

## **МЕТОДИКА РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНОЙ ТРАЕКТОРИИ ПРОЛЕТА ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ ПО КРИТЕРИЮ МИНИМУМА ВЕРОЯТНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ**

С.П. Лещенко, М.П. Батурицкий, Д.Ю. Свистунов  
(Объединенный научно-исследовательский институт Вооруженных Сил, Харьков)

*Представлена методика автоматизированного расчета оптимальной траектории пролета воздушных объектов по критерию минимума вероятности обнаружения.*

***воздушный объект, оптимальная траектория, вероятность обнаружения***

**Постановка проблемы и анализ литературы.** Обеспечение скрытного преодоления авиацией радиолокационного поля, созданного совокупностью средств радиолокации противоборствующей стороны, является важной задачей, решаемой на этапе планирования воздушного удара. Существующим методикам выбора оптимальной траектории [1 – 3] присущи такие недостатки, как слабый учет статистических характеристик сигнала, отраженных от воздушных объектов (ВО). В используемых методиках диаграмма обратного вторичного излучения (ДОВИ) воздушного объекта принимается постоянной для всех ракурсов полета, что может привести к значительному изменению показателей качества обнаружения.

Таким образом, в настоящее время актуальной задачей является разработка методики расчета оптимальной траектории полета ВО, которая наиболее полно учитывала бы реальные физические процессы радиолокации объектов.

При поиске оптимальной трассы полета необходимо решить противоречивую задачу. С одной стороны необходимо минимизировать вероятность обнаружения  $D$  ВО в каждой точке трассы, с другой – сократить до минимума полетное время. Понятно, что оптимальная только по полетному времени трасса – это прямая (или дуга большого круга для больших расстояний). Но эта трасса не обеспечивает минимизации вероятности обнаружения. Оптимальная по минимуму вероятности обнаружения трасса, которая может существенно отличаться от прямой и иметь неприемлемое для практики полетное время. Для разрешения этого противоречия, в качестве критерия оптимизации оказывается целесообразным использовать интеграл от вероятности обнаружения  $D$  по полетному времени  $t$  :

$$a = \int_{t_0}^{t_{\text{кон}}} D(t) dt, \quad (1)$$

где  $a$  – критерий оптимизации;  $t_0, t_{\text{кон}}$  – полетное время в начале и конце траектории, подлежащей оптимизации.

Кроме вероятности обнаружения в выражении (1) можно использовать связанные с ней вероятность завязки трассы и вероятность существования трассы (коэффициент проводки) [4].

В качестве исходного метода расчета траектории полета выберем оптимизационный метод динамического программирования Р. Белмана [1], поскольку характерной задачей, которая решается с его помощью, является поиск оптимального пути между двумя точками. Для этого строится прямоугольная сеть точек и каждой прямой, соединяющей два соседних узла сети, ставится в соответствие свой вес. Оптимальным считается тот путь, сумма составляющих весов которого будет минимальной. Метод определяет, что если для произвольной точки найдено оптимальное значение (сумма весов), то не имеет значения, из какой точки осуществился последний переход. Следующей точкой может стать любая соседняя.

Особенностью задачи поиска оптимальной трассы пролета ВО является то, что вероятность обнаружения объекта зависит как от его координат, так и от его ракурса относительно средств радиолокации. Кроме того, на ВО накладываются ограничения по величине перегрузки во время выполнения маневра. Учет указанных особенностей может быть осуществлен путем модификации взятого за основу оптимизационного метода Р. Беллмана.

Таким образом, задача состоит в том, чтобы рассчитать такую траекторию полета ВО, в каждой точке которой обеспечивается минимизация параметра  $a$ . При этом необходимо соблюдать ограничения на перегрузку ВО. Параметр оптимизации трассы должен быть рассчитан с учетом особенностей радиолокации ВО. Последнее условие требует для каждого ВО знания диаграммы обратного вторичного излучения (ДОВИ) и ГТХ РЛС группировки.

**Изложение основного материала.** Предлагаемая методика расчета оптимальной траектории пролета воздушных объектов состоит в последовательном выполнении следующих этапов.

**1. Построение сети точек.** Сеть строится таким образом, чтобы узловые точки были расположены на концентрических окружностях (волнах), центром которых является начальная точка траектории. Относительно направления "начальная точка – конечная точка" задается коридор, в пределах которого разрешен полет ВО, что исключает возмож-

ность облета всей совокупности средств радиолокации за пределами зоны радиовидимости. В методике используется прямоугольная система координат, оси которой соответствуют географическим координатам.

**2. Расчет весовых коэффициентов узловых точек сети.** Порядок перебора точек осуществляется в соответствии с волновым алгоритмом трассировки [1]. Начиная с начальной точки траектории (волны с нулевым радиусом и одним узлом) производится последовательный перебор всех волн. Для каждого узла анализируемой (текущей) волны (точка А, рис. 1) происходит перебор тех ракурсов  $d$ , под которыми в этот узел было попадание ВО на одной из предыдущих итераций. Таким образом, происходит исключение "незадействованных" ракурсов. Например, если за все предыдущие итерации в точку А под определенным ракурсом  $d_z$  не было попаданий, то этот ракурс не будет принимать участие в дальнейшем анализе. Ракурс  $d_z$  становится "незадействованным" для точки А. Начальная точка траектории является исключением, и для нее производится расчет всех ракурсов. Для каждого из задействованных ракурсов строятся возможные участки полета до всех узлов (точка В, рис. 1), находящихся ближе некоторого расстояния  $R$ . Рассчитывается ракурс на конце участка  $f$ , перегрузка и время  $t$ , необходимые для совершения маневра при пролете этого участка. Если необходимая перегрузка оказалась выше располагаемой для выбранного типа ВО, то происходит переход к следующему узлу, являющемуся концом участка пролета. В противном случае вычисляется интегральная (для совокупности средств радиолокации) вероятность обнаружения  $P_{B,f}$  для точки В (рис. 1) с учетом текущего ракурса:

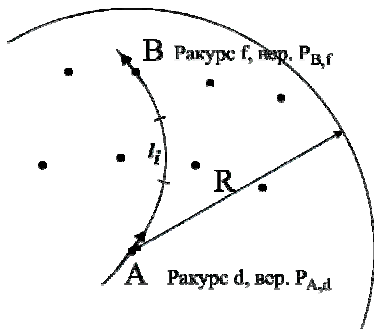


Рис. 1. Расчет оптимальной трассы

$$P_{B,f} = P_{A,d} + t \sum_{i=1}^N p_i, \quad (2)$$

где  $P_{A,d}$  – интегральная вероятность обнаружения для точки А при текущем ракурсе  $d$ ;  $p_i$  – полная вероятность обнаружения для  $i$ -го элементарного участка;  $N$  – количество элементарных участков отрезка пути АВ.

Вероятность  $p_i$  определяется из соотношения для суммы вероятностей

$$p_i = 1 - \prod_{j=1}^M (1 - p_{i,j}), \quad (3)$$

где  $p_{i,j}$  – вероятность обнаружения ВО  $j$ -м средством радиолокации на  $i$ -м участке;  $M$  – количество средств радиолокации, участвующих в расчете.

Расчет  $p_{i,j}$  осуществляется по методике, изложенной в [5]. При малых размерах элементарного участка  $i$  вместо  $p_{i,j}$  может быть взята вероятность обнаружения для любой точки, находящейся внутри этого участка.

Если в точку  $B$  под ракурсом  $f$  не было попаданий, этому ракурсу ставится в соответствие значение  $P_{B,f}$ . Если было, то записанное ранее значение сравнивается с рассчитанным  $P_{B,f}$  и оставляется меньшее из них. Для упрощения выделения оптимальной трассы при окончании перебора всех узлов на всех окружностях, при изменении значения  $P_{B,f}$  на новое меньшее, следует запомнить комбинацию точки и ракурса, из которой был получен минимум вероятности для ракурса  $f$ . После перебора всех ракурсов  $d$  для точки  $A$  осуществляется переход к следующему узлу на текущей волне. При переборе всех узлов волны текущей становится следующая волна. Так происходит до тех пор, пока не будет пройдена предпоследняя волна.

**3. Выявление оптимальной траектории пролета.** Находится узел на последней волне, расположенный наиболее близко к конечной точке траектории. Для этого узла находится ракурс с наименьшим интегральным значением вероятности. Поскольку при записи нового значения предыдущая точка и ракурс были сохранены, то осуществляется переход к соответствующему ракурсу этой точки. Аналогично осуществляется следующая итерация. Итерационная процедура заканчивается при достижении начальной точки траектории. Вместе с этим будет выделена оптимальная траектория пролета.

При выборе параметра  $R$  необходимо исходить из условий, чтобы круг с центром в точке  $A$  и радиусом  $R$  (рис. 2) охватывал узлы с нескольких соседних волн. Если при расчете использовать только соседние

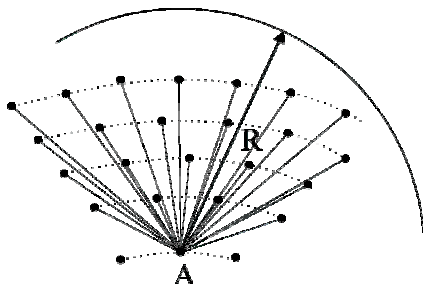


Рис. 2. Выбор параметра  $R$

точки (параметр  $R$  равен расстоянию между соседними волнами), то будет существовать всего 6 (или 8, если использовать все точки прямоугольной сети) возможных переходов. Соответственно, для выбора ракурса будет использоваться столько же отсчетов. Аппроксимация же диаграммы обратного вторичного излучения

ВО всего 6-ю (8-ю) точками является грубой, и для расчетов недостаточна. Использование узлов не только соседних волн, но и нескольких последующих значительно повышает количество отсчетов, что повышает

достоверность результата. Однако параметр  $R$  не стоит выбирать и слишком большим, поскольку значительно возрастет время счета.

Дальнейший расчет осуществлялся для самолетов трех типов (F-15, МиГ-21, F-117), радиолокационные характеристики которых рассчитывались в соответствии с методами, изложенными в [6, 7]. Рассчитанная по методике [5] зависимость дальности обнаружения выбранных целей в свободном пространстве от ракурса наблюдения приведена на рис. 3.

На рис. 4 представлены рассчитанные траектории полета различных ВО относительно группы радиолокаторов. Кроме самих траекторий на рис. 4 интенсивностью черного изображено поле вероятности обнаружения для каждой точки на высоте полета ВО.

Поскольку заранее ракурс полета был неизвестен, то при расчете поля ракурс принимался нулевым. Считается, что все РЛС работают с включенной системой СДЦ до дальности 70 км.

Для расчета выбрана нормальная коническая проекция [8]. Исходная точка находится в нижней части рисунков, конечная – в верхней. Линии, их соединяющие, представляют "исходную" и "оптимальную" траектории. Под "исходной" траекторией подразумевается полет по кратчайшему расстоянию. Для F-15 и МиГ-21 скорость полета выбрана 500 м/сек, а для F-117 – 250 м/сек. Высота полета ВО составляет 1 км. Зависимость рассчитана для РЛС, у которой рабочая длина волны равна 10 см., дальность обнаружения цели, имеющей ЭПР  $2,5\text{ м}^2$ , составляет 200 км. Вероятности правильного обнаружения и ложных тревог равны соответственно  $D = 0,5$  и  $F = 10^{-6}$ . Кривые (рис. 4) соответствуют  $F = 10^{-4}$ . Для истребителя F-15 оптимальная трасса (рис. 4, а) проходит через одну позицию РЛС. Это противоречит устоявшемуся суждению о необходимости огибать точки стояния радиолокационных средств. Однако, огибание зачастую подразумевает полет под бортовыми ракурсами к радиолокатору, что значительно повышает вероятность обнаружения и приводит к увеличению параметра оптимизации.

При построении оптимальной траектории целесообразно как можно меньше иметь бортовой ракурс к тем РЛС, в зоне обнаружения которых

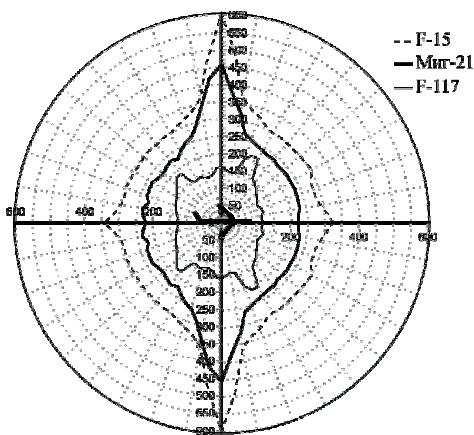


Рис. 3. Зависимость дальности обнаружения от ракурса полета

проходит полет. Если не учитывать зависимость характеристик обнаружения от ракурса и считать ДОВИ изотропной, то оптимальные траектории будут проходить с огибанием позиций средств радиолокации (рис. 4, б).

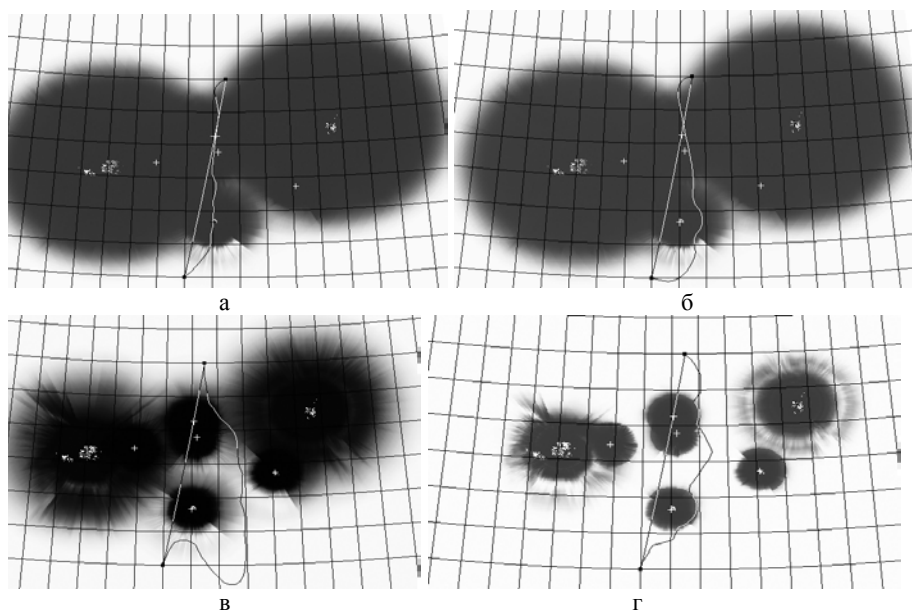


Рис. 4. Оптимальные и исходные траектории: а – F-15; б – F-15 (медианное значение ЭПР); в – МиГ-21; г - F-117

В некоторых случаях результаты расчетов могут значительно отличаться от случая, рассмотренного выше, например для истребителя МиГ-21 (рис. 4, в). Вираз в начале полета объясняется необходимостью минимизировать время полета под бортовым ракурсом относительно ближайшего средства радиолокации. Оптимальная траектория истребителя МиГ-21 состоит из нескольких участков. Первый участок – заход с направления наибольшего угла закрытия к радиолокатору (маневр вначале полета). Второй участок – радиальный полет по дальней границе работы системы ЧПВ. Поскольку при этом радиальная скорость близка к нулю, то работа системы ЧПВ обеспечивает минимальную вероятность обнаружения. После происходит полет по прямой, и в конце пути происходит вираз для выхода из зоны обнаружения РЛС.

**Выводы.** Моделирование показало, что если группа радиолокаторов создает поле, не имеющее "коридоров", по которым можно пролететь до точки назначения, и при этом вероятность обнаружения во всех точках этого поля высока, то оптимальная траектория зачастую не отли-

чается от траектории, проложенной по критерию наименьшего расстояния. Если маневр не приводит к значительному уменьшению вероятности обнаружения, то условие наименьшей интегральной вероятности обеспечивается наименьшим временем нахождения ВО на этом участке пути. Это объясняется тем, что время, затраченное на маневр, в конечном итоге приведет к повышению интегрального показателя, который стремятся минимизировать. Таким образом, осуществляется приближение оптимального пути к наименьшему.

Траекторию полета ВО, ЭПР которых сравнительно небольшие, целесообразно прокладывать в пределах "коридоров", характеризующихся минимальными значениями вероятности обнаружения. При этом необходимо минимизировать полет под бортовым ракурсом к ближайшим радиолокаторам. Моделирование показало, что в некоторых случаях оптимальной будет трасса, проходящая непосредственно через точку стояния РЛС.

Для воздушных объектов, выполненных по технологии STEALTH, почти всегда существуют "коридоры", в пределах которых вероятность обнаружения мала. Полет осуществляется по этим коридорам, но с условием минимизации тех ракурсов полета, для которых дальность обнаружения максимальна. Именно этим объясняется ломаный характер оптимальной траектории для истребителя F-117 (рис. 4, г).

Количественные результаты расчета приведены на рис. 5.

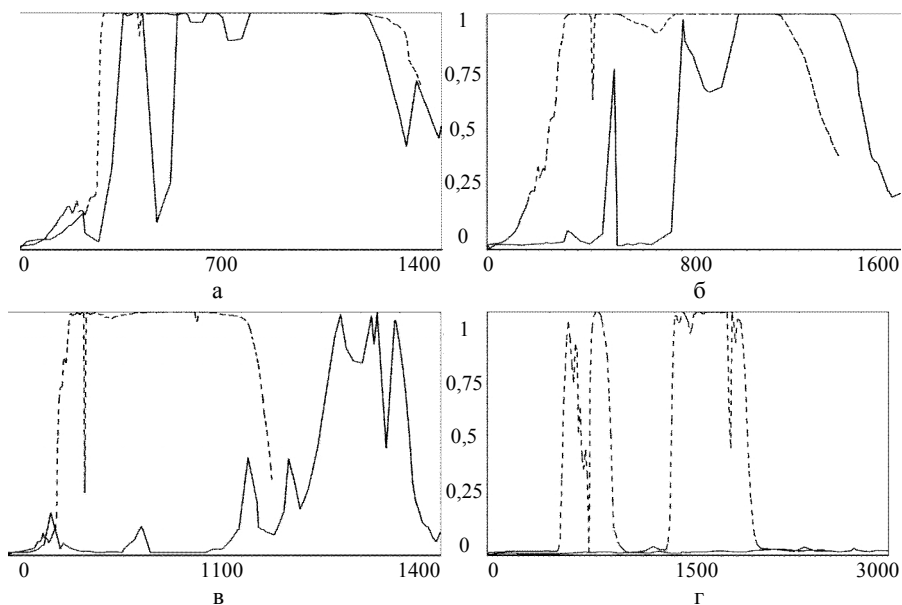


Рис. 5. Зависимость вероятности обнаружения от времени полета: а – F-15; б – F-15 (медианное значение ЭПР); в – Mig-21; г – F-117

Кривые описывают изменение мгновенных значений полной вероятности обнаружения (совокупностью средств радиолокации) во время полета. Каждый график содержит информацию об исходной и оптимальной траектории. Из графика видно, что полет по оптимальной траектории требует большего времени, но интегральная вероятность всегда меньше, чем под кривой, соответствующей кратчайшей траектории.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Седых В.И., Богданов В.И., Болотов В.П. Формализация и решение оптимизационных задач динамического программирования в системе "ВЕКТОР". – [Электр. ресурс]. – Режим доступа: <http://www.dvgtm.vld.ru/Sbornik/Bogdan1.htm>.
2. Вонг Дж. Теория наземных транспортных средств. – М.: Машиностроение, 1982. – 284 с.
3. Курейчик В.М. Математическое обеспечение конструкторского и технологического проектирования с применением САПР. – М.: Радио и связь, 1990. – 384 с.
4. Леценко С.П., Батурицкий М.П. Расчет вероятностных показателей радиолокационного наблюдения воздушных объектов с учетом особенностей их конструкции, параметров полета и влияния рельефа местности // Збірник наукових праць інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова. – К.: ИПМЕ. – 2004. – Вип. 25. – С. 120 – 127.
5. Леценко С.П., Батурицкий М.П. Расчет показателей качества обнаружения воздушных целей с учетом особенностей их конструкции и параметров полета // Збірник наукових праць ХВУ. – Х.: ХВУ. – 2004. – Вип. 2 (49). – С. 94 – 96.
6. Computer Simulation of Aerial Target Radar Scattering, Recognition, Detection, and Tracking / Y.D. Shirman, S.A. Gorshkov, S.P. Leshchenko, V.M. Orlenko, S.Y. Sedyshev, O.I. Sukharevskiy / Y.D. Shirman editor. – Boston – London: Artech house, 2002. – 294 p.
7. Сухаревский О.И., Василець В.О. Горелишев С.А. Нечитайло С.В. Ткачук К.И. Эффективная поверхность рассеяния (ЭПР) объектов с неидеально отражающей поверхностью, имеющей изломы // Зарубежная радиоэлектроника. – 2001. – № 6. – С. 41 – 48.
8. Справочник геодезиста. В 2-х книгах. Кн. 1 / Под ред. В.Д. Большакова и Г.П. Левчука. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1985. – 440 с.

Поступила 2.03.2005

**Рецензент:** доктор технических наук, профессор О.Н. Фоменко,  
Харьковский университет Воздушных Сил.