

ОСОБЕННОСТИ РАСПОЗНАВАНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ОБЪЕКТОВ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМИ МЕТОДАМИ ПРОВЕРКИ МНОГОАЛЬТЕРНАТИВНЫХ ГИПОТЕЗ

Свинарский М.В., Ярмолик С.Н., Храменков А.С.

Военная академия Республики Беларусь, Минск, РБ. e-mail: mechislav1993@gmail.com

Введение. Задача радиолокационного распознавания (РЛР) заключается в установлении факта принадлежности наблюдаемого объекта к определенному классу [1]. Процесс принятия решения носит статистический характер и предполагает обработку реализации принятого сигнала, наблюдаемую на ограниченном временном интервале [2]. При этом наблюдаемый N -элементный вектор принятого сигнала ξ представляет собой аддитивную смесь сигнальной составляющей радиолокационного портрета (РЛП) цели k -го класса $\xi_k = \{\xi_1^k, \xi_2^k, \dots, \xi_N^k\}$ и фона $\xi_0 = \{\xi_1^\Phi, \xi_2^\Phi, \dots, \xi_N^\Phi\}$ [3].

Функционирование систем радиолокационного распознавания необходимо рассматривать в условиях сложной помеховой обстановки: наличие активных, пассивных и имитирующих помех, преднамеренное использование ложных целей [1, 2]. Следует отметить, что основной причиной низких темпов внедрения устройств РЛР в современные и перспективные радиолокаторы является сравнительно низкая достоверность решений, принимаемых в условиях существенной априорной неопределенности. В интересах повышения достоверности принимаемых решений при классификации может использоваться увеличение времени наблюдения радиолокационного объекта, путем применения последовательных процедур принятия решения [4,6]. Основу таких процедур, как правило, составляют последовательный критерий отношения вероятностей, предложенный А. Вальдом [5] или последовательный байесовский критерий [6]. Практическое использование байесовского подхода существенно затруднено необходимостью знания полной априорной информации об условиях наблюдения объектов.

В литературе, как правило, детально рассматривают последовательные правила применительно к анализу двух гипотез [4, 6]. Последовательные методы решения многоальтернативных задач рассматриваются, как правило, в обобщенном виде [4], а приведенные результаты носят эмпирический характер [7]. В связи с этим, определенный интерес представляет задача сопоставительного анализа наиболее распространенных многошаговых алгоритмов последовательной классификации [4, 6, 7]:

- 1) алгоритм голосования с использованием парных отношений правдоподобия (The Armitage Test);
- 2) алгоритм принятия решения на основе обобщенного последовательного критерия отношения вероятностей (The Reed Test);
- 3) алгоритм принятия решения, основанный на сравнении двух максимальных отношений правдоподобия (The Palmer Test).

Задача последовательного радиолокационного распознавания объекта k -го класса A_k ($k = \overline{1, M}$) на каждом шаге наблюдения сводится к принятию решения о принадлежности наблюдаемой цели к одному из l классов A_l^* ($l = \overline{1, M}$) или вынесения решения о продолжении наблюдения A_{M+1}^* [6]. В интересах сопоставительного анализа последовательных процедур распознавания объектов целесообразно использовать результаты оценки показателей качества их функционирования: условные вероятности принимаемых решений [3, 6] и средние длительности процедур принятия решения, [6].

Особенности анализируемых последовательных алгоритмов распознавания радиолокационных объектов:

«The Armitage Test». Алгоритм голосования с использованием парных отношений

правдоподобия (The Armitage Test) предполагает формирование на каждом шаге алгоритма $M(M-1)$ парных отношений правдоподобия:

$$\Lambda_{kl}^n = \frac{p_k^n(\xi)}{p_l^n(\xi)}, \quad k, l = \overline{1, M}, \quad l \neq k,$$

где $p_k^n(\xi)$ ($p_l^n(\xi)$) – многомерная плотность вероятности (МПВ) дискретных отсчетов смеси сигнала, отраженного от объекта k (l)-го класса и фона, наблюдаемых на n -ом шаге; ξ – дискретные отсчеты аддитивной смеси сигнала и фона, при условии наблюдения объекта k -го класса (событие A_k).

Решающее правило анализируемого алгоритма распознавания «The Armitage Test» имеет следующий вид:

если $\Lambda_{kl}^n \geq \Lambda_{kl}^{n*}$, $l = \overline{1, M}$, $l \neq k$, то принимается решение о наблюдении объекта k -го класса (A_k^*), иначе принимается решение о продолжении наблюдения (A_{M+1}^*).

Пороговые уровни принятия решения (Λ_{kl}^{n*}) для каждого из анализируемых классов рассчитываются исходя из требуемых значений показателей качества радиолокационного распознавания (матрицы условных вероятностей принятия решения $F_{k/l}$, $k, l = \overline{1, M}$). В [7] предложена следующая функциональная зависимость порогов от требуемых вероятностей распознавания:

$$\Lambda_{kl}^{n*} = \frac{1}{F_{k/l}} \left(1 - \sum_{l=1}^M F_{l/k} \right), \quad l \neq k, \quad (1)$$

где $F_{k/l}$ – условная вероятность ложного распознавания цели k -го класса, при наблюдении объекта $l \neq k$ -го класса.

В качестве примера на рисунке 1.а приведена решающая статистика последовательной процедуры распознавания объектов трех классов ($M = 3$).

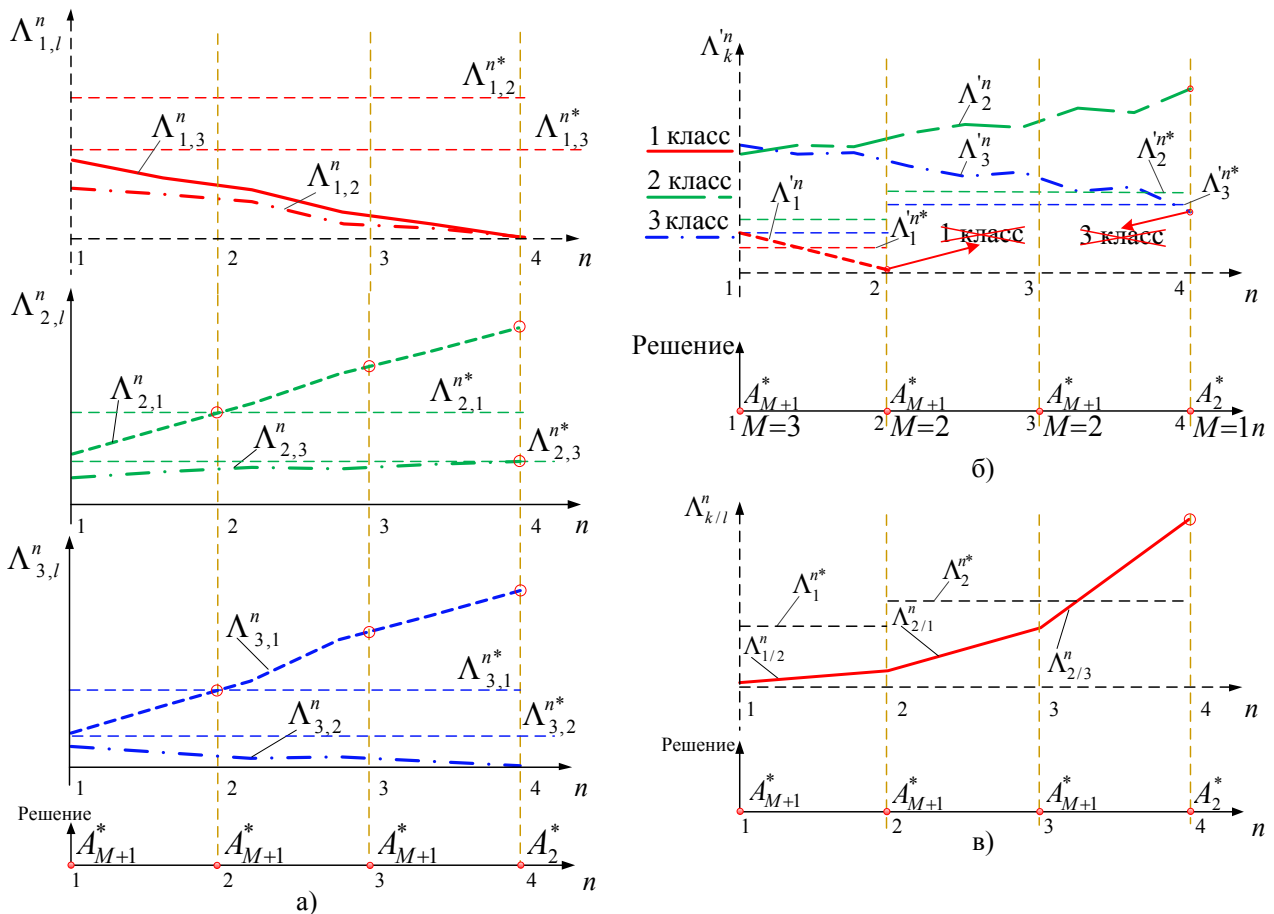


Рисунок 1 – Графическая интерпретация последовательной процедуры распознавания а) «The Armitage Test»; б) «The Reed Test»; в) «The Palmer Test»

Из приведенного примера следует, что процесс наблюдения продолжается до тех пор, пока $M - 1$ отношений правдоподобия Λ_{kl}^n , $l = \overline{1, M}$, $l \neq k$ одновременно не превысят соответствующие пороги Λ_{kl}^{n*} . В приведенном примере решение о наблюдении объекта 2 класса принимается на $n = 4$ шаге.

В большинстве практически важных случаев наблюдаемые случайные реализации сигнала принято характеризовать гауссовскими плотностями вероятности [1, 2, 3]. В этом случае целесообразно осуществить переход к анализу логарифмов отношения правдоподобия:

$$Z_{kl}^n = \ln \Lambda_{kl}^n = Z_k^n - Z_l^n, \quad (2)$$

где Z_{kl}^n – логарифм парного отношения правдоподобия на n -ом шаге наблюдения;

$\Lambda_{kl}^n = \frac{p_k^n(\xi)}{p_0^n(\xi)} / \frac{p_l^n(\xi)}{p_0^n(\xi)}$ – отношение правдоподобия, сформированное с учетом шума в k (l)-ом

канале обработки на n -ом шаге наблюдения; $p_0^n(\xi)$ – МПВ дискретных отсчетов

радиолокационного фона; $Z_k^n = \ln \left(\frac{p_k^n(\xi)}{p_0^n(\xi)} \right)$ – логарифм отношения правдоподобия,

сформированного при условии наблюдения цели k (l)-го класса на n -ом шаге наблюдения.

Переход к анализу логарифма отношения правдоподобия (2) требует соответствующей корректировки порогов (1). Полученные значения решающей статистики (Z_{kl}^n) сравниваются с порогами Z_{kl}^{n*} , которые определяются выражением:

$$Z_{kl}^{n*} = \ln \left(\frac{1}{F_{k/l}} \left(1 - \sum_{l=1}^M F_{l/k} \right) \right), l \neq k.$$

Следует отметить, что для $M = 2$ пороговые уровни (Λ_{kl}^{n*}) идентичны Вальдовским порогам обнаружения [4, 5].

«**The Reed Test**». Алгоритм принятия решения на основе обобщенного последовательного критерия отношения вероятностей (The Reed Test) предполагает формирование на каждом шаге анализа значения обобщенного отношения правдоподобия:

$$\Lambda_k^n = p_k^n(\xi) / M \sqrt{\prod_{l=1}^M p_l^n(\xi)}, k = \overline{1, M}, \quad (3)$$

Процедура определения класса объекта заключается в последовательном исключении из анализа класса, эталонный образ которого наименее подобен наблюдаемому объекту. В интересах принятия решения формируется решающая статистика Λ_k^n , которая сравнивается со значением останавливающей границы для k -го класса образов Λ_k^{n*} .

Решающее правило последовательного алгоритма распознавания «The Reed Test» имеет следующий вид:

если $\Lambda_j^n < \Lambda_j^{n*}$, $j = \overline{1, M}$, то принимается решение о продолжении наблюдения (A_{M+1}^*), а j -ый класс исключается из дальнейшей обработки.

При этом процедура классификации длится до тех пор, пока не останется один наиболее вероятный класс (A_k^*), в пользу которого и принимается окончательное решение.

Останавливающие границы для каждого из анализируемых классов (Λ_k^{n*}) выбираются исходя из требуемых значений показателей качества радиолокационного распознавания ($F_{k/l}$). В качестве останавливающих границ в [7] предложена следующая функциональная зависимость от вероятностей распознавания:

$$\Lambda_k^{n*} = (1 - D_k) / M \sqrt{\prod_{l=1}^M (1 - F_{k/l})}, k = \overline{1, M}, \quad (4)$$

где $D_k = F_{k/k}$ – условная вероятность правильного распознавания объекта k -го класса.

Следует отметить, что при выполнении условия исключения из дальнейшего анализа наименее вероятного класса, общее число анализируемых классов уменьшается (становится равным $M - 1$). При этом соответственно изменяются останавливающие границы (4) и процедура анализа последовательно повторяется. Процесс наблюдения продолжается до тех пор, пока не останется один (наиболее вероятный) класс, к которому и относят распознаваемый объект. Графическая интерпретация последовательной процедуры распознавания объектов трех анализируемых классов ($M = 3$) представлена на рисунке 1.б.

Приведенный пример показывает, что после шага $n = 2$ из дальнейшего анализа исключается один из классов объектов (объект 1 класса). При этом останавливающие границы для оставшихся классов соответственно изменяются. Решение о наблюдении объекта 2 класса принимается на $n = 4$ шаге.

Очевидно, что в случае обработки гауссовских реализаций принятого сигнала целесообразно перейти к анализу логарифмов обобщенного отношения правдоподобия (3), которые могут быть представлены в следующем виде:

$$Z_k^n = \ln \Lambda_k^n = \frac{M-1}{M} Z_k^n - \frac{1}{M} \sum_{l=1, l \neq k}^M Z_l^n, k = \overline{1, M}, \quad (5)$$

где Z_k^n – решающая статистика, сформированная в k -ом канале обработки на n -ом шаге

наблюдения; $\Lambda_k^n = \frac{p_k^n(\xi)}{p_0^n(\xi)} / \sqrt[M]{\prod_{l=1}^M \frac{p_l^n(\xi)}{p_0^n(\xi)}}$ – обобщенное отношение правдоподобия, сформированное с учетом логарифмов ОП в k -ом канале обработки на n -ом шаге наблюдения.

Переход к анализу логарифмов обобщенного отношения правдоподобия (5) требует соответствующей корректировки останавливающих границ (4). Полученные значения решающей статистики (Z_k^n) сравниваются с порогами Z_k^{n*} , которые определяется выражением:

$$Z_k^{n*} = \frac{M-1}{M} \ln(1-D_k) - \frac{1}{M} \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^M \ln(1-F_{k/l}), \quad k = \overline{1, M}.$$

«The Palmer Test». Алгоритм принятия решения, основанный на сравнении двух максимальных отношений правдоподобия «The Palmer Test» предполагает следующие операции:

1) формирование на каждом шаге последовательной процедуры M отношений правдоподобия: $\Lambda_k^n = \frac{p_k^n(\xi)}{p_0^n(\xi)}$, $k = \overline{1, M}$;

2) выбор двух наибольших значений отношения правдоподобия: $\Lambda_{\max 1}^n$ и $\Lambda_{\max 2}^n$, ($\max 1$ - номер класса, соответствующий максимальному значению отношения правдоподобия; $\max 2$ - номер класса второго по величине из сформированных отношений правдоподобия);

3) формирование решающей статистики в виде отношения двух выбранных значений $\Lambda_{\max 1/\max 2}^n = \Lambda_{\max 1}^n / \Lambda_{\max 2}^n$, и сравнение ее с требуемым пороговым уровнем.

Решающее правило последовательного алгоритма распознавания «The Palmer Test» имеет следующий вид:

если $\Lambda_{\max 1/\max 2}^n \geq \Lambda_k^{n*}$ принимается решение в пользу k -го класса соответствующего максимальному отношению правдоподобия $\Lambda_{\max 1}^n$, иначе принимается решение о продолжении наблюдения (A_{M+1}^*).

Пороговые уровни принятия решения (Λ_k^{n*} , $k = \overline{1, M}$) для каждого из анализируемых классов рассчитываются исходя из требуемых значений показателей качества радиолокационного распознавания (матрицы распознавания $F_{k/l}$). В качестве порогов в [7] предложена следующая функциональная зависимость от вероятностей распознавания:

$$\Lambda_k^{n*} = \frac{M}{4(1-F_{k/k})^2}, \quad (6)$$

Графическая интерпретация процесса принятия решения анализируемой последовательной процедурой при распознавании объектов трех классов ($M=3$) представлена на рисунке 1.в.

Процесс наблюдения продолжается до тех пор, пока сформированное значение $\Lambda_{\max 1/\max 2}^n$ не превысит порог $\Lambda_{k=\max 1}^{n*}$, соответствующий классу с максимальным значением отношения правдоподобия. В данном примере на первом шаге процедуры максимальным значением ОП характеризуется класс №1 ($\max 1=1$). Вторым по величине ОП является класс №2 ($\max 2=2$). Решение о продолжении наблюдения принимается после сравнения решающей статистики с пороговым уровнем класса №1 ($\Lambda_{k=1}^{n*}$). На втором шаге

измерения максимальным значением ОП характеризуется 2 класс ($\max 1 = 2$), а второй по величине – класс №1 ($\max 2 = 1$). В качестве порогового уровня принятия решения используется значение $\Lambda_{k=2}^{n*}$. Решение о наблюдении объекта 2 класса принимается на $n = 4$ шаге.

В случае обработки гауссовских реализаций принятого сигнала целесообразно перейти к анализу логарифмов. Решающая статистика в этом случае может быть представлена в следующем виде:

$$Z_{\max 1 / \max 2}^n = \ln \Lambda_{\max 1 / \max 2}^n = Z_{\max 1}^n - Z_{\max 2}^n, \quad (7)$$

где $Z_{\max 1 / \max 2}^n$ – логарифмическая решающая статистика на n -ом шаге наблюдения.

Переход к анализу логарифма отношения правдоподобия (7) требует соответствующей корректировки порогов (6). Полученные значения решающей статистики (Λ_k^n) сравниваются с порогами Λ_k^{n*} , которые определяется выражением:

$$Z_k^{n*} = \ln(\Lambda_k^{n*}) = \ln\left(M / \left[4(1 - F_{k/k})^2\right]\right).$$

Результаты математического моделирования.

Эффективность функционирования последовательных алгоритмов распознавания радиолокационных объектов оценивалось методом математического моделирования. В качестве оцениваемых показателей для текущего значения отношения сигнал-шум (ОСШ) ρ выбрана совокупность M условных вероятностей правильного распознавания D_k и M средних вероятностей ложного распознавания:

$$F_k = \frac{1}{(M-1)} \sum_{l=1, l \neq k}^M F_{k/l}.$$

Кроме того

оценивалась средняя длительность процедуры принятия решения \bar{n} .

На рисунке 2 представлена структурная схема моделирующего комплекса, позволяющего оценить показатели качества последовательного распознавания.

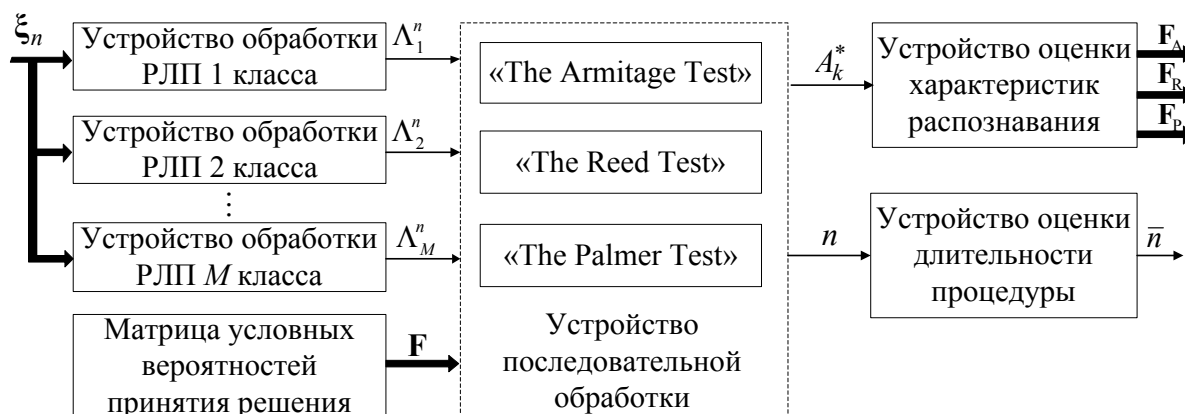


Рисунок 2 – Моделирующий комплекс последовательного устройства распознавания

Имитировались флуктуационные РЛП [1] целей трех классов, исходными данными для моделирования были: число элементов РЛП - $N = 10$; время корреляции флуктуаций сигнала для объектов анализируемых классов - $\tau_1 = 10$ мс, $\tau_2 = 155$ мс, $\tau_3 = 300$ мс. Матрица

условных вероятностей принятия решения $\mathbf{F} = \begin{vmatrix} 0.9 & 0.04 & 0.06 \\ 0.04 & 0.89 & 0.07 \\ 0.06 & 0.07 & 0.87 \end{vmatrix}$.

Устройство обработки РЛП каждого класса формирует решающую статистику,

поступающую на устройство последовательной обработки. В данном устройстве реализованы последовательные алгоритмы распознавания по своим решающим правилам: «The Armitage Test», «The Reed Test», «The Palmer Test». Результат принятия решения каждого из алгоритмов поступает на устройство оценки характеристик распознавания, где формируются матрицы условных вероятностей принятия решения по каждому из алгоритмов (F_A , F_R , F_P). А результат длительности принятия решения по каждому из алгоритмов поступает на устройство оценки длительности процедуры. В этом устройстве формируется средняя длительность и среднеквадратическое отклонение длительности принятия решения по каждому из алгоритмов.

Для оценки характеристик последовательного распознавания методом статистического моделирования ($N_{\text{опытов}} = 10^6$) рассчитывались матрицы условных вероятностей для нескольких ОСШ ($\rho = 5, 10, 50, 100$). Результаты моделирования характеристик распознавания и средней длительности принятия решения представлены на рисунке 3.

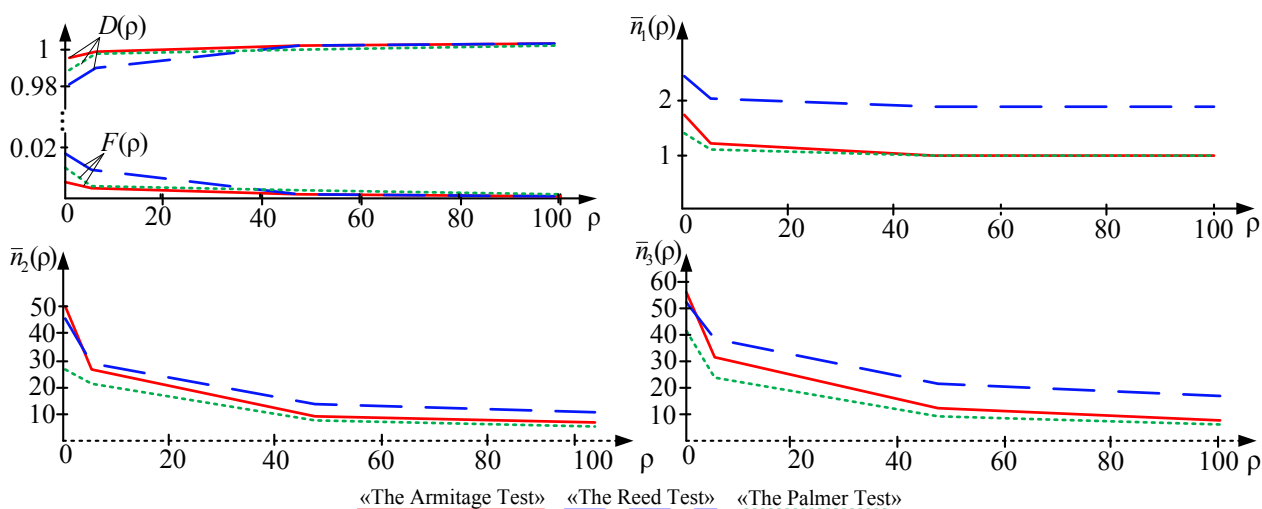


Рисунок 3 – Условные вероятности распознавания и средняя длительность принятия решения для объекта 1,2 и 3 класса

Из рисунка 3 видно, что с увеличением ОСШ среднее число обзоров \bar{n} , необходимое для распознавания объекта, уменьшается. Различие в средней длительности принятия решения между классами, особенно 1 классом, обусловлено контрастностью РЛП. Из анализа приведенных данных следует, что наиболее продолжительным тестом является «The Reed Test», а наиболее быстрым «The Palmer Test». Из полученных результатов видно, что последовательные алгоритмы, обеспечивают показатели качества распознавания в целом не ниже заданных.

Необходимо отметить, что использование последовательного алгоритма позволяет оптимизировать обзор в пространстве (уменьшить количество излучений в тех угловые направления, где цель отсутствует и увеличить количество излучений там, где цель присутствует). Оптимизация обзора приводит к: рациональному распределению энергии в пространстве; наиболее полному использованию потенциала РЛС; повышению качества принимаемых решений в условиях ограниченного времени контакта с целью.

Использование последовательных процедур при решении задач распознавания объектов позволяет осуществлять адаптацию решающего правила к условиям наблюдения и открывает возможности изменения границ признакового пространства путем исключения из дальнейшего рассмотрения наименее вероятных гипотез.

Литература:

1. Небабин, В.Г. Методы и техника радиолокационного распознавания / В.Г. Небабин, В.В. Сергеев. – М.: Радио и связь, 1984. – 152 с.
2. Селекция и распознавание на основе локационной информации / А.Л. Горелик [и др.]; под ред. А.Л. Горелика. – М.: Радио и связь, 1990. – 240 с.

3. Охрименко, А.Е. Основы извлечения, обработки и передачи информации. Ч. 3. Распознавание – различение сигналов / А.Е. Охрименко. – Минск: БГУИР, 1994. – 64 с.
4. Фу, К. Последовательные методы в распознавании образов и обучении машин / К. Фу. – М.: Наука, 1971. – 256 с.
5. Вальд, А. Последовательный анализ. Пер. с англ. / А. Вальд, под ред. Б.А. Севастьянова. – М.: Физматгиз, 1960. – 328 с.
6. Репин, В.Г. Статистический синтез в условиях априорной неопределенности и адаптация информационных систем / В.Г. Репин, Г.П. Тартаковский. – М.: Сов. радио, 1977. – 432 с.
7. Jouny, I. M-ary sequential hypothesis tests for automatic target recognition / I. Jouny, F.D. Garber // IEEE Transaction on aerospace and electronic systems. – 1992. Vol. 28, №. 2. – P. 473–483.