

УДК 355.7

С.М. Звиглянич, М.П. Изюмский, В.В. Федченко

## ОБОСНОВАНИЕ МОДЕЛИ ВЫБОРА ПРОФИЛЯ ПОЛЕТА БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

*Рассмотрен подход определения профиля полета беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). С учетом того, что на профиль полета оказывает влияние значительное количество факторов, при построении модели предлагается использовать метод имитационного моделирования.*

### Постановка проблемы в общем виде

Опыт современных вооруженных конфликтов [1] дает основание сделать вывод о широком использовании разведывательных комплексов с управляемыми беспилотными летательными аппаратами (БПЛА). Данные комплексы предназначены обеспечить командира воздушной разведывательной информацией о текущей обстановке в зоне его ответственности [2].

Основными недостатками БПЛА являются относительно низкие скорость и высота полета, и как следствие, слабая защищенность от зенитного огня. За 79 суток операции в Косово в 1999 году потери НАТО составили около 20...30 БПЛА. Следует отметить, что относительно высокие потери при интенсивном применении БПЛА в совокупности с достаточной высокой ценой ощутимы не только для государств с небольшим военным бюджетом. Так, например, убытки Великобритании в Косово от потерь 12 БПЛА «Phoenix» были оценены в 3,5 млн. фунтов стерлингов [3].

Учитывая сказанное выше, можно констатировать, что существует проблема повышения живучести БПЛА. Рассмотрим один аспект этой проблемы, на наш взгляд наиболее важный – повышение живучести БПЛА в условиях применения в зоне действия средств ПВО противника.

### Анализ последних исследований и публикаций

В предлагаемой имитационной модели по сути моделируются два процесса: процесс полета БПЛА и процесс его поражения средствами ПВО. В качестве средств ПВО рассматриваются ЗРК. Как правило, полет летательных аппаратов в пространстве описывается дифференциальными уравнениями движения [4]. Такой подход требует реализации непрерывного течения модельного времени, что приводит к значительным вычислительным трудностям при построении модели. С учетом требуемой точности в создаваемой имитационной модели допустимо перейти к дискретному изменению модельного времени с некоторым шагом, соизмеримым с рассматриваемыми процессами. Широко применяемые аналитические зависимости для определения факта по-

ражения воздушных целей дают хорошие результаты при довольно высоком уровне абстракции, когда рассматриваются варианты противодействия группировки средств ПВО массированному применению авиации [5]. В рассматриваемом случае предпочтительней перейти от аналитической модели к имитационной. Такой подход позволит наиболее полно учесть все особенности полета БПЛА, а также технические характеристики конкретных ЗРК с привязкой последних на местности.

**Цель статьи** – обоснование метода построения имитационной модели выбора профиля полета БПЛА.

### Обобщенное теоретическое решение задачи

В качестве показателя эффективности действий БПЛА целесообразно выбрать вероятность его поражения средствами ПВО. Если считать заданными летные характеристики БПЛА и ТТХ средств ПВО с учетом конкретного их расположения на местности, то основное влияние на вероятность поражения будет оказывать профиль полета БПЛА.

Профиль полета должен выбираться таким образом, чтобы естественные предметы местности затрудняли обнаружение и поражение БПЛА. Основным фактором, влияющим на показатель эффективности, выступают высоты рельефа. Обеспечить наглядность процесса формирования профиля полета БПЛА может применение цифровых карт местности (ЦКМ).

Отметим, что учет всех факторов, влияющих на вероятность поражения БПЛА при его полете, аналитически представляется сложной задачей. Поэтому при построении модели выбора профиля полета БПЛА предлагается использовать метод статистического моделирования.

С учетом координат ЗРК и цели (объекта разведки) построим трехмерное изображение района противника. Введем относительную систему координат, совмещенную с точкой старта БПЛА. Траектория БПЛА аппроксимируется линейными сплайнами. Начало  $n$ -го сплайна определяется координатами  $X_n$ ,  $Y_n$ ,  $Z_n$ . Задается скорость БПЛА  $V$ , направление движения (азимут)  $\alpha$ , угол места  $\varepsilon$ , время  $T$  до достижения которого  $V$ ,  $\alpha$ ,  $\varepsilon$  не изменяются.

Модельное время изменяется с некоторым задаваемым шагом  $\Delta t$ . Тогда положению БПЛА в пространстве соответствуют уравнения

$$\begin{aligned} X_{n+1} &= X_n + (V\Delta t)|\cos \varepsilon| \sin \alpha; \\ Y_{n+1} &= Y_n + (V\Delta t)|\cos \varepsilon| \cos \alpha; \\ Z_{n+1} &= Z_n + (V\Delta t) \sin \varepsilon. \end{aligned} \quad (1)$$

Зададим параметры ЗРК, определяющие его возможности по поражению воздушных целей [5]: *вероятность поражения цели* при наличии и отсутствии помех одной ракетой; *количество целевых каналов*: определяет число возможных целей, по которым ведется огонь; *количество ракетных каналов стрельбы* (для получения заданного значения вероятности уничтожения цели комплекс имеет 2 – 3 ракетных канала на один целевой); *время реакции* (*рабочее время*, интервал времени от начала обнаружения цели до готовности комплекса к удару).

*Зона поражения комплекса*. Отметим, что положение границ зоны поражения определяется большим количеством факторов, связанных с техническими характеристиками отдельных элементов комплекса и контура управления в целом, условиями стрельбы, характеристиками и параметрами движения воздушной цели. Условно зона поражения представлена на рис. 1. Положение дальней границы зоны поражения определяет потребную дальность действий

$$d_{\text{потр}} = d_d + V_{\text{ц}}(t_p + d_d/V_p),$$

где  $V_p$  – скорость ракеты;  $V_{\text{ц}}$  – скорость цели;  $t_p$  – время реакции.

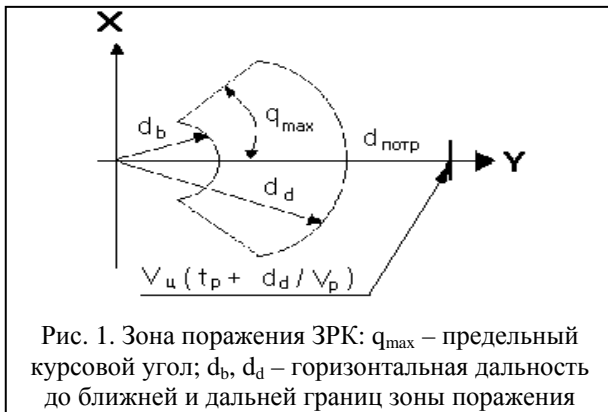


Рис. 1. Зона поражения ЗРК:  $q_{\text{max}}$  – предельный курсовой угол;  $d_b$ ,  $d_d$  – горизонтальная дальность до ближней и дальней границ зоны поражения

*Возможность обстрела цели* по балансу времени определяется выражением

$$T_{\text{подл.ij}} \geq t_{\text{цуйj}} + t_{p,i} + d_{bj}/V_{pj},$$

где  $T_{\text{подл.ij}}$  – подлетное время  $i$ -й цели до ближайшей границы зоны поражения  $j$ -го ЗРК;  $t_{\text{цуйj}}$  – время на подготовку огневой задачи по  $i$ -й цели  $j$ -му ЗРК.

Возможность поражения цели с учетом высоты определяется максимальной ( $H_{\text{max}}$ ) и минимальной ( $H_{\text{min}}$ ) высотами действия ЗРК.

Одной из важнейших характеристик, обеспечивающих выполнение боевой задачи по обнаружению, сопровождению и измерению координат цели является дальность действия.

Дальность действия в свободном пространстве для импульсных РЛС с совмещенными приемной и передающей антеннами [6] определяется выражением

$$D_0 = \sqrt[4]{P_u G_0^2 \lambda^2 \sigma_{\text{ц}} / ((4\pi)^3 P_{\text{прmin}} q K)}, \quad (2)$$

где  $P_u$  – импульсная мощность;  $G_0$  – коэффициент усиления антенны;  $\lambda$  – длина волны;  $\sigma_{\text{ц}}$  – эффективная отражающая поверхность цели;  $P_{\text{прmin}}$  – чувствительность приемника;  $q$  – параметр обнаружения;  $K$  – результирующий коэффициент потерь.

Коэффициент потерь  $K$  учитывает разного рода потери в передающем и приемном трактах РЛС:

$$K = \prod_{i=1} K_i,$$

где  $K_i$  – частичные коэффициенты, характеризующие потери в различных элементах РЛС.

Расчет коэффициентов потерь  $K_i$  является специфической задачей, учитывающей особенности каждой конкретной РЛС, однако для практических целей можно произвести приближенную количественную оценку этих коэффициентов и принять  $K = 3,14$ .

Параметр обнаружения  $q$  – безразмерное отношение энергии  $E$  полезного сигнала к спектральной плотности  $n_0$  помех:  $q = 2E/N_0$ .

Величина параметра обнаружения определяет все основные тактические характеристики РЛС, такие как дальность и вероятность обнаружения, вероятность ложной тревоги, точность измерения координат и др. При  $q = 1$  уравнение (1) дает возможность определить максимальную дальность обнаружения с вероятностью правильного обнаружения  $P_{\text{по}} \cong 0,5$ .

Дальность действия РЛС с учетом вероятности обнаружения может быть определена с помощью функции распределения вероятностей

$$P(D) = e^{-(D/D_0)^4}, \quad (3)$$

где  $D$  – текущее значение дальности, изменяющееся от 0 до  $D_{\text{max}}$ .

Сделаем математическую постановку задачи. Пусть целью операции есть проведение разведки с использованием БПЛА некоторого района, прикрываемого средствами ПВО. В качестве показателя эффективности ранее была определена вероятность поражения БПЛА. Тогда критерий операции – правило выбора такого профиля полета  $u^* \in U$ , при котором

$$P_p \leq P_{\text{тр}},$$

где  $U$  – множество допустимых профилей полета БПЛА;  $P_{\text{тр}}$  – допустимое значение вероятности поражения БПЛА.

Ограничениями выступают конкретная группировка ЗРК с заданными ТТХ и определенный район разведки с присущими ему геодезическими свойствами.

Опишем работу модели с использованием функциональной схемы (рис. 2). В первом блоке с учетом группировки ЗРК и ЦКМ строится трехмерное изображение района разведки. Далее во втором блоке формируется профиль полета БПЛА. Используя выражения (1), задается отрезок профиля полета для конкретного времени  $T$  в течение которого  $V$ ,  $\alpha$ ,  $\varepsilon$  не изменяются. После отображения на экране монитора отрезка профиля оператор делает заключение о правильности выбора  $V$ ,  $\alpha$ ,  $\varepsilon$ . Если положение отрезка профиля не соответствует предполагаемому маршруту, то оператор производит “откат”, т.е. возврат в предыдущее положение. Удовлетворяющие маршруту отрезки профиля заносятся в файл полета БПЛА в виде записей следующей структуры:  $\alpha$  – азимут;  $\varepsilon$  – угол места;  $V$  – скорость;  $T$  – время, до которого БПЛА летит с заданными  $\alpha$ ,  $\varepsilon$ ,  $V$ .

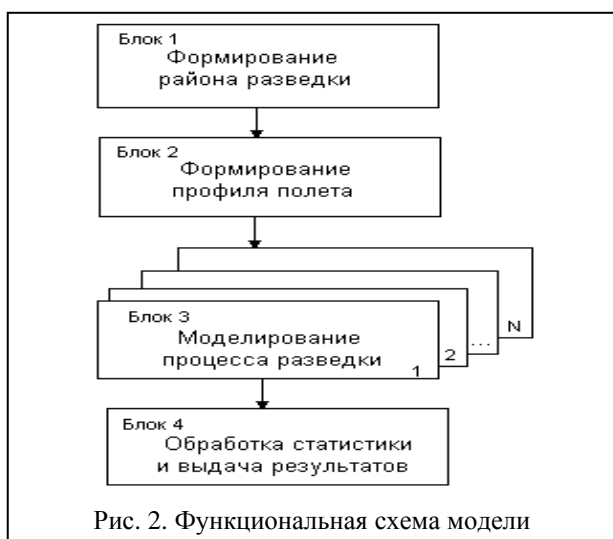


Рис. 2. Функциональная схема модели

Определив профиль полета БПЛА или нескольких БПЛА (для каждого БПЛА формируется свой файл полета), переходим к третьему блоку. В нем происходит непосредственно моделирование процесса проведения разведывательного полета БПЛА. Модельное время изменяется дискретно с задаваемым шагом  $\Delta t$ . Выбор шага изменения модельного времени обосновывается необходимой точностью моделирования. На каждом шаге модельного времени определяется положение в пространстве БПЛА (количество БПЛА определяется количеством файлов полета). Последовательно фиксируя заданные БПЛА, проверяется возможность каждого ЗРК начать прицеливание. Возможность обнаружения БПЛА обуславливается его ЭПР, ТТХ ЗРК и рельефом местности. Используя выражения (2), (3), определяется вероятность обнаружения БПЛА. Затем методом жребия [6] устанавливается факт его обнаружения. Если БПЛА обнаружен данным

ЗРК, то фиксируется текущее модельное время. Для БПЛА, по которым ведется прицеливание, проверяется интервал времени прицеливания. Если этот интервал превысил время реакции ЗРК и БПЛА не вышел из зоны поражения, то по нему данный ЗРК проводит пуск ракеты. С учетом количества ракетных каналов на один целевой методом жребия устанавливается факт поражения БПЛА. Обновление информации по движению БПЛА в пространстве (значения  $V$ ,  $\alpha$ ,  $\varepsilon$ ) производится путем считывания очередной записи файла полета при достижении модельным временем  $T$  значения текущего отрезка траектории. Окончание одной реализации определяется достижением модельным временем конца временного интервала моделирования. После выполнения заданного числа реализаций (число реализаций влияет на точность работы модели) управление передается в четвертый блок.

Отметим, что в данной статье оценка точности имитационной модели не рассматривается, но быстродействие современных вычислительных средств позволяет путем задания заведомо большого числа реализаций обеспечить требуемую точность работы модели.

В четвертом блоке на основе полученной статистики по количеству установленных фактов поражения для каждого БПЛА находится оценка вероятности его поражения средствами ПВО при выбранном профиле полета.

### Выводы

Обоснован метод построения имитационной модели выбора профиля полета БПЛА. В качестве показателя эффективности использования БПЛА выбрана вероятность его поражения средствами ПВО. Данный подход позволяет путем моделирования выбирать наиболее рациональные варианты применения БПЛА с учетом реально складывающейся оперативной обстановки в районе боевых действий.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ващинин И. Войны XXI века // Зарубежное военное обозрение. М. – 1998. – № 5, № 7. – С. 5 – 15, 7 – 14.
2. Лукашова Э.П. Беспилотники не выходят из пике // Независимое военное обозрение. – М. – 2000. – № 21. – С. 3.
3. Єрмошин М.О., Федай В.М. Боротьба в повітрі. – ХВУ, 2004. – 383 с.
4. Разоренов Г.В., Бахрамов Э.А., Титов Ю.Ф. Системы управления летательными аппаратами. – М.: Машиностроение, 2003. – 554 с.
5. Чуев Ю.В. Исследование операций в военном деле. – М.: Воениздат, 1970. – 256 с.
6. Ларичев О.И. Теория и методы принятия решений. – М.: Логос, 2002. – 392 с.

Поступила 07.12.2005

Рецензент: д-р воен. наук профессор И.О. Кириченко, Харьковский университет Воздушных Сил.