

УДК 621.396.96

## АЛГОРИТМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО РАСПОЗНАВАНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ОБЪЕКТОВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЙ МИНИМИЗАЦИЮ СРЕДНЕГО РИСКА ПРИНИМАЕМЫХ РЕШЕНИЙ

А.С. ХРАМЕНКОВ, С.Н. ЯРМОЛИК

*Военная академия Республики Беларусь  
Независимости, 220, Минск, 220057, Беларусь*

*Поступила в редакцию 30 июня 2015*

Для повышения достоверности классификации радиолокационных объектов предлагается использовать последовательный байесовский алгоритм распознавания, обеспечивающий минимизацию риска принимаемых решений о классе объекта и о продолжении дальнейшего наблюдения. С целью обеспечения возможности уточнения информации при реализации последовательного алгоритма предложено использование апостериорной вероятности решающей статистики предыдущего шага классификации в качестве априорной информации для следующего шага. Приведены результаты расчета характеристик распознавания радиолокационных объектов трех классов для предлагаемого последовательного алгоритма и одноэтапного байесовского алгоритма классификации.

*Ключевые слова:* последовательный байесовский алгоритм распознавания, минимум среднего риска, последовательное уточнение информации.

### Введение и постановка задачи

Задача радиолокационного распознавания (РЛР) заключается в установлении факта принадлежности наблюдаемого объекта к определенному классу [1–3]. Информация о классе объекта может использоваться при решении широкого круга задач управления [1–3].

Процесс распознавания радиолокационных объектов в условиях сложной помеховой обстановки носит статистический характер и решается соответствующими методами [1–4]. При решении задач радиолокационного наблюдения наиболее распространен байесовский подход к проверке статистических гипотез [1]. Байесовское решающее правило [1, 2] предполагает формирование  $M$  (по числу распознаваемых классов) отношений правдоподобия (ОП). Решение о классе наблюдаемого объекта принимается в пользу класса, характеризующегося максимальным значением ОП или его монотонной функции. Решающее правило может быть представлено в следующем виде [1, 2]:

«если  $Z_k \geq Z_l$ , для всех  $l = \overline{1, M}$ ,  $l \neq k$ , то принимается решение в пользу  $k$ -го класса», (1)

где  $Z_k = \ln[\Lambda(\xi|A_k)] = \ln \frac{p(\xi|A_k)}{p(\xi|A_0)}$  ( $Z_l = \ln[\Lambda(\xi|A_l)] = \ln \frac{p(\xi|A_l)}{p(\xi|A_0)}$ ) – логарифм ОП, сформированный

при условии наблюдения объекта  $k$  ( $l$ -го класса);  $p(\xi|A_k)$  ( $p(\xi|A_l)$ ) – многомерная плотность вероятности (МПВ) дискретных отсчетов аддитивной смеси сигнальной составляющей радиолокационного портрета (РЛП) и фона  $\xi$ , при условии наблюдения объекта  $k$  ( $l$ -го класса  $A_k$  ( $A_l$ ));  $p(\xi|A_0)$  – МПВ дискретных отсчетов радиолокационного фона.

Качество функционирования устройств РЛР для текущего значения отношения сигнал-шум принято характеризовать совокупностью  $M$  условных вероятностей правильного распознавания:  $D_k$  и  $M(M-1)$  условных вероятностей ошибочного (ложного) распознавания

$F_{k/l}$ ,  $l, k = \overline{1, M}$ ,  $l \neq k$ . При этом ложные решения часто характеризуют средней вероятностью ложного распознавания объекта  $k$ -го класса [1]:  $F_k = 1/(M-1) \sum_{l=1, l \neq k}^M F_{k/l}$ .

Для повышения достоверности принимаемых решений при классификации может использоваться увеличение времени наблюдения радиолокационного объекта [1, 2]. Однако непосредственное увеличение времени контакта с целью не всегда возможно. Вместе с этим, в ряде практически важных случаев радиолокатор имеет возможность последовательного многократного обращения к цели [5]. Использование последовательных процедур при решении задач распознавания объектов позволяет осуществлять адаптацию решающего правила к условиям наблюдения [4, 6].

Следует отметить, что последовательные методы решения многоальтернативных задач зачастую рассматриваются в обобщенном виде [6], а приведенные результаты носят эмпирический характер. В связи с этим определенный интерес представляет задача получения алгоритма последовательного распознавания радиолокационных объектов, обеспечивающего минимизацию среднего риска принимаемых решений о классе объекта и о продолжении наблюдения.

### Основная часть

Задача последовательного РЛР объекта  $k$ -го класса  $A_k$  ( $k = \overline{1, M}$ ) на каждом шаге наблюдения сводится к принятию решения в пользу одного из  $M$  классов  $A_l^*$  ( $l = \overline{1, M}$ ) или вынесения решения о продолжении наблюдения  $A_{M+1}^*$ . Оптимальным в смысле байесовского последовательного критерия распознавания будет правило, обеспечивающее минимизацию среднего значения потерь (риска), при принятии решения о классе наблюдаемого объекта или о продолжении наблюдения на каждом шаге наблюдений [4].

Средний риск принятия решения на  $n$ -ом шаге наблюдения можно представить в виде суммы среднего риска за принятые решения в пользу определенного класса и среднего риска за решение о продолжении наблюдения:

$$R_n = \sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^M P_n(A_i) C_{ki}^n P_n(A_k^* | A_i) + \sum_{i=1}^M P_n(A_i) C_{M+1i}^n P_n(A_{M+1}^* | A_i), \quad (2)$$

где  $P_n(A_i)$  – априорная вероятность наличия объекта  $i$ -го класса на  $n$ -ом шаге;  $C_{ki}^n$  – цена за принятое решение в пользу  $k$ -го класса при наличии объекта  $i$ -го класса на  $n$ -ом шаге;  $P_n(A_k^* | A_i)$  – условная вероятность принятия решения в пользу  $k$ -го класса при наличии объекта  $i$ -го класса на  $n$ -ом шаге;  $C_{M+1i}^n$  – цена за принятое решение о продолжении наблюдения при наличии объекта  $i$ -го класса на  $n$ -ом шаге;  $P_n(A_{M+1}^* | A_i)$  – условная вероятность принятия решения о продолжении наблюдения при наличии объекта  $i$ -го класса на  $n$ -ом шаге.

Последовательное байесовское распознавание предполагает на каждом шаге разбиение области принятия решения  $\Gamma(n) = \Gamma_1(n) \cup \Gamma_2(n) \cup \dots \cup \Gamma_{M+1}(n)$  таким образом, чтобы обеспечить минимум среднего риска (2). При этом условные вероятности принимаемых решений находятся путем интегрирования распределения решающей статистики по требуемой области  $\Gamma_k(n)$ :  $P_n(A_k^* | A_i) = \int_{\Gamma_k(n)} p(\xi_n | A_i) d\xi_n$ , где  $\xi_n$  – вектор принятого сигнала на  $n$ -ом шаге,

представляющий собой аддитивную смесь РЛП цели  $i$ -го класса и фона;  $p(\xi_n | A_i)$  – МПВ (функция правдоподобия) отсчетов смеси РЛП цели  $i$ -го класса и фона на  $n$ -ом шаге.

Оптимальное байесовское правило принятия решения, минимизирующее средний риск на  $n$ -ом шаге (2), сводится к выбору минимального значения из рассчитываемых апостериорных рисков принадлежности наблюдаемого объекта к каждому классу  $R_n^k(\xi_n)$ ,  $k = 1, \dots, M$  [4] и апостериорного риска продолжения процедуры наблюдения  $R_n^{M+1}(\xi_n)$ :

$$R_n^k(\xi_n) = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^M P_n(A_i)(C_{ki}^n - C_{ii}^n)p(\xi_n|A_i), \quad k = 1, \dots, M, \quad R_n^{M+1}(\xi_n) = \sum_{i=1}^M P_n(A_i)(C_{M+1i}^n - C_{ii}^n)p(\xi_n|A_i), \quad (3)$$

где  $R_n^k(\xi_n)$  – значение апостериорного риска, характеризующее принадлежность наблюдаемой цели к  $k$ -му ( $k = \overline{1, M}$ ) классу на  $n$ -ом шаге;  $R_n^{M+1}(\xi_n)$  – значение апостериорного риска, характеризующее продолжение наблюдения на  $n$ -ом шаге.

Апостериорный риск может быть выражен через отношение правдоподобия:

$$J_n^k(\xi_n) = \sum_{\substack{i=1, i \neq k}}^M P_n(A_i)(C_{ki}^n - C_{ii}^n)\Lambda(\xi_n|A_i), \quad k = 1, \dots, M, \quad J_n^{M+1}(\xi_n) = \sum_{i=1}^M P_n(A_i)(C_{M+1i}^n - C_{ii}^n)\Lambda(\xi_n|A_i), \quad (4)$$

где  $\Lambda(\xi_n|A_i) = \frac{p(\xi_n|A_i)}{p(\xi_0|A_0)}$  – отношение правдоподобия объекта  $i$ -го класса на  $n$ -ом шаге.

Таким образом, решающее правило последовательного распознавания радиолокационных объектов, обеспечивающего минимизацию среднего риска принимаемых решений, можно представить в виде: если  $J_n^k(\xi_n) \leq J_n^l(\xi_n)$ ,  $l = \overline{1, M}$ ,  $l \neq k$ , то принимается предварительное решение о наблюдении объекта  $k$ -го класса  $A_k^*$ . После принятия предварительного решения  $A_k^*$  проверяется возможность остановки последовательной процедуры наблюдения. Если  $J_n^k(\xi_n) \leq J_n^{M+1}(\xi_n)$ , то принимается окончательное решение о принадлежности наблюдаемой цели к  $k$ -му классу  $A_k^*$ . Если указанное условие не выполняется, то принимается решение о продолжении наблюдения  $A_{M+1}^*$  и переход к  $n + 1$  шагу.

Обобщенная структурная схема, реализующая полученное последовательное решающее правило, минимизирующее средний риск принимаемых решений представлена на рис. 1.

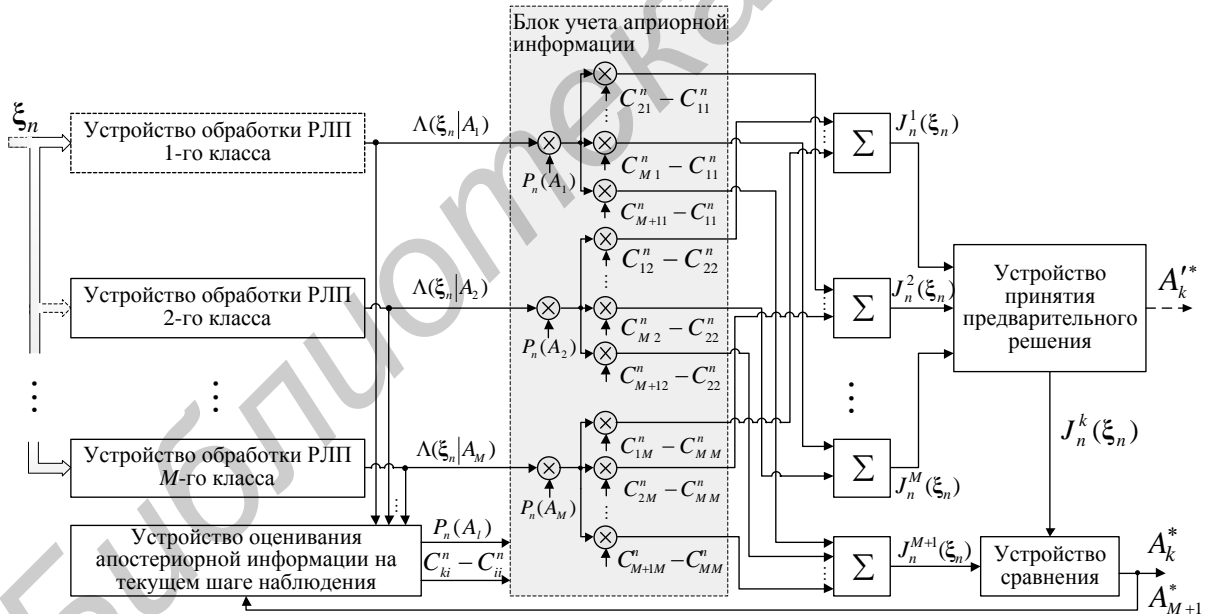


Рис. 1. Структурная схема устройства последовательного распознавания объектов

В процессе классификации существует возможность после каждого контакта с целью совместно с окончательным решением  $A_k^*$  или  $A_{M+1}^*$ , выдавать предварительное решение  $A_k^*$  только о классе цели по минимальному значению  $J_n^l(\xi_n)$ ,  $l = \overline{1, M}$ . В ряде практических случаев удобнее использовать логарифм от апостериорного риска  $U_n^k(\xi_n) = \ln[J_n^k(\xi_n)]$ ,  $k = \overline{1, M+1}$ .

Последовательная процедура распознавания приводит к повышению различимости (контрастности) проверяемых гипотез, что обусловлено трансформацией распределений решающей статистики на каждом шаге наблюдения. В качестве примера на рис. 2, приведены

гистограммы распределений решающей статистики по флуктуационному РЛП, оцененные методом статистических испытаний по результатам наблюдения объектов 3 классов.

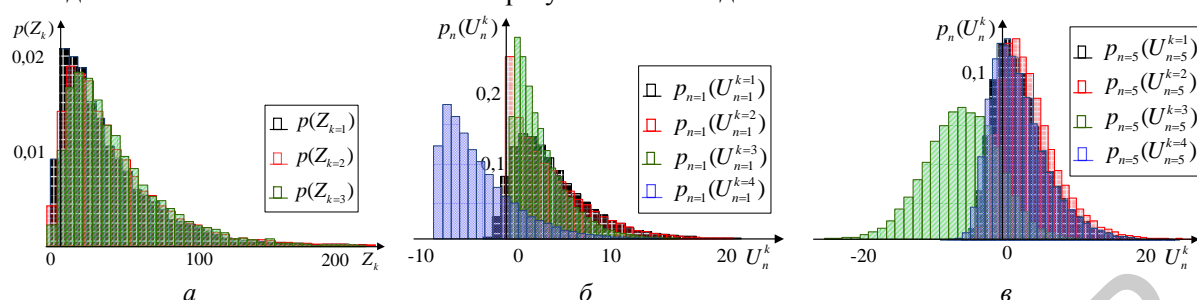


Рис. 2. Гистограммы решающей статистики для одноэтапного (а) и многоэтапного (б, в) устройств РЛР

На рис. 2, а представлены гистограммы выходных сигналов каждого из каналов распознавания  $Z_k$ ,  $k=1,2,3$ , формируемые при наблюдении цели 3 класса с использованием одношагового решающего правила (1). Очевидно, что в рассматриваемой ситуации принять решение о классе цели с высокой степенью достоверности не представляется возможным. Оценки распределения решающей статистики при последовательной процедуре распознавания  $U_n^k = U_n^k(\xi_n)$ ,  $k=1,2,3$ ,  $k=4$  (гипотеза о продолжении наблюдения) приведены на рис. 2, б (шаг  $n=1$ ) и в (шаг  $n=5$ ). В соответствии с последовательным решающим правилом, решение на первом этапе принимается по минимальному значению  $U_1^k$ . Очевидно, что такому значению соответствует гипотеза о продолжении наблюдения  $A_{k=4}^*$ . Согласно рис. 2, в на пятом шаге наблюдения минимальному значению решающей статистики соответствует гипотеза о принадлежности наблюдаемой цели к третьему классу, что позволяет с минимальным риском остановить последовательную процедуру анализа и принять решение  $A_{k=3}^*$ .

Реализация последовательного байесовского алгоритма, предполагает использование полного комплекта априорных данных: априорных вероятностей появления объектов различных классов ( $P_n(A_i)$ ); цен за принятые решения на каждом этапе процедуры распознавания ( $C_{ki}^n$ ). Проведенные исследования позволяют сформулировать некоторые рекомендации по выбору требуемых значений априорных данных.

*Рекомендации по нахождению априорных вероятностей появления объектов различных классов.* Исходя из максимальной априорной неопределенности, на первом шаге процедуры априорные вероятности появления распознаваемых объектов принято считать одинаковыми  $P_{n=1}(A_k) = 1/M$ ,  $k = \overline{1, M}$  [1, 2]. Учитывая возможность последовательного уточнения информации, в качестве априорных вероятностей для последующих шагов целесообразно использовать апостериорные вероятности предыдущего шага классификации. Выражение для априорной вероятности  $k$ -го класса на  $n+1$  шаге принимает вид:

$$P_{n+1}(A_k) \cong P(A_k | \xi_n) = \frac{P_n(A_k) p(\xi_n | A_k)}{\sum_{i=1}^M P_n(A_i) p(\xi_n | A_i)}, \quad (5)$$

где  $P(A_k | \xi_n)$  – апостериорная вероятность принадлежности цели к  $k$ -му классу на  $n$ -ом шаге.

Выражение (5) может быть представлено через отношение правдоподобия:

$$P_{n+1}(A_k) \cong P_n(A_k | \xi_n) = \frac{P_n(A_k) \Lambda(\xi_n | A_k)}{\sum_{i=1}^M P_n(A_i) \Lambda(\xi_n | A_i)}. \quad (6)$$

Рассмотренный подход позволяет на текущем шаге процедуры классификации учитывать информацию о распределении статистики с предыдущих этапов наблюдения. Последовательное уточнение априорной информации позволяет сократить длительность процедуры принятия решения и повысить качество принимаемых решений.

*Рекомендации по выбору цен за принятые решения на каждом этапе процедуры распознавания.* Значения цен за принятые решения при последовательном распознавании

определяются физической природой наблюдаемых процессов. На первых этапах классификации, в связи с небольшим количеством сведений о наблюдаемом объекте, принятие ошибочных решений наиболее вероятно, однако нежелательно. Компромиссом является возможность продолжения наблюдения. Следовательно, цены за ошибочные решения целесообразно выбирать больше стоимостей продолжения наблюдения, а последние больше цен за правильные решения  $C_{ki}^n > C_{M+1i}^n > C_{ii}^n$ ,  $k, i = \overline{1, M}$ ,  $k \neq i$  [4].

Следует отметить, что выбором на каждом шаге соотношения между ценами за ошибочные решения и за продолжение наблюдения можно добиться усечения последовательной процедуры классификации. Если же все цены одинаково зависят от номера шага процедуры распознавания  $n$ , отличаясь лишь коэффициентом пропорциональности, то их можно представить в виде произведения  $C_{ki}^n = C_{ki} \cdot f(n)$ ,  $C_{M+1i}^n = C_{M+1i} \cdot f(n)$ . Данное представление позволяет упростить расчет значений решающей статистики (4), исключив тем самым зависимость цен от номера шага процедуры распознавания. При этом длительность последовательной процедуры распознавания будет случайной величиной.

Для дальнейшего упрощения алгоритма распознавания по аналогии с критерием идеального наблюдателя стоимость правильных решений может быть принята равной нулю  $C_{ii}^n = 0$ ,  $i = \overline{1, M}$ , а цены ошибочных решений равными единице  $C_{ki}^n = 1$ . Стоимость продолжения наблюдения может быть выбрана  $C_{M+1i}^n = 0,5$ .

Вариантом упрощения алгоритма распознавания является замена штрафов за неправильные решения – «премиями» за правильные, т.е.  $C_{kk}^n \neq C_{ii}^n \neq 0$  и  $C_{ki}^n = 0$ ,  $k, i = \overline{1, M}$ . Учет неравнозначности различных правильных решений в этом случае сохраняется.

Таким образом, исходя из технических возможностей и требований, предъявляемых к устройству распознавания, с помощью вариации цен за принятые решения можно получить различные варианты квазиоптимальных алгоритмов последовательной классификации.

*Результаты расчета показателей качества распознавания объектов.* Для оценивания качества функционирования разработанного последовательного алгоритма распознавания радиолокационных объектов, минимизирующего средний риск принимаемых решений, целесообразно воспользоваться методом математического моделирования. С этой целью был разработан моделирующий комплекс (рис. 3), включающий в себя формирователь принятого сигнала, блок выделения и обработки радиолокационного портрета и блок оценивания показателей качества.

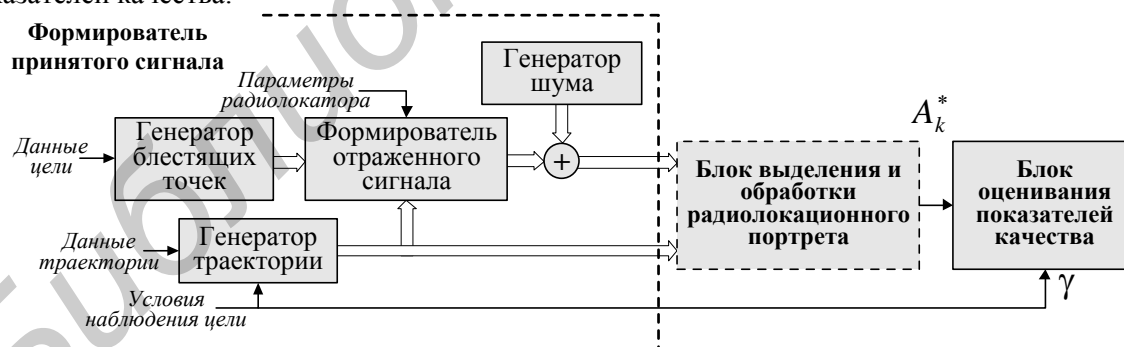


Рис. 3. Структурная схема моделирующего комплекса для оценивания показателей качества принимаемых решений

Формирователь принятого сигнала позволяет имитировать наблюдаемые случайные реализации принятого сигнала [7]. В устройстве выделения и обработки РЛП реализованы анализируемые алгоритмы распознавания объектов: разработанный последовательный алгоритм РЛР объектов (рис. 1) и одноэтапный байесовский алгоритм классификации (1). Устройство оценивания показателей качества позволяет статистическими методами оценивать вероятности принимаемых решений в зависимости от отношения сигнал-шум ( $\gamma$ ).

Для анализа характеристик, моделировался процесс принятия решений о классе объектов, отличающихся шириной временной корреляционной функции сигналов. С этой

целью имитировались флуктуационные РЛП [1] целей трех классов, формируемые на основе следующих исходных данных:  $N = 10$  – число элементов РЛП; время корреляции флуктуаций сигнала для объектов анализируемых классов –  $\tau_1 = 300$  мс,  $\tau_2 = 80$  мс,  $\tau_3 = 30$  мс. В последовательном алгоритме РЛР цены за решения выбирались одинаковыми для анализируемых классов с учетом следующих допущений: равными нулю за правильные решения  $C_{ii}^n = 0$ ,  $i = \overline{1, M}$ , за продолжение наблюдения увеличивались в зависимости от шага наблюдения  $C_{M+1i}^n = 0,5 \cdot n$ , за неправильные решения – уменьшающиеся в зависимости от шага наблюдения  $C_{ki}^n = C_{ik}^n = 5 - 0,5 \cdot n$ ,  $k, i = \overline{1, M}$ ,  $k \neq i$ . В одношаговом байесовском алгоритме цены за правильные решения предполагались равными нулю, а за ошибочные – одинаковыми. Полученные характеристики распознавания приведены на рис. 4.

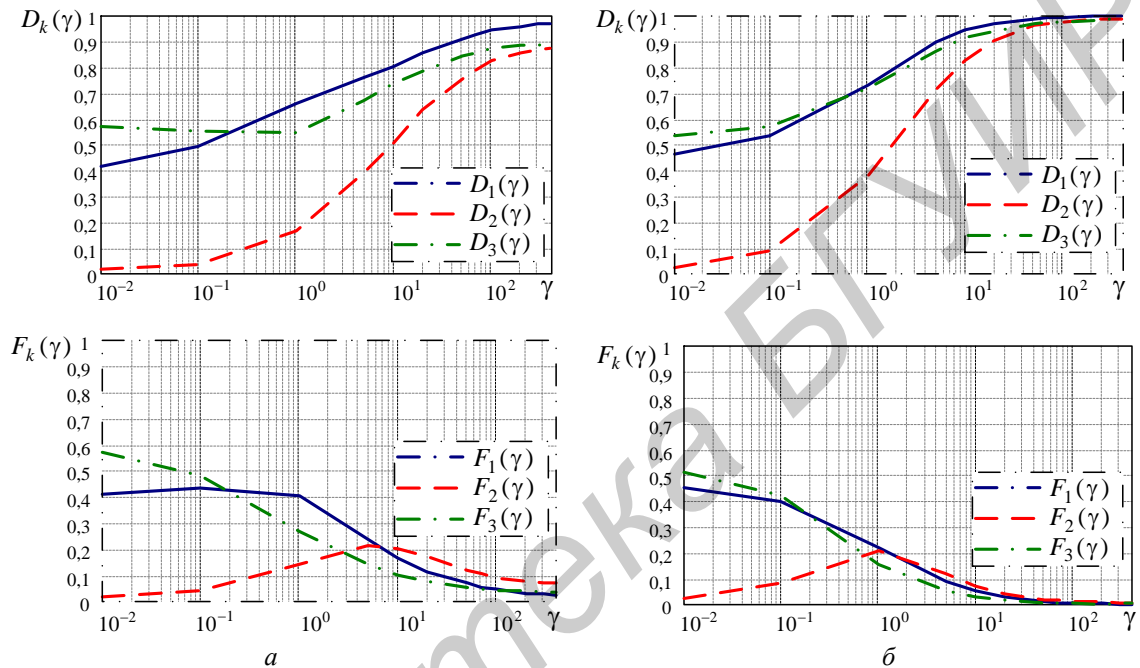


Рис. 4. Характеристики распознавания:

$a$  – одноэтапного алгоритма распознавания;  $б$  – последовательного алгоритма распознавания

Результаты моделирования показали, что при одинаковых условиях наблюдения в диапазоне отношения сигнал-шум от 1 до 100 вероятность правильного распознавания объектов при использовании последовательного алгоритма классификации, в среднем, увеличивается на 40 %, а вероятность ложного распознавания уменьшается на 70 %, чем при использовании одноэтапного алгоритма. На рис. 5 приведены результаты оценивания средней длительности анализируемой последовательной процедуры распознавания объектов.

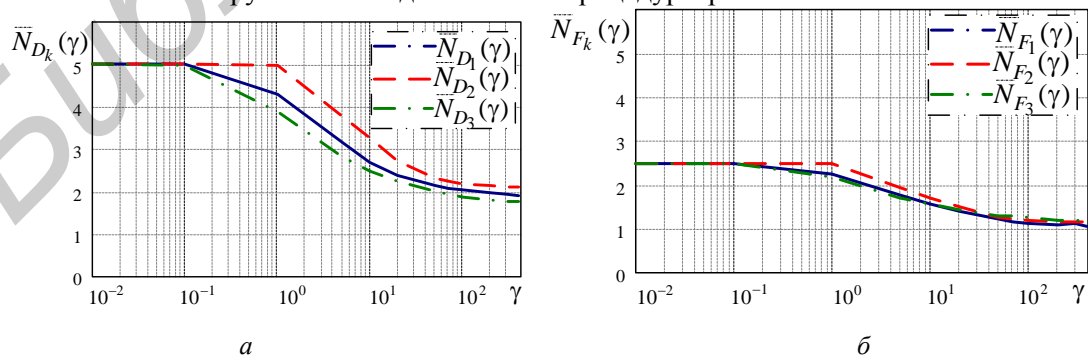


Рис. 5. Средняя длительность последовательной процедуры распознавания:

$a$  – при правильном принятии решения;  $б$  – при неправильном принятии решения

С увеличением отношения сигнал-шум время на принятие решения существенно сокращается.

Анализ полученных результатов показывает, что при одинаковых значениях отношения сигнал-шум использование многошагового алгоритма с минимизацией среднего риска принимаемых решений, позволяет повысить эффективность классификации радиолокационных объектов, по сравнению с одноэтапными процедурами. Неизбежной платой за повышение качества распознавания выступает увеличение времени на принятие решения. При этом длительность процедуры определяется имеющимися условиями наблюдения объектов. Кроме того, последовательные процедуры позволяют более эффективно решать задачу адаптации параметров устройства распознавания к изменяющимся условиям наблюдения объектов (например, к ракурсу наблюдаемого объекта), что является их важным преимуществом в условиях быстро изменяющейся воздушно-помеховой обстановки.

### Заключение

Повышение достоверности решений о классе радиолокационных объектов, принимаемых в условиях ограниченного времени наблюдения, в ряде случаев может достигаться путем перехода к использованию последовательных процедур обработки. При этом обеспечение большей информативности процедур классификации наблюдаемых объектов неизбежно приводит к увеличению длительности процесса принятия решений. Использование предложенного алгоритма последовательной классификации радиолокационных объектов, обеспечивающего минимизацию риска принимаемых решений о классе объекта и о продолжении дальнейшего наблюдения, позволяет обеспечить рациональное соотношение между требуемым качеством распознавания и продолжительностью процедуры принятия решения. При этом использование апостериорной вероятности решающей статистики предыдущего шага классификации в качестве априорной информации для следующего шага обеспечивает возможность последовательного уточнения информации.

## **RADAR-TRACKING OBJECTS SEQUENTIAL RECOGNITION ALGORITHM, PROVIDING MINIMIZATION AVERAGE RISK OF ACCEPTED DECISIONS**

A.S. KHRAMIANKOU, S.N. YARMOLIK

### Abstract

For increase of reliability of radar-tracking objects classification it is offered to use sequential Bayesian recognition algorithm, providing minimisation risk of accepted decisions on an object class and about further supervision continuation. For the information sequential specification propose to use a posteriori probability of solving statistics of the classification previous step as a priori information for a following step. Calculation results of radar-tracking objects recognition characteristics for three simulated classes to sequential algorithm and one-step Bayesian classification algorithm are produced.

*Keywords:* sequential Bayesian recognition algorithm, minimisation risk, information sequential specification.

### Список литературы

1. *Охрименко А.* Основы радиолокации и радиоэлектронная борьба. Ч.1. Основы радиолокации. М., 1983.
2. *Ширман Я.Д.* Радиолокационное распознавание. Харьков, 1994.
3. *Tait P.* Introduction to Radar Target Recognition. London, 2009.
4. *Репин В.Г., Тартаковский Г.П.* Статистический синтез в условиях априорной неопределенности и адаптация информационных систем. М., 1977.
5. *Шишов Ю.А.* Многоканальная радиолокация с временным разделением каналов. М., 1987.
6. *Сосулин Ю.Г., Фишман М.М.* Теория последовательных решений и ее применения. М., 1985.
7. *Солонар А.С., Ярмолик С.Н., Храменков А.С. и др.* // Докл. БГУИР. 2014. № 6 (84). С. 60–66.