Vol. 52, pp. 1–12. DOI: 10.1016/j.dsp.2016.01.014
8. *Wei L., Wu W., Sun H., Luo M., Wu X.* GM-CVMeMBeR-based multi-target tracking in the presence of Doppler blind zone // 20th International Conference on Information Fusion (10-13 July 2017, Xi'an, China). DOI: 10.23919/ICIF.2017.8009646
9. *Clark J.M.C., Kountouriotis P.A., Vinter R.B.* A New Gaussian Mixture Algorithm for GMTI Tracking Under a Minimum Detectable Velocity Constraint // IEEE Transactions on Automatic Control. 2009. Vol. 54. No. 12, pp. 2745–2756. DOI: 10.1109/TAC.2009.2031720
10. *Clark J.M.C., Kountouriotis P.A., Vinter R.B.* A new algorithm for GMTI tracking problems, subject to a Doppler blind zone constraint // IET Seminar on Target Tracking and Data Fusion: Algorithms and Applications (15-16 April 2008, Birmingham, UK). DOI: 10.1049/ic:20080056
11. *Mertens M., Koch W., Kirubarajan T.* Exploiting Doppler Blind Zone Information for Ground Moving Target Tracking with Bistatic Airborne Radar // IEEE

- Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2014. Vol. 50. No. 1, pp. 130–148. DOI: 10.1109/TAES.2013.120718
12. Du S., Shi Z., Zang W., Chen K. Using interacting multiple model particle filter to track airborne targets hidden in blind Doppler // Journal of Zhejiang University-SCIENCE A. 2007. Vol. 8. No. 8, pp. 1277–1282. DOI: 10.1631/jzus.2007.A1277
 13. Huang H., Rong Y., Foo P.H., Ng G.W., Mertens M., Ulmke M., Koch W. Convoy tracking in Doppler blind zone regions using GMTI radar // 16th International Conference on Information Fusion (9-12 July 2013, Istanbul, Turkey).
 14. Загребельный И.П., Сузанский Д.Н. Исследование скрытного наведения воздушного объекта в зоне обзора импульсно-доплеровской РЛС // Радиолокация, навигация, связь: Сб. трудов XXII Международной научно-технической конференции (Воронеж, 19-21 апреля 2016). Воронеж: ИД ВГУ, 2016. С. 1376–1385.
 15. Wang L.-X., Zhou D.-Y., Zheng R. A Stealthy Path Planning Method for Aircraft by Constant Azimuth // Proceedings of the International Conference on Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies (8-11 Dec. 2010, Wuhan, China). DOI: 10.1109/PDCAT.2010.84
 16. Liu H., Chen J., Shen L., Chen S. Low observability trajectory planning for stealth aircraft to evade radars tracking // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering. 2014. Vol. 228. No. 3, pp. 398–410. DOI: 10.1177/0954410012474557
 17. Inanc T., Muezzinoglu M.K., Misovec K., Murray R.M. Framework for Low-Observable Trajectory Generation in Presence of Multiple Radars // Journal of Guidance, Control, and Dynamics. 2008. Vol. 31. No. 6, pp. 1740–1749. DOI: 10.2514/1.35287
 18. Lingxiao W., Deyun Z. Effective Path Planning Method for Low Detectable Aircraft // Journal of Systems Engineering and Electronics. 2009. Vol. 20. No. 4, pp. 784–789.
 19. Ding Xiaodong, Liu Yi, Li Weimin. Based on dynamic RCS of Real-time flight path planning method // Systems Engineering and Electronics. 2008. Vol. 5. No. 30, pp. 868–871.
 20. Грумондз В.Т., Полищук М.А. Задача наведения беспилотного планирующего летательного аппарата на подвижную цель // Вестник Московского авиационного института. 2014. Т.21. № 4. С. 7–12.
 21. Кирсанов А.П. Кинематические свойства траекторий скрытного движения летательного аппарата в зоне обнаружения бортовой доплеровской радиолокационной станции // Вестник Московского авиационного института. 2017. Т. 24. № 4. С. 129–136.
 22. Кирсанов А.П., Ямпольский С.М. Прямолинейные траектории скрытного движения воздушного объекта в зоне обнаружения бортовой доплеровской радиолокационной станции // Труды МАИ. 2015. №84. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=63124>
 23. Остославский И.В., Стражева И.В. Динамика полета. Траектории летательных аппаратов. — М.: Машиностроение, 1969. — 502 с.

STEALTHY MOVEMENT OF AERIAL OBJECT ALONG RECTILINEAR PATHS IN THE ONBOARD DOPPLER RADAR STATION DETECTION ZONE

Kirsanov A.P.

National Research University Higher School of Economics,
20, Myasnitskaya str., Moscow, 101000, Russia
e-mail: ki@hse.ru

Abstract

Onboard radar stations operating in the pulse–Doppler mode show the characteristic feature in the detection zone. This feature consists in the fact that in every point of the detection zone the aircraft has a sector of directions moving along which it is not detected by the onboard Doppler radar. This sector is called the sector of invisible motion directions of the aircraft. Due to these features, there are stealthy paths allowing an aircraft to stay non-detected by Doppler radar station, such as radar station of an airborne early warning aircraft, while moving along them. The majority of stealthy trajectories is curvilinear with variable curvature. The article deals with the study of the rectilinear paths of the aircraft stealthy movement in

the onboard Doppler radar station detection zone. It was established that any aerial object position relative to the early warning aircraft might be the start of the rectilinear stealthy path at the appropriate selection of direction of movement. An equation to determine the stealthy movement duration along the rectilinear path depending on the aircraft initial position and its direction of movement was obtained. Areas in the detection zone of the pulse-Doppler radar station to which the aerial object may enter, moving along the rectilinear stealthy paths, were plotted. Their shapes and sizes depending on the aerial object position and motion parameters relative to the radar station were studied. Conditions of the unlimited time duration of

movement along the stealthy paths, and conditions of the rectilinear stealthy paths for the aerial object outgoing to the onboard Doppler radar station location were found.

Keywords: Doppler radar station detection zone, stealthy trajectory, rectilinear movement.

References

1. Verba V.S. *Aviatsionnye komplekсы radiolokatsionnogo dozora i navedeniya. Printsipy postroeniya, problemy razrabotki i osobennosti funktsionirovaniya* (Aircraft complexes for radar picket and guidance. Principles of development, problems of design and functioning specifics), Moscow, Radiotekhnika, 2014, 528 p.
2. Long M.W. *Airborne Early Radar Warning System Concepts*, SciTech, 2004, 519 p.
3. Gandurin V.B., Kirsanov A.P. *Radiotekhnika*, 2007, no. 10, pp. 42–46.
4. Kirsanov A.P. *Avtomatika i telemekhanika*, 2014, no. 9, pp. 144–155.
5. Gordon N., Ristic B. Tracking airborne targets occasionally hidden in the blind Doppler. *Digital Signal Processing*, 2002, vol. 12, no. 2–3, pp. 383–393. DOI: 10.1006/dspr.2002.0439
6. Han W., Tang Z., Zhu Z. Method of target tracking with Doppler blind zone constraint. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2013, vol. 24, no. 6, pp. 889–898. DOI: 10.1109/JSEE.2013.00103
7. Wu W., Liu W., Jiang J., Gao L., Wei Q., Liu C. GM-PHD filter-based multi-target tracking in the presence of Doppler blind zone. *Digital Signal Processing*, 2016, vol. 52, pp. 1–12. DOI: 10.1016/j.dsp.2016.01.014
8. Wei L., Wu W., Sun H., Luo M., Wu X. GM-CBMeMBer-based multi-target tracking in the presence of Doppler blind zone. *20th International Conference on Information Fusion (10–13 July 2017, Xi'an, China)*. DOI: 10.23919/ICIF.2017.8009646
9. Clark J.M.C., Kountouriotis P.A., Vinter R.B. A New Gaussian Mixture Algorithm for GMTI Tracking Under a Minimum Detectable Velocity Constraint. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2009, vol. 54, no. 12, pp. 2745–2756. DOI: 10.1109/TAC.2009.2031720
10. Clark J.M.C., Kountouriotis P.A., Vinter R.B. A new algorithm for GMTI tracking problems, subject to a Doppler blind zone constraint. *IET Seminar on Target Tracking and Data Fusion: Algorithms and Applications (15–16 April 2008, Birmingham, UK)*. DOI: 10.1049/ic:20080056
11. Mertens M., Koch W., Kirubarajan T. Exploiting Doppler Blind Zone Information for Ground Moving Target Tracking with Bistatic Airborne Radar. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2014, vol. 50, no. 1, pp. 130–148. DOI: 10.1109/TAES.2013.120718
12. Du S., Shi Z., Zang W., Chen K. Using interacting multiple model particle filter to track airborne targets hidden in blind Doppler. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, 2007, vol. 8, no. 8, pp. 1277–1282. DOI: 10.1631/jzus.2007.A1277
13. Huang H., Rong Y., Foo P.H., Ng G.W., Mertens M., Ulmke M., Koch W. Convoy tracking in Doppler blind zone regions using GMTI radar. *16th International Conference on Information Fusion (9–12 July 2013, Istanbul, Turkey)*.
14. Zagrebel'nyi I.R., Suzanskii D.N. *Materialy XXII Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Radiolokatsiya, navigatsiya, svyaz" (Voronezh, 19–21 April 2016)*. Voronezh, Izdatel'skii dom VGU, 2016, pp. 1376–1385.
15. Wang L.-X., Zhou D.-Y., Zheng R. A Stealthy Path Planning Method for Aircraft by Constant Azimuth. *Proceedings of the International Conference on Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies (8–11 December 2010, Wuhan, China)*. DOI: 10.1109/PDCAT.2010.84
16. Liu H., Chen J., Shen L., Chen S. Low observability trajectory planning for stealth aircraft to evade radars tracking. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 2014, vol. 228, no. 3, pp. 398–410. DOI: 10.1177/0954410012474557
17. Inanc T., Muezzinoglu M.K., Misovec K., Murray R.M. Framework for Low-Observable Trajectory Generation in Presence of Multiple Radars. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2008, vol. 31, no. 6, pp. 1740–1749. DOI: 10.2514/1.35287
18. Lingxiao W., Deyun Z. Effective Path Planning Method for Low Detectable Aircraft. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2009, vol. 20, no. 4, pp. 784–789.
19. Ding Xiaodong, Liu Yi, Li Weimin. Based on dynamic RCS of Real-time flight path planning method. *Systems Engineering and Electronics*, 2008, vol. 5, no. 30, pp. 868–871.
20. Grumondz V.T., Polishcuk M.A. The problem of guidance of a gliding unmanned aerial vehicle onto a moving target. *Aerospace MAI Journal*, 2014, vol. 21, no. 4, pp. 7–12.
21. Kirsanov A.P. Kinematic properties of aircraft concealed motion trajectory in detection zone of the onboard doppler radar. *Aerospace MAI Journal*, 2017, vol. 24, no. 4, pp. 129–136.
22. Kirsanov A.P., Yampol'skii S.M. *Trudy MAI*, 2015, no. 84. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=63124>
23. Ostoslavskii I.V., Strazheva I.V. *Dinamika poleta. Traektorii letatel'nykh apparatov* (Dynamics of flight. Trajectories of aircraft), Moscow, Mashinostroenie, 1969, 502 p.