

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ БЕСПИЛОТНОГО АВИАЦИОННОГО КОМПЛЕКСА НА ЭТАПЕ НАВЕДЕНИЯ.

Лобатый А.А., Бенкафо А.С., Абуфанас А.С.

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь*  
*lobaty@tut.by*

За последние годы по всему миру значительно возрос интерес к беспилотным авиационным комплексам (БАК), что вызвано, в первую очередь, экономической целесообразностью использования беспилотной авиации для решения задач наблюдения и управления. БАК обладают по сравнению с пилотируемыми аппаратами того же назначения следующими преимуществами: низкой стоимостью изготовления и обслуживания, меньшим потреблением топлива, большим отношением полезной нагрузки к общей массе аппарата.

В настоящее время находят применение разнообразные БЛА от микро- и мини-БЛА ближнего радиуса действия весом до 5 кг и дальностью полета около 25 – 40 км до тяжелых летательных аппаратов весом более 1500 кг и дальностью полета до 1500 км.

БАК могут применяться для решения широкого круга задач, таких как организация управления и связи. Однако основной задачей беспилотного авиационного комплекса является мониторинг земной поверхности.

В условиях ограниченного бюджетного финансирования НИОКР актуальной и практически значимой задачей является разработка методик оценки эффективности существующих и перспективных образцов БАК.

Процесс функционирования БАК общего назначения при выполнении поставленной задачи состоит из следующих этапов:

1. наведение (вывод в заданную точку);
2. поиск объекта в исполнительной зоне;
3. передача информации об объекте (мониторинг).

Успешное применение БАК на каждом из этих этапов характеризуется соответствующей вероятностью. На эффективность боевого применения БАК оказывает влияние работа бортовых систем, наземных систем управления и обеспечения. Поэтому оценку эффективности БАК необходимо производить с учётом взаимосвязи различных элементов и систем. Для каждого этапа функционирования необходимо определить значение показателя эффективности.

Основным этапом функционирования БАК в процессе ведения воздушного мониторинга земной поверхности является этап наведения. Характеристики завершения данного этапа выступают в качестве исходных данных для последующих этапов поиска объекта мониторинга, её идентификации и передачи информации о нём на командный пункт.

Наведение БЛА может осуществляться одним из следующих способов:

- командное управление, осуществляемое автоматически или с помощью оператора;
- автономное управление на основе использования беспилотной инерциальной навигационной системы (БИНС) с коррекцией от спутниковой навигационной системы (СНС) или без коррекции.

Соответственно, на этапе наведения БАК может находиться в одном из четырех состояний:

1. наведение оператором с пункта управления;
2. автоматическое наведение с пункта управления;
3. наведение с помощью БИНС с коррекцией от СНС;
4. наведение с помощью БИНС без коррекции от СНС.

В общем виде процесс функционирования БАК на этапе наведения в каждом из  $l$ -х состояний, представляющих полную группу несовместных состояний (структур) описывается многомерной системой стохастических дифференциальных уравнений в форме Коши

$$\dot{Y}^{(l)} = D^{(l)}(t)\varphi^{(l)}(Y, t) + H^{(l)}(Y, t)V^{(l)}(t), Y^{(l)}(t_0) = Y_0^{(l)}, \quad (1)$$

где  $D^{(l)}(t)$  - детерминированная матрица коэффициентов  $d_{kl}^{(l)}(t)$ , имеющая размерность  $n \times n$ ;  $\varphi^{(l)}(Y, t)$  - нелинейная векторная функция;  $H^{(l)}(Y, t)$  - нелинейная матричная функция с компонентами  $h_{kl}^{(l)}(Y, t)$ ;  $V^{(l)}(t)$  - вектор гауссовых белых шумов с матрицей интенсивностей  $G^{(l)}(t)$  и вектором математического ожидания  $m^g(t)$ ;  $l = 1 \dots 4$  - номер состояния.

Системы уравнений вида (1) для первых двух состояний отличаются лишь законом управления.

При управлении оператором закон управления имеет вид:

$$\dot{\lambda} = \frac{e^{-\tau}}{T} \hat{v} - \frac{1}{T} \lambda, \quad (2)$$

При автоматическом управлении закон управления имеет вид:

$$\lambda = K(v_{T.BYX} - \hat{v}), \quad (3)$$

где  $K$  - обобщенный коэффициент усиления,  $\tau$ ,  $T$  - постоянные времени, характеризующие запаздывание и инерционность системы наведения с пункта управления,  $v_{\dot{\Delta} \hat{U} \hat{O}}$ ,  $\hat{v}$  - требуемое значение и оценка параметра управления.

При наведении БЛА с помощью БИНС (с коррекцией от СНС или без коррекции) математические модели наведения БЛА различаются только моделью сигнала коррекции СНС, но при этом существенно отличаются от математических моделей наведения при управлении оператором или при автоматическом управлении.

Основным в математической модели наведения с помощью БИНС является алгоритм вычисления кинематических параметров наведения, который для случая наведения БЛА в заданную точку в векторно-матричной форме имеет вид:

$$\begin{aligned} \dot{Y}_{BAK} &= -L \cdot U_D^g \cdot V_g, \\ \dot{V}_g &= U_g^c \cdot A_{BAK} + G, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\text{где } Y_{BAK} = \begin{Bmatrix} D \\ \varepsilon \\ v \end{Bmatrix}, \quad Y_{BAK}(0) = \begin{Bmatrix} D_0 \\ \varepsilon_0 \\ v_0 \end{Bmatrix}; \quad L = \begin{Bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{D} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{D \cdot \cos \varepsilon} \end{Bmatrix};$$

$V_g$  - вектор проекций скорости БАК на оси стартовой системы координат;

$A_{BAK}$  - вектор проекций ускорения БАК на оси связанной системы координат, измеряемый датчиками линейных ускорений;

$G$  - вектор ускорения силы тяжести;

$U_D^g$  - матрица перехода от стартовой системы координат  $OX_g Y_g Z_g$  к лучевой системе координат  $O\xi\eta$ , связанной с вектором дальности;

$U_g^c$  - матрица перехода от связанной системы координат  $OX_1 Y_1 Z_1$  к стартовой системе координат  $OX_g Y_g Z_g$ .

Математические модели для каждого состояния этапа наведения представляют собой нелинейные стохастические дифференциальные уравнения, которые позволяют методом статистических испытаний получить частные показатели эффективности этапа наведения: математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение ошибки наведения.

Для статистической оценки эффективности БАК целесообразно иметь методику, позволяющую оперативно получать результаты с выдачей рекомендаций автоматизированной

системе управления БАК по наиболее рациональному способу применения. Такая методика дает возможность оценить влияние процесса наведения на частные критерии эффективности. Для создания такой методики необходимо разработать аналитическую математическую модель этапа наведения БАК, учитывающую все четыре состояния этапа наведения. Алгоритм разработки аналитической модели включает следующие этапы:

1. линеаризация нелинейностей и составление стохастических уравнений;
2. определение условий перехода из одного состояния этапа наведения в другое (поглощение реализаций процесса наведения на границе или в области);
3. определение функции поглощения и восстановления реализаций этапа наведения;
4. получение уравнений для определения математических ожиданий и корреляционных моментов всех фазовых координат системы наведения БЛА для всех состояний этапа наведения.
5. получение уравнений для определения вероятностей нахождения БАК в одном из четырёх ( $l$ -х) рассматриваемых выше состояний.

Математическая модель для оценки вероятностных характеристик процесса наведения БЛА включает системы уравнений для вычисления начальных моментов  $M_k$  и центральных моментов  $D_{kl}$ :

$$\dot{M}_k^{(l)} = \langle A_k^{(l)}(\vec{y}, t) \rangle^{(l)} - \sum_{r=1}^s \langle v^{(l,r)}(\vec{y}, t) y_k \rangle^{(l)} + \sum_{r=1}^s \frac{P_r}{P_l} \langle v^{(r,l)}(\vec{y}, t) y_k \rangle^{(r)} - \frac{\dot{P}_l(t)}{P_l(t)} M_k^{(l)}, \quad (5)$$

$$M_k^{(l)}(t_0) = M_{k_0}^{(l)};$$

$$\begin{aligned} \dot{D}_{kp}^{(l)} = & \langle A_k^{(l)}(\vec{y}, t)(y_p - M_p^{(l)}) + A_p^{(l)}(\vec{y}, t)(y_k - M_k^{(l)}) + B_{kp}^{(l)}(\vec{y}, t) \rangle^{(l)} - \\ & - \sum_{r=1}^s \langle v^{(l,r)}(\vec{y}, t)(y_k - M_k^{(l)})(y_p - M_p^{(l)}) \rangle^{(l)} + \end{aligned} \quad (6)$$

$$+ \sum_{r=1}^s \frac{P_r}{P_l} \langle v^{(r,l)}(\vec{y}, t)(y_k - M_k^{(l)})(y_p - M_p^{(l)}) \rangle^{(r)} - \frac{\dot{P}_l}{P_l} D_{kp}^{(l)}, \quad D_{kp}^{(l)}(t_0) = D_{kp_0}^{(l)}(t_0).$$

В уравнениях (5)-(6)  $A_k^{(l)}(\vec{y}, t)$  и  $B_{kp}^{(l)}(\vec{y}, t)$  - соответственно вектор сноса и матрица диффузии случайного процесса (1),  $\langle \dots \rangle^{(l)}$  - операция осреднения,  $v^{(l,r)}(\vec{y}, t)$  - интенсивность поглощения реализаций  $l$ -го состояния.

Для замыкания системы уравнений (5)-(6) неизвестную функцию  $P_l = P_l(t)$ , характеризующую вероятность существования реализаций случайного марковского процесса наведения  $l$ -го состояния в текущий момент времени  $t$ , определим из уравнения

$$\dot{P}_l = - \sum_{\substack{r=1 \\ r \neq l}}^s P_r(t) \langle v^{(l,r)}(\vec{y}, t) \rangle^{(l)} + \sum_{\substack{r=1 \\ r \neq l}}^s P_r(t) \langle v^{(r,l)}(\vec{y}, t) \rangle^{(r)}, \quad P_l(t_0) = P_{l_0}. \quad (7)$$

Система уравнений (5)-(7) позволяет произвести оценку вероятностных характеристик функционирования БЛА, который положен в основу алгоритма оценки качества функционирования БАК на основных этапах его боевого применения.

Решение данной системы дифференциальных уравнений позволяет вычислить вероятности нахождения БАК в каждом из возможных состояний этапа наведения, а также определить частные критерии эффективности для каждого из состояний. При этом имеется возможность учесть динамику смены состояний структуры БАК на этапах наведения, поиска цели и передачи информации, а также оценить влияние данного процесса на эффективность выполнения боевой задачи в целом.

Таким образом, изложенная выше методика позволяет выдать рекомендации по рациональному использованию БАК и тем самым снизить затраты на выполнение поставленной задачи.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Василин, Н.Я. Беспилотные летательные аппараты / Н.Я. Василин. – Минск: ООО «Попурри», 2003. – 272 с.
2. Вентцель Е.С. Исследование операций. Задачи, принципы, методология. – М.: Дрофа, 2006. – 206 с.
3. Ориентация и навигация подвижных объектов: современные информационные технологии / под ред. Б.С. Алёшина, К.К. Веремеенко, А.И. Черноморского. – М.: Физматлит, 2006. – 424 с.
4. Управление и наведение беспилотных маневренных летательных аппаратов на основе современных информационных технологий / под ред. М.Н. Красильщикова, Г.Г. Серебрякова. – М.: Физматлит, 2005. – 280 с.
5. Пугачев, В.С. Теория стохастических систем / В.С. Пугачев, И.Н. Сеницын. – М.: Логос, 2004. – 1000 с.
6. Казаков И.Е., Артемьев В.М., Бухалев В.А. Анализ систем случайной структуры. - М.: Наука, 1993. - 270 с.