

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ БЕСПИЛОТНОГО АВИАЦИОННОГО КОМПЛЕКСА ПРИ МОНИТОРИНГЕ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

*аспирант А.С. БЕНКАФО*

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
gabril\_68@mail.ru*

### **Введение**

Беспилотные летательные аппараты (БЛА) являются эффективным средством для решения широкого спектра задач, как военного, так и народнохозяйственного характера. БЛА имеют большую перспективу применения в тех областях, где отсутствие пилота на борту позволяет сделать летательный аппарат более компактным и дешевым, а также при выполнении работ, связанных с риском для жизни и здоровья человека [1].

БЛА могут быть применены для решения множества задач, выполнение которых пилотируемыми летательными аппаратами в силу различных причин нецелесообразно. В число таких задач входит: мониторинг воздушного пространства, земной и водной поверхностей, экологический контроль, управление воздушным движением, контроль морского судоходства, развитие систем связи и т.д. К перспективным направлениям можно отнести использование БЛА в транспортной и сельскохозяйственной авиации, для связи, охраны объектов, регулирования транспортных потоков в крупных городах, и т.д.

Существенной особенностью процессов функционирования БАК является их случайность, вызываемая не полной определенностью условий, в которых эти процессы протекают, а также различными случайными отклонениями и ошибками, возникающими при сборе информации, выработке управляющих сигналов и их исполнении. Таким образом, результат функционирования БАК является случайным и с количественной стороны характеризуется законами распределения параметров, выражающих этот результат.

При разработке БЛА, как ключевых составляющих БАК, или при принятии их в эксплуатацию приходится решать вопрос о выборе рационального варианта решения, эффективного в заданном диапазоне условий применения. Допустим, что имеются различные варианты решений задачи (например, различные системы мониторинга земной поверхности)  $B_1, B_2, \dots, B_m$  и совокупность условий их применения (маршруты полета БЛА):  $A_1, A_2, \dots, A_n$ .

Пусть  $W_{ij}$  - показатель эффективности (вероятность получения необходимой информации о земной поверхности) при применении  $i$ -го решения

(*i*-го варианта бортового оборудования) в *j*-х условиях [3]. Составим матрицу эффективностей (таблица 1).

Таблица 1. Матрица эффективностей

Варианты решения	Варианты условий			
	$A_1$	$A_2$	...	$A_n$
$B_1$	$W_{11}$	$W_{12}$	...	$W_{1n}$
$B_2$	$W_{21}$	$W_{22}$	...	$W_{2n}$
...	...	...	...	...
$B_m$	$W_{m1}$	$W_{m2}$	...	$W_{mn}$

Для наглядности можно построить для каждого из гипотетических вариантов решений диаграмму зависимости между значениями показателей эффективности и вариантами условий. По оси ординат отложим значения показателя эффективности  $W$ , а по оси абсцисс - варианты условий в виде точек, расположенных в определённом порядке. Соединим точки  $W_{ij}$ , соответствующие данному решению линиями (рис. 1). Получим типичный для практики случай, когда одно решение эффективнее в одних условиях, а другое - в других. Однако из экономических соображений нельзя позволить себе иметь многочисленные технические решения и использовать каждое в соответствующих случаях. Нужно выбрать одно какое-то решение (иногда несколько), которое было бы лучшим в каком-то смысле для всего диапазона условий применения.

В ряде случаев возникает задача определения вероятности или частоты появления тех или иных условий  $p_1, p_2, \dots, p_n$  и выбрать то решение, для которого осреднённый и показатель  $W_i$  будет наибольшим.

$$W_i = p_1 W_{i1} + p_2 W_{i2} + \dots + p_n W_{in}.$$

Если вероятности  $p_j$  ( $j = 1, \dots, n$ ) известны и не изменяются во времени, то именно так и следует поступать. Однако получить значения  $p_j$  из опытов в ряде случаев невозможно. Кроме того, если в среднем лучшим окажется один из вариантов решения (рис. 1) и мы его примем, то может оказаться, что этот вариант технического решения эффективен только в определенных условиях функционирования БАК. В результате же решение окажется эффективным на очень короткое время. Таким образом, нет смысла выбирать решение в соответствии с приведенной выше формулой и оказаться через некоторое время в крайне невыгодном положении.

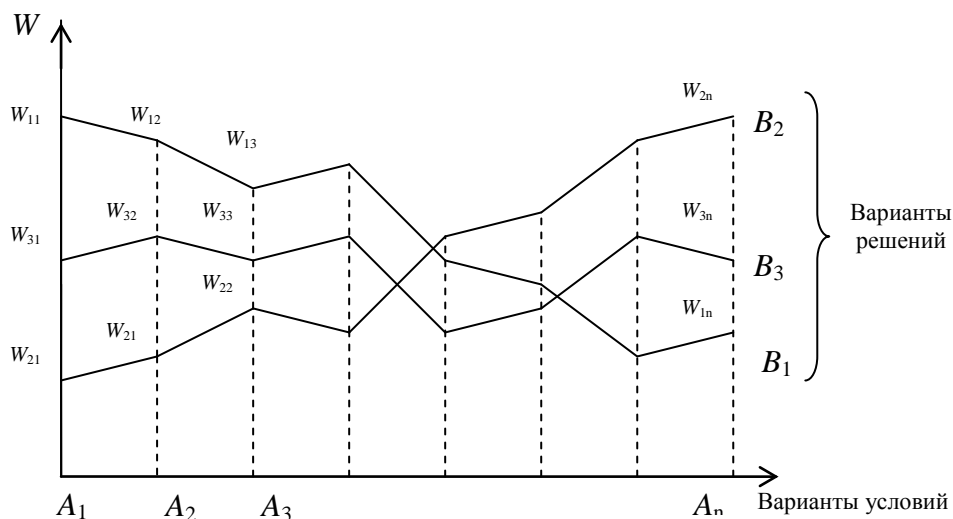


Рис. 1. Диаграмма зависимостей условий и решений

Следовательно, лучше выбрать такое компромиссное решение, которое может быть даже, не будучи оптимальным в отдельных диапазонах условий применения, удовлетворило бы нас на всем диапазоне условий. Наилучшее решение основывается на анализе руководителем всей матрицы эффективности с учётом прогноза изменения условий применения БАК.

Рассмотрим структуру, задачи и показатели эффективности БАК, предназначенных для сбора информации о наземной обстановке и выработке рекомендаций по принятию решений. В информационную подсистему БАК поступает предварительная информация о обстановке в соответствующем районе применения БАК. Используя эту информацию, управляющее звено БАК – оператор-руководитель решает задачу распределения имеющихся в его распоряжении БЛА по соответствующим задачам. Исполнительное звено БАК — источники информации отдельных подсистем БАК доставляют информацию о наземной обстановке. Таким образом, результатом функционирования БАК является информация о наземной обстановке. Возникает вопрос о том, каким образом количественно оценивать собранную информацию. Какие показатели характеризуют эффективность БАК? Ответ на этот вопрос вытекает из задач, которые стоят перед БАК.

В самой общей формулировке основной задачей БАК является сбор и доставка необходимой информации с целью выработки решения соответствующей организации (ведомства), в интересах которой применяется БАК. Уже из этой общей формулировки следуют основные принципы подхода к оценке эффективности БАК. Эффективность её определяется качеством принятого решения, эффективностью деятельности, организованной на основе полученной информации.

БАК, действующие в интересах министерства или ведомства, организующего соответствующую деятельность, имеют главной задачей сбор сведений о широком круге наземных объектов, в результате чего должен быть получен некоторый образ реальной обстановки, необходимый для принятия обоснованного решения соответствующим руководством. Таким образом, проблема оценки эффективности БАК в общем виде тесно связана с проблемой воспроизведения образов по наблюдаемым признакам. Не останавливаясь на существовании этой весьма сложной проблемы, мы констатируем только следующее. Во-первых, задача воспроизведения образа любой сложности имеет своей основой конкретные сведения об его элементах. Для создания образа наземной обстановки в соответствующем регионе необходимы обширные сведения о числе, состоянии, координатах наземных объектов и т.д. Во-вторых, необходимая полнота и подробность сведений об обстановке в регионе в целом и об отдельных ее элементах определяются степенью их (сведений) влияния на эффективность. Применительно к БАК из этого следует, что эффективность такой системы должна измеряться приращением эффективности БАК, получаемым в результате использования доставленной информации [3].

Информация, поставляемая БАК, очень разнообразна. Поэтому единая задача доставки информации об исследуемом регионе обычно разделяется на ряд частных задач, каждая из которых решается различными подсистемами БАК, имеющими специальное оборудование. Распределение сил и средств БАК по различным задачам и районам действий и является основным содержанием работы управляющего звена системы.

Сформулируем основные характерные задачи БАК и определим показатели эффективности их выполнения. Одной из основных задач является определение координат внезапно появляющихся наземных объектов. При этом положение этих объектов может характеризоваться соответствующими статистическими характеристиками неопределённостей. Примером такой задачи является задача определения очага пожара в лесной местности.

Показателем эффективности (выполнения задачи) может служить приращение вероятности недопущения экономических потерь или математического ожидания сохраненных ресурсов, получающегося в результате обработки соответствующей информации. Вероятность недопущения потерь  $W_i^{(è)}$  и математическое ожидание сохраненных ресурсов  $m_c^{(è)}$  с учетом соответствующего информационного обеспечения можно записать в следующем виде

$$W_i^{(è)} = W_i \cdot W^{(è)}, \quad (1)$$

$$m_n^{(è)} = m_n \cdot W^{(è)}. \quad (2)$$

где  $W_n$ ,  $m_c$  — вероятность недопущение потерь и математическое ожидание сохранных ресурсов, получаемые БАК, в состав которого входит БЛА.  $W^{(n)}$  — вероятность выполнения задачи БАК по получению и обработке соответствующей информации.

Пусть, например,  $P_{m,n}$  — вероятность того, что из  $n$  БЛА, входящих в БАК, только  $m$  смогут определить очаг пожара в лесу, а  $W^{(n)}(m)$  — условная вероятность выполнения БАК задачи определения очага пожара. Тогда вероятность выполнения задачи БАК получается по формуле полной вероятности

$$W^{(n)} = \sum_{m=1}^n P_{m,n} W^{(n)}(m). \quad (3)$$

Пусть БЛА, находящийся в полете, передаёт информацию о возможном очаге пожара в лесу. Между моментом обнаружения пожара и тушением пожара некоторое случайное время запаздывания

$$T_{\text{цї}} = T_{\text{їè}} + T_{\text{їð}} + T_{\text{їê}}, \quad (4)$$

где  $T_{\text{он}}$  — время обработки информации о пожаре,  $T_{\text{пð}}$  — время, идущее на принятие решения и подготовку к тушению пожара,  $T_{\text{їê}}$  — время прибытия пожарной команды и тушения пожара.

Вероятность своевременного прибытия пожарной команды  $P_{\text{їê}}$  равна вероятности того, что время, прошедшее с момента обнаружения пожара до момента тушения пожара (время запаздывания)  $T_{\text{зп}}$ , окажется меньше, чем время, в течение которого пожар нанесет неприемлемый ущерб  $T_{\text{ó}}$ .

$$P_{\text{їê}} = P(T_{\text{цї}} < T_{\text{ó}}). \quad (5)$$

Пусть  $f_{\text{зп}}(t)$  и  $f_{\text{ó}}(t)$  — плотности распределения случайных величин  $T_{\text{зп}}$  и  $T_{\text{ó}}$ . Тогда

$$P_{\text{їê}} = \int_0^{\infty} f_{\text{ó}}(t) \int_0^t f_{\text{цї}}(\tau) d\tau dt. \quad (6)$$

Для получения закона распределения времени запаздывания  $T_{\text{зп}}$  необходимо знать законы распределения времени обработки информации  $T_{\text{он}}$ , времени, идущего на принятие решения и подготовку к тушению пожара  $T_{\text{їð}}$ , и времени прибытия пожарной команды  $T_{\text{їê}}$ . Эти законы распределения могут быть получены путем статистического моделирования процесса передачи и последующего использования информации. Так как этот процесс складывается из ряда последовательных операций, то закон распределения времени запаздывания при некоррелированности составляющих его времён можно считать приближенно нормальным с математическим ожиданием и дисперсией, вычисляемым по формулам

$$m_{\text{цї}} = m_{\text{їè}} + m_{\text{їð}} + m_{\text{їê}}, \quad (7)$$

$$D_{t_{\text{цї}}} = D_{t_{\text{їê}}} + D_{t_{\text{їđ}}} + D_{t_{\text{їê}}}, \quad (8)$$

где  $m_{t_{\text{он}}}$ ,  $m_{t_{\text{пр}}}$ ,  $m_{t_{\text{їê}}}$  — математические ожидания,  $D_{t_{\text{он}}}$ ,  $D_{t_{\text{пр}}}$ ,  $D_{t_{\text{їê}}}$  — дисперсии случайных величин  $T_{\text{он}}$ ,  $T_{\text{пр}}$ ,  $T_{\text{їê}}$ .

Закон распределения времени распространения пожара задается, исходя из данных о возможных изменениях его параметров. Пусть этот закон полагают показательным с параметром, равным  $\frac{1}{\langle t_{\text{đ}} \rangle}$ , где  $\langle t_{\text{đ}} \rangle$  — среднее время распространения пожара. При нормальном законе распределения времени запаздывания и показательном законе времени распространения пожара для входящих в выражение (6) составляющих имеем

$$\int_0^t f_{\text{зп}}(\tau) d\tau = \frac{1}{2} \left[ \Phi \left( \frac{t - m_{t_{\text{зп}}}}{\sqrt{2D_{t_{\text{зп}}}}} \right) + \Phi \left( \frac{m_{t_{\text{зп}}}}{\sqrt{2D_{t_{\text{зп}}}}} \right) \right], \quad (9)$$

$$f_{\text{đ}}(t) = \frac{1}{\langle t_{\text{đ}} \rangle} e^{-\frac{t}{\langle t_{\text{đ}} \rangle}}, \quad (10)$$

где  $\Phi(\dots)$  — функция Крампа (интеграл вероятностей) вида

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt. \quad (11)$$

При этих допущениях после подстановки (9) и (10) в (6) получим выражение для вероятности своевременного тушения пожара  $P_{\text{цї}}$

$$P_{\text{цї}} = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} \frac{1}{\langle t_{\text{đ}} \rangle} e^{-\frac{t}{\langle t_{\text{đ}} \rangle}} \left[ \hat{O} \left( \frac{t - m_{t_{\text{цї}}}}{\sqrt{2D_{t_{\text{цї}}}}} \right) + \hat{O} \left( \frac{m_{t_{\text{цї}}}}{\sqrt{2D_{t_{\text{цї}}}}} \right) \right] dt. \quad (12)$$

Определим математическое ожидание времени, требующегося для обнаружения пожара. В общем случае интенсивность обнаружения наземных объектов вычисляется по формуле [3]

$$\gamma = \frac{V_{\text{сý}}}{S}, \quad (13)$$

где  $S$  — площадь, приходящаяся на один объект (очаг пожара для данного примера),  $V_{\text{сý}}$  — средняя эффективная скорость обзора.  $V_{\text{сý}} = V_s \cdot P_{\text{їá}} \cdot n_{\text{АЕА}}$ , где  $V_s$  — средняя скорость обзора земной поверхностью аппаратурой БЛА,  $P_{\text{їá}}$  — условная вероятность обнаружения наземного объекта аппаратурой БЛА,  $n_{\text{АЕА}}$  — число БЛА, производящих мониторинг (количество вылетов одного БЛА).

Пусть интенсивность определений очагов пожара  $\gamma$  с помощью аппаратуры БЛА приближенно известна, а достоверная информация о пожаре поступает в течение времени  $t_{\text{п}}$ . Тогда условное математическое ожидание времени, прошедшего до обнаружения пожара, при условии, что пожар был обнаружен с вероятностью  $W_{\text{об}}$  за время поиска  $t_{\text{п}}$  определяется по формуле

$$m_{\hat{t}_a} = \frac{1}{W_{\hat{t}_a}(t_i)} \int_0^{t_i} t dW_{\hat{t}_a}(t) = \frac{1}{W_{\hat{t}_a}(t_i)} \left[ t_i W_{\hat{t}_a}(t_i) - \int_0^{t_i} (1 - e^{-\gamma t}) dt \right] = \frac{1}{\gamma} - \frac{t_i}{e^{\gamma t_i} - 1}. \quad (14).$$

Так как  $\gamma$  является случайной величиной, то определим вероятность своевременного тушения пожара. Для этого допустим, что не только время распространения пожара  $T_{\delta}$ , но и время запаздывания  $T_{\text{зн}}$  подчинено показательному закону с математическим ожиданием равным  $\langle t_{\text{зн}} \rangle$ . При этих допущениях вероятность своевременного тушения пожара определяется по формуле

$$P_{\text{от}} = \int_0^{\infty} \frac{1}{\langle t_{\delta} \rangle} e^{-\frac{t}{\langle t_{\delta} \rangle}} \int_0^t \frac{1}{\langle t_{\text{зн}} \rangle} e^{-\frac{\tau}{\langle t_{\text{зн}} \rangle}} d\tau dt = \int_0^{\infty} \frac{1}{\langle t_{\delta} \rangle} e^{-\frac{t}{\langle t_{\delta} \rangle}} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\langle t_{\text{зн}} \rangle}} \right) dt = \frac{\langle t_{\delta} \rangle}{\langle t_{\delta} \rangle + \langle t_{\text{зн}} \rangle}. \quad (15)$$

Имея информацию о значениях  $m_{\hat{t}_a}$ ,  $P_{\text{от}}$ ,  $\langle t_{\delta} \rangle$ ,  $\langle t_{\text{зн}} \rangle$ , можно производить анализ влияния информационной подсистемы БЛА на эффективность выполнения задачи БАК, а также производить сравнительную оценку и выбор варианта бортового и наземного оборудования БАК.

При решении задачи в условиях наличия многих неопределенностей необходимо произвести оценку достоверности информации, необходимой для принятия решения.

Пусть задача обработки и оценки информации о наземной обстановке формулируется следующим образом. Имеются какие-то сведения об элементах некоторой системы (в нашем случае — системы распределения наземных объектов), часть этих сведений известна заранее, часть доставлена дополнительно. Необходимо по этим сведениям составить представление о действительном состоянии системы — создать «образ» системы, определить в какой степени созданное представление соответствует действительному состоянию системы. Сложность решения этой задачи определяется тем, что в настоящее время недостаточно изучен механизм обработки информации человеком. Поэтому представляется затруднительным определить сравнительную ценность различных сведений и их значение для создания «образа». Мы можем говорить лишь о подходе к решению этой проблемы и о решении некоторых частных задач. В качестве примера рассмотрим следующую сравнительно простую ситуацию.

Пусть наземная обстановка (система)  $B$  может находиться в конечном числе состояний:  $b_1, b_2, \dots, b_n$ . Каждое состояние системы может, например, характеризоваться количеством, ёмкостью объектов (элементов системы) и состоянием каждого объекта. Пусть эти предварительные сведения дают возможность оценить правдоподобность того или иного состояния системы в виде вероятностей состояний. Обозначим эти вероятности  $P_0(b_1), P_0(b_2), \dots$ ,

$P_0(b_n)$ . В случае, когда заранее трудно отдать предпочтение какому-либо состоянию, можно положить эти вероятности равными друг другу.

Все поставщики информации БЛА приносят некоторую совокупность сведений  $S$ . Пусть нам известны условные вероятности совокупности сведений (сообщений)  $S$  при условии, что система находится в данном состоянии  $P(\langle s \rangle | b_1), P(\langle s \rangle | b_2), \dots, P(\langle s \rangle | b_n)$ .  $\langle s \rangle$  — средний объём сообщений.

Определим вероятность того, что система действительно находится в данном ( $i$ -м) состоянии  $b_i$ . Для этого воспользуемся формулой Бейеса, дающей возможность уточнить вероятность гипотезы с учетом новых сведений. Согласно этой формуле, вероятность  $i$ -го состояния системы потребления после получения совокупности сведений  $S$  определяется по формуле

$$P_c(b_i | \langle s \rangle) = \frac{P_0(b_i)P(\langle s \rangle | b_i)}{\sum_{j=1}^n P_0(b_j)P(\langle s \rangle | b_j)}. \quad (16)$$

Апостериорные вероятности  $P(\langle s \rangle | b_i)$  могут быть получены путём обработки статистических данных о состоянии наземных объектов, мониторинг которых производится с помощью БЛА.

В более сложных ситуациях вычисление или получение этих вероятностей из опытных данных весьма затруднено. Поэтому, как правило, задача практически решается человеком без использования конкретных числовых значений этих вероятностей. В этом случае к информационной системе предъявляются требования сбора наиболее существенных сведений, необходимых для создания представления о наземной обстановке, т. е, получения такой совокупности сведений, при которой вероятность ошибки была бы минимальной.

### Литература

1. Управление и наведение беспилотных маневренных летательных аппаратов на основе современных информационных технологий / Под ред. М.Н. Красильщикова и Г.Г. Серебрякова. – М.: Физматлит, 2005. – 280 с.
2. Вентцель Е.С. Исследование операций. – М.: Дрофа, 2006. – 206 с.
3. Мильграм Ю.Г., Попов И.С. Боевая эффективность авиационной техники и исследование операций. М.: Издание ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1970, 499 с.