

УДК 621.396.96

А. С. ХРАМЕНКОВ, С. Н. ЯРМОЛИК, М. В. СВИНАРСКИЙ

СИНТЕЗ УСТРОЙСТВА РАДИОЛОКАЦИОННОГО РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЪЕКТОВ С ВОЗМОЖНОСТЬЮ ОСТАНОВКИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ПРОЦЕДУРЫ

Военная академия Республики Беларусь, Минск, Беларусь, e-mail: xras.tech@mail.ru

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 последовательного уточнения информации при реализации последовательного алгоритма предложено использование апостериорной вероятности решающей статистики предыдущего шага классификации в качестве априорной информации для следующего шага.

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

A. S. KHRAMIANKOU, S. N. YARMOLIK, M. V. SVINARSKI

SYNTHESIS OF A RADAR RECOGNITION DEVICE WITH POSSIBILITY TO STOP THE SEQUENTIAL PROCEDURE

Military academy of the Republic of Belarus, Minsk, Belarus, e-mail: xras tech@mail.ru

For increase of reliability of radar objects classification it is offered to use sequential Bayesian recognition algorithm, providing minimisation risk of accepted decisions on an object class and further supervision continuation. For sequential specification of data it is proposed to use a posteriori probability of solving statistics of the previous step of classification as a priori information for the following step.

Keywords: sequential Bayesian algorithm of recognition, minimum average risk, sequential specification of the prior information.

Введение и постановка задачи. Задача радиолокационного распознавания заключается в установлении факта принадлежности наблюдаемого объекта к определенному классу [1–3]. Процесс распознавания радиолокационных объектов осуществляется в условиях сложной помеховой обстановки: наличие активных, пассивных и имитирующих помех, преднамеренное использование ложных целей [1, 3, 4]. Принятие решения о классе наблюдаемого объекта носит статистический характер и решается соответствующими методами [1–6].

Общее решение задачи радиолокационного распознавания класса объекта при использовании байесовского критерия оптимальности известно [1–3]. На практике наибольшее распространение получил алгоритм максимального правдоподобия [1]. Решающее правило устройства распознавания M классов объектов предполагает формирование M отношений правдоподобия $\Lambda(\xi|A_l)$, $l = \overline{1, M}$, и сравнение их между собой:

если $\Lambda(\xi|A_k) \geq \Lambda(\xi|A_l)$, $l = \overline{1, M}$, $l \neq k$, то принимается решение в пользу k -го класса,

где $\Lambda(\xi|A_k) = \frac{p(\xi|A_k)}{p(\xi|A_0)}$ $\left(\Lambda(\xi|A_l) = \frac{p(\xi|A_l)}{p(\xi|A_0)} \right)$ – отношение правдоподобия, сформированное при условии наблюдения объекта k (l -го) класса; $p(\xi|A_k)$ ($p(\xi|A_l)$) – многомерная плотность вероятности (функция правдоподобия) дискретных отсчетов аддитивной смеси сигнала и фона при условии наблюдения объекта k (l -го) класса; $p(\xi|A_0)$ – многомерная плотность вероятности дискретных отсчетов радиолокационного фона.

© Храменков А. С., Ярмолик С. Н., Свинарский М. В., 2016

Следует отметить, что, несмотря на значительные успехи и достижения в теоретической и экспериментальной областях [1–5], на пути практической реализации разработанных методов и способов распознавания в современных и перспективных радиолокаторах встречаются значительные трудности. Основной причиной этого является сравнительно низкая достоверность решений, принимаемых при наличии интенсивного и сложного радиолокационного фона особенно в условиях ограниченного времени наблюдения объектов. Кроме того, в настоящее время отсутствует оптимальная процедура выбора наиболее информативных признаков классификации, что заставляет разработчиков переходить к квазиоптимальным алгоритмам, используя различные комбинации отличительных признаков. Важным вопросом при решении задачи классификации объектов является также преодоление априорной неопределенности о параметрах обрабатываемых сигналов [6].

Для повышения достоверности принимаемых решений при классификации определенный интерес представляет увеличение времени наблюдения радиолокационного объекта [1]. 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 [7]. Использование последовательных процедур при решении задач распознавания объектов позволяет осуществлять адаптацию решающего правила к условиям наблюдения [6] и открывает возможности изменения границ признакового пространства путем исключения из рассмотрения наименее вероятных классов [8].

В связи с тем, что существует определенная связь между количеством извлекаемой информации о наблюдаемом объекте и длительностью интервала наблюдения в последовательных процедурах, неизбежно возникает задача оптимизации длительности процедуры обработки [6]. При этом важно обеспечить рациональное соотношение между требуемым качеством распознавания и продолжительностью процедуры принятия решения.

Следует отметить, что в технической литературе детально рассматривают последовательные правила применительно к двум гипотезам [6, 8]. Последовательные методы решения многоальтернативных задач часто рассматриваются в обобщенном виде [6], а приведенные результаты носят эмпирический характер [8]. Определенный интерес представляет задача синтеза байесовского многошагового алгоритма последовательной классификации радиолокационных объектов, обеспечивающего минимизацию риска принимаемых решений о классе объекта и о продолжении дальнейшего наблюдения.

Синтез решающего правила последовательной классификации объектов. Задача последовательного радиолокационного распознавания объекта k -го класса A_k ($k = 1, M$) на каждом шаге наблюдения сводится к принятию решения о принадлежности наблюдаемой цели к одному из l классов A_l^* ($l = 1, M$) или к вынесению решения о продолжении наблюдения A_{M+1}^* . Очевидно, что событиям $l = k$ соответствуют правильные решения, а событиям $l \neq k$ – ошибочные решения. Оптимальным в смысле байесовского последовательного критерия распознавания будет правило, обеспечивающее минимизацию среднего значения потерь (риска), связанных с последовательной процедурой, при принятии решения о классе наблюдаемого объекта или о продолжении наблюдения. При этом процесс минимизации значения среднего риска последовательной процедуры сводится к минимизации среднего риска на каждом шаге наблюдений [6].

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

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

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

шения о продолжении наблюдения (($M + 1$)-я гипотеза) при наличии объекта i -го класса на n -м шаге.

Последовательное байесовское распознавание предполагает на каждом шаге наблюдения 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 (1). При этом условные вероятности принимаемых решений находятся путем интегрирования распределения решающей статистики по требуемой области $\Gamma_k(n)$:

$$P_n(A_k^* | A_i) = \int_{\Gamma_k(n)} p(\xi_n | A_i) d\xi_n, \quad (2)$$

где ξ_n – наблюдаемый вектор принятого сигнала на n -м шаге, представляющий собой аддитивную смесь сигнальной составляющей радиолокационного портрета объекта и фона; $p(\xi_n | A_i)$ – многомерная плотность вероятности (функция правдоподобия) дискретных отсчетов смеси сигнала, отраженного от объекта i -го класса и фона на n -м шаге.

При расчете среднего риска за принятые решения в пользу определенного класса отдельно выделим слагаемое, определяющее средний риск за правильно принятые решения ($i = k$):

$$R_n = \sum_{k=1}^M \sum_{i=1, i \neq k}^M P_n(A_i) C_{ki}^n \int_{\Gamma_k(n)} p(\xi_n | A_i) d\xi_n + \sum_{i=1}^M P_n(A_i) C_{ii}^n \int_{\Gamma_i(n)} p(\xi_n | A_i) d\xi_n + \sum_{i=1}^M P_n(A_i) C_{M+1,i}^n \int_{\Gamma_{M+1}(n)} p(\xi_n | A_i) d\xi_n. \quad (3)$$

Поскольку области принятия решений на каждом шаге процедуры являются непересекающимися, каждую из них можно представить в следующем виде:

$$\Gamma_k(n) = \Gamma(n) - \bigcup_{i=1, i \neq k}^{M+1} \Gamma_i(n), \quad k = \overline{1, M+1}. \quad (4)$$

Подставим значения областей принятия решений (4) в выражение для риска за правильно принятые решения ($i = k$) (3):

$$R_n = \sum_{k=1}^M \sum_{i=1, i \neq k}^M P_n(A_i) C_{ki}^n \int_{\Gamma_k(n)} p(\xi_n | A_i) d\xi_n + \sum_{i=1}^M P_n(A_i) C_{ii}^n \int_{\Gamma(n)} p(\xi_n | A_i) d\xi_n - \sum_{k=1}^M \sum_{i=1, i \neq k}^M P_n(A_i) C_{ii}^n \int_{\Gamma_k(n)} p(\xi_n | A_i) d\xi_n - \sum_{i=1}^M P_n(A_i) C_{ii}^n \int_{\Gamma_{M+1}(n)} p(\xi_n | A_i) d\xi_n + \sum_{i=1}^M P_n(A_i) C_{M+1,i}^n \int_{\Gamma_{M+1}(n)} p(\xi_n | A_i) d\xi_n.$$

После группировки слагаемых и с учетом того, что $\int_{\Gamma(n)} p(\xi_n | A_i) d\xi_n = 1$, выражение для среднего риска (3) примет вид (5)

$$R_n = \sum_{i=1}^M P_n(A_i) C_{ii}^n + \sum_{k=1}^M \int_{\Gamma_k(n)} \sum_{i=1, i \neq k}^M P_n(A_i) (C_{ki}^n - C_{ii}^n) p(\xi_n | A_i) d\xi_n + \int_{\Gamma_{M+1}(n)} \sum_{i=1}^M P_n(A_i) (C_{M+1,i}^n - C_{ii}^n) p(\xi_n | A_i) d\xi_n. \quad (5)$$

Первое слагаемое в выражении (5) является постоянной величиной, поэтому решению о принадлежности наблюдаемого объекта к определенному классу или о продолжении процедуры на n -м шаге соответствует гипотеза, характеризующаяся минимальным значением подынтегрального выражения:

$$R_n^k(\xi_n) = \sum_{i=1, i \neq k}^M P_n(A_i)(C_{ki}^n - C_{ii}^n)p(\xi_n | A_i), \quad k = \overline{1, M}, \quad R_n^{M+1}(\xi_n) = \sum_{i=1}^M P_n(A_i)(C_{M+1,i}^n - C_{ii}^n)p(\xi_n | A_i), \quad (6)$$

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

Очевидно, что если минимальным оказывается одно из M значений $R_n^k(\xi_n)$, $k = \overline{1, M}$, то принимается решение о принадлежности цели к k -му классу A_k^* и процедура распознавания прекращается. Если же минимальным оказывается $R_n^{M+1}(\xi_n)$, то принимается решение о продолжении наблюдения A_{M+1}^* .

Выражения для апостериорного риска можно представить в несколько иной форме. Разделим $R_n^k(\xi_n)$ и $R_n^{M+1}(\xi_n)$ на плотность вероятности шума $p(\xi_0 | A_0)$:

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

$$J_n^{M+1}(\xi_n) = \sum_{i=1}^M P_n(A_i)(C_{M+1,i}^n - C_{ii}^n)\Lambda(\xi_n | A_i), \quad (7)$$

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 -м шаге процедуры распознавания.

Таким образом, решающее правило последовательного распознавания радиолокационных объектов, обеспечивающего минимизацию среднего риска принимаемых решений, включает в себя 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 $J_n^k(\xi_n) \leq J_n^l(\xi_n)$, $l = \overline{1, M}$, $l \neq k$, 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 (риск продолжения наблюдения меньше риска принимаемого решения), то принимается решение о продолжении наблюдения A_{M+1}^* и осуществляется переход к $(n + 1)$ -му шагу процедуры распознавания.

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

При необходимости контроля процесса классификации существует возможность после каждого контакта с целью совместно с окончательным решением о классе цели либо о продолжении наблюдения выдавать предварительное решение только о классе цели по минимальному значению $J_n^l(\xi_n)$, $l = \overline{1, M}$.

С учетом выражения (7) решающее правило при последовательном распознавании может быть представлено с использованием значений отношения правдоподобия:

если

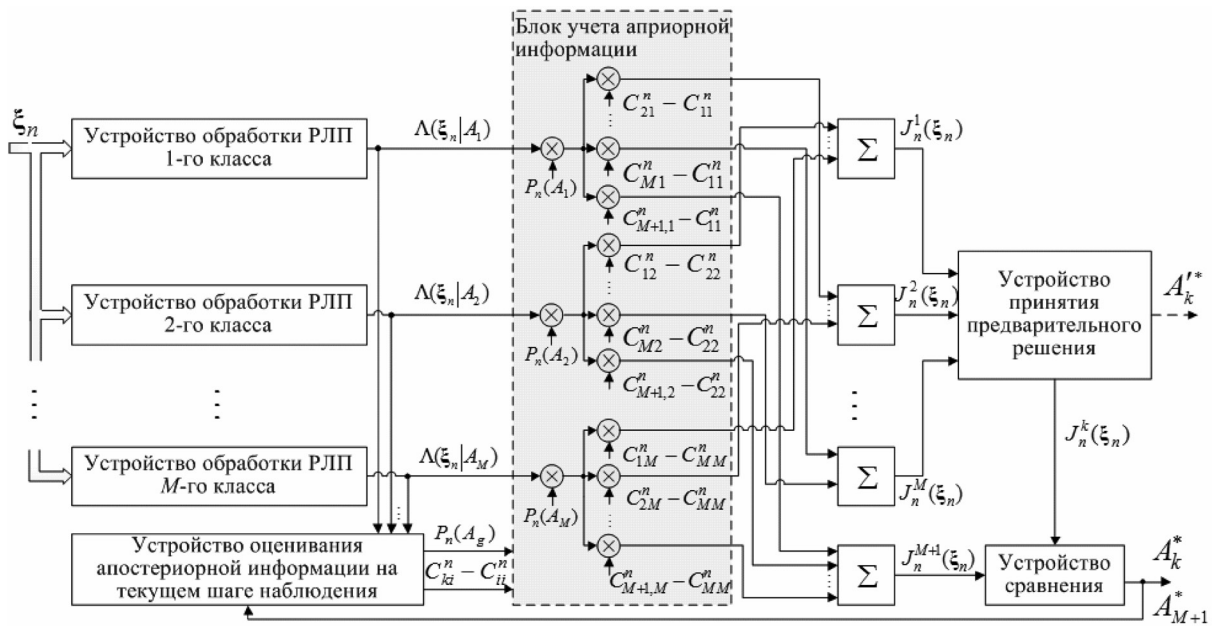
$$\Lambda(\xi_n | A_k) \geq \frac{1}{P_n(A_k)(C_{lk}^n - C_{kk}^n)} \sum_{i=1, i \neq k}^M P_n(A_i)(C_{ki}^n - C_{li}^n)\Lambda(\xi_n | A_i), \quad l = \overline{1, M}, \quad l \neq k,$$

то предварительное решение A_k^* ;

если

$$\Lambda(\xi_n | A_k) \geq \frac{1}{P_n(A_k)(C_{M+1,k}^n - C_{kk}^n)} \sum_{i=1, i \neq k}^M P_n(A_i)(C_{ki}^n - C_{M+1,i}^n)\Lambda(\xi_n | A_i), \quad (8)$$

то окончательное решение A_k^* , иначе – продолжение наблюдения.



Структурная схема устройства распознавания объектов с возможностью остановки последовательной процедуры

В ряде практических случаев удобнее использовать монотонную функцию (например, логарифм) от апостериорного риска $U_n^k(\xi_n) = \ln[J_n^k(\xi_n)]$, $k = \overline{1, M+1}$.

Рассмотренный подход позволяет обеспечить минимизацию среднего риска принимаемых решений о классе объекта и о продолжении дальнейшего наблюдения.

Таким образом, использование последовательной процедуры с минимизацией среднего риска принимаемых решений позволяет повысить эффективность классификации радиолокационных объектов по сравнению с одноэтапными процедурами. Ценой за повышение качества распознавания является увеличение времени на принятие решения. При этом длительность процедуры определяется имеющимися условиями наблюдения объектов.

Реализация байесовского алгоритма, минимизирующего средний риск принимаемых решений, предполагает использование полного комплекта априорных данных [2]. Полученное байесовское решающее правило (8) в процессе формирования решающей статистики на каждом шаге классификации предполагает использование следующих величин:

априорные вероятности появления объектов различных классов ($P_n(A_l)$, $l = \overline{1, M}$);

цены за принятые решения на каждом этапе процедуры распознавания (C_{kl}^n , $C_{M+1,l}^n$, $k, l = \overline{1, M}$).

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 $P_{n=1}(A_l) = 1/M$, $l = \overline{1, M}$ [1–3].

При учете взаимосвязи последовательно наблюдаемых процессов и возможности последовательного уточнения информации в качестве априорных вероятностей для последующих шагов целесообразно использовать апостериорные вероятности предыдущего шага классификации. Очевидно, что выражение для априорной вероятности l -го класса на $(n+1)$ -м шаге можно представить следующей рекуррентной формулой:

$$P_{n+1}(A_l) \cong P_n(A_l | \xi_n) = \frac{P_n(A_l) p(\xi_n | A_l)}{\sum_{i=1}^M P_n(A_i) p(\xi_n | A_i)}, \quad (9)$$

где $P_n(A_l | \xi_n)$ – апостериорная вероятность принадлежности цели к l -му классу на n -м шаге; $P_n(A_l)$ – априорная вероятность принадлежности цели к l -му классу на n -м шаге; $p(\xi_n | A_l)$ – ус-

ловная плотность вероятности (функция правдоподобия) принятой реализации сигнала на входе l -го канала обработки на n -м шаге.

Если числитель и знаменатель выражения (9) разделить на плотность вероятности шума $p(\xi_0 | A_0)$, то априорную вероятность l -го класса на $(n + 1)$ -м шаге можно представить через отношение правдоподобия:

$$P_{n+1}(A_l) \cong P_n(A_l | \xi_n) = \frac{P_n(A_l) \Lambda(\xi_n | A_l)}{\sum_{i=1}^M P_n(A_i) \Lambda(\xi_n | A_i)}. \quad (10)$$

Рассмотренный подход позволяет при формировании решения на текущем шаге процедуры классификации учитывать информацию о распределении статистики с предыдущих этапов наблюдения. Последовательное уточнение априорной информации в ряде случаев 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. Использование последовательных процедур позволяет улучшить достоверность классификации за счет увеличения времени наблюдения объекта. 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. Исходя из этого, цены за ошибочные решения целесообразно выбирать больше стоимостей продолжения наблюдения, а последние больше цен за правильные решения $C_{kl}^n > C_{M+1,l}^n > C_{ll}^n$, $k, l = 1, M$, $k \neq l$ [6].

Следует отметить, что определенным выбором на каждом шаге соотношения между ценами за ошибочные решения и за продолжение наблюдения можно добиться усечения последовательной процедуры классификации. Если все цены одинаково зависят от номера шага процедуры распознавания n , отличаясь лишь величиной коэффициента пропорциональности, то их можно представить в виде произведения $C_{kl}^n = C_{kl} f(n)$, $C_{M+1,l}^n = C_{M+1,l} f(n)$. Данное представление позволяет упростить расчет значений решающей статистики (7), исключив зависимость значений цен от номера шага процедуры распознавания. При этом длительность последовательной процедуры распознавания будет случайной величиной.

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

Другим способом упрощения алгоритма распознавания является замена штрафов за неправильные решения «премиями» за правильные решения, т. е. $C_{kk}^n \neq C_{ll}^n \neq 0$ и $C_{kl}^n = 0$, $k, l = 1, M$. 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.

Заключение. Повышение достоверности решений о классе радиолокационных объектов, принимаемых при наличии интенсивного и сложного радиолокационного фона 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.

Список использованной литературы

1. *Охрименко, А. Е.* Основы радиолокации и радиоэлектронная борьба. Ч. 1. Основы радиолокации: учеб. для высших училищ ПВО / А. Е. Охрименко. – М.: Воен. изд-во, 1983. – 456 с.
2. Радиолокационное распознавание: учеб. пособие по курсу «Теоретические основы радиолокации» / Я. Д. Ширман [и др.]; под. общ. ред. Я. Д. Ширмана. – Харьков: ХВУ, 1994. – 122 с.
3. *Курлович, В. И.* Основы теории радиосистем / В. И. Курлович, С. В. Шаляпин. – Минск: Военная академия РБ, 1999. – 343 с.
4. *Tait, P.* Introduction to Radar Target Recognition / P. Tait. – London: The Institution of Engineering and Technology, 2009. – 404 p.
5. *Blacknell, D.* Radar Automatic Target Recognition (ATR) and Non-Cooperative Target Recognition (NCTR) / D. Blacknell, H. Griffiths. – London: The Institution of Engineering and Technology, 2013. – 279 p.
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. *Шишов, Ю. А.* Многоканальная радиолокация с временным разделением каналов / Ю. А. Шишов, В. А. Ворошилов. – М.: Радио и связь, 1987. – 144 с.
8. *Фу, К.* Последовательные методы в распознавании образов и обучении машин / К. Фу. – М.: Наука, 1971. – 256 с.

Поступила в редакцию 04.10.2015