

## **Структурно-параметрический синтез рационального бортового распознающего устройства в составе беспилотного летательного аппарата**

**Гусейнов А.Б.\*, Маховых А.В.\*\***

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

*\*e-mail: [a.b.guseynov@mail.ru](mailto:a.b.guseynov@mail.ru)*

*\*\*e-mail: [anyuta\\_mahovyh@mail.ru](mailto:anyuta_mahovyh@mail.ru)*

### **Аннотация**

В данной работе изложена методика формирования рационального облика бортового распознающего устройства в составе беспилотного летательного аппарата на основе комплексного критерия «Стоимость-Эффективность». Сформулирована матрица возможных признаков распознавания объекта. Приведена структурно-функциональная схема распознающего устройства. Для оценки эффективности распознавания объекта используется правило минимизации риска, которое называется байесовским методом оценки вероятности различных гипотез. Техническое подобие объекта и эталона определяется средней вероятностью распознавания во всем диапазоне изменения числовых показателей закона распределения признака, как случайной величины. Сформулированы постановки задачи структурного анализа и синтеза и параметрической оптимизации. Дана блок-схема и методы решения задач на базе комплексного критерия – минимум стоимости выполнения задачи с заданной эффективностью.

**Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат, распознающее устройство.

## **Введение**

Современные военно-технические концепции создания и развития высокоточного оружия предусматривают применение системного подхода к разработке перспективных летательных аппаратов (ЛА) и их бортовых комплексов с элементами искусственного интеллекта, в том числе, автоматических подсистем распознавания образов. Эти устройства, функционируя с системами управления, наведения и другими подсистемами ЛА, обеспечивают определение истинных (главных) целей среди ложных (второстепенных). Использование таких устройств наряду с современной вычислительной техникой позволяют освободить оператора, повысить качество, скорость принимаемых решений и эффективность выполнения задачи в целом.

Целью данной работы является разработка системной методики, моделей и блок-схемы структурно-параметрического анализа и синтеза проектных решений по бортовому распознающему устройству в составе беспилотного летательного аппарата (БЛА).

Боевое применение высокоточного беспилотного летательного аппарата (БЛА) происходит в условиях некоторой операции. Взаимодействия подсистем БЛА в схеме операции может быть представлено в виде последовательных типовых боевых

эпизодов (фаз) условно выделяемых частей операции, направленных на выполнение промежуточных задач. Так, например, эффективность поражения цели одним БЛА можно представить как произведения вероятностей выполнения отдельных фаз операции при допущении, что подсистемы функционируют независимо друг от друга [2]:

$$W_1 = [(W_{\Pi} \cdot W_{\text{ОБН}} \cdot W_{\text{РАСП}} \cdot W_{\text{НАВ}}) \cdot K_{\text{РЭП}_i}] W_{\text{БЧ}} \cdot W_{\text{Н}} (1 - K_{\text{РЭЗ}} \cdot P_{\text{ПВО}}); \quad (1)$$

где  $W_{\Pi}$  – вероятность поиска (накрытия) цели зоной поиска бортового радиоэлектронного средства (РЭС);  $W_{\text{ОБН}}$  – вероятность обнаружения цели;  $W_{\text{РАСП}}$  – вероятность распознавания (селекции) цели;  $W_{\text{НАВ}}$  – вероятность наведения на цель;  $K_{\text{РЭП}_i}$  – коэффициент снижения эффективности этих  $i$ -ых процессов при радиоэлектронном противодействии;  $W_{\text{БЧ}}$  – вероятность поражения цели БЧ;  $W_{\text{Н}}$  – вероятность безотказной работы всех систем (техническая надежность);  $P_{\text{ПВО}}$  – эффективность поражения БЛА средствами системы ПВО противника;  $K_{\text{РЭЗ}}$  – коэффициент снижения эффективности комплексов ПВО из-за применения на БЛА бортовых средств радиоэлектронной защиты (Ср. РЭЗ): средств снижения заметности (ССЗ) и средств радиоэлектронного подавления (ср.РЭП).

При допущении, что эффективность всех БЛА одинакова и они функционируют независимо друг от друга, наряд (количество) БЛА, необходимый для поражения цели с заданной вероятностью ( $W_{\Sigma} = \text{const}$ ), можно оценить по соотношению [2]

$$n_{\text{ЛА}} = \frac{\lg(1 - W_{\Sigma})}{\lg(1 - W_1)} \quad (2)$$

Как видно из формул (1) и (2), вероятность распознавания цели бортовым РЭС является одним из важных показателей эффективности БЛА.

Эффективность распознавания целей определяется:

- степенью подобия их признаков с признаками эталонной цели;
- характеристиками бортового распознающего устройства (БРУ): дальность действия, сектор и период обследования, рабочий диапазон длин волны, число измеряемых признаков, канальность, точность измерения, разрешающая способность, помехозащищенность, надежность, масса, габариты, стоимость и т.п.;
- методами распознавания;
- постановкой задачи распознавания.

Эффективность распознавания цели проводится методами теории распознавания образов, где под признаками понимаются свойства материального объекта, подлежащие количественному описанию. К признакам объекта можно отнести [1, 3, 5, 6, 7]:

$P_1$  – признаки, характеризующие свойства конструкционных материалов объекта (электропроводимость, теплопроводимость, кристаллическое строение, твердость и т.п.);

$P_2$  – признаки, характеризующие показатели отражения, излучения (показатели заметности) объектов в различных диапазонах электромагнитных волн:

в радиолокационном – эффективная поверхность рассеяния (ЭПР), инфракрасном – сила теплового излучения, видимом – контраст объекта на фоне и т.п.;

$P_3$  – признаки, характеризующие изменения состава, свойств и параметров окружающей среды, при движении в ней объекта (турбулентное, тепловое, химико-биологическое, радиационное, магнитное поле);

$P_4$  – признаки, характеризующие координаты объекта в пространстве, геометрические формы и параметры объекта;

$P_5$  – признаки, определяющие временные характеристики (все признаки могут изменяться во времени  $t$ ) и т.п.

То есть каждую цель можно описать определенными признаками, которые могут меняться во времени, т.е.

$$Ц = f(P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, t),$$

где  $P_i$  – признаки, а  $t$  – время.

Поскольку под признаком понимается определенное число, то к анализу признаков и распознаванию объектов целесообразно применить математические (статистические) методы. Если объект распознают по одному признаку, то его можно представить в виде одной точки (реализации) ( $P_1$ ) на координатной оси первого признака  $P_1$ .

Если распознавание объекта производится одновременно по двум признакам, то вместо одной координатной оси можно использовать две ортогональные оси

признаков  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$ , т.е. объект распознавания можно представить в двумерном пространстве признаков точкой  $\mathcal{C}(\Pi_1, \Pi_2)$  на плоскости, рис. 1.

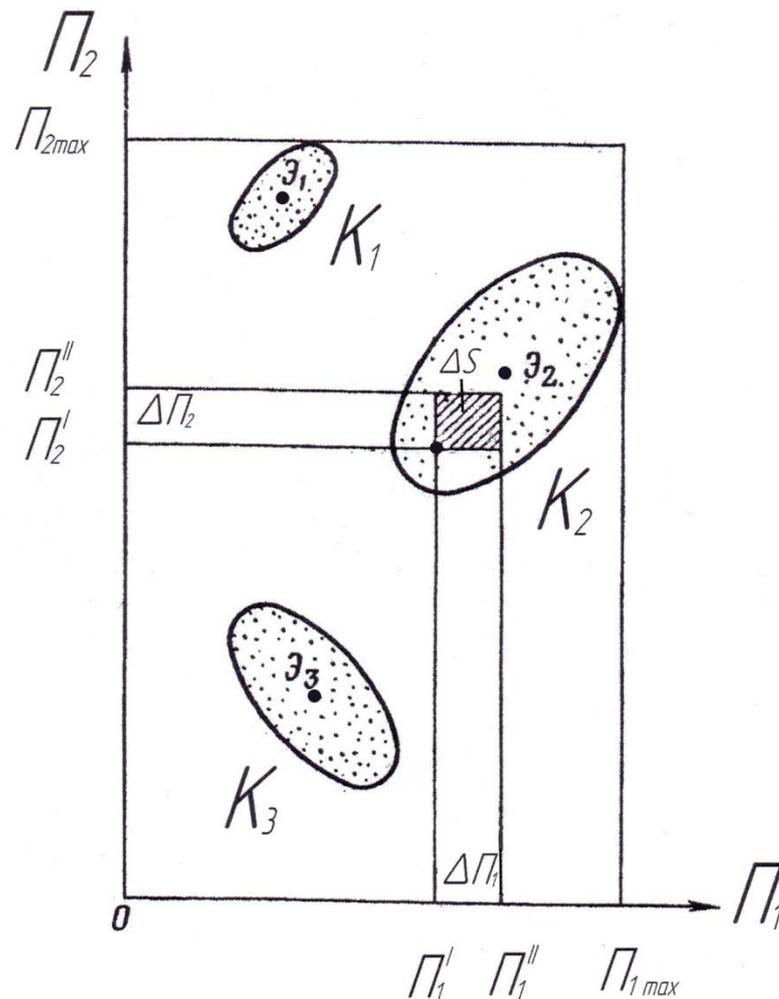


Рис. 1. Непересекающиеся классы объектов в двумерном пространстве.

В общем случае для распознавания объекта можно использовать одновременно  $N$  признаков. Тогда объект распознавания можно геометрически представить точкой в  $N$ -мерном пространстве.

Примером такого представления может служить изображение тепловой карты местности, полученной с помощью ИК-аппаратуры (например, ИК головки

самонаведения). Тепловые изображения объекта можно разбить на множество квадратов с разной степенью почернения. Если ввести числовую градацию почернения и ее значение для каждого квадрата откладывать по своей оси, то тепловое изображение можно представить одной точкой в N-мерном пространстве.

Процесс распознавания объекта можно представить как сравнение его признаков с признаками одного или несколько эталонов, заранее априорно известных для каждого класса и заложенных в блок памяти БРУ и отнесение объекта к тому или иному эталону данного класса, по принятому решающему правилу [4, 5, 6, 7].

На рис. 1 эталоны показаны в виде точек  $\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2, \mathcal{E}_3$  внутри каждого класса  $K_1, K_2, K_3$ . В большом пространстве признаков число классов обычно составляет конечное множество. Это множество составляет алфавит классов.

Все точки области отдельного класса (например  $K_2$ ) образуют множество неодинаковых реализаций  $M_2 = M_{1,2}, M_{2,2}, \dots, M_{i,2}$ , где  $M_{i,2}$  – конкретная точка реализации в данном классе  $K_2$ ;  $i$  – текущий номер реализации в данном классе;  $N$  – общее число неодинаковых реализаций во всем алфавите классов.

Каждая реализация характеризуется на плоскости двумя значениями признаков (координатами)  $\Pi_1^I$  и  $\Pi_2^{II}$ . Реализации, координаты которых попадают в область  $\Delta\Pi_1$  и  $\Delta\Pi_2$ , занимают на плоскости область  $\Delta S$ . Если  $\Delta S$  лежит внутри области класса  $K_2$ , то реализации принадлежат к данному классу, рис. 1. Зная число реализаций (точек) в каждом классе ( $M_1, M_2, M_3$ ) и общее число реализаций во всех

классах  $N = M_1 + M_2 + M_3$ , каждый класс можно описать некоторыми вероятностными характеристиками, т.е. определить насколько часто в заданном алфавите классов встречается тот или иной класс.

$$P(K_1) = M_1/N; P(K_2) = M_2/N; P(K_3) = M_3/N,$$

где  $P(K_i)$  – вероятность появления соответствующего класса.

Так, например, если известно число реализаций (точек) внутри каждого класса  $K_1, K_2$ , и  $K_3$  (примем  $M_1 = 75, M_2 = 180, M_3 = 45$  и общее число реализаций  $N = 300$ ) можно определить как часто в заданном алфавите классов встречается тот или иной класс, т.е.  $P(K_1) = 75/300 = 0,25; P(K_2) = 180/300 = 0,6; P(K_3) = 45/300 = 0,15$ . Очевидно суммы этих вероятностей равны единице.

На рис. 2 приведена функциональная схема опико-электронной распознающей системы. Несмотря на разнообразие распознающих систем по назначению и использованию физических признаков объектов распознавания, в них можно выделить общие для всех систем блоки. Для инфракрасных распознающих систем это блоки: чувствительных элементов (рецепторов), обработки сигналов и памяти. Блоки чувствительных устройств  $S_1, S_2, \dots, S_k$  служат для преобразования инфракрасного излучения от объектов в электрический сигнал. Система может иметь один или несколько чувствительных устройств, каждый из которых воспринимает лучистый поток от объекта в определенном спектральном диапазоне. Сигналы на выходе рецепторов пропорциональны эффективным лучистым потокам

от целей и фонов. Решение о принадлежности обнаруженных сигналов к определенному классу объектов может осуществляться двояким образом: только по амплитудам сигналов (т.е. по эффективным лучистым потокам) без привлечения дополнительной информации и по тем же сигналам, но с привлечением дополнительной информации, такой, как анализ формы объекта, анализ координат источника излучения и их производных и т.п.

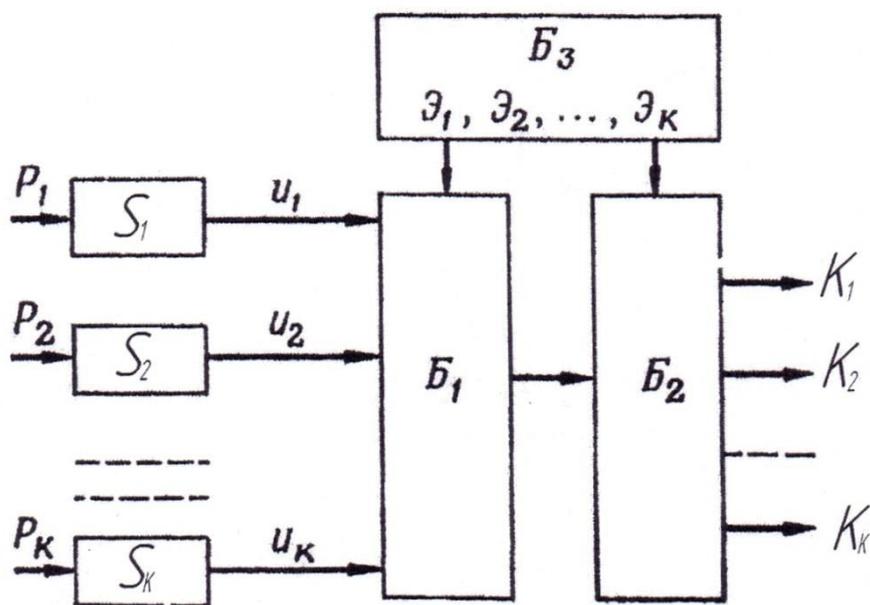


Рис. 2. Функциональная схема опико-электронного распознающего устройства.

Обработка сигналов по первичным признакам производится в логическом блоке  $B_1$  путем сравнения с эталонами, хранящимися в блоке памяти  $B_3$ , или в блоке  $B_1$  и блоке сравнения со вторичными признаками  $B_2$ . На выходе блоков  $B_1$  и  $B_2$  выдается решение о принадлежности текущего значения сигнала к тому или иному

классу объектов ( $K_1, K_2, \dots, K_K$ ). Решающим правилом распознавания является минимально-заданное отличие признаков объекта и эталона данного класса.

Оптические устройства обработки информации обеспечивают большую скорость, производительность, параллелизм вычислений. Одним из многообещающих направлений построения бортовых устройств обработки информации является использование нейронных сетей, которые обеспечивают гибкость, адаптивность внешним условиям, высокое качество.

Исторически сложилось, что теория распознавания образов развилась по двум направлениям: детерминированному и статистическому, хотя на практике находят применение комбинация этих направлений. Детерминированный подход включает такие методы, как эмпирические, эвристические, которые основаны на логике, теории графов, кластерном анализе, топологии и др. Статистические методы опираются на математическую статистику (теория оценок, байесовское правило, последовательный анализ, теория вероятностей, стохастическая аппроксимация и др.).

В статистической теории признаки объектов и эталонов в процессе распознавания могут меняться во времени. Эти изменения, как правило, носят случайный характер и подчиняются нормальному закону распределения. И для их сравнительной оценки необходимо располагать плотностями распределения и их числовыми показателями (МОЖ и СКО).

В соответствии с принципом дихотомии (способ логического деления на два взаимоисключающих понятия) любое множество объектов можно разделить на истинные и ложные. Тогда априорная информация может быть представлена следующими показателями:  $f_{И}(\Pi), f_{Л}(\Pi)$  – плотность распределения признаков распознавания для истинных и ложных объектов соответственно;  $\Pi$  – вектор признаков распознавания (например, структура ЭПР, дальность первичного обнаружения, параметры отраженного сигнала и т.п.);  $P_{И}, P_{Л}$  – вероятности появления истинного и ложного объектов.

Дихотомическое деление привлекательно своей простотой, т.е. деление производится по наличию или отсутствию того или иного признака на два понятия, которые исключают друг друга («истинное», «ложное»). Недостаток этого принципа – наличие фактора неопределенности, особенно в понятии «ложное». Наличие неопределенности обусловлено [3, 5, 6, 7]:

- недостаточной изученностью признаков (физических явлений, которые, как правило, имеют стохастическую природу) т.е. априорной неосведомленности о признаках распознавания;

- наличием противодействия, каждая из конфликтующих сторон вынуждена принимать решение в условиях, когда ей неизвестны будущие действия противника и уровень противодействия;

- по отношению характеристик технических устройств распознавания;

- нечеткостью постановки задачи исследования и необходимость поиска оптимальных решений по нескольким критериям.

Проблема учета неопределенных факторов является настолько значимой, что ее решению, как правило, необходимо уделить особое внимание на всех этапах исследований – от формулировки задачи до анализа полученных результатов и принятия решения. В математической модели распознавания образов необходимо учитывать не только случайные, но и реальные неопределенности, как по отношению выбранных признаков, так и по отношению технических характеристик средств распознавания и условий функционирования.

В основе статистической теории распознавания лежит правило минимизации среднего риска, которое называется байесовым правилом или байесовским методом оценки вероятности различных гипотез [1, 4, 5]. Если в качестве среднего риска рассматривается вероятность того, что истинный объект принят за ложный или наоборот, то байесово правило можно сформулировать таким образом, если  $P_{И}f_{И}(\Pi^*) \geq P_{Л}f_{Л}(\Pi^*)$ , то объект истинный, в противном случае – ложный: здесь  $\Pi^*$  - конкретное значение признака распознавания. Отношение плотностей истинного  $f_{И}(\Pi)/f_{Л}(\Pi)$  при определенном значении вектора  $\Pi$  называется отношением правдоподобия и обозначается  $\lambda_{\Pi}$ . Для оценки технического подобия при сопоставлении двух объектов интерес представляет случай  $P_{И} = P_{Л}$ . Объект считается истинным, если  $\lambda_{\Pi} \geq 1$ , в противном случае – ложным. Это соответствует пороговому принципу распознавания.

В общем случае, используя формулу Байеса, можно определить вероятность принадлежности объекта к классу истинных и ложных соответственно, если признак распознавания принял значение  $\Pi^*$ :

$$P(И, \Pi^*) = \frac{P_{И}f_{И}(\Pi^*)}{P_{И}f_{И}(\Pi^*) + P_{Л}f_{Л}(\Pi^*)}; \quad (3)$$

$$P(Л, \Pi^*) = \frac{P_{Л}f_{Л}(\Pi^*)}{P_{И}f_{И}(\Pi^*) + P_{Л}f_{Л}(\Pi^*)}.$$

Очевидно, что  $P(И, \Pi^*) = 1 - P(Л, \Pi^*)$ . Эти зависимости характеризуют конкретную реализацию распознавания с учетом конкретных значений признаков  $\Pi^*$  и используются в алгоритмах систем распознавания.

Для анализа технического подобия на этапе проектирования обычно определяется средняя вероятность распознавания во всем диапазоне признаков  $\Pi$ . Если учесть априорные распределения этих признаков для каждого класса объектов, можно получить показатели технического подобия:

вероятность принятия истинного объекта за истинный:

$$P_{И/И} = \int_{S_{\Pi}} P(И, \Pi)f_{И}(\Pi)d\Pi; \quad (4)$$

вероятность принятия истинного объекта за ложный:

$$P_{И/Л} = \int_{S_{\Pi}} P(Л, \Pi)f_{И}(\Pi)d\Pi; \quad (5)$$

вероятность принятия ложного за ложный:

$$P_{л/л} = \int_{S_{\Pi}} P(Л, \Pi) f_{л}(\Pi) d\Pi; \quad (6)$$

вероятность принятия ложного за истинный:

$$P_{л/и} = \int_{S_{\Pi}} P(И, \Pi) f_{л}(\Pi) d\Pi. \quad (7)$$

Учитывая соотношения  $P_{и/и} = 1 - P_{и/л}$ ,  $P_{л/л} = 1 - P_{л/и}$ , можно определять только вероятности распознавания  $P_{и/и}$  и  $P_{л/л}$ . Здесь  $S_{\Pi}$  – область возможного изменения признаков распознавания. Диапазон изменения этих показателей при  $P_{И} = P_{Л}$  таков: при абсолютном подобии, т.е. при  $f_{и}(\Pi) = f_{л}(\Pi)$  (рис. 3, а), имеем ситуацию полной неопределенности  $P_{и/л} = P_{и/и} = P_{л/л} = P_{л/и} = 0,5$ ; при абсолютном различии (существенное различие признаков) имеем ситуацию полной определенности (рис. 3, б)  $P_{и/и} = P_{л/л} = 1$ ;  $P_{и/л} = P_{л/и} = 0$ .

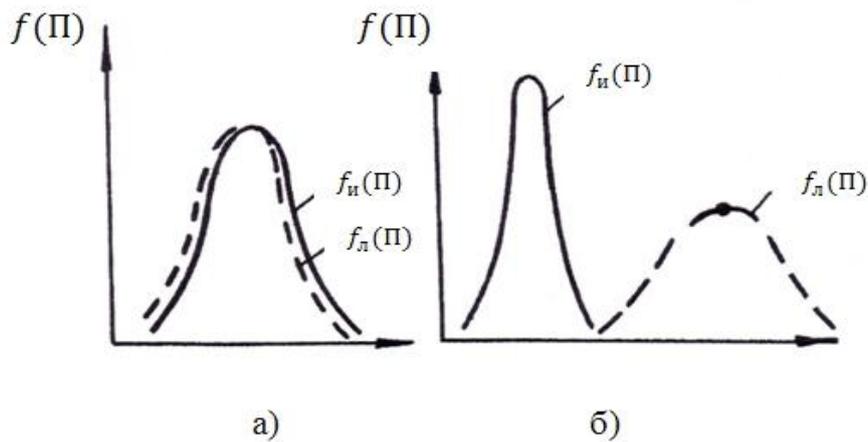


Рис. 3. Плотности распределения признаков распознавания: а) при абсолютном подобии; б) при абсолютном различии.

Таким образом, диапазон изменения показателей для вероятности распознавания  $P_{и/и}$  и  $P_{л/л}$  (0,5...1), для вероятности нераспознавания  $P_{и/л}$ ,  $P_{л/и}$  (0...0,5).

Удобным и наглядным показателем технического подобия может служить средняя доля нераспознанных объектов определенного класса. Этот условный показатель представляет собой отношение соответствующей вероятности нераспознавания к максимально возможному ее значению (при абсолютном подобии, когда можно считать, что все объекты не распознаны), т.е.  $\delta_{нр}^и = P_{и/л} / 0,5 = 2P_{и/л}$ ;  $\delta_{нр}^л = P_{л/и} / 0,5 = 2P_{л/и}$ . При абсолютном подобии ( $P_{и/л} = 0$  и  $P_{л/и} = 0$ )  $\delta_{нр}^и = \delta_{нр}^л = 0$ , что отражает физическую сущность процесса распознавания.

Рассмотрим пример определения эффективности распознавания по признаку сравнений различий в структуре ЭПР  $S_{ц}$  двух надводных целей: истинной – надводного корабля, ложной – уголкового отражателя, установленного около корабля, причем  $P_{и} = P_{л}$ . Предположим, что ЭПР  $S_{ц}$  для обоих объектов подчиняется нормальному распределению со следующими числовыми характеристиками: среднее квадратическое отклонение для истинной цели  $\sigma_{и} = 1$ , математическое ожидание  $m_{и} = 0$  и для ложной цели  $\sigma_{л} = \sigma$ ,  $m_{л} = a$  (рис. 4).

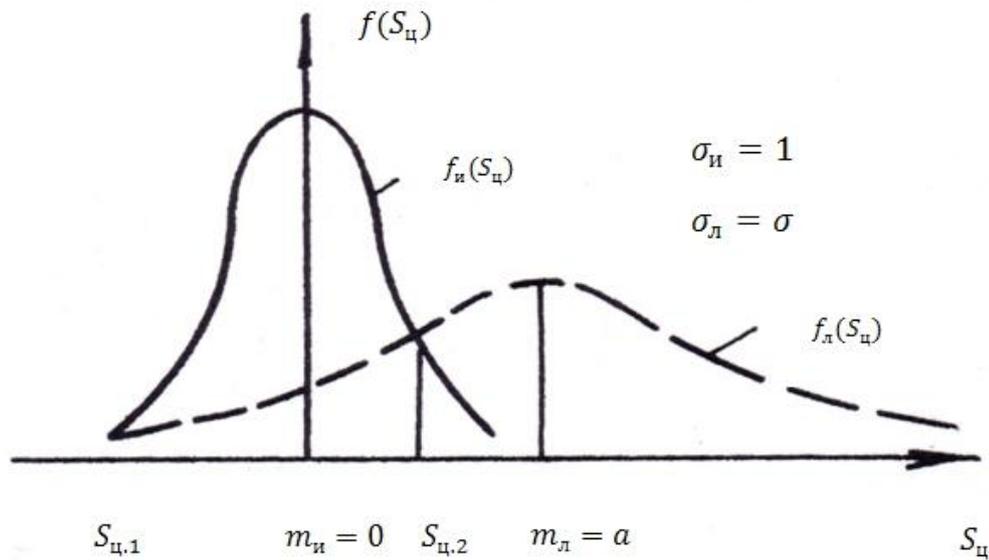


Рис. 4. Плотность распределения эффективной поверхности рассеяния целей.

В соответствии с байесовым правилом объект будет отнесен к классу истинных, если ЭПР  $S_{ц}$  примет значение в диапазоне  $[S_{ц,1}, S_{ц,2}]$  и классу ложных, если  $S_{ц}$  за пределами этого диапазона. Здесь  $S_{ц,1}$  и  $S_{ц,2}$  – координаты точек пересечения плотностей распределения  $f_{И}(S_{ц})$  и  $f_{Л}(S_{ц})$ , т.е. корни уравнения  $f_{И}(S_{ц}) = f_{Л}(S_{ц})$ . Для принятых условий примера ( $\sigma_{И} = 1, m_{И} = 0$  и  $\sigma_{Л} = \sigma, m_{Л} = a$ ) плотности вероятности нормального закона распределения можно записать в виде

$$f_{И}(S_{ц}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{S_{ц}^2}{2}}; f_{Л}(S_{ц}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(S_{ц}-a)^2}{2\sigma^2}}. \quad (8)$$

Тогда корни уравнения  $f_{И}(S_{ц}) = f_{Л}(S_{ц})$  можно найти из соотношения

$$S_{ц,1,2} = \frac{a}{1-\sigma^2} \pm \sqrt{\frac{a^2}{(1-\sigma^2)^2} + \frac{a^2 + 2\sigma^2 \ln \sigma}{\sigma^2 - 1}}. \quad (9)$$

Зная  $S_{ц1}, S_{ц2}$  и  $f_{и}(S_{ц}), f_{л}(S_{ц})$  вероятности распознавания (селекции) объекта, находим по формулам

$$P_{и/и} = \int_{S_{ц1}}^{S_{ц2}} f_{и}(S_{ц}) dS_{ц}; P_{л/л} = \int_{-\infty}^{S_{ц2}} f_{л}(S_{ц}) dS_{ц} + \int_{S_{ц2}}^{+\infty} f_{л}(S_{ц}) dS_{ц}. \quad (10)$$

Интегралы в формулах (10) определяются с помощью табличной функции Лапласа.

В современных средствах распознавания образов для получения радиолокационных, инфракрасных и других синтезированных изображений объектов и оценки их признаков используются методы глубокой обработки принимаемых сигналов в широком спектре диапазона волн. Для повышения эффективности распознавания могут быть использованы многоканальные перспективные опто-электронные устройства обработки информации (УОИ). Искусственные нейронные сети позволяют с успехом решать проблемы идентификации, классификации, управления, прогнозирования, моделирования, оптимизации. Повышение качества получаемой информации при этом приводит к увеличению энергетических, массогабаритных и стоимостных показателей этих устройств и ЛА в целом.

Задача синтеза предоптимального облика БЛА состоит в согласовании и увязке рациональных технических решений по  $i$ -м подсистемам ракеты  $\{P_{i,j}^*\}$ , полученных в результате структурно-параметрического синтеза предпочтительных вариантов, в учете интегративного эффекта их взаимодействия и уровня

комплексирования. Учет этих факторов может быть реализован на базе матмоделей, алгоритмов и программ и комплексного критерия.

Для получения рационального облика ЛА необходимо решить задачу оптимального распределения располагаемого ресурса массы полезной нагрузки  $m_{\text{пн}} = \text{const}$  на составляющие (БЧ, ср. РЭЗ, СУ, БРУ). Эта задача решается на базе выявления предоптимального облика. Для определения изменений характеристик БЛА и его показателей точности, заметности, эффективности и величины комплексного критерия при варьировании соотношений между составляющими полезной нагрузки используются более точные модели, алгоритмы и программы.

Решение всех задач структурно-параметрического синтеза представляет собой итерационный процесс последовательных приближений. Проектировщик в процессе решения уточняет, накапливает и обрабатывает информацию. При этом широко использует взаимодополняющие методы анализа и синтеза, индукции (от общего к частному) и дедукции (от частного к общему), а также формализованные процедуры принятия решений.

Задачи выбора рационального бортового распознающего устройства  $i$ -го типа  $\{P_i\}$ , состоит в нахождении технических решений  $\{P_{ij}\}$  и их проектных параметров  $\{\pi_S\}$  из диапазона их возможного изменения, которое, во-первых, удовлетворяло бы заданному на проектирование ТЗ, ряду принятых ограничений и, во-вторых, чтобы выбранный критерий принял минимальное (максимальное) значение. Для решения этих задач необходимо провести структурно-параметрический синтез матрицы

совместимых альтернативных технических решений и их проектных параметров [3]. Исходным для решения этих задач является ТЗ на проектирование ЛА, которое формируется на уровне внешнего проектирования.

Определяющим этапом при этом является количественный структурно-параметрический синтез альтернативных вариантов на базе точных математических моделей и комплексного критерия.

Количественный структурно-параметрический синтез вариантов включает в себя одновременное решение двух взаимосвязанных задач:

- структурный синтез альтернативных вариантов облика с оптимальными проектными параметрами и определение рациональных технических решений по БРУ  $\{P_{i,j}^*(\pi_S^*)\}$ ;

- определение оптимальных проектных параметров технических решений по БРУ и ЛА в целом  $\{\pi_S\}$  для рассматриваемой альтернативной структуры.

Первая из них является задачей дискретной оптимизации, которая решается на уровне обоснования техпредложений по техническому облику БРУ и ЛА по заданному ТЗ. Математическую формулировку данной задачи структурно-параметрического синтеза сформулируем следующим образом.

Пусть на этапе количественного синтеза структуры ЛА рассматривается  $L$ -е число предпочтительных вариантов технических решений по БРУ и ЛА в целом. Каждый  $l$ -й вариант структуры характеризуется вектором проектных параметров,

для которых известны допустимые интервалы изменений  $\{\pi\}_{\text{доп } l}$ . Предположим, что выбрана некоторая целевая функция  $K$ , минимизация (или максимизация) которой при соблюдении заданных ограничений  $q_\lambda$  на другие показатели в рассматриваемой задаче определяет рациональное техническое решение по БРУ и ЛА, т.е.

$$\{P_{i,j}^*\} \in \arg[\min\{K_l^*({\pi_S^*}_l, \{U\})\}], l = 1, 2, \dots, L, \quad (11)$$

где  $\{K_l^*({\pi_S^*}_l, \{U\})\}$  – совокупность дискретных значений комплексной целевой функции (критерия), определяемых как

$$K_l^*({\pi_S^*}_l, \{U\}) = \min K_l^*({\pi_S^*}_l, \{U\}) \quad (12)$$

при принятых ограничениях

$$q_\lambda(\pi_{1l}, \pi_{2l}, \dots, \pi_{S_l}, U_1, U_2, \dots, U_m) \leq b_\lambda; \lambda_{(l)} = 1, 2, \dots, \lambda_{S_l}; (\lambda_{S_l} < S_l), \quad (13)$$

где  $\{\pi_S^*\}_l \in \{\pi\}_{\text{доп } l}$ ;  $\{\pi_S^*\}_l = \{\pi_1^*, \pi_2^*, \dots, \pi_{S_l}^*\}_l$  – вектор оптимальных проектных параметров для  $l=1, \dots, L$ -го варианта структуры;  $K_l^*({\pi_S^*}_l, \{U\})$  – целевая функция на области вектора оптимальных проектных параметров  $\{\pi_S^*\}_l$  для  $l$ -го альтернативного варианта РУ;  $\{U\} = \{U_1, U_2, \dots, U_m\}$  – вектор характеристик, параметров среды, внешний по отношению к техническим решениям по БРУ и ЛА.

При решении второй задачи оптимизируются проектные параметры для каждого рассматриваемого  $l$ -го варианта проектного решения по БРУ и облика БЛА, т.е. она является составной частью структурного синтеза. Задачи параметрической оптимизации для заданной структуры в значительной степени разработаны и

освоены на практике и решаются. Математическая формулировка этих задач может быть представлена в виде

$$\{\pi_S^*\} \in \arg[\min K(\{\pi_S\}_l, \{U\}) < C_{\text{пц}}^0] \quad (14)$$

при заданных ограничениях

$$q_\lambda(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_S, U_1, U_2, \dots, U_m) \leq b_\lambda; \lambda = 1, 2, \dots, \lambda_S; (\lambda_S < S), \quad (15)$$

где  $\{\pi\}_l = \{\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_S\} \in \{\pi_{\text{доп}}\}$  – вектор проектных параметров;  $K(\{\pi_S\}_l, \{U\})$  – целевая функция (критерий), в качестве которой приняты затраты на поражение цели с заданной эффективностью  $W_\Sigma = \text{const}$ ;  $C_{\text{пц}}^0$  – затраты на поражение цели с заданной эффективностью залпом из «опорных» вариантов БЛА и БРУ.

При этом в качестве целевой функции  $K(\{\pi_S\}_l, \{U\})$  могут быть приняты и частные составляющие комплексного критерия. Например, минимальная стартовая масса БЛА при заданной его эффективности, т.е.  $K = \min m_0$  при  $W_1 = \text{const}$ . Для практической реализации количественного структурно-параметрического синтеза облика ЛА и БРУ, который представляет собой совместное решение задач дискретного структурного синтеза (комбинаторной оптимизации) и параметрической оптимизации, необходимо выбрать математические методы решения.

Преимущества, недостатки, области применения и алгоритмы методов параметрической оптимизации даны работах [3, 6, 8]. Наиболее широко при

решении задач оптимизации проектных параметров  $\{\pi_s\}$  используется метод случайного поиска.

Для решения задач дискретной (комбинаторной) оптимизации структурных решений может быть использован метод перебора предпочтительных альтернатив и его модификации – метод ветвей и границ (направленного перебора) и другие процедуры. Более подробно методы оптимизации изложены в работах [3, 6].

Блок-схема решения задач количественного анализа и синтеза структурных решений и оптимизации проектных параметров БЛА и БРУ представлена на рис. 5 [3]. С одной стороны, технические решения и проектные параметры по облику бортового оборудования (БО) и ЛА в целом  $\{P_{ij}\}$  и  $\{\pi_i\}$  могут привести к увеличению массогабаритных характеристик ЛА, изменению геометрических размеров, аэродинамических характеристик  $(C_x, C_y^\alpha)$ , рабочих характеристик ДУ  $(P_{уд}, \mu_{сек})$ , баллистических характеристик  $(H(x), V(t), \alpha(t), n_y(t)$  и т.д.), тепловых характеристик, потребного относительного запаса топлива  $(\mu_T)$ , относительных масс отдельных агрегатов (бокового отсека  $\mu_{бо}$ , крыла  $\mu_{кр}$ , оперения  $\mu_{оп}$ , привода управления  $\mu_{пр}$ , двигательной установки  $\mu_{ду}$ , фюзеляжа  $\beta_\phi$  и т.п.) и увеличению стартовой массы  $m_0$ , стоимости ЛА  $(C_{ЛА})$  и стоимости одного пуска  $(C_{1п})$ , т.е. одной из составляющих принятого комплексного критерия качества  $K$ .

С другой стороны, применение перспективных технических решений (ТР) по БРУ позволяют увеличить вероятности распознавания  $W_{расп}$ , наведения  $W_{нав}$ , обнаружение  $W_{обн}$ . Это приводит к увеличению эффективности ЛА в целом

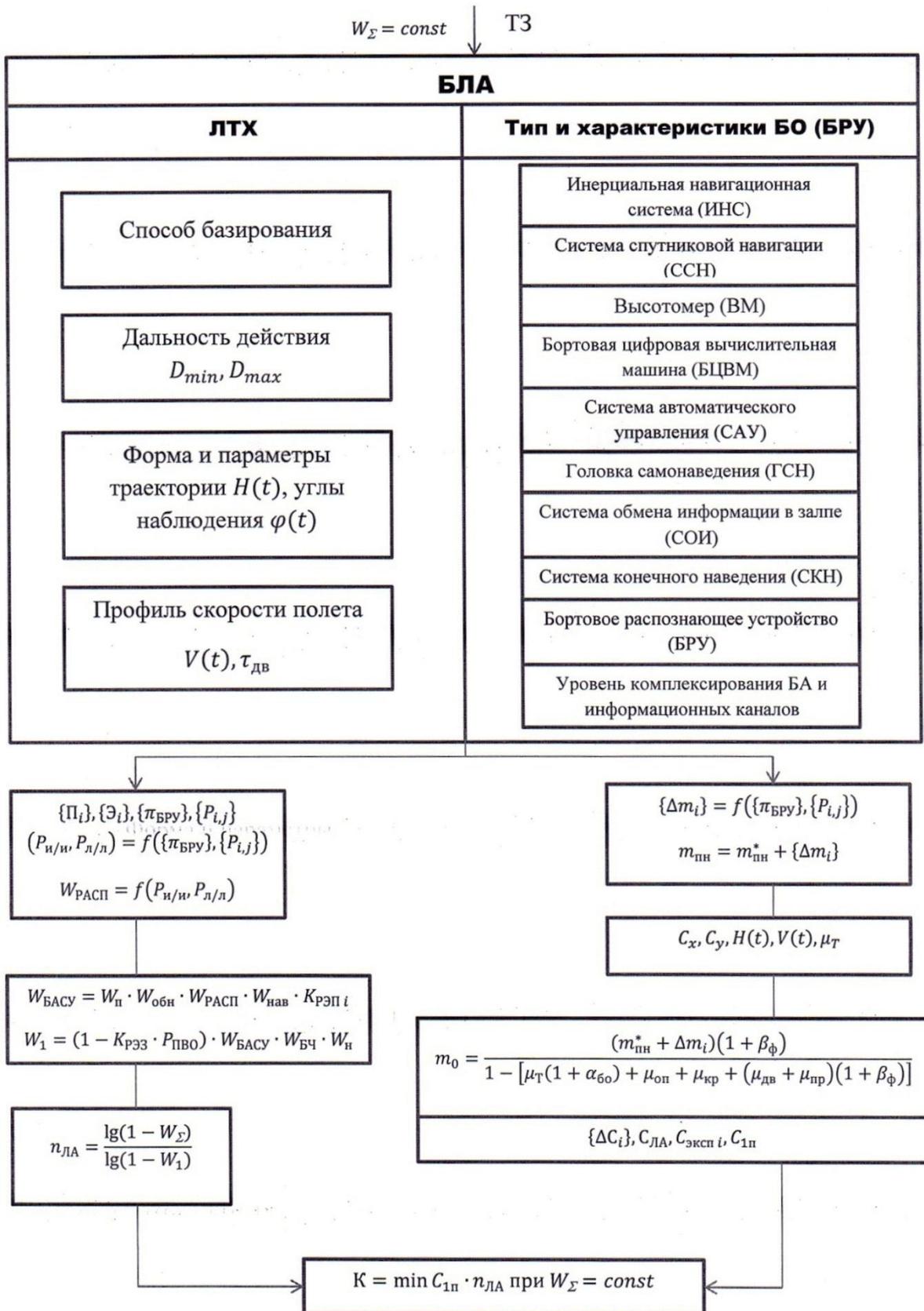


Рис. 5. Блок-схема структурно-параметрического анализа и синтеза проектных решений.

$W_1$ , к снижению потребного наряда  $n_{ЛА}$  на выполнение задачи с заданной вероятностью  $W_{\Sigma}=\text{const}$ , уменьшается вторая составляющая принятого критерия.

Такое разнородное влияние альтернативных ТР на составляющие критерия обуславливает наличие рациональных структурных решений по БРУ и ЛА в целом, оптимума по проектным параметрам. Они и определяют облик БРУ и ЛА в целом.

Для практической реализации сформулированных задач необходимо располагать математическими моделями, алгоритмами и программами расчетов аэродинамических, энергетических, баллистических, температурных, массовых, объемных, экономических характеристик и показателей эффективности функционирования отдельных подсистем (БРУ) и ЛА в целом в операции.

### **Выводы**

1. Предложена методика структурно-параметрического синтеза проектных решений по бортовому распознающему устройству в составе беспилотного летательного аппарата по комплексному критерию «стоимость-эффективность».
2. Сформулирована матрица признаков, характеризующих объект с точки зрения распознавания.
3. Изложен байесовский метод оценки вероятности принадлежности объекта к классу истинных и ложных.

4. Сформулирована постановка задачи структурного синтеза технических решений по БРУ и оптимизации проектных параметров, как одной из подсистем БЛА.
5. Разработана блок-схема структурно-параметрического синтеза бортового распознающего устройства.

Представленная в данной работе системная методология может быть применена для комплексного анализа и синтеза проектных решений по облику БЛА и других отдельных его подсистем.

### **Библиографический список**

1. Агапов О.А. Обнаружение полезного сигнала на фоне сигналов активных помех в полном поляризационном базисе при известной межканальной корреляционной матрице // Труды МАИ, 2016, №89:  
<http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=73361>
2. Гусейнов А.Б. Эффективность крылатых ракет с ТРД. – М.: Издательство МАИ, 2003. – 88 с.
3. Гусейнов А.Б., Трусков В.Н. Проектирование малозаметных летательных аппаратов. – М.: Издательство МАИ, 2014. – 288 с.
4. Дуда Р., Хорт П. Распознавание образов и анализ схем – М.: Мир, 1976. -509 с.
5. Ильичев А.В., Волков В.Д., Грущанский В.А. Эффективность проектируемых элементов сложных систем. – М.: Высшая школа, 1982. - 280 с.
6. Колосовская Т.П. Субоптимальный алгоритм оценивания и параметрической идентификации для навигационных систем летательных аппаратов и других

- подвижных объектов на основе информации магнитного поля Земли // Труды МАИ, 2016, №88: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=70666>
7. Лазарев И.А. Синтез структуры систем электроснабжения летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1976. – 256 с.
  8. Сафронов Ю.П., Эльман Р.И. Инфракрасные распознающие устройства. – М.: Воениздат, 1976. – 207 с.
  9. Ткаченко С.С., Иванов С.Л., Аврамов А.В. Комплексование бортовых радиоэлектронных локационных систем в интересах косвенной идентификации целей // Труды МАИ, 2016, №87: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=69746>
  10. Чернобровкин Л.С. Общее проектирование управляемых снарядов. – М.: Машиностроение, 1970. – 512 с.