

## ДВУХЭТАПНАЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНАЯ ПРОЦЕДУРА РАСПОЗНАВАНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ОБЪЕКТОВ

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

*Статья посвящена задаче повышения эффективности распознавания радиолокационных объектов. Для повышения достоверности классификации радиолокационных объектов предлагается использовать квазиоптимальный алгоритм распознавания с последовательным уточнением информации о классе объекта и о продолжении наблюдения. Рассмотрены особенности построения устройства радиолокационного распознавания с последовательным уточнением информации о классе объекта и о продолжении наблюдения. Процедура принятия решения в таком устройстве разделяется на два этапа: принятие предварительного решения (о наблюдении объекта  $k$ -го класса) и окончательного решения (в пользу объекта  $k$ -го класса или о продолжении наблюдения). Возможность последовательного уточнения информации о классе объекта позволила в качестве априорных вероятностей для последующих шагов использовать апостериорные вероятности предыдущего шага классификации. Качество функционирования последовательного устройства радиолокационного распознавания для текущего значения отношения сигнал-шум характеризовалось совокупностью  $M$  (количество классов) условных вероятностей правильного распознавания,  $M$  средних вероятностей ложного распознавания. Кроме того, важной характеристикой последовательной процедуры классификации является ее средняя длительность. Для предложенного квазиоптимального алгоритма распознавания с последовательным уточнением информации о классе объекта и о продолжении наблюдения приведены результаты расчета характеристик распознавания радиолокационных объектов, трех классов.*

### **Введение**

Современные радиолокационные системы, особенно военного назначения, должны характеризоваться высокой информативностью. С этой целью радиолокационные комплексы оснащаются системами распознавания объектов. Радиолокационное распознавание заключается в установлении факта принадлежности наблюдаемого объекта к определенному классу [1]. Информация о классе объекта может использоваться при решении широкого круга задач: целеуказания, целераспределения, селекции объектов на фоне ложных целей, определения очередности сопровождения и обстрела целей и т.п. [1].

Поскольку в практически важных случаях радиолокатор имеет возможность последовательного многократного обращения к наблюдаемому объекту, то использование последовательных процедур для решения задач распознавания позволяет повысить качество принимаемых решений [1]. Следует отметить, что в литературе, как правило, рассматриваются последовательные правила применительно к двум гипотезам [2, 3]. Последовательные методы решения многоальтернативных задач зачастую рассматриваются в обобщенном виде [3], а приведенные результаты носят эмпирический характер.

В [4] представлен последовательный байесовский алгоритм распознавания, обеспечивающий минимизацию среднего риска принимаемых решений на каждом шаге наблюдения. Приведенный алгоритм позволяет повысить эффективность распознавания радиолокационных объектов, по сравнению с одноэтапными процедурами. Вместе с этим, оптимальный алгоритм классификации требует использования ряда априорных данных, что может затруднять его практическое использование. В связи с этим определен интерес представляет задача получения квазиоптимального алгоритма распознавания радиолокационных объектов с последовательным уточнением информации о классе объекта и о продолжении наблюдения.

### **Синтез квазиоптимального устройства распознавания радиолокационных объектов с последовательным уточнением информации о классе объекта и о продолжении наблюдения**

Приведенный в [4] оптимальный алгоритм последовательной классификации, предполагает, что решению о принадлежности наблюдаемого объекта к одному из  $M$  классов или о продолжении наблюдения ( $M+1$  гипотеза) на  $n$ -ом шаге соответствует гипотеза, характеризующаяся минимальным значением одного из выражений:

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

$$J_n^{M+1}(\xi_n) = \sum_{i=1}^M P_n(A_i)(C_{M+1 i}^n - C_{ii}^n)\Lambda(\xi_n|A_i), \quad (2)$$

где  $J_n^k(\xi_n) = J_k^n$  - значение апостериорного риска, характеризующее принадлежность наблюдаемого объекта к  $k$ -му классу на  $n$ -ом шаге процедуры распознавания;  $\xi_n$  - вектор принятого сигнала на  $n$ -ом шаге, представляющий собой аддитивную смесь радиолокационного портрета (РЛП) цели и фона;  $P_n(A_i) = P_i^n$  - 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;  $\Lambda(\xi_n|A_i) = \Lambda_i^n$  - отношение правдоподобия объекта  $i$ -го класса на  $n$ -ом шаге процедуры распознавания;  $C_{M+1 i}^n$  - цена за принятое решение о продолжении наблюдения при наличии объекта  $i$ -го класса на  $n$ -ом шаге;  $J_n^{M+1}(\xi_n) = J_{M+1}^n$  - значение апостериорного риска, характеризующее продолжение наблюдения на  $n$ -ом шаге процедуры распознавания.

На основании выражений (1), (2) процедуру принятия решения можно разделить на два этапа: предварительное решение о наблюдении объекта  $k$ -го класса  $A_k'^*$  и окончательное решение в пользу объекта  $k$ -го класса  $A_k^*$  или о продолжении наблюдения  $A_{M+1}^*$ . Если  $J_k^n \leq J_l^n$ ,  $l = \overline{1, M}$ ,  $l \neq k$ , 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  $J_k^n \leq J_{M+1}^n$ , то принимается окончательное решение о принадлежности наблюдаемой цели к  $k$ -му классу  $A_k^*$ . Если указанное условие не выполняется (т.е. риск продолжения наблюдения меньше риска принимаемого решения), то принимается решение о продолжении наблюдения  $A_{M+1}^*$  и осуществляется переход к  $n+1$  шагу процедуры распознавания.

Переход к квазиоптимальному байесовскому последовательному алгоритму предполагает исключение зависимости стоимостей принятых решений от номера шага процедуры распознавания ( $C_{ki}^n = C_{ki}$ ), а также по аналогии с критерием «идеального наблюдателя» выбор стоимостей правильных решений равными нулю  $C_{ii}^n = 0, i = \overline{1, M}$ , а цен за ошибочные решения равными единице  $C_{ki}^n = 1, i = \overline{1, M}$ . Стоимость продолжения наблюдения может быть выбрана  $C_{M+1i}^n = C_{obs}^n < 1, i = \overline{1, M}$ .

В соответствии с введенными допущениями, предварительное решение о наблюдении объекта  $k$ -го класса  $A_k^*$  принимается в соответствии с правилом:

$$\text{если } \sum_{i=1, i \neq k}^M P_i^n \Lambda_i^n \leq \sum_{i=1, i \neq l}^M P_i^n \Lambda_i^n, l = \overline{1, M}, l \neq k, \text{ то } A_k^*. \quad (3)$$

Преобразовав выражение (3), получим правило принятия предварительного решения в виде:

$$\text{если } P_k^n \Lambda_k^n \geq P_l^n \Lambda_l^n, l = \overline{1, M}, l \neq k \text{ то } A_k^*. \quad (4)$$

Для проверки возможности остановки процедуры классификации, проверяется условие  $J_k^n \leq J_{M+1}^n$ . После подстановки (1) и (2) в приведенное неравенство, решающее правило принимает вид:

$$\text{если } \sum_{i=1, i \neq k}^M P_i^n \Lambda_i^n \leq \sum_{i=1}^M P_i^n C_{obs}^n \Lambda_i^n, \text{ то } A_k^*. \quad (5)$$

Преобразовав выражение (5), получим условие прекращения наблюдения:

$$\text{если } P_k^n C_{obs}^n \Lambda_k^n \leq (1 - C_{obs}^n) \sum_{i=1, i \neq k}^M P_i^n \Lambda_i^n, \text{ то } A_k^*. \quad (6)$$

Таким образом, с учетом выражений для предварительного (4) и окончательного (6) решений, правило принятия решения в пользу  $k$ -го класса для квазиоптимального последовательного алгоритма на  $n$ -ом шаге примет вид:

$$\text{если } \begin{cases} P_k^n \Lambda_k^n \geq P_l^n \Lambda_l^n, l = \overline{1, M}, l \neq k \\ P_k^n C_{obs}^n \Lambda_k^n \geq (1 - C_{obs}^n) \sum_{i=1, i \neq k}^M P_i^n \Lambda_i^n \end{cases}, \text{ то } A_k^*. \quad (7)$$

Возможность последовательного уточнения информации позволяет в качестве априорных вероятностей для последующих шагов использовать

апостериорные вероятности предыдущего шага классификации. Исходя из максимальной априорной неопределенности, на первом шаге процедуры априорные вероятности появления распознаваемых объектов принято считать одинаковыми  $P_{n=1}^l = 1/M, l = \overline{1, M}$  [1]. Выражение для априорной вероятности  $l$ -го класса на  $n + 1$  шаге определяется в соответствии с формулой Байеса:

$$P_l^{n+1} \cong P_n(A_l|\xi_n) = \frac{P_l^n \Lambda_l^n}{\sum_{i=1}^M P_i^n \Lambda_i^n}, \quad (8)$$

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

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

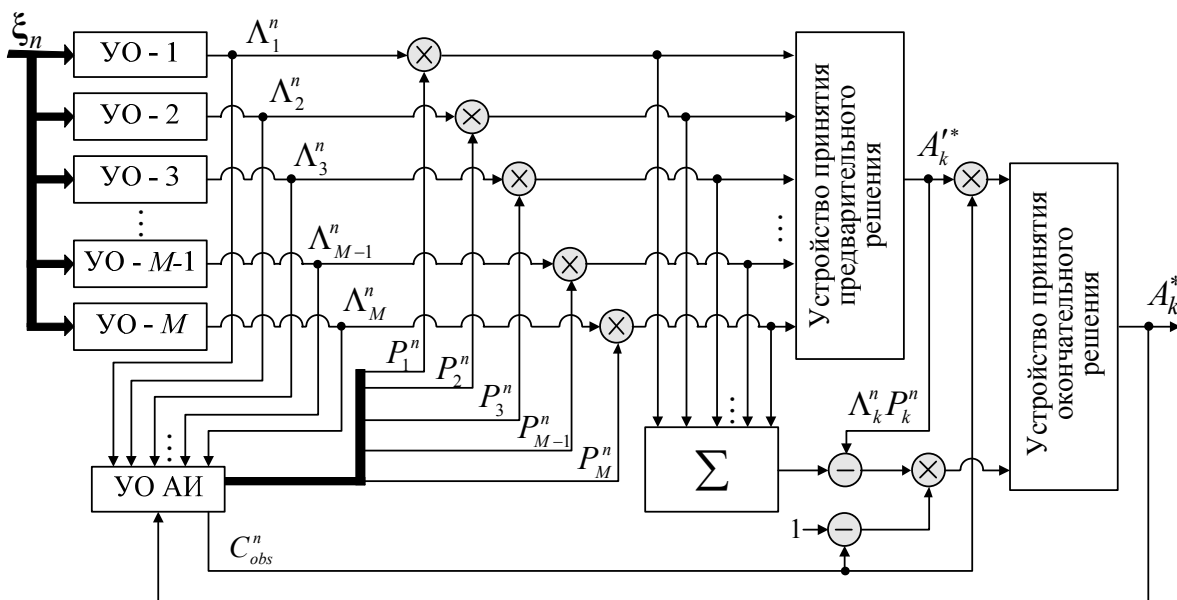


Рис. 1. Структурная схема квазиоптимального устройства последовательного распознавания

На  $n$ -ом шаге процедуры классификации на входы каждого из  $M$  устройств обработки (УО) РЛП поступает реализация РЛП  $\xi_n$ . На выходах УО РЛП формируются значения отношения правдоподобия (ОП)  $\Lambda_l^n, l = \overline{1, M}$  для каждого из  $M$  распознаваемых классов. В устройстве оценивания апостериорной информации (УО АИ) на основе сформированных ОП в соответствии с (8) рассчитываются значения апостериорных вероятностей  $P(A_l|\xi_n)$  для каждого класса, которые на следующем шаге процедуры распознавания будут использоваться в качестве априорных. Кроме того, УО АИ хранит информацию о стоимости продолжения наблюдения  $C_{obs}^n$ . Согласно (4) производится коррекция сформированных ОП с учетом имеющейся априорной

информации. В устройстве принятия предварительного решения по максимальному значению  $P_l^n \Lambda_l^n, l = \overline{1, M}$  принимается предварительное решение о наблюдаемом объекте  $A_k^*$  и выдается значение  $P_k^n \Lambda_k^n$ , соответствующее данному классу. На основе сформированных значений  $P_k^n C_{obs}^n \Lambda_k^n$  и  $(1 - C_{obs}^n) \sum_{i=1, i \neq k}^M P_i^n \Lambda_i^n$ , в соответствии с (6), принимается решение о наличии объекта  $k$ -го класса или о переходе к  $n+1$  шагу наблюдения.

### Результаты расчета, показателей качества распознавания объектов

Качество функционирования устройств радиолокационного распознавания для текущего значения отношения сигнал-шум (ОСШ)  $\gamma$  принято [1] характеризовать совокупностью  $M$  условных вероятностей правильного распознавания  $D_k$  и  $M$  средних вероятностей ложного распознавания:

$$F_k = 1/(M - 1) \sum_{l=1, l \neq k}^M F_{k/l}, \text{ где } F_{k/l} - \text{условные вероятности ложного распознавания}$$

$l, k = \overline{1, M}, l \neq k$ . Последовательные устройства распознавания дополнительно характеризуют средней длительностью процедуры принятия решения  $\bar{N}_k$ .

Оценивание качества функционирования разработанного квазиоптимального алгоритма распознавания радиолокационных объектов с последовательным уточнением информации о классе объекта и о продолжении наблюдения проводилось методом математического моделирования. С этой целью 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 -  $\tau_1 = 12 \text{ мс}, \tau_2 = 40 \text{ мс}, \tau_3 = 80 \text{ мс}$ . Цена за продолжение наблюдения не изменялась в зависимости от номера шага  $C_{obs}^n = C_{obs} = 0,1$ . Максимальное число этапов процедуры  $N_{max} = 10$ , по достижению  $N_{max}$  принимается предварительное решение. Полученные вероятности правильного распознавания приведены на рис. 2.

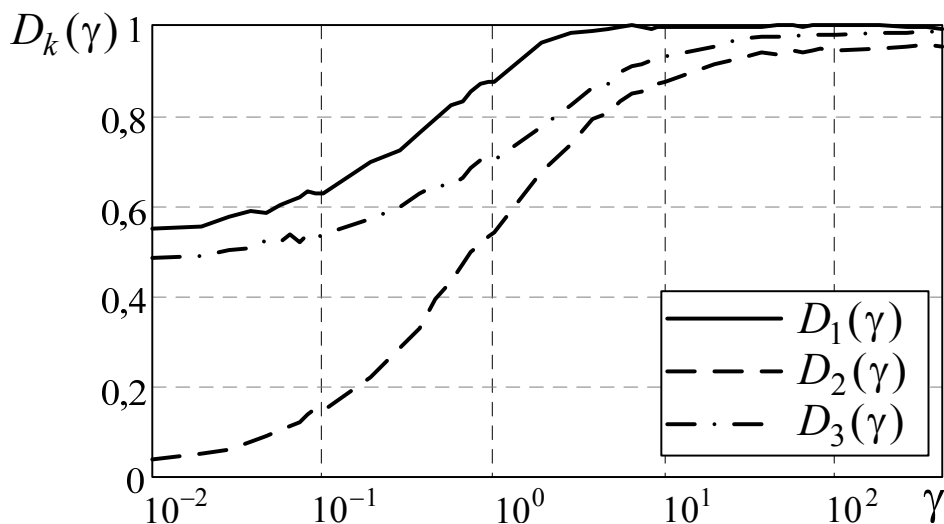


Рис. 2. Вероятности правильного распознавания в зависимости от ОСШ

Полученные вероятности ложного распознавания приведены на рис. 3.

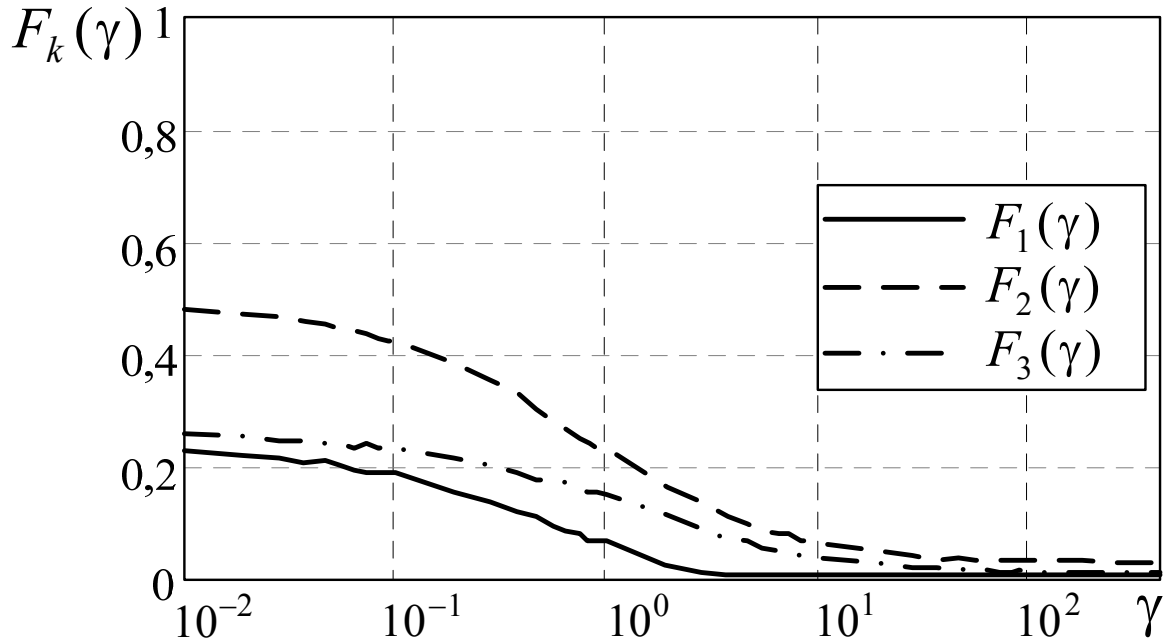


Рис. 3. Вероятности ложного распознавания в зависимости от ОСШ

Значения средней длительности процедуры распознавания приведены на рис. 4.

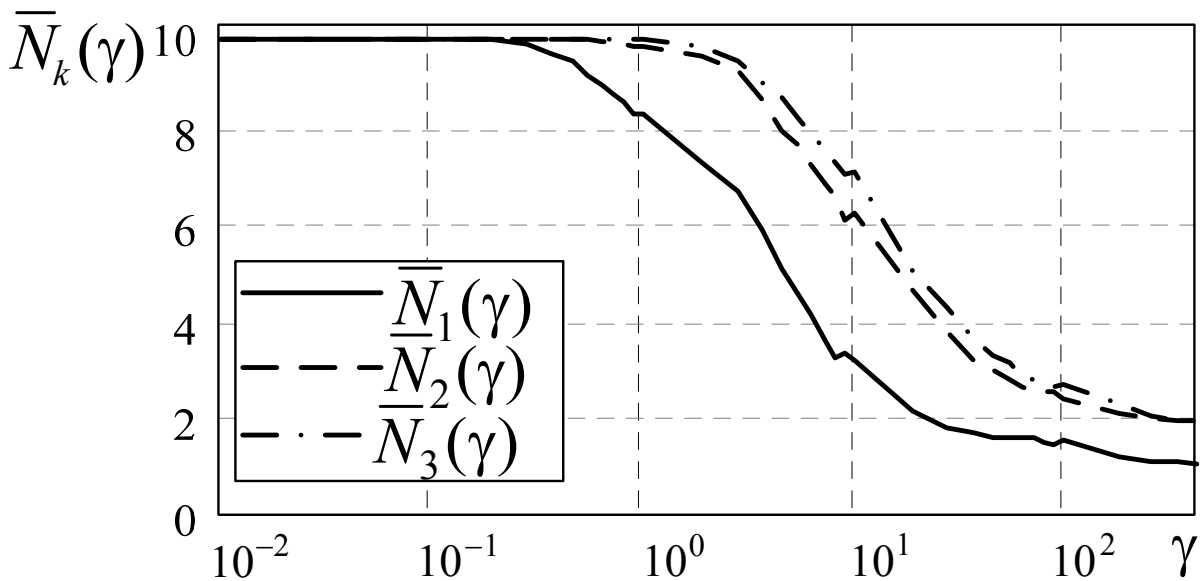


Рис. 4. Значения средней длительности последовательной процедуры распознавания

### Заключение

Полученный квазиоптимальный алгоритм последовательного распознавания радиолокационных объектов, обеспечивающий, минимизацию среднего риска принимаемых решений о классе объекта и о продолжении наблюдения характеризуется достаточной простотой и высокими показателями качества классификации. Это достигается благодаря использованию подхода, основанного на последовательном уточнении априорной информации.

## Список литературы

1. Охрименко, А. Е. Основы радиолокации и РЭБ / А.Е. Охрименко. Минск: Воениздат, 1983. – 456 с.
2. Вальд, А. Последовательный анализ / А. Вальд; под ред. Б.А. Севастьянова. - Москва: Физматгиз, 1960. - 328 с.
3. Фу, К. Последовательные методы в распознавании образов и обучении машин / К. Фу; под ред. Л.А. Мееровича, Я.З. Цыпкина. Москва: Наука, 1971. 256 с.
4. Храменков А.С. Алгоритм последовательного распознавания радиолокационных объектов, обеспечивающий минимизацию среднего риска принимаемых решений / А.С. Храменков, С.Н. Ярмолик // Доклады БГУИР. - 2016. - Т 1. - № 3. - С. 28-32.

*Храменков Андрей Сергеевич, адъюнкт кафедры радиолокации и приемопередающих устройств. Военной академии Республики Беларусь, Xras.tech@mail.ru*

*Ярмолик Сергей Николаевич, профессор кафедры радиолокации и приемопередающих устройств. Военной академии Республики Беларусь, кандидат технических наук, доцент, Yarmsergei@yandex.ru*

*Свинарский Мечислав Витальевич, магистрант кафедры радиолокации и приемопередающих устройств Военной академии Республики Беларусь, Mechislav1993@gmail.com*