

УДК 621.396.969.34

# ОСОБЕННОСТИ ДВИЖЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА В ЗОНЕ ОБНАРУЖЕНИЯ БОРТОВОЙ ДОПЛЕРОВСКОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ МАНЕВРИРУЮЩЕГО САМОЛЕТА

**А.П. Кирсанов**

*АО «Концерн «Вега»*

Россия, 121170, Москва, Кутузовский пр-кт., 34

E-mail: ki572020@yandex.ru

**Р.А. Одегов**

*АО «Концерн «Вега»*

Россия, 121170, Москва, Кутузовский пр-кт., 34

E-mail: ruslan.odegow@yandex.ru

**Ключевые слова:** доплеровские слепые зоны, зоны резекции бортовой доплеровской РЛС.

**Аннотация:** Рассмотрены особенности функционирования бортовой доплеровской РЛС самолета, из-за которых в зоне обнаружения РЛС существуют скрытые траектории, при движении по которым низколетящие летательные аппараты не обнаруживаются бортовой РЛС. Предложены дифференциальные уравнения, решениями которых являются траектории скрытного движения летательного аппарата в зоне обнаружения маневрирующего носителя РЛС. Исследовано влияние различных маневров самолета-носителя доплеровской РЛС на траектории скрытного движения летательного аппарата

## 1. Введение

Для своевременного обнаружения и сопровождения низколетящих летательных аппаратов (ЛА) используются доплеровские радиолокационные станции (РЛС), устанавливаемые на самолетах дальнего радиолокационного обнаружения (ДРЛО) [1-3]. Такие РЛС способны обнаруживать низколетящие ЛА на фоне подстилающей поверхности. Обнаружение целей происходит за счет различия радиальных скоростей ЛА и поверхности земли относительно бортовой РЛС. Однако возможны ситуации, когда частоты сигналов, отраженных от ЛА и поверхности, совпадают, в результате чего сигнал от ЛА попадает в фильтр резекции и ЛА не обнаруживается. Этот факт позволяет ЛА оставаться «невидимыми», двигаясь в зоне обзора доплеровской РЛС.

Этот эффект можно использовать для скрытного движения ЛА в зоне обнаружения самолета ДРЛО. В [4, 5] рассмотрен важный класс скрытных траекторий движения ЛА в зоне обнаружения бортовой РЛС самолета ДРЛО. При этом предполагалось, что самолет ДРЛО движется прямолинейно с постоянной скоростью. Самолеты ДРЛО в зоне дежурства, как правило, перемещаются по замкнутым траекториям, в которых прямолинейные участки полета чередуются с разворотами на некоторый угол.

Маневрирование занимают меньшую часть времени полета самолетов ДРЛО по сравнению с прямолинейным движением. Поэтому, видимо, скрытное движение ЛА во время маневрирования самолёта ДРЛО исследовано недостаточно.

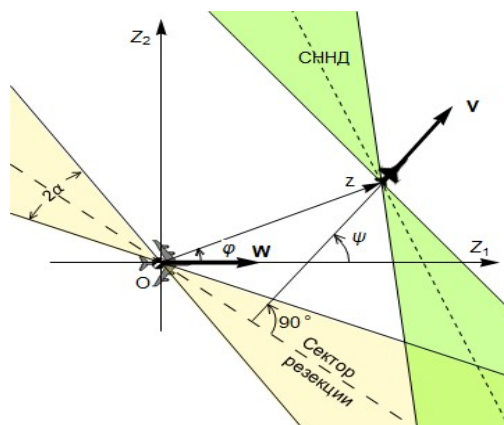
В работе рассматриваются особенности траекторий скрытного движения ЛА в зоне обзора РЛС маневрирующего самолета ДРЛО.

## 2. Обнаружение воздушных целей на фоне подстилающей поверхности

Устанавливаемые на самолетах РЛС (далее бортовые РЛС) для обнаружения низколетящих воздушных объектов вынуждены работать в условиях мощных отражений радиолокационного сигнала от подстилающей поверхности. Специальный фильтр резекции препятствует попаданию в приемник РЛС этой помехи. Из-за этого все сигналы (в том числе и от ЛА), частоты которых близки к средней частоте сигнала, отраженного от поверхности, не обнаруживаются в доплеровском режиме [3, 6]. Такая специфика обработки сигналов от целей на фоне подстилающей поверхности приводит к особенностям в зоне обнаружения бортовых доплеровских РЛС.

Во-первых, множество точек, в которых ЛА не обнаруживается доплеровской РЛС на фоне подстилающей поверхности, имеет вид секторов, образованных 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 зонами резекции.

Ориентация и размер зоны резекции зависит от вектора скорости ЛА  $V$ . Общая биссектриса секторов резекции всегда перпендикулярна вектору скорости ЛА  $V$ . Угловой размер  $\alpha$  каждого сектора зависит от величины  $v = |V|$  скорости ЛА и определяется по формуле  $\alpha = 2 \arcsin(v_{min}/v)$ .



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

Во-вторых, для каждого возможного положения ЛА имеется сектор направлений, двигаясь в котором ЛА не будет обнаруживаться доплеровской РЛС самолета ДРЛО. Этот сектор называется сектором невидимых направлений движения (СННД) ЛА. Вершина СННД находится в месте текущего положения ЛА, которому на рис. 1 соответствует вектор  $z$ . Биссектриса СННД перпендикулярна вектору  $z$  (линии визирования «самолет ДРЛО – ЛА»).

Угловой размер СННД совпадает с угловым размером сектора резекции и равен  $\alpha$ . Ориентация СННД определяется положением ЛА, а ориентация секторов резекции определяется направлением движения ЛА (см. рис. 1). Расположение ЛА в секторе резекции эквивалентно нахождению скорости ЛА в СННД.

### 3. Уравнения траектории скрытного движения ЛА в зоне обзора доплеровской РЛС маневрирующего самолета ДРЛО

Рассматриваются скрытные траектории, для которых вектор скорости ЛА, находясь в процессе движения в СННД, отклоняется на постоянный угол  $\varepsilon$  от биссектрисы СННД. В этом случае система дифференциальных уравнений, описывающая траектории скрытного движения ЛА в зоне обнаружения доплеровской РЛС маневрирующего самолета ДРЛО, имеет вид:

$$(1) \quad \begin{cases} \dot{x}_1 = -\frac{v}{\sqrt{(x_1-y_1)^2+(x_2-y_2)^2}} \left( (x_1-y_1) \sin \varepsilon + (x_2-y_2) \cos \varepsilon \right) \\ \dot{x}_2 = \frac{v}{\sqrt{(x_1-y_1)^2+(x_2-y_2)^2}} \left( (x_1-y_1) \cos \varepsilon - (x_2-y_2) \sin \varepsilon \right) \\ \dot{y}_1 = w \cos \psi \\ \dot{y}_2 = w \sin \psi \\ \dot{\psi} = \omega(t) \end{cases}$$

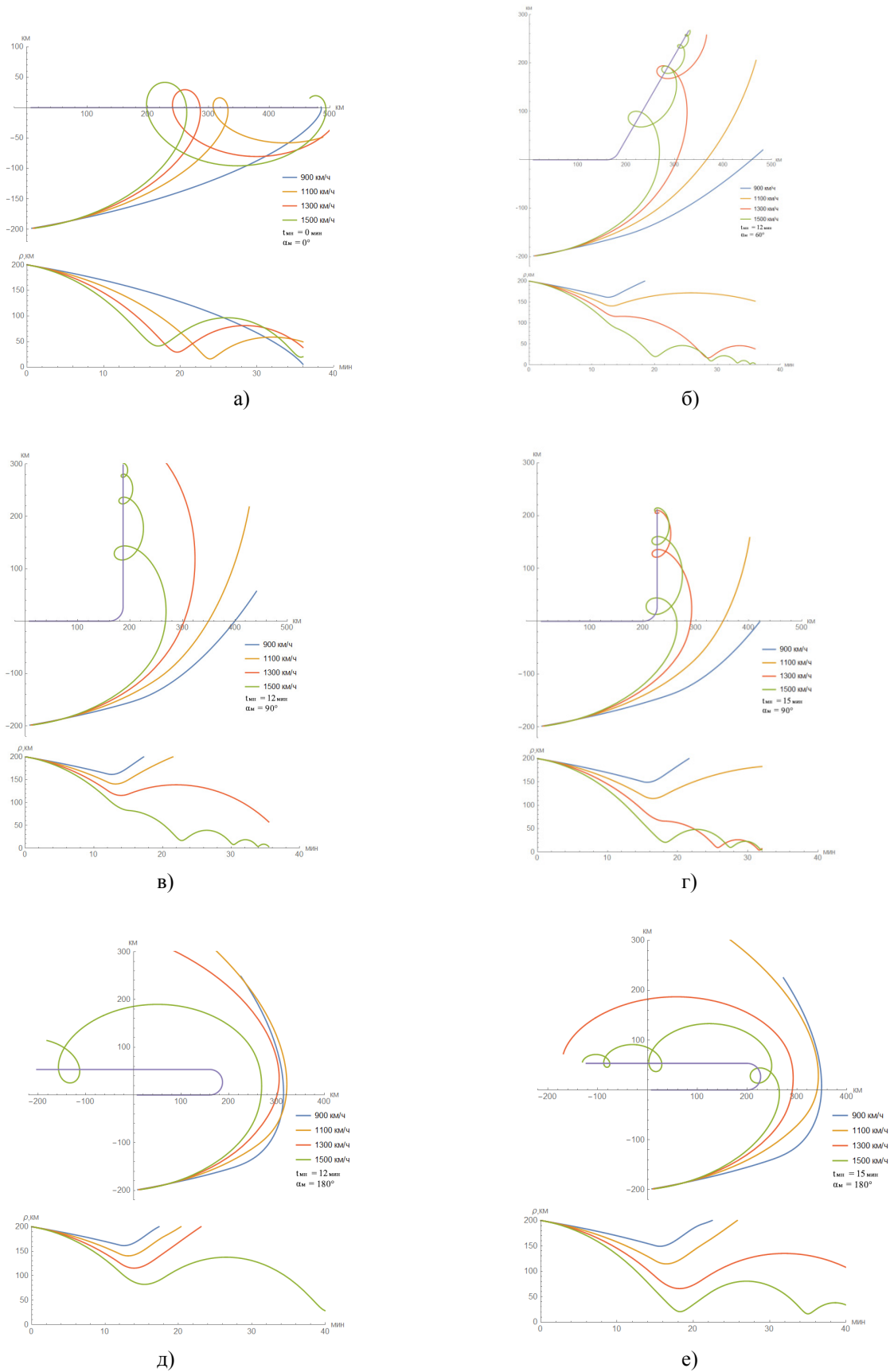
Первые два уравнения описывают скрытное движение ЛА, следующие три уравнения описывают движение самолета ДРЛО. В этой системе  $\psi$  – курсовой угол самолета ДРЛО, отсчитываемый от горизонтальной оси против часовой стрелки,  $\omega(t)$  – скорость вращения вектора скорости самолета ДРЛО при движении по окружности. Прямолинейному движению соответствует  $\omega(t) \equiv 0$ , а движению по окружности – постоянная угловая скорость разворота  $\omega \neq 0$ . Через  $x_1, x_2$  обозначены координаты ЛА, а через  $y_1, y_2$  – координаты самолета ДРЛО в прямоугольно земной системе координат. Постоянные скорости движения ЛА самолета ДРЛО обозначены через  $v$  и  $w$ .

### 4. Моделирование скрытного движения ЛА в зоне обнаружения РЛС маневрирующего самолета ДРЛО

Моделирование заключалось в численном решении системы дифференциальных уравнений (1) для различных траекторий движения самолета ДРЛО. Рассматривалось движение с постоянной скоростью  $w = 800$  км/ч по траекториям, состоящим из двух прямолинейных участков, соединенных дугой окружности.

Рассматривалось скрытное движение ЛА с постоянными скоростями равными 900, 1100, 1300 и 1500 км/ч и с постоянным углом  $\varepsilon$ . Для каждой скорости  $v$  ЛА угол  $\varepsilon$  выбирался так, чтобы  $v \sin \varepsilon = v_{min}$ . Движения ЛА по скрытной траектории выполнялось из точки с координатами (0 км, -200 км).

Результаты моделирования иллюстрирует рис. 2



**Рис. 2.** Скрытые траектории сближения с самолетом ДРЛО, совершающим маневр, и графики изменения расстояния между ЛА и самолетом ДРЛО.

Каждому из шести вариантов маневра самолета ДРЛО на рис. 2 соответствует два графика. На первом из них (верхнем) представлены траектории скрытного сближения, соответствующие различным скоростям ЛА. На втором (нижнем) изображены соответствующие графики изменения расстояния между ЛА и самолётом

Из приведенных на рис 2 данных видно, что увеличение скорости ЛА снижает влияние маневрирования самолета ДРЛО на траектории скрытного сближения.

Помимо скорости ЛА на траектории скрытного сближения заметное влияние оказывает момент начала маневра, отсчитываемый от момента начала сближения ЛА с самолетом ДРЛО. При развороте самолета ДРЛО на  $90^\circ$  это иллюстрируют скрытные траектории движения ЛА на рис. 2в) и 2г), а при развороте на  $180^\circ$  скрытные траектории на рис. 2д) и 2е). Эти результаты моделирования показывают, что чем позже начинается маневр самолета ДРЛО, тем меньше он влияет на скрытное сближение ЛА.

Еще одним фактором, влияющим на скрытные траектории, является угол изменения направления движения самолета ДРЛО. Рис. 2б) и в) свидетельствуют о том, что при скорости ЛА 1500 км/ч с увеличением этого угла с  $60^\circ$  до  $90^\circ$  время достижения первого локального минимума расстояния между ЛА и самолетом ДРЛО увеличивается с 20 до 30 минут. При скорости ЛА 1300 км/ч это время увеличивается еще больше.

## 5. Заключение

Выполненное моделирование выявило ряд факторов, влияющих на скрытное сближение ЛА с маневрирующим самолётом ДРЛО.

Во-первых, это величина угла, на который изменяется направление полета самолета ДРЛО в результате разворота. Изменение направления движения на углы более  $60^\circ$  в некоторых случаях могут привести к недопустимо большому увеличению времени сближения на требуемое расстояние.

Во-вторых, это задержка начала маневра самолета ДРЛО относительно момента начала скрытного сближения. Чем позднее начинается маневр, тем ближе ЛА может скрытно приблизиться к самолету ДРЛО.

В-третьих, это скорость полета ЛА по скрытной траектории. Скорости полета ЛА более 1000 км/ч позволяют парировать маневр самолета ДРЛО по курсу ценой более длительного скрытного сближения ЛА с самолетом ДРЛО на требуемое расстояние.

Кроме того, траектории скрытного сближения с самолетом ДРЛО зависит от положения ЛА относительно самолета ДРЛО в момент начала скрытного движения.

## Список литературы

1. Верба В.С. Авиационные комплексы радиолокационного дозора и наведения. Принципы построения, проблемы разработки и особенности функционирования. М.: Радиотехника, 2014, 528 С.
2. Long Maurice W. Airborne Early Radar Warning System Concepts. SciTech, 2004, 519 p.
3. Справочник по радиолокации. / В 2 книгах. Под редакцией М.И. Сколника. Пер. с англ. под общей ред. В.С. Вербы. В 2 книгах. Москва: Техносфера, 2014.
4. Кирсанов А.П. Траектории скрытного движения воздушного объекта в зоне обнаружения бортовой доплеровской радиолокационной станции // Автоматика и телемеханика 2014. № 9. С. 144-155.
5. Кирсанов А. П. Классификация траекторий скрытного движения воздушного объекта в зоне обнаружения бортовой доплеровской радиолокационной станции // Известия РАН. Теория и системы управления. 2020. № 4. DOI: 10.31857/S0002338820040095.
6. Гандурин В. А., Кирсанов А. П. Особенности зоны обнаружения низколетающих воздушных объектов доплеровской радиолокационной станции // Радиотехника, 2007. № 10. С. 42-46.