CC BY

http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-5-33-41

УДК 621.396.96

МЕТОДИКА СИНТЕЗА УСТРОЙСТВА ДВУХАЛЬТЕРНАТИВНОГО РАДИОЛОКАЦИОННОГО РАСПОЗНАВАНИЯ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ОПОРНЫХ ВЕКТОРОВ И ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО КРИТЕРИЯ ВАЛЬДА

В. Г. ЧИГРЯЙ[1], А. С. СОЛОНАР[2], А. С. ХРАМЕНКОВ[1]

[1]Военная академия Республики Беларусь (Минск, Республика Беларусь)
[2]ОАО «КБ Радар» – управляющая компания холдинга «Системы радиолокации» (Минск, Республика Беларусь)

Аннотация. В статье рассматривается задача синтеза устройства двухальтернативного радиолокационного распознавания при отсутствии априорных аналитических моделей распределения классификационных признаков. Предложена методика последовательного распознавания радиолокационных объектов, основанная на совместном применении метода опорных векторов и последовательного критерия отношения вероятностей Вальда. На этапе обучения формируется разделяющая гиперплоскость, относительно которой многомерное признаковое пространство преобразуется в одномерную решающую величину – ориентированное расстояние до границы разделения классов. По обучающей выборке оцениваются условные вероятности правильного и ложного распознавания, используемые для формирования приращений решающей статистики. На этапе распознавания статистика рекуррентно накапливается и сравнивается с пороговыми уровнями до принятия решения. Методика сохраняет единую алгоритмическую структуру при изменении состава признаков и допускает адаптацию путем повторного обучения классификатора.

Ключевые слова: радиолокационное распознавание, двухальтернативная классификация, последовательный критерий отношения вероятностей, метод опорных векторов.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Чигряй, В. Г. Методика синтеза устройства двухальтернативного радиолокационного распознавания на основе метода опорных векторов и последовательного критерия Вальда / В. Г. Чигряй, А. С. Солонар, А. С. Храменков // Доклады БГУИР. 2026. Т. 24, № 5. С. 33–41. http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-5-33-41.

METHODOLOGY FOR SYNTHESIZING A BINARY RADAR RECOGNITION DEVICE BASED ON SUPPORT VECTOR MACHINES AND WALD'S SEQUENTIAL CRITERION

VASIL CHYHRAI[1], ANDREI SOLONAR[2], ANDREI KHRAMIANKOU[1]

[1]Military Academy of the Republic of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)
[2]JSC "KB Radar" – Managing Company of "Radar Systems" Holding (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The article considers the synthesis of a binary radar recognition device in the absence of a priori analytical models of classification feature distributions. A methodology for sequential radar target recognition is proposed, based on the combined use of support vector machines and Wald's sequential probability ratio test. At the training stage, a separating hyperplane is constructed, with respect to which the multidimensional feature space is transformed into a one-dimensional decision variable represented by the signed distance to the class-separation boundary. Based on the training sample, the conditional probabilities of correct and false recognition are estimated and used to form increments of the decision statistic. At the recognition stage, the statistic is recursively accumulated and compared with threshold levels until a decision is made. The methodology preserves a unified algorithmic structure when the feature set changes and allows adaptation through repeated classifier training.

Keywords: radar recognition, binary classification, sequential probability ratio test, support vector machines.

Conflict of interests. The authors declare that there is no conflict of interests.

For citation. Chyhrai V., Solonar A., Khramiankou A. (2026) Methodology for Synthesizing a Binary Radar Recognition Device Based on Support Vector Machines and Wald's Sequential Criterion. *Doklady BGUIR*. 24 (5), 33–41. http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-5-33-41 (in Russian).

Введение

Задача радиолокационного распознавания (РЛР) состоит в установлении принадлежности наблюдаемого объекта к одному из заданных классов по совокупности классификационных признаков, формируемых на основе данных радиолокационного наблюдения. Существенный практический интерес представляет двухальтернативное РЛР, при котором требуется принять решение о принадлежности объекта к одному из двух взаимоисключающих классов. К таким задачам относятся распознавание малоразмерных беспилотных летательных аппаратов и птиц, селекция истинных и ложных баллистических целей, а также распознавание воздушных и наземных объектов по сигнальным и (или) траекторным признакам. Их общей особенностью является необходимость принятия решения при ограниченном времени наблюдения, неполной априорной информации и изменчивости признакового описания объекта.

Эффективный подход к решению задач двухальтернативного РЛР – применение последовательных статистических методов, в частности, последовательного критерия отношения вероятностей (ПКОВ) Вальда [1, 2]. Последовательные процедуры позволяют принимать решение по мере поступления новых наблюдений и завершать распознавание при достижении требуемой достоверности, что потенциально сокращает среднюю длительность наблюдения. Однако их практическое применение требует задания условных вероятностных моделей классификационных признаков для каждой из проверяемых гипотез.

В реальных условиях радиолокационного наблюдения признаки часто имеют высокую размерность, являются взаимно коррелированными, нестационарными и не имеют аналитических моделей плотности распределения. В этих условиях целесообразно использовать методы машинного обучения, формирующие разделяющие правила непосредственно по обучающим выборкам. Метод опорных векторов [3–5] эффективен для двухальтернативной классификации, однако в классическом виде ориентирован преимущественно на одношаговое принятие решений и не использует преимущества последовательного накопления информации.

В связи с этим актуальной является задача объединения метода опорных векторов и последовательного критерия Вальда в едином подходе к построению устройств двухальтернативного РЛР. Цель исследований авторов – разработка методики синтеза такого устройства, обеспечивающей реализацию последовательного распознавания без априорного задания аналитических моделей плотности распределения классификационных признаков.

Постановка задачи двухальтернативного радиолокационного распознавания

Двухальтернативное РЛР формализуется как задача последовательной проверки статистических гипотез. Пусть проверяются две альтернативные гипотезы: ϑ_1 – объект принадлежит первому классу, ϑ_2 – объект принадлежит второму классу. В процессе радиолокационного наблюдения на каждом $(k + 1)$-м шаге формируется случайный L-мерный вектор классификационных признаков

$$\mathbf{x}_{k+1} = \left[x_{k+1}^{(1)} \;\; x_{k+1}^{(2)} \;\; x_{k+1}^{(3)} \;\; \ldots \;\; x_{k+1}^{(L-1)} \;\; x_{k+1}^{(L)} \right]^{\mathrm{T}}. \tag{1}$$

В качестве элементов вектора $\mathbf{x}_{k+1}$ могут выступать оценки сигнальных и (или) траекторных радиолокационных признаков. Предполагается, что статистические свойства вектора $\mathbf{x}_{k+1}$ зависят от принадлежности объекта к одной из рассматриваемых гипотез и характеризуются соответствующими условными плотностями вероятности $p(\mathbf{x}_{k+1} \mid \vartheta_i)$, $i = 1, 2$.

К моменту наступления $(k + 1)$-го шага процедуры распознавания сформирована совокупность наблюдений $\mathbf{X}_{k+1} = [\mathbf{x}_1 \;\; \mathbf{x}_2 \;\; \mathbf{x}_3 \;\; \ldots \;\; \mathbf{x}_k \;\; \mathbf{x}_{k+1}]^{\mathrm{T}}$. Требуется по последовательности наблюдаемых векторов признаков $\mathbf{X}_{k+1}$ принять одно из следующих решений: гипотеза ϑ_1 верна, гипотеза ϑ_2 верна, либо продолжить наблюдение до получения дополнительной информации.

В соответствии с ПКОВ [1] на каждом $(k + 1)$-м шаге процедуры распознавания должно вычисляться отношение правдоподобия (ОП) наблюдаемой совокупности признаков при гипотезах ϑ_1 и ϑ_2

$$\Lambda_{k+1} = \frac{p(\mathbf{X}_{k+1} \mid \vartheta_1)}{p(\mathbf{X}_{k+1} \mid \vartheta_2)}, \tag{2}$$

где $p(\mathbf{X}_{k+1} \mid \vartheta_1)$, $p(\mathbf{X}_{k+1} \mid \vartheta_2)$ – многомерные плотности вероятности классификационных признаков, соответствующие гипотезам ϑ_1 и ϑ_2.

При допущении статистической независимости отдельных наблюдений условные многомерные плотности вероятности могут быть представлены в виде произведения

$$p(\mathbf{X}_{k+1} \mid \vartheta_i) = \prod_{j=1}^{k+1} p(\mathbf{x}_j \mid \vartheta_i), \; i = 1, \; 2, \tag{3}$$

где $p(\mathbf{x}_j \mid \vartheta_i)$ – многомерная плотность вероятности классификационных признаков, сформированная на текущем j-м шаге и соответствующая гипотезе ϑ_i.

Такой подход позволяет перейти к рекуррентной форме вычисления ОП (2). В логарифмическом представлении это соответствует накоплению решающей статистики в виде суммы приращений, каждое из которых определяется очередным наблюдением $\mathbf{x}_{k+1}$.

На каждом шаге распознавания текущее значение ОП, либо его логарифма, должно сравниваться с двумя пороговыми уровнями. При достижении верхнего порога принимается решение в пользу гипотезы ϑ_1, при достижении нижнего – в пользу гипотезы ϑ_2, а если текущее значение решающей статистики располагается между порогами, наблюдение продолжается. Значения порогов определяются исходя из требуемых вероятностей ошибочных решений для рассматриваемых гипотез.

Непосредственное применение ПКОВ Вальда к многомерному вектору классификационных признаков требует задания условных плотностей вероятности $p(\mathbf{x}_{k+1} \mid \vartheta_i)$, $i = 1, 2$, получение которых в задачах РЛР затруднено вследствие высокой размерности признакового пространства и отсутствия аналитических моделей распределений. Это обусловливает необходимость разработки процедуры формирования решающей статистики, пригодной для последовательного распознавания без явного задания многомерных вероятностных моделей классификационных признаков.

Методика синтеза устройства последовательного двухальтернативного радиолокационного распознавания

Предлагаемая методика синтеза состоит из этапов обучения и последовательного радиолокационного распознавания. Процедура синтеза включает следующие операции.

1. Этап обучения устройства распознавания

1.1. Формирование обучающей выборки классификационных признаков объектов двух классов на основе априорной информации об их принадлежности к гипотезам ϑ_1 и ϑ_2.

1.2. Построение в многомерном пространстве признаков решающей границы между указанными классами с применением метода опорных векторов.

1.3. Переход от многомерного признакового описания к одномерной величине расстояния, характеризующей положение реализации относительно решающей границы.

1.4. Оценка условных вероятностей, используемых при формировании приращений решающей статистики последовательного распознавания.

2. Этап последовательного радиолокационного распознавания

2.1. Формирование текущего вектора классификационных признаков по данным радиолокационного наблюдения.

2.2. Определение положения указанного вектора относительно решающей границы, полученной на этапе обучения.

2.3. Формирование приращения решающей статистики на основе условных вероятностей, оцененных по обучающей выборке.

2.4. Накопление решающей статистики по мере поступления новых наблюдений.

2.5. Сравнение накопленной статистики с пороговыми уровнями и принятие решения в пользу гипотезы ϑ_1, гипотезы ϑ_2 либо продолжения наблюдения.

На рис. 1 представлена функциональная схема, поясняющая методику синтеза устройства последовательного РЛР. Схема задает общую алгоритмическую структуру устройства РЛР, которая сохраняется при использовании различных наборов сигнальных или траекторных признаков. При изменении состава признаков, режима наблюдения или характеристик радиолокационного средства требуется повторное обучение классификатора, однако последовательность основных операций остается неизменной.

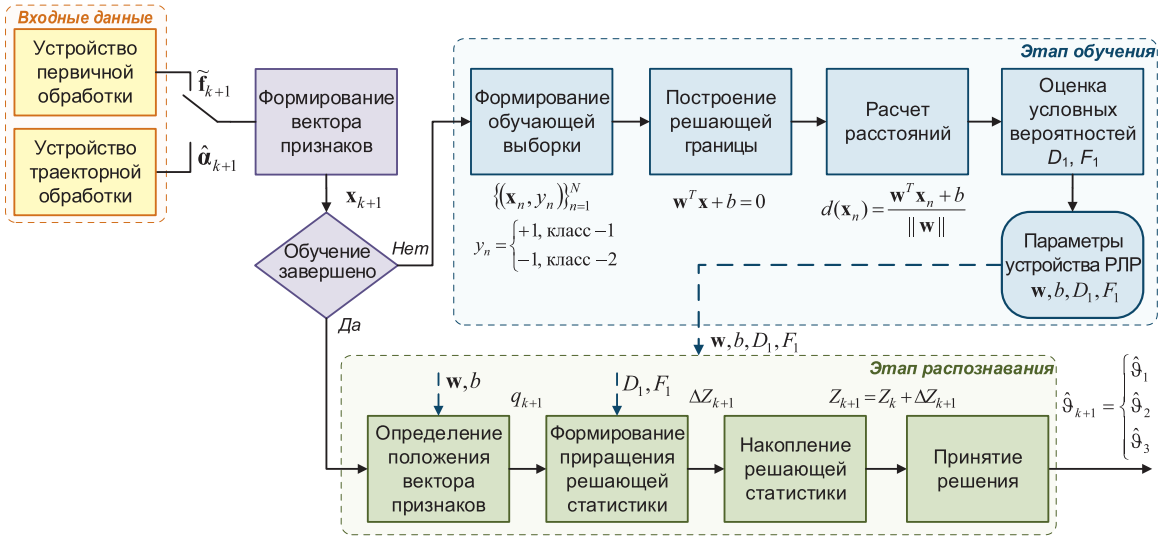


Рис. 1. Функциональная схема, поясняющая методику синтеза устройства последовательного радиолокационного распознавания
Fig. 1. Functional diagram explaining the method of synthesizing a sequential radar recognition device

Формализация этапа обучения устройства последовательного радиолокационного распознавания

Этап обучения выполняется до начала рабочего применения устройства и предназначен для формирования параметров, необходимых для последующей реализации процедуры последовательного РЛР.

Формирование обучающей выборки классификационных признаков объектов двух классов на основе априорной информации об их принадлежности к гипотезам ϑ_1 *и* ϑ_2. Исходными данными этапа обучения являются реализации радиолокационных наблюдений объектов с известной классовой принадлежностью. Если устройство предназначено для функционирования по сигнальным признакам, то обучающая выборка формируется по реализациям, доступным на этапе первичной обработки принятого сигнала $\tilde{\mathbf{f}}_{k+1}$. Если устройство синтезируется по траекторным признакам, то обучающая выборка формируется по признакам, вычисляемым на этапе траекторной обработки на основе фильтрованных оценок вектора состояния объекта $\hat{\boldsymbol{\alpha}}_{k+1}$.

В результате обработки радиолокационных данных для каждого наблюдаемого объекта формируется последовательность векторов классификационных признаков. На этапе обучения из совокупности таких реализаций составляется обучающая выборка вида

$$\left\{\left(\mathbf{x}_n, y_n\right)\right\}_{n=1}^{N}, \tag{4}$$

где $\mathbf{x}_n$ – L-мерный вектор классификационных признаков, соответствующий n-й реализации; y_n – метка класса, принимающая значения +1, если $\mathbf{x}_n$ относится к первому классу, и –1, если $\mathbf{x}_n$ относится ко второму классу; $N = N_1 + N_2$ – общее количество реализаций в обучающей выборке; N_1 (N_2) – количество реализаций, соответствующих объектам первого (второго) класса.

Для обеспечения сбалансированного обучения классификатора целесообразно использовать сопоставимое количество реализаций каждого класса $N_1 \approx N_2$ [6].

Построение в многомерном пространстве признаков решающей границы между указанными классами с применением метода опорных векторов. Для построения решающей границы между классами используется метод опорных векторов с линейным ядром [6]. Результатом обучения является уравнение разделяющей гиперплоскости вида

$$\mathbf{w}^T\mathbf{x} + b = 0, \tag{5}$$

где $\mathbf{w}$ – вектор нормали к разделяющей гиперплоскости; b – смещение.

Параметры $\mathbf{w}$ и b определяются путем решения задачи квадратичного программирования, обеспечивающей максимизацию ширины разделяющей полосы, ограниченной опорными векторами двух классов. Параметры разделяющей гиперплоскости определяются стандартной процедурой обучения метода опорных векторов [6].

Таким образом, уравнение (5) задает разбиение пространства признаков на две области $\Gamma_1 = \{\mathbf{x}: \mathbf{w}^T\mathbf{x} + b > 0\}$ и $\Gamma_2 = \{\mathbf{x}: \mathbf{w}^T\mathbf{x} + b < 0\}$, которые соответствуют гипотезам ϑ_1 и ϑ_2. Такое сопоставление определяется автоматически в процессе обучения на основе меток классов обучающей выборки.

Переход от многомерного признакового описания к одномерной величине расстояния, характеризующей положение реализации относительно решающей границы. Для реализации последовательной процедуры распознавания многомерный вектор признаков объекта преобразуется в одномерную решающую величину, сохраняющую информацию о положении реализации относительно решающей границы. В случае использования линейной разделяющей гиперплоскости такой величиной служит ориентированное расстояние от вектора признаков $\mathbf{x}_n$ до гиперплоскости (5)

$$d(\mathbf{x}_n) = \frac{\mathbf{w}^T\mathbf{x}_n + b}{\|\mathbf{w}\|}, \; n = 1, \ldots, N, \tag{6}$$

где $\|\mathbf{w}\| = \sqrt{\mathbf{w}^T\mathbf{w}} = \sqrt{\sum_{i=1}^{L} w_i^2}$ – евклидова норма вектора, перпендикулярного разделяющей гиперплоскости.

В отличие от этапа построения гиперплоскости, где ее положение фактически определяется только опорными векторами, на данном этапе расстояния $d(\mathbf{x}_n)$ вычисляются для всех реализаций обучающей выборки. Знак величины $d(\mathbf{x}_n)$ определяет область признакового пространства, к которой относится реализация, а модуль характеризует степень ее удаленности от границы разделения классов. Таким образом, обучающая выборка (4) в многомерном пространстве признаков преобразуется в выборку одномерных значений $\{(d(\mathbf{x}_n), y_n)\}_{n=1}^{N}$.

Оценка условных вероятностей, используемых при формировании приращений решающей статистики последовательного распознавания. Обозначим через D_1 условную вероятность того, что реализация, принадлежащая первому классу, будет отнесена к области Γ_1. Аналогично обозначим через F_1 условную вероятность того, что реализация, принадлежащая второму классу, также будет отнесена к области Γ_1. Тогда после перехода к одномерной величине расстояния указанные вероятности оцениваются по обучающей выборке:

$$D_1 = \frac{1}{N_1}\sum_{n:\, y_n=+1} \mathrm{I}(d(\mathbf{x}_n) \ge 0); \quad F_1 = \frac{1}{N_2}\sum_{n:\, y_n=-1} \mathrm{I}(d(\mathbf{x}_n) \ge 0), \tag{7}$$

где $\mathrm{I}(d(\mathbf{x}_n) \ge 0) = \begin{cases} 1, \text{ если } d(\mathbf{x}_n) \ge 0 \\ 0, \text{если } d(\mathbf{x}_n) < 0 \end{cases}$ – индикаторная функция.

Таким образом, величина D_1 характеризует вероятность правильного распознавания объекта первого класса, тогда как F_1 – вероятность ложного распознавания объекта первого класса. Соответственно, вероятность $1-D_1$ определяет вероятность ложного распознавания объекта второго класса, а $1-F_1$ – вероятность правильного распознавания объекта второго класса. Наглядная интерпретация процедуры оценивания указанных вероятностей приведена на рис. 2.

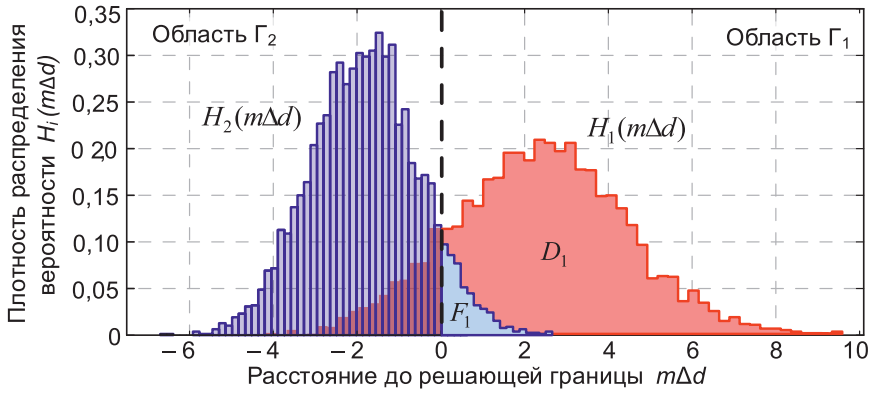


Рис. 2. Пример гистограммы распределения расстояний до решающей границы для объектов первого и второго классов

Fig. 2. Example histogram of the distribution of distances to the decision boundary for objects of the first and second classes

По оси абсцисс откладывается значение расстояния $m\Delta d$ от вектора признаков до решающей границы, а распределения данной величины для первого и второго классов (гистограммы $H_1(m\Delta d)$ и $H_2(m\Delta d)$) позволяют представить условные вероятности правильного и ложного распознавания в виде площадей под соответствующими кривыми распределения. Так, для примера на рис. 2 определены значения $D_1 = 0{,}859$ и $F_1 = 0{,}078$.

В качестве порогового для разделения классов принимается значение расстояния $m\Delta d = 0$, соответствующее разделяющей гиперплоскости, полученной методом опорных векторов (рис. 2, вертикальная линия). В соответствии с принятым разбиением признакового пространства условные вероятности D_1 и F_1 определяются как доли реализаций, попадающих в область $m\Delta d \geq 0$ при истинности гипотез ϑ_1 и ϑ_2 соответственно.

Этап обучения обеспечивает формирование исходных данных (параметров решающей границы $\mathbf{w}$ и b, а также условных вероятностей D_1 и F_1), необходимых для реализации ПКОВ без явного аналитического задания многомерных распределений классификационных признаков.

Формализация этапа последовательного радиолокационного распознавания

Этап последовательного РЛР реализуется в процессе текущего наблюдения объекта неизвестного класса и заключается в последовательном анализе поступающих векторов классификационных признаков с последующим накоплением решающей статистики и принятием решения в пользу одной из рассматриваемых гипотез ϑ_1 или ϑ_2.

Формирование текущего вектора классификационных признаков по данным радиолокационного наблюдения. На каждом шаге наблюдения формируется текущий вектор классификационных признаков объекта. В общем случае состав текущего вектора классификационных признаков $\mathbf{x}_{k+1}$ определяется видом используемой информации о наблюдаемом объекте и может включать сигнальные или траекторные признаки.

Определение положения вектора классификационных признаков относительно решающей границы, полученной на этапе обучения. На текущем шаге наблюдения для вектора признаков $\mathbf{x}_{k+1}$ по параметрам решающей границы (6), полученным на этапе обучения, вычисляется значение ориентированного расстояния $d(\mathbf{x}_{k+1})$. В зависимости от знака вводится бинарное решение q_{k+1}, определяемое следующим образом:

$$q_{k+1} = \begin{cases} +1, \text{ если } d(\mathbf{x}_{k+1}) \geq 0; \\ -1, \text{ если } d(\mathbf{x}_{k+1}) < 0. \end{cases} \tag{8}$$

Значение $q_{k+1} = +1$ соответствует отнесению текущего вектора признаков к области Γ_1, характеризующей гипотезу ϑ_1, а $q_{k+1} = -1$ – к области Γ_2, характеризующей гипотезу ϑ_2.

Формирование приращения решающей статистики на основе условных вероятностей, оцененных по обучающей выборке. Поскольку q_{k+1} является бинарной случайной величиной, ее распределение при каждой из гипотез ϑ_1 и ϑ_2 полностью определяется двумя парами условных вероятностей:

$$\begin{gathered} P(q_{k+1} = +1 \,|\, \vartheta_1) = P(d(\mathbf{x}_{k+1}) \geq 0 \,|\, \vartheta_1) = D_1, \;\; P(q_{k+1} = +1 \,|\, \vartheta_2) = P(d(\mathbf{x}_{k+1}) \geq 0 \,|\, \vartheta_2) = F_1; \\ P(q_{k+1} = -1 \,|\, \vartheta_1) = P(d(\mathbf{x}_{k+1}) < 0 \,|\, \vartheta_1) = 1 - D_1, \;\; P(q_{k+1} = -1 \,|\, \vartheta_2) = P(d(\mathbf{x}_{k+1}) < 0 \,|\, \vartheta_2) = 1 - F_1. \end{gathered} \tag{9}$$

Следовательно, условные функции правдоподобия бинарного решения q_{k+1} при проверяемых гипотезах могут быть представлены в виде:

$$p(q_{k+1} \,|\, \vartheta_1) = \begin{cases} D_1, & \text{если } q_{k+1} = +1; \\ 1 - D_1, & \text{если } q_{k+1} = -1; \end{cases} \quad p(q_{k+1} \,|\, \vartheta_2) = \begin{cases} F_1, & \text{если } q_{k+1} = +1; \\ 1 - F_1, & \text{если } q_{k+1} = -1. \end{cases} \tag{10}$$

В соответствии с ПКОВ Вальда [1] приращение решающей статистики на $(k + 1)$-м шаге наблюдения определяется логарифмом ОП текущего значения бинарного решения

$$\Delta Z_{k+1} = \ln \frac{p(q_{k+1} \,|\, \vartheta_1)}{p(q_{k+1} \,|\, \vartheta_2)}. \tag{11}$$

Подставляя выражения (10) в (11), получаем следующие формулы для приращений решающей статистики:

$$\Delta Z_{k+1} = \begin{cases} \ln\left(\dfrac{D_1}{F_1}\right), & \text{если } q_{k+1} = +1; \\ \ln\left(\dfrac{1-D_1}{1-F_1}\right), & \text{если } q_{k+1} = -1. \end{cases} \tag{12}$$

Важной особенностью предложенного способа формирования приращения решающей статистики (12) является то, что условные вероятности D_1 и F_1 не задаются априорно и не выводятся из аналитических моделей распределения многомерного вектора признаков. Они оцениваются непосредственно по обучающей выборке после построения решающей границы методом опорных векторов. Это позволяет реализовать процедуру применения ПКОВ Вальда в задаче двухальтернативного РЛР в тех случаях, когда многомерные условные плотности вероятности классификационных признаков неизвестны, имеют сложную структуру или прямое вероятностное моделирование многомерного признакового пространства затруднено.

Таким образом, предложенный способ формирования статистики (12) выступает связующим звеном между этапом обучения, на котором строится разделяющее правило в многомерном пространстве признаков, и этапом распознавания, на котором рекуррентно формируется решающая статистика.

Накопление решающей статистики по мере поступления новых наблюдений. В процессе РЛР в режиме реального времени последовательность бинарных решений, формируемых на основе текущих реализаций вектора классификационных признаков, используется для накопления решающей статистики ПКОВ Вальда. Решающая статистика на (k + 1)-м шаге наблюдения формируется в виде рекуррентной суммы указанных приращений

$$Z_{k+1} = Z_k + \Delta Z_{k+1},\ Z_0 = 0\,. \tag{13}$$

Особенности реализации процедуры накопления решающей статистики определяются типом применяемых классификационных признаков. При использовании сигнальных признаков вектор $\mathbf{x}_{k+1}$ формируется на этапе первичной обработки и характеризует отдельную радиолокационную отметку. В связи с этим перед накоплением решающей статистики сопровождаемой цели требуется выполнение процедуры отождествления отметок. Для этого информационное описание отметки дополняется результатом текущего распознавания, представленным в виде бинарного решения q_{k+1} либо соответствующего приращения решающей статистики ΔZ_{k+1}. После отождествления указанная информация используется для обновления решающей статистики сопровождаемой цели. При использовании траекторных признаков такая процедура не требуется, поскольку признаки $\mathbf{x}_{k+1}$ вычисляются непосредственно по фильтрованным оценкам вектора состояния цели. При этом вычисление q_{k+1} и формирование ΔZ_{k+1} выполняются непосредственно на этапе траекторной обработки. Независимо от типа используемых признаков последующая процедура принятия решения на основе сравнения накопленной решающей статистики с пороговыми уровнями остается неизменной.

Сравнение накопленной статистики с пороговыми уровнями и принятие решения в пользу гипотез ϑ_1 и ϑ_2, либо о продолжении наблюдения. На каждом (k + 1)-м шаге наблюдения после вычисления значения Z_{k+1} (13) осуществляется его сравнение с порогами [1]:

$$Z^*_{up} = \ln\left(\frac{D_{\text{тр}}}{F_{\text{тр}}}\right);\ Z^*_{low} = \ln\left(\frac{1-D_{\text{тр}}}{1-F_{\text{тр}}}\right), \tag{14}$$

где $D_{\text{тр}}$ ($F_{\text{тр}}$) – требуемая условная вероятность правильного (ложного) распознавания объекта первого класса.

В таком случае правило принятия решения имеет следующий вид:

$$\hat{\vartheta}_{k+1} = \begin{cases} \hat{\vartheta}_1, \text{если } Z_{k+1} \geq Z^*_{up}; \\ \hat{\vartheta}_2, \text{если } Z_{k+1} \leq Z^*_{low}; \\ \hat{\vartheta}_3, \text{если } Z^*_{low} < Z_{k+1} < Z^*_{up}, \end{cases} \tag{15}$$

где $\hat{\vartheta}_1$, $\hat{\vartheta}_2$ – решение о принадлежности объекта к первому и второму классам соответственно; $\hat{\vartheta}_3$ – решение о продолжении наблюдения.

При каждом новом шаге наблюдения значение решающей статистики изменяется на фиксированную величину, определяемую бинарным решением q_{k+1}. В случае, если бинарное решение $q_{k+1} = +1$, решающая статистика возрастает на величину $\Delta Z_{k+1}(q_{k+1} = +1) = \ln\left(D_1/F_1\right)$, в противном случае – уменьшается на $\Delta Z_{k+1}(q_{k+1} = -1) = \ln\left(\left(1-D_1\right)/\left(1-F_1\right)\right)$. Процесс наблюдения продолжается до момента пересечения решающей статистикой одного из порогов, после чего принимается окончательное решение о классе наблюдаемого объекта.

На рис. 3 представлена иллюстрация процесса формирования решающей статистики и принятия решения в соответствии с ПКОВ для случая, когда условные вероятности, полученные на этапе обучения, равны $D_1 = 0{,}859$ и $F_1 = 0{,}078$, а требуемые заданы $D_{тр} = 0{,}9$ и $F_{тр} = 0{,}01$. В этом случае значения приращений решающей статистики составляют $\Delta Z_{k+1}(q_{k+1} = +1) = 2{,}4$ и $\Delta Z_{k+1}(q_{k+1} = -1) = -1{,}88$.

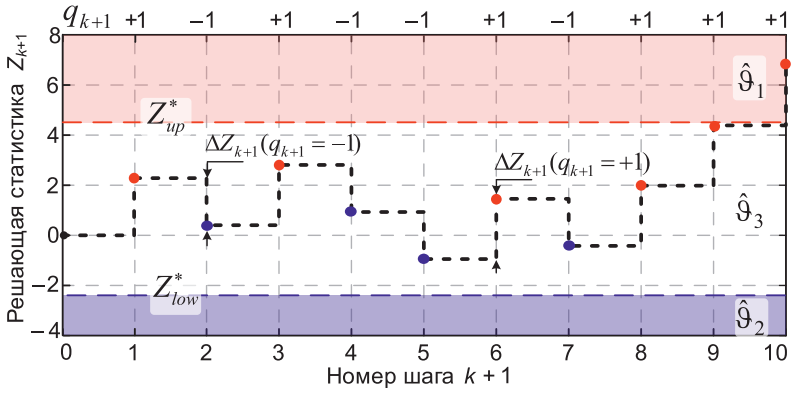


Рис. 3. Пример формирования решающей статистики и принятия решения в соответствии с последовательным критерием отношения вероятностей
Fig. 3. An example of forming decisive statistics and making a decision in accordance with a sequential probability ratio criterion

Следует отметить, что вероятности D_1 и F_1 характеризуют качество одношагового решения, формируемого классификатором на основе текущего вектора признаков. Вероятности $D_{тр}$ и $F_{тр}$ задают требуемые показатели качества всей последовательной процедуры распознавания. Поэтому практический смысл последовательного накопления проявляется в том случае, когда требования к итоговому решению более жесткие, чем качество одного наблюдения, т. е., как правило, $D_{тр} > D_1$ и $F_{тр} < F_1$. В этом случае одиночное решение классификатора недостаточно для принятия окончательного решения с заданной достоверностью, и требуется накопление нескольких бинарных решений. Если же принять $D_{тр} = D_1$ и $F_{тр} = F_1$, последовательная процедура фактически вырождается в одношаговую, поскольку пороговые уровни оказываются согласованными с приращениями статистики одного наблюдения.

Заключение

1. Разработана методика синтеза устройства двухальтернативного радиолокационного распознавания, основанная на совместном применении метода опорных векторов и последовательного критерия отношения вероятностей Вальда. Предложенный подход обеспечивает реализацию последовательного распознавания без аналитического задания многомерных условных плотностей вероятности классификационных признаков за счет перехода от многомерного пространства признаков к бинарным решениям, формируемым относительно разделяющей гиперплоскости.

2. Предложен способ формирования приращений решающей статистики последовательного критерия отношения вероятностей Вальда на основе условных вероятностей правильного и ложного распознавания, оцениваемых непосредственно по обучающей выборке после построения решающей границы методом опорных векторов. Это позволяет выполнять рекуррентное накопление решающей статистики в процессе радиолокационного наблюдения и принимать решение по мере поступления новых наблюдений.

3. Методика имеет единую алгоритмическую структуру при использовании различных типов классификационных признаков и может быть реализована как по сигнальным признакам, фор-

мируемым на этапе первичной обработки радиолокационных сигналов, так и по траекторным признакам, вычисляемым при сопровождении целей. Это обеспечивает возможность ее практического применения в задачах радиолокационного распознавания.

Список литературы / References

1. Fu K. (1971) *Sequential Methods in Pattern Recognition and Machine Learning*. Moscow, Nauka (in Russian).
2. Khramiankou A. S., Yarmolik S. N. (2013) The Comparative Analysis of Radar-tracking Searchers Based on Neiman-Pierson Criterion and Sequential Probability Ratio Test. *Doklady BGUIR*. (6), 72–78 (in Russian).
3. Kent S., Kasapoglu N. G., Kartal M. (2008) Radar Target Classification Based on Support Vector Machines and High Resolution Range Profiles. *Proceedings of the IEEE Radar Conference (RADAR 2008)*. Rome, Italy. 1–6. https://doi.org/10.1109/RADAR.2008.4721107.
4. Jasinski T., Brooker G., Antipov I. (2021) W-Band Multi-Aspect High Resolution Range Profile Radar Target Classification Using Support Vector Machines. *Sensors*. 21 (7). https://doi.org/10.3390/s21072385.
5. Bufler T. D., Narayanan R. M. (2016) Radar Classification of Indoor Targets Using Support Vector Machines. *IET Radar, Sonar & Navigation*. 10 (8), 1468–1476. https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2015.0580.
6. Murphy K. P. (2012) *Machine Learning: A Probabilistic Perspective*. Cambridge, MIT Press.

Поступила 21.05.2026 Принята в печать 03.08.2026

Received: 21 May 2026 Accepted: 3 August 2026

Вклад авторов

Чигряй В. Г. сформулировал и описал методику синтеза устройства последовательного радиолокационного распознавания, предложил способ формирования приращения решающей статистики, собрал и систематизировал данные.

Солонар А. С. обосновал концепцию исследования, сформулировал идею, цели и задачи исследования.

Храменков А. С. сформулировал методику синтеза устройства последовательного радиолокационного распознавания, обобщил и интерпретировал результаты.

Authors' contribution

Chyhrai V. formulated and described the methodology for synthesizing a sequential radar recognition device, proposed a method for forming increments of the decision statistic, collected and systematized the data.

Solonar A. substantiated the research concept and formulated the idea, objectives, and tasks of the study.

Khramiankou A. formulated the methodology for synthesizing a sequential radar recognition device, generalized and interpreted the obtained results.

Сведения об авторах

Чигряй В. Г., адъюнкт каф. автоматики, радиолокации и приемо-передающих устройств, Военная академия Республики Беларусь (ВА РБ)

Солонар А. С., канд. техн. наук, доц., вед. науч. сотр., ОАО «КБ Радар» – управляющая компания холдинга «Системы радиолокации»

Храменков А. С., канд. техн. наук, доц., зам. нач. каф. автоматики, радиолокации и приемо-передающих устройств, ВА РБ

Information about the authors

Chyhrai V., Adjunct of the Department of Automation, Radar and Transceivers, Military Academy of the Republic of Belarus (MA RB)

Solonar A., Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Leading Researcher, JSC "KB Radar" – Managing Company of "Radar Systems" Holding

Khramiankou A., Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Deputy Head of the Department of Automation, Radar and Transceivers, MA RB

Адрес для корреспонденции

220057, Республика Беларусь,
Минск, просп. Независимости, 220
Военная академия Республики Беларусь
Тел.: +375 17 287-42-46
E-mail: xras.tech@mail.ru
Храменков Андрей Сергеевич

Address for correspondence

220057, Republic of Belarus
Minsk, Nezavisimosti Ave., 220
Military Academy of the Republic of Belarus
Tel.: +375 17 287-42-46
E-mail: xras.tech@mail.ru
Khramiankou Andrei