

## РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ СИНТЕЗА АДАПТИВНОГО УСТРОЙСТВА СОВМЕСТНОГО ИЗМЕРЕНИЯ-РАСПОЗНАВАНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ОБЪЕКТОВ

Свинарский М.В., Ярмолик С.Н., Храменков А.С., Зайко Е.В., Леонович А.С.

Военная академия Республики Беларусь, Минск, РБ. e-mail: [mechislav1993@gmail.com](mailto:mechislav1993@gmail.com)

### Введение

При решении задачи распознавания в радиолокационных системах в качестве классификационных признаков широко используют радиолокационные портреты (РЛП) объектов наблюдения [1]. Процесс принятия решения о классе наблюдаемого объекта предполагает сопоставление реализации наблюдаемого РЛП с имеющимися эталонными портретами [1]. Эффективность принимаемого решения во многом зависит от оптимальности процедуры обработки выделенного РЛП и степени соответствия портрета ожидаемому эталону. Поскольку обрабатываемый РЛП формируется относительно линии визирования (ЛВ) «радиолокатор-цель», то процесс формирования эталонного РЛП также должен предполагать учет текущей пространственной ориентации объекта относительно системы координат (СК) ЛВ [2]. С этой целью необходимо оценивать текущие значения УПО наблюдаемого объекта относительно СК ЛВ и использовать их в интересах адаптации систем радиолокационного распознавания. Под СК ЛВ будем понимать систему координат, ось  $Ox_{ЛВ}$  которой совпадает с ЛВ, ось  $Oy_{ЛВ}$  направлена вверх по перпендикуляру к оси  $Ox_{ЛВ}$ , а ось  $Oz_{ЛВ}$  образует с ними правую тройку векторов. Ориентация наблюдаемого объекта в СК ЛВ определяется совокупностью трех углов пространственной ориентации (УПО), характеризующих курс ( $\psi^{ЛВ}$ ), тангаж ( $\vartheta^{ЛВ}$ ) и крен ( $\gamma^{ЛВ}$ ) летательного аппарата (ЛА) в используемой СК [2].

В процессе исследований была разработана методика оценивания УПО ЛА, основанная на нелинейном преобразовании фильтрованных прямоугольных координат [2]. Однако обеспечение высокой точности оценивания УПО ЛА заставляет затрачивать значительные временные ресурсы [3]. Необходимость использования компромиссного решения между точностью оценивания УПО ЛА и располагаемым временным ресурсом вынуждает совершенствовать подходы к построению адаптивных систем. Одним из способов адаптации устройства распознавания к изменяющимся условиям наблюдения является учет при классификации закона распределения текущих оценок УПО ЛА [3]. При построении систем распознавания радиолокационных объектов, функционирующих в условиях ограниченного временного ресурса, целесообразно использовать совместное решение задач измерения УПО объекта и определения его класса.

Целью доклада является синтез структуры устройства совместного измерения-распознавания радиолокационных объектов с адаптацией обрабатываемых РЛП к пространственной ориентации распознаваемого объекта наблюдения.

### Основная часть

При синтезе структуры устройств совместного измерения-распознавания, функционирующих в условиях априорной неопределенности (в данном случае относительно пространственной ориентации объекта наблюдения), наиболее распространенным является Байесовский подход [4]. Байесовский критерий синтеза подразумевает формирование оценок среднего (апостериорного) риска на основе данных наблюдения и минимизацию этих оценок путем выбора оптимального правила решения [4].

В качестве критерия синтеза устройства использован минимум апостериорного риска  $R_{\hat{\theta}^{ЛВ}, \xi}$ , совместного распознавания класса объекта наблюдения и измерения его пространственной ориентации, с простой функцией стоимости принятия решения о классе цели и квадратичной функцией потерь для задачи измерения [4]:

$$R_l(\hat{\Theta}^{LB}, \xi) = \frac{1}{p(A_l)} \sum_{g=1}^M p(A_g) \Lambda(A_l | A_g) \times \left[ \Pi_{lg} + \int_{\Gamma_{\Theta^{LB}}} (\hat{\Theta}^{LB} - \Theta^{LB})^T (\hat{\Theta}^{LB} - \Theta^{LB}) p(\xi | \xi, A_g) d(\Theta^{LB}) \right], \quad l = \overline{1, M}, \quad (1)$$

где  $A_l$  – гипотеза о объекте  $l$ -го класса;  $\hat{\Theta}^{LB}$  – оценка УПО ЛА;  $\xi$  – элементы РЛП;  $p(A_l)$  – безусловная плотность распределения  $\xi$ ;  $M$  – количество классов;  $P(A_g)$  – априорная вероятность появления объекта  $g$ -го класса;  $p(\xi | \xi, A_g)$  – апостериорная плотность вероятности УПО ЛА, условная по классу объекта наблюдения и элементам РЛП;  $\Lambda(A_l | A_g)$  – условное отношение правдоподобия при справедливости гипотезы  $A_g$ ;  $\Pi_{lg}$  – стоимости за решение об объекте  $l$ -го класса при условии, что он  $g$ -го;  $\Gamma_{\Theta^{LB}}$  – область определения УПО ЛА;  $\Theta^{LB}$  – истинное значение УПО ЛА;  $p(\xi | \xi, A_g)$  – апостериорная плотность вероятности УПО ЛА, условная по классу объекта наблюдения и элементам РЛП.

Известно [4], что отношение правдоподобия, условное по классу наблюдаемого объекта, определяется выражением:

$$\Lambda(A_l | A_g) = \int_{\Gamma_{\Theta^{LB}}} p(\xi | \xi, A_g) \Lambda(\Theta^{LB} | \Theta^{LB}, A_g) d(\Theta^{LB}), \quad g = \overline{1, M}, \quad (2)$$

где  $p(\xi | \xi, A_g)$  – условная плотность вероятности параметра  $\Theta^{LB}$ , при наблюдении объекта  $g$ -го класса;  $\Lambda(\Theta^{LB} | \Theta^{LB}, A_g) = p(\Theta^{LB} | \Theta^{LB}, A_g) / p(\Theta^{LB} | A_0)$  – отношение правдоподобия, условное по классу наблюдаемого объекта ( $A_g$ ) и значению УПО ЛА ( $\Theta^{LB}$ ), для всех анализируемых классов;  $p(\Theta^{LB} | \Theta^{LB}, A_g)$  – плотность вероятности реализации  $\xi$ , условная по классу объекта наблюдения  $A_g$  и значению УПО ЛА  $\Theta^{LB}$  (функция правдоподобия);  $p(\Theta^{LB} | A_0)$  – плотность вероятности шума.

Выражение (2) определяет метод адаптации эталонных РЛП к текущим условиям наблюдения. В качестве метода адаптации используется метод учета закона распределения УПО ЛА [3]. Суть данного метода заключается в адаптивном формировании РЛП, в соответствии с текущими оценками распределения УПО ЛА. В качестве примера на рисунке 1 представлен пример формирования адаптивного эталонного дальномерного радиолокационного портрета (ДРЛП) методом учета закона распределения УПО ЛА для самолета «Tornado».

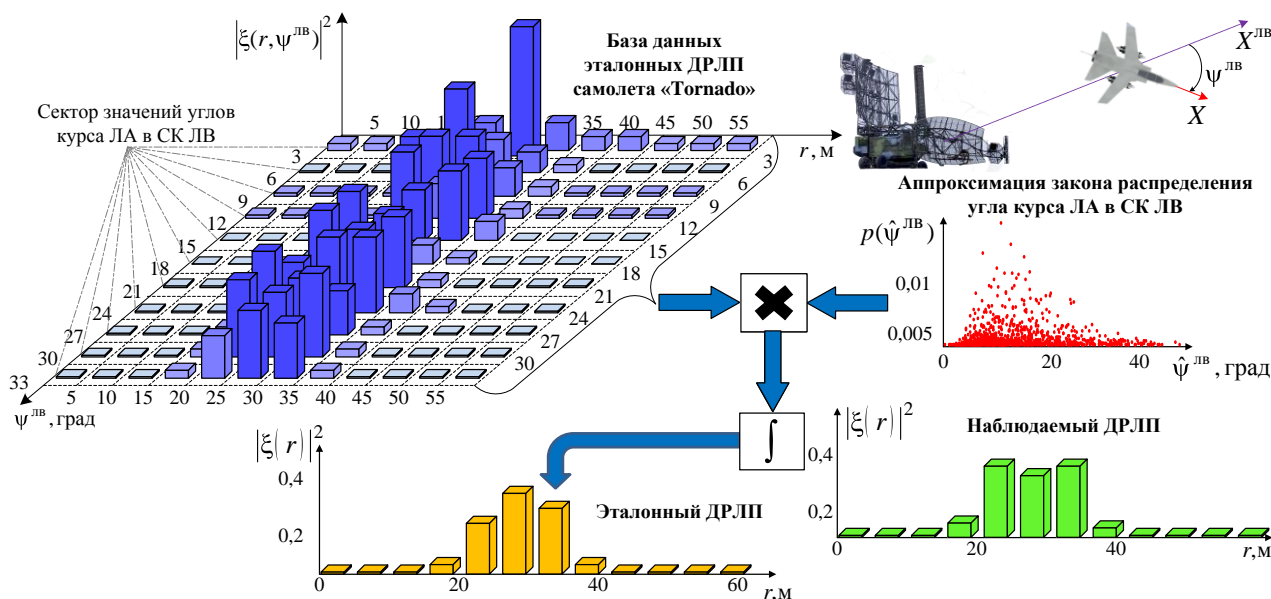


Рисунок 1 – Формирование адаптивного эталонного ДРЛП МУЗР УПО ЛА

Решение задачи совместного измерения УПО и распознавания класса объекта предполагает поэтапную минимизацию выражения апостериорного риска (1).

Результатом первого этапа минимизации апостериорного риска является выражение для формирования оптимальной оценки УПО ЛА:

$$\hat{\Theta}^{ЛВ} = \sum_{g=1}^M P(A_g | \xi) \hat{\Theta}^{ЛВ}(A_g), \quad (3)$$

где  $\hat{\Theta}^{ЛВ}(A_g)$  – условная оценка УПО ЛА (условное математическое ожидание), вычисляемая при наблюдении объекта  $g$ -го класса;  $P(A_g | \xi)$  – апостериорная вероятность наблюдения объекта  $g$ -го класса.

Результирующая оценка представляет собой взвешенную сумму условных математических ожиданий оценок УПО ЛА, формируемых при наблюдении объекта каждого из возможных классов. Весовыми коэффициентами являются значения апостериорной вероятности наблюдения объекта соответствующего класса.

Второй этап минимизации апостериорного риска, реализуемый для решения задачи определения класса наблюдаемого объекта, производится с учетом полученной оптимальной оценки УПО ЛА (3). Условная байесовская оценка, характеризующая класс наблюдаемого объекта, определяется минимальным значением риска (1). Правило принятия решения о классе наблюдаемого объекта, соответствующее минимальному значению апостериорного риска, принимает вид:

$$\text{если } J_k < J_l, l = \overline{1, M}, k \neq l, \text{ то } A_k^*, \quad (4)$$

где  $J_{k(l)} = \sum_{g=1}^M P(A_g) \Lambda(A_g | A_k) \Pi_{k(l)g}$  – значение апостериорного риска, соответствующее наблюдению объекта  $k$  ( $l$ )-го класса.

Принимаемое решение о классе наблюдаемого объекта  $A_k^*$  характеризуется минимальным значением апостериорного байесовского риска, учитывая при этом априорные вероятности появления объектов, величины потерь, соответствующие формируемым оценкам, а также значения условных отношений правдоподобия, обусловленных наблюдаемыми данными.

Структурная схема устройства радиолокационного распознавания, реализующая синтезированный байесовский алгоритм совместного измерения-распознавания, с учетом адаптации к УПО объекта наблюдения представлена на рисунке 2.

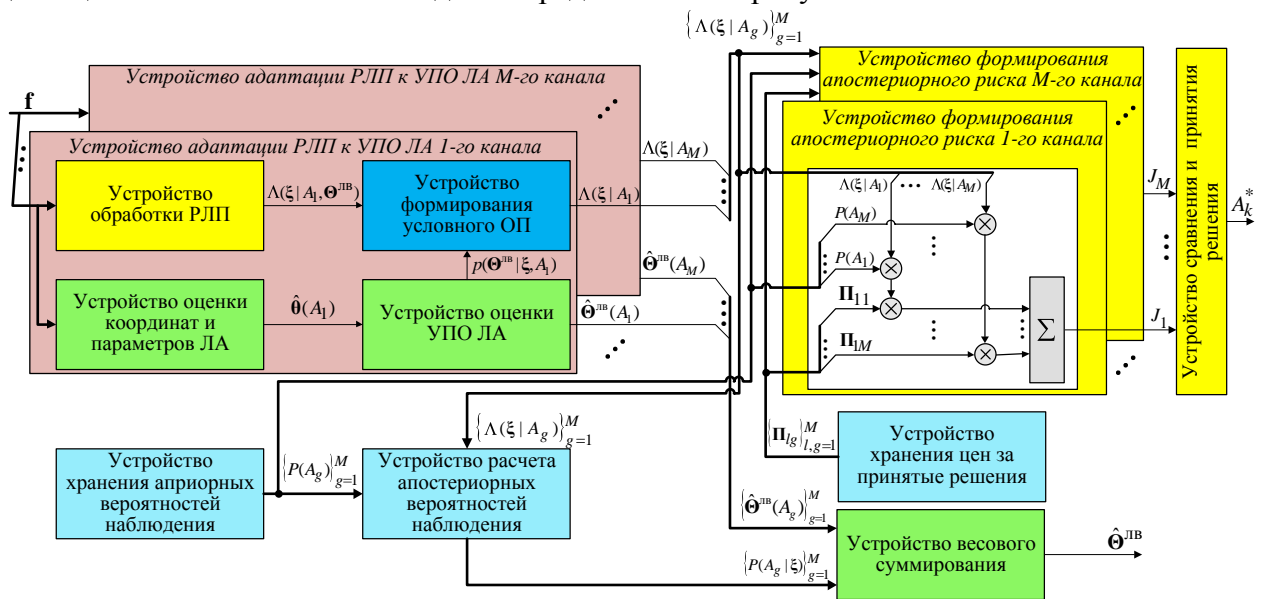


Рисунок 2 – Структурная схема устройства распознавания радиолокационных объектов с адаптацией к углам пространственной ориентации

В состав устройства распознавания входят:

- многоканальное устройство обработки РЛП;
- многоканальное устройство оценки координат объекта;
- многоканальное устройство оценки УПО объекта;
- многоканальное устройство формирования условного отношения правдоподобия;
- устройство расчета апостериорных вероятностей наблюдения;
- устройство хранения апериорных вероятностей наблюдения;
- устройство хранения цен за принятые решения;
- устройство весового суммирования;
- многоканальное устройство формирования апостериорного риска;
- устройство сравнения и принятия решения.

Многоканальное устройство обработки РЛП предназначено для расчета значения отношения правдоподобия каждого из анализируемых классов ( $\Lambda(\xi | A_g, \Theta^{ЛВ})$ ,  $g = \overline{1, M}$ ), условных по классу наблюдаемого объекта и по значению УПО ЛА. В общем случае каждый канал включает в себя устройство выделения и оптимальной обработки анализируемого РЛП, структура которых определяется типом РЛП [1].

Многоканальное устройство оценки координат объекта предназначено для измерения сферических координат наблюдаемого объекта ( $\hat{\Theta}(A_g)$ ,  $g = \overline{1, M}$ ). Структура типового канала оценивания определяется реализуемым алгоритмом измерения координат с учетом особенностей каждого из анализируемых классов объектов [1].

Многоканальное устройство оценки УПО объекта служит для формирования текущих оценок углов ориентации наблюдаемого объекта и их текущих распределений ( $\hat{\Theta}^{ЛВ}(A_g)$  и  $p(\Theta^{ЛВ} | \xi, A_g)$ ,  $g = \overline{1, M}$ ).

Многоканальное устройство формирования условного отношения правдоподобия предназначено для адаптации эталонных РЛП к УПО наблюдаемого объекта [3]. На выходах каналов формируются значения отношения правдоподобия каждого из анализируемых классов ( $\Lambda(\xi | A_g)$ ,  $g = \overline{1, M}$ ), соответствующие текущим условиям наблюдения.

*Устройство расчета апостериорных вероятностей наблюдения* реализует вычисление апостериорных вероятностей наблюдения каждого из анализируемых классов ( $P(A_g | \xi)$ ,  $g = \overline{1, M}$ ).

*Устройство хранения априорных вероятностей наблюдения* предназначено для хранения априорно известных вероятностей наблюдения объектов анализируемых классов ( $P(A_g)$ ,  $g = \overline{1, M}$ ).

*Устройство хранения цен за принятые решения* обеспечивает возможность хранения и использования соответствующих элементов матрицы стоимостей ( $\Pi_{lg}$ ,  $l, g = \overline{1, M}$ ). Значения цен могут выбираться различными известными способами.

*Устройство весового суммирования* предназначено для формирования оценки УПО объекта, минимизирующей апостериорный риск согласно выражению (3).

*Многоканальное устройство формирования апостериорного риска* предназначено для формирования апостериорного риска ( $J_l$ ,  $l = \overline{1, M}$ ).

*Устройство сравнения и принятия решения*, согласно выражению (4), реализует байесовское правило принятия решения о классе наблюдаемого объекта.

Реализованный подход к распознаванию, основанный на обработке РЛП наблюдаемых объектов с использованием адаптации к изменяющимся УПО ЛА, позволит повысить эффективность решаемых задач без дополнительных временных затрат.

### **Заключение**

Совместное решение задачи измерения-распознавания на основе двухфункционального решающего правила позволяет формировать оценку УПО объекта и использовать ее для адаптации обрабатываемого РЛП с целью распознавания его класса. Представленный подход способствует повышению эффективности классификации радиолокационных объектов, не требуя использования дополнительного временного ресурса на адаптацию к изменяющимся углам визирования объектов. Достоинством синтезированного алгоритма является решение задачи распознавания класса наблюдаемого объекта с одновременным оцениванием углов его пространственной ориентации, обеспечивая при этом адаптацию эталонного портрета к текущим значениям углов наблюдения.

### **Список используемых источников**

1. Курлович, В. И. Основы теории радиосистем: учеб. пособие / В. И. Курлович, С. В. Шаляпин. – Минск : ВА РБ, 1999. – 342 с.
2. Ярмолик, С. Н. Повышение точности оценивания ориентации летательного аппарата в интересах адаптации радиолокационных портретов к условиям наблюдения / С. Н. Ярмолик, М. В. Свинарский, А. С. Храменков, Е. В. Зайко // Доклады БГУИР, 2018. № 5. С. 57–64.
3. Ярмолик, С. Н. Способ повышения эффективности распознавания радиолокационных объектов с адаптацией к углам пространственной ориентации / С. Н. Ярмолик, М. В. Свинарский, А. С. Храменков, Е. В. Зайко // Вестник ВА РБ, 2018. № 3. С. 68–75.
4. Репин, В. Г. Статистический синтез при априорной неопределенности и адаптации информационных систем / В. Г. Репин, Г. П. Тартаковский. – М.: «Советское радио», 1977. – 432 с.