

МОДЕЛЬ ПОИСКА ПОДВИЖНОГО ОБЪЕКТА С ПОМОЩЬЮ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

В.А. Фурлет, Р.Р. Шакиров
(представил проф. В.А. Прокопов)

Рассматривается модель проведения поиска подвижного объекта с использованием разведывательного летательного аппарата с учетом подвижности объекта поиска.

Постановка проблемы. Анализ опыта войн и вооруженных конфликтов конца XX и начала XXI веков позволяет сделать вывод о том, что в современных условиях захват стратегической инициативы и успех военной кампании могут быть достигнуты только в результате активных и решительных действий в воздухе и с воздуха. В настоящее время Военно-воздушные Силы (ВВС) превратились в универсальное, мощное, высокоманевренное и эффективное средство вооруженной борьбы.

Сложившаяся военно-политическая обстановка обуславливает высокую вероятность развертывания обычной региональной борьбы, в которой ВВС должны быть готовы к выполнению широкого круга задач. Одной из таких задач будет воздушная разведка. Это связано, прежде всего, с тем, что для успешного ведения боевых действий требуется достоверная и своевременная информация о противнике. Воздушная разведка с использованием как пилотируемых, так и беспилотных летательных аппаратов способна быстро и качественно сформировать информацию о противнике и донести ее до потребителя. Качество проведения разведки, а также предполагаемый результат может быть спрогнозирован на основе моделирования процесса поиска. Рассмотрим одну из возможных моделей поиска (с применением летательного аппарата (ЛА)) в некотором районе с целью обнаружения в нем подвижного объекта противника (техника, боевое подразделение и др.).

Анализ исследований и публикаций. Подобные задачи решались ранее [1, 2, 5, 6], но при их решении не учитывалось влияние на величину вероятности обнаружения подвижных объектов некоторых случайных величин:

– размеры района поиска могут изменяться в достаточно широких пределах, соответственно изменяется площадь района поиска;

- скорость движения объекта является случайной величиной, которая зависит от большого количества случайных факторов (погодные, дорожные, климатические и другие условия);
- после обнаружения подвижный объект (ПО) должен быть идентифицирован (распознан), т.е. информация о ПО должна быть достоверной.

Постановка задачи. Рассмотрим следующую задачу. Подвижный объект находится в пределах района поиска (РП). Полагаем, что известно место положения РП. С целью обнаружения ПО организуется разведка РП с помощью летательного аппарата (ЛА). Необходимо определить вероятность обнаружения и идентификации ПО в зависимости от разведанной площади РП.

Предположим, что ПО может находиться в любой точке РП с одинаковой вероятностью, тогда вероятность его обнаружения к моменту времени, когда из общей площади РП разведке подверглась некоторая площадь S^* ($S^* \leq S_{РП}$), будет определяться формулой [1, 2]:

$$P(S^*) = \begin{cases} \frac{S^*}{S_{РП}} & (S^* < S_{РП}); \\ 1 & (S^* \leq S_{РП}). \end{cases} \quad (1)$$

Для определения вероятности обнаружения и идентификации ПО воспользуемся моделью поиска, которая представлена в [2], но учтем случайность размеров района поиска, а также возможной скорости движения подвижного объекта. Вся площадь РП будет полностью просмотрена одним наблюдателем (разведчиком), если он будет двигаться по маршруту поиска (назовем его челночным маршрутом), который показан на рис. 1. Причем полосы обзора разведчика должны прилегать одна к другой, а ширина полосы обзора $R_{обз}$ зависит от характеристик аппаратуры, с помощью которой ведется разведка. Будем считать, что если ПО попадает в полосу разведки, то он будет обнаружен и распознан с некоторой вероятностью $R_{расп}$.

ПО в пределах РП может совершать перемещения с целью активного противодействия разведке. Скорость ПО при этом – $V_{по}$, скорость полета разведывательного ЛА во время ведения разведки – V_p . Необходимо определить вероятность обнаружения ПО – $R_{обн}$, находящегося в пределах РП.

Для решения поставленной задачи сделаем следующие допущения:

- место положения ПО во время ведения разведки равновероятно по всей площади РП;
- РП имеет форму прямоугольника с площадью $S_{РП}$ [км²], где $L_{РП}$ и $M_{РП}$ – линейные размеры прямоугольника по длине и ширине;

– ПО во время перемещения не покидает пределы РП;

– увеличение разведанной площади РП увеличивает вероятность обнаружения ПО в пределах РП.

Согласно сделанным допущениям, разведка ведется по маршруту поиска со строго параллельными участками так, что непросматриваемых зон между участками маршрута разведки не остается. Учитывая, что место положения ПО в РП заранее неизвестно, а также неизвестно направление его движения, то факт подвижности ПО не меняет утверждения о том, что ПО может оказаться в любой точке РП с равной вероятностью. Случайные перемещения ПО в пределах РП могут привести к тому, что во время разведки ПО может сместиться таким образом, что окажется в области (обозначим ее S^*), которая была уже полностью разведана.

Размеры РП есть случайные величины, которые могут изменяться в задаваемых руководящими документами пределах $[M_{\min}; M_{\max}]$ и $[L_{\min}; L_{\max}]$ для ширины и длины соответственно.

Так как заранее неизвестно, какими будут линейные размеры конкретного РП, то будем предполагать, что случайные величины $L_{РП}$ и $M_{РП}$ подчиняются равномерному закону распределения на указанных интервалах. В этом случае площадь РП будет определяться случайной величиной, принадлежащей интервалу наиболее вероятных значений [3, 4]:

$$S_{РП} \in [M[S_{РП}] - 3\sigma_{S_{РП}}; M[S_{РП}] + 3\sigma_{S_{РП}}], \quad (2)$$

где $M[S_{РП}]$ – математическое ожидание случайной величины площади РП, которое определяется, как произведение независимых случайных величин длины и ширины РП; $\sigma_{S_{РП}}$ – среднеквадратическое отклонение случайной величины площади РП.

Во время проведения разведки РП, существуют зоны (они заштрихованы на рис. 1), в которые может уйти от разведки ПО. Ширина d каждой из этих зон определяется возможной скоростью движения ПО при уходе от разведки и временем, которое необходимо разведывательному ЛА для разведки одной полосы разведки. Суммарная площадь этих зон

$$S_3 = nS_{I_3}, \quad (3)$$

где S_{I_3} – площадь одной заштрихованной зоны; n – количество параллельных пролетов разведывательного БПЛА.

Количество параллельных пролетов разведчика на разведывательном маршруте, необходимое для полной разведки РП, равно

$$n = [M[M_{РП}]/R_{обз}] + 1, \quad (4)$$

где $[M[M_{РП}]/R_{обз}]$ – целая часть отношения одного из линейных размеров РП (в данном случае – ширины) и ширины полосы обзора. Следует заметить, что количество полос разведки берется с избытком для того, чтобы РП был достоверно разведан полностью.

Так как размеры РП являются случайными величинами, то логично предположить, что количество полос разведки n также случайно и зависит (при $R_{обз} = \text{const}$) от одного из линейных размеров РП.

В процессе ведения разведки вероятность обнаружения ПО в пределах РП изменяется в зависимости от увеличения S^* , т.е. имеем

$$\frac{dP}{1-P} = \frac{dS^*}{S},$$

где dS^* – приращение площади разведки; S – площадь, в пределах которой еще может находиться ПО; $1 - P$ – вероятность того, что на уже разведанной площади РП ПО не будет обнаружен.

Если ПО случайно окажется в точке, лежащей на границе полос разведки, то лишь с вероятностью 0,5 дальнейшее движение ПО приведет к тому, что он окажется за пределами разведываемой полосы; среднее расстояние, на которое он проникнет за пределы разведываемой полосы за время dt согласно [2], равняется

$$\frac{V_{ПО} dt}{2} \int_0^{\pi} \sin \theta d\theta = \frac{V_{ПО} dL_p}{V_p} = \frac{V_{ПО} dS^*}{V_p R_{обз}}, \quad (5)$$

где dL_p – расстояние, пройденное разведчиком за время dt ; θ – угол между направлениями движения разведывательного ЛА и ПО. В случае движения разведчика по челночному маршруту суммарная площадь зон, в которые может уйти от разведки ПО, равна (с учетом выражений (3) и (5)):

$$S_3 = nS_{I3} = \frac{S_{РП}(L_{РП} - R_{обз})}{2R_{обз}} \frac{V_{ПО}}{V_p} = S_{РП}\mu, \quad (6)$$

где $\mu = \frac{(L_{РП} - R_{обз})}{2R_{обз}} \frac{V_{ПО}}{V_p}$ – коэффициент пропорциональности.

Для вероятностной оценки величины S_3 , перейдем к математическим ожиданиям случайных величин, входящих в выражение (6), получаем

$$M[S_3] = \frac{M[S_{РП}](M[L_{РП}] - R_{обз})}{2R_{обз}} \frac{M[V_{ПО}]}{V_p}. \quad (7)$$

На момент времени, когда разведке подверглась некоторая часть площади РП (S^*), площадь, на которой еще может находиться ПО, будет определяться следующим равенством

$$S(t_p, V_{\text{ПО}}, V_p) = S_p - (1 - \mu)S^*, \quad (8)$$

где $S^*(t_p) = V_p R_{\text{обз}} t_p$ – площадь РП, разведанная разведчиком за время t_p .

Подставив полученное выражение для S в уравнение (*), получаем

$$\frac{dP}{1 - P} = \frac{dS^*}{S_{\text{РП}} - (1 - \mu)S^*},$$

или, проинтегрировав, получаем

$$P(S^*) = 1 - \left[1 - (1 - \mu) \left(S^* / S_{\text{РП}} \right) \right]^{1/(1 - \mu)}. \quad (9)$$

Данная формула справедлива в случае, если μ есть малая величина, т.е. выполняется следующее условие (см. выражение (6)):

$$M[V_{\text{ПО}}] \ll V_p, \quad \mu < 1.$$

Очевидно, что когда разведан весь РП, т.е. $S^* = S$, (9) примет вид

$$P(S^*) = P(\mu) = 1 - \mu^{1/(1 - \mu)}. \quad (10)$$

Значения вероятности $P(S^*)$ для различных значений параметра μ представлены в табл. 1 [2]:

Таблица 1

Вероятность обнаружения объекта при заданном μ

μ	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25
$P(S^*)$	1,000	0,957	0,923	0,893	0,866	0,843

За время совершения движения ПО РП может быть разведан несколько раз. Общее время однократной разведки РП одним разведчиком, с учетом выражения (4), будет равно

$$M[t_p] = M[t_{p1}]n = \frac{M[L_{\text{РП}}]}{V_p} \left(\left[\frac{M[M_{\text{РП}}]}{R_{\text{обз}}} \right] + 1 \right) = \frac{M[S_{\text{РП}}]}{V_p R_{\text{обз}}} + \frac{M[L_{\text{РП}}]}{V_p}, \quad (11)$$

где $M[t_{p1}]$ – математическое ожидание времени разведки одной полосы.

Исходя из предположений, сделанных вначале, вероятность обнаружения ПО будет определяться формулой

$$P_{\text{обн}} = P(S^*)P_{\text{расп}}, \quad (12)$$

где $P_{\text{расп}}$ – вероятность распознавания обнаруженного объекта.

Согласно [5, 6], для случая одновременного ведения разведки несколькими разведчиками (или при неоднократной разведке РП), вероятность обнаружения ПО в РП будет определяться выражением

$$P_{\text{обн}}(N_p, P_{\text{обн1}}) = 1 - (1 - P_{\text{обн1}})^{N_p}, \quad (13)$$

где $P_{\text{обн1}}$ – вероятность обнаружения ПО одним средством разведки; $P_{\text{обн}}(N_p, P_{\text{обн1}})$ – вероятность обнаружения ПО N_p независимыми разведчиками, или вероятность обнаружения ПО во время движения при N_p разведках РП.

В случае, когда ПО неподвижен, параметр μ будет равен нулю, так как величина скорости ПО будет равна нулю (выражения (6) и (7)). Тогда вероятность обнаружения объекта, зависящая от разведанной площади, $P(S^*) = 1$ и, следовательно, получим

$$P_{\text{обн}} = P(S^*)P_{\text{расп}} = P_{\text{расп}}. \quad (14)$$

Выводы. Таким образом, полученная модель разведки РП ЛА позволяет определить вероятность обнаружения ПО (группы ПО) в одном из возможных состояний выполнения боевой задачи. В случае если ПО в момент разведки неподвижен, то вероятность его обнаружения зависит от того, насколько хорошо замаскирован ПО.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горбунов В.А. Эффективность обнаружения целей. – М.: Воениздат, 1980. – 217 с.
2. Исследование операций. Т. 1 / Под ред. Дж. Муудера, С. Элмаграби. – М.: Мир, 1981. – 712 с.
3. Бильчук В.М., Петров В.А. Прикладная математика. – Х.: ХВВКИУ РВ, 1986. – 336 с.
4. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Физматгиз, 1958. – 460 с.
5. Афанасьев А.А., Горбунов В.А. Эффективность обнаружения целей радиотехническими средствами наблюдения. – М.: Воениздат, 1964. – 123 с.
6. Абчук В.А., Суздаль В.Г. Поиск объектов. – М.: Сов. радио, 1977. – 336 с.

Поступила 29.08.2003

ФУРЛЕТ Валерий Анатольевич, старший научный сотрудник НИЛ Харьковского института ВВС. В 1992 году окончил Харьковское Высшее военное командно-инженерное училище Ракетных Войск. Область научных интересов – моделирование боевых действий.

ШАКИРОВ Радик Ринатович, начальник НИЛ Харьковского института Военно-воздушных Сил. В 1993 году окончил Харьковское училище летчиков. Область научных интересов – моделирование боевых действий.