

ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ

УДК 621.391

В.М. БЕЗРУК, д-р техн. наук

СЕЛЕКЦИЯ И РАСПОЗНАВАНИЕ ЗАДАННЫХ СЛУЧАЙНЫХ СИГНАЛОВ

Введение

При решении ряда прикладных задач распознавания в областях радиолокации, радиомониторинга, технической и медицинской диагностики информация о распознаваемых объектах представляется в виде случайных сигналов, которые поступают с выхода некоторых физических датчиков сигналов [1 – 8]. Возникает необходимость обработки такой информации, которая заключается в принятии решений о принадлежности объектов и состояний к одному из заданных классов по представляющим их случайным сигналам. При синтезе соответствующих статистических алгоритмов распознавания требуется выбрать адекватную математическую модель распознаваемых сигналов, получить вероятностные характеристики сигналов и задать критерий оптимальности. Разные типы распознаваемых случайных сигналов в конкретных прикладных задачах определяют необходимость использовать для описания сигналов разные вероятностные модели. Априорная неопределенность, то есть отсутствие априорных сведений о вероятностных характеристиках сигналов, обычно преодолевается с использованием обучающих выборок распознаваемых сигналов, в результате чего осуществляется адаптация алгоритмов к условиям распознавания конкретной прикладной задачи. Однако на практике на распознавание кроме заданных в вероятностном смысле сигналов поступают также неизвестные сигналы, для которых не могут быть получены обучающие выборки. В этом случае классические методы распознавания не могут быть использованы, что приводит к необходимости разработки нетрадиционных методов селекции и распознавания заданных сигналов, учитывающих наличие класса неизвестных сигналов. В известных работах по распознаванию такие задачи распознавания не рассматривались. Лишь в работе [2] приведены методы распознавания заданных сигналов при наличии класса неизвестных сигналов для случая описания сигналов вероятностной моделью в виде ортогональных разложений случайных сигналов.

В настоящей работе рассматриваются нетрадиционные методы селекции и распознавания статистически заданных случайных сигналов при наличии класса неизвестных сигналов для случаев описания сигналов другими вероятностными моделями, в частности, в виде авторегрессионных процессов и смесей гауссовых распределений. Приводятся некоторые результаты исследований при решении ряда прикладных задач распознавания с использованием рассмотренных методов селекции и распознавания заданных случайных сигналов. Исследования методов распознавания были проведены путем статистического моделирования на выборках сигналов, характерных для задач радиолокации, автоматизированного радиомониторинга и медицинской диагностики.

1. Постановка задачи распознавания сигналов

Предположим, что распознаваемые объекты представлены конечномерными случайными векторами равноотстоящих временных отсчетов сигналов \vec{x} , по реализациям которых принимаются решения о их принадлежности. Зададим $(M + 1)$ -у гипотезы, которые могут быть сделаны в отношении наблюдаемых сигналов: H^i , $i = \overline{1, M}$ – для заданных в вероятностном смысле сигналов, H^0 – для сигналов с неизвестными вероятностными характеристиками, которые объединены в $(M + 1)$ -й класс. Плотности вероятности заданных сигналов $W(\vec{x} | \vec{\alpha}^i)$, $i = \overline{1, M}$ заданы с точностью до случайных векторных параметров $\vec{\alpha}^i$, $i = \overline{1, M}$,

а для $(M + 1)$ -го класса плотность вероятности неизвестна. Заданы также априорные вероятности гипотез $P(H^i) = P_i$, причем $\sum_{i=0}^M P_i = 1$. Полагается, что заданы обучающие выборки M заданных сигналов $\{\vec{x}_r^i, r = \overline{1, n_i}; i = \overline{1, M}\}$, а обучающая выборка для $(M + 1)$ -го неизвестных сигналов ($i = 0$) отсутствует либо она является непредставительной. Такие исходные данные для распознавания сигналов могут быть определены термином повышенная априорная неопределенность [5]. Оговоренные условия и ограничения определяют необходимость нетрадиционной постановки задачи распознавания сигналов в условиях повышенной априорной неопределенности.

Проанализируем вид показателя качества распознавания сигналов, характеризуемого средним риском [2, 7]

$$R = \sum_{l=0}^M \sum_{\substack{i=0 \\ l \neq i}}^M c_{li} P_i P(G^l / i) = \sum_{i=1}^M \sum_{l=1}^M c_{li} P_i P(G^l / i) + \sum_{i=1}^M c_{0i} P_i P(G^0 / i) + P_0 \sum_{l=0}^M c_{l0} P(G^l / 0), \quad (1)$$

где c_{li} – функция потерь; $P(G^l / i)$ – вероятность ошибки в случае принятия решения в пользу l -го сигнала при действии i -го сигнала.

Нерандомизированное решающее правило распознавания осуществляет разбиение выборочного пространства сигналов на $(M + 1)$ -ну непересекающуюся область. С учетом этого в выражении (1) первое слагаемое – это составляющая среднего риска за счет перепутывания M заданных сигналов между собой, второе слагаемое – за счет отнесения заданных сигналов к $(M + 1)$ -му классу неизвестных сигналов, третье слагаемое – за счет отнесения сигналов из $(M + 1)$ -го класса к M заданным сигналам.

В соответствии с имеющейся информацией в поставленной задаче распознавания можно найти оценки первых двух составляющих в (1), которые обозначим через $k_s(\vec{A})$, где \vec{A} – вектор параметров распределений для заданных сигналов. Оценить величину третьей составляющей не представляется возможным. Для учета третьей составляющей предлагается ввести скалярный показатель $k_g(\vec{A})$ объема критической области $G = \bigcup_{i=1}^M G^i$ отклонения гипотезы H_0 о действии $(M + 1)$ -го сигнала. Эта область имеет смысл собственной области M заданных сигналов. С содержательной точки зрения рассматриваемая задача распознавания заключается в принятии решения о действии одного из M заданных сигналов и отнесении неизвестных сигналов в $(M + 1)$ -й класс. В этой связи такая задача распознавания может быть названа селекцией и распознаванием заданных случайных сигналов.

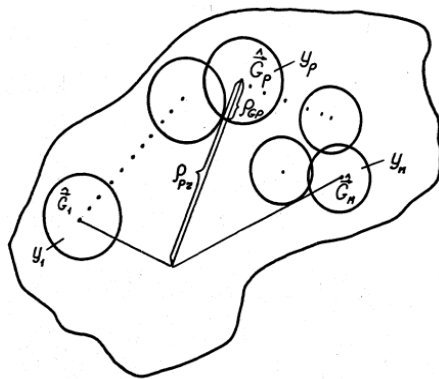


Рис. 1

3. Решающие правила селекции распознавания заданных сигналов

Для сформулированной нетрадиционной задачи селекции и распознавания заданных сигналов при наличии неизвестных сигналов получено следующее решающее правило [2]: если выполняются неравенства

$$H^0 : \max_{l=1, M} \{P_l W(\bar{x} / \bar{\alpha}^l)\} < \lambda, \quad (2a)$$

то принимается гипотеза H^0 о действии $(M + 1)$ -го класса неизвестных сигналов; при выполнении системы неравенств

$$H^i : \max_{l=1, M} \{P_l W(\bar{x} / \bar{\alpha}^l)\} \geq \lambda, \quad (2б)$$

$$P_i W(\bar{x} / \bar{\alpha}^i) \geq P_l W(\bar{x} / \bar{\alpha}^l), \quad l = \overline{1, M}, \quad l \neq i \quad (2в)$$

принимается гипотеза H^i о действии заданного i -го сигнала.

Здесь пороговое значение λ определяется из условия обеспечения заданной вероятности правильного распознавания заданных сигналов.

Заметим, что при нахождении этого решающего правила не использована информация о плотности распределения $(M + 1)$ -го сигнала и не требовалась его обучающая выборка. Постановка и решение рассмотренной задачи – это формализация требования содержательного характера о необходимости распознать M заданных сигналов и отнести в $(M + 1)$ -й класс все остальные неизвестные сигналы, информация о которых недостаточна для их распознавания. Геометрический смысл решающего правила поясняется на рис 1.

В частном случае решения задачи для простой функции потерь, когда вводятся потери лишь за счет перепутывание неизвестных сигналов с M заданными (безразлично, с каким конкретно), приходят к различению двух гипотез: H^M – о действии одного из M заданных сигналов; H^0 – о действии неизвестного сигнала из $(M + 1)$ -го класса. При этом может быть получено следующее решающее правило [2]:

$$\begin{aligned} H^0 : \sum_{l=1}^M P_l W(\bar{x} / \bar{\alpha}^l) \leq \lambda, \\ H^i : \sum_{l=1}^M P_l W(\bar{x} / \bar{\alpha}^l) > \lambda. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь по существу, решается задача выделения (селекции) класса M заданных сигналов в условиях повышенной априорной неопределенности (при наличии класса неизвестных сигналов). Нетрудно видеть, что решающее правило (3) можно использовать и для решения иногда встречающейся на практике противоположной задачи – выделения (обнаружения) неизвестных сигналов.

Решающее правило (2) дает общее решение поставленной задачи селекции и распознавания заданных сигналов при наличии неизвестных сигналов. В работе [2] приводятся особенности решающих правил распознавания, когда сигналы описываются вероятностной моделью в виде ортогональных разложений, дающей спектральное представление сигналов. В этом случае в указанных решающих правилах (2), (3) сигнал, представляемый вектором \bar{x} , заменяется на вектор коэффициентов разложения сигналов в некотором базисе $\bar{c} = \bar{x}\Phi$, где Φ – матрица базисных векторов.

Рассмотрим особенности решающего правила распознавания (2), конкретизированного для случаев описания распознаваемых сигналов другими вероятностными моделями – в виде авторегрессионных процессов и смеси распределений сигналов.

В частности, при выборе для описания сигналов вероятностной модели в виде гауссовских авторегрессионных процессов решающее правило распознавания (2) имеет следующий вид [7, 10]:

если выполняется система неравенств

$$H^l : K_l(\bar{x}) < \Lambda_l, \quad l = \overline{1, M} \quad (3a)$$

$$K_l(\bar{x}) - K_i(\bar{x}) + \ln \frac{(2\pi\sigma_i)^{p_i-L}}{(2\pi\sigma_k)^{p_k-L}} \geq \ln \frac{P_l}{P_i}, \quad (3б)$$

то принимается гипотеза о действии i -го заданного сигнала; если выполняются неравенства)

$$H^{M+1} : K_l(\bar{x}) > \Lambda_l, \quad l = \overline{1, M}, \quad (3в)$$

то принимается гипотеза о действии неизвестного сигнала.

Здесь $K_l(\bar{x}) = \frac{1}{2\sigma_l^2} \sum_{k=p+1}^L \left[x_k - \mu_l - \sum_{j=1}^{p_l} a_j^l (x_{k-j} - \mu_l) \right]^2$ – соотношение, определяющее нормиро-

ванную ошибку предсказания в авторегрессионной модели; p_l, a_j^l – порядок и параметры

авторегрессионной модели для l -го сигнал; $\Lambda_l = \ln \frac{(2\pi)^{\frac{L}{2}} \sigma_l^{L-p_l} \lambda_l}{P_l}$ – некоторые пороговые

значения, определяемые из условия обеспечения заданных вероятностей правильного распознавания M заданных сигналов;

При использовании вероятностной модели сигналов в виде смеси распределений решающее правило распознавания (2) имеет следующий вид [6]: при выполнении условий

$$H^i : \max_{l=1, M} \left\{ P_l \sum_{q=1}^Q g_m W_m(\bar{x}/\bar{\alpha}^l) \right\} \geq \lambda, \quad (4a)$$

$$P_i \sum_{q=1}^Q g_m W_m(\bar{x}/\bar{\alpha}^l) \geq P_l \sum_{q=1}^Q g_m W_m(\bar{x}/\bar{\alpha}^l), \quad l = \overline{1, M}, \quad l \neq i \quad (4б)$$

принимается гипотеза о действии i -го заданного сигнала; если выполняются условия

$$H^0 : \max_{l=1, M} \left\{ P_l \sum_{q=1}^Q g_m W_m(\bar{x}/\bar{\alpha}^l) \right\} < \lambda, \quad (4в)$$

то принимается гипотеза о действии неизвестных сигналов из $(M + 1)$ -го класса.

Аналогично решающее правило (2) может быть конкретизовано с учетом вида плотностей распределения сигналов для случая выбора других вероятностных моделей сигналов.

4. Результаты исследований методов селекции и распознавания сигналов

Рассмотренные методы селекции и распознавания заданных случайных сигналов использованы при решения ряда прикладных задач распознавания объектов по представляющим их случайным сигналам в областях радиолокации, автоматизированного радиоконтроля и медицинской диагностики. Исследования проведены путем статистического моделирования на выборках сигналов, типичных для конкретной прикладной задачи. При этом соответствующие алгоритмы распознавания сигналов были программно реализованы на ЭВМ. Сформированы обучающие и контрольные выборки сигналов, характерные для каждой прикладной задачи. Обучающие выборки сигналов были использованы для оценивания неизвестных параметров соответствующих решающих правил. По контрольным выборкам сигналов в результате статистических испытаний алгоритмов распознавания найдены оценки вероятностей правильного распознавания сигналов.

При исследовании задачи радиолокационного распознавания воздушных объектов по выборкам дальностных портретов использовано решающее правило типа (2), основанное на вероятностной модели в виде ортогональных разложений случайных сигналов [8]. Исследования были проведены на выборках дальностных портретов трех типов воздушных объектов: крупных, средних и малых размеров, смоделированных для случая зондирующих сигналов в виде когерентной пачки широкополосных ЛЧМ-импульсов (рис. 2) [8]. В результате исследований получена оценка средней вероятности правильного распознавания объектов, равная 0.92 [9].

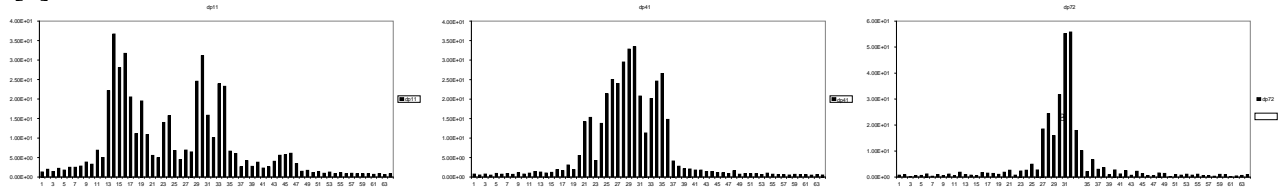


Рис. 2

Рассмотрены также особенности радиолокационного распознавания типов объектов, когда для математического описания сигналов пачки дальностных портретов используется векторная авторегрессионная модель [11]. При этом выборка дальностных портретов рассматривается как многокомпонентную векторную последовательность. Каждая компонента – это дискретная последовательность, которая характеризует изменение интенсивности отраженного сигнала от каждого элемента разрешения по дальности на интервале времени накопления пачки отраженных сигналов. При этом векторная последовательность может быть описана векторным авторегрессионным процессом и построено решающее правило распознавания, которое является обобщением решающего правила (3). Получаемые при этом дальностно-частотные портреты для указанных типов объектов приведены на рис. 3.

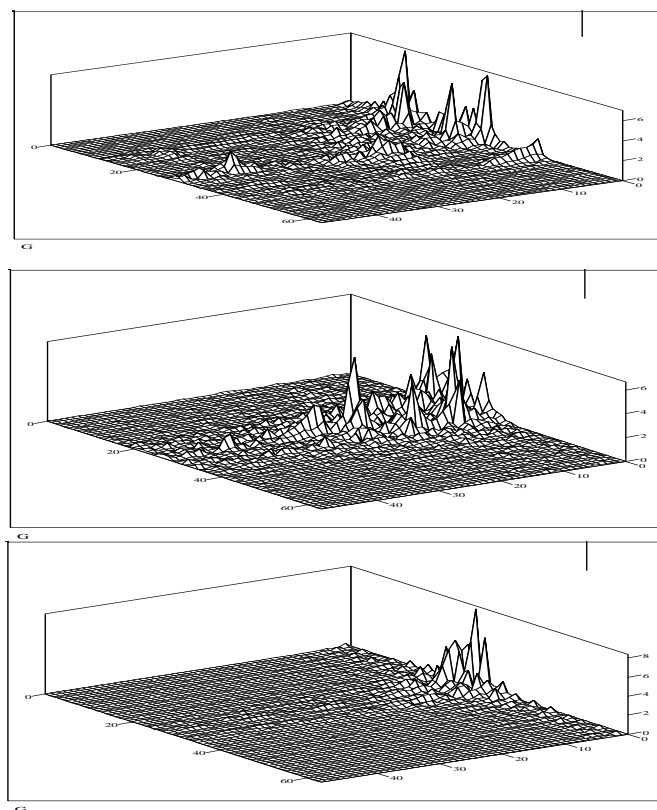


Рис. 3

Исследования задачи радиолокационного распознавания метеорологических объектов по флуктуациям интенсивности отраженных сигналов импульсного некогерентного радиоло-

катора проведено с использованием решающего правила распознавания (3), основанное на модели в виде авторегрессионных процессов [12]. Неизвестные параметры модели флуктуаций интенсивности отраженных сигналов были получены с использованием классифицированных выборок реальных отраженных сигналов для четырех типов облаков: перьевые, сплошные серые, высококучевые, кучевые мощные облака. Полученные оценки параметров модели приведены на рис. 4. В результате исследований по контрольным выборкам реальных отраженных сигналов от различных типов облаков получена оценка средней вероятности правильного распознавания заданных облаков, равная 0.8 – 0.9.

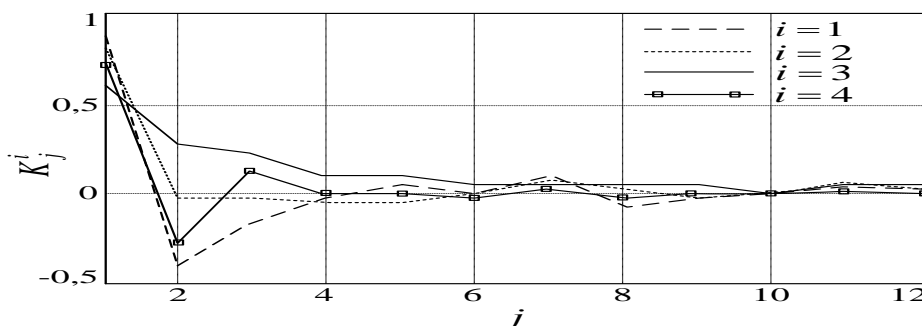


Рис. 4

При исследованиях задачи распознавания заданных типов радиопередач для автоматизированного радиомониторинга использовано решающее правило (3) [7]. Исследования проведены на выборках сигналов, соответствующих радиоизлучениям с различным типом радиопередач, которые характерны для задач автоматизированного радиомониторинга. Их усредненные энергетические спектры приведены на рис. 5. Получена оценка средней вероятности правильного распознавания радиопередач, равная 0.95.

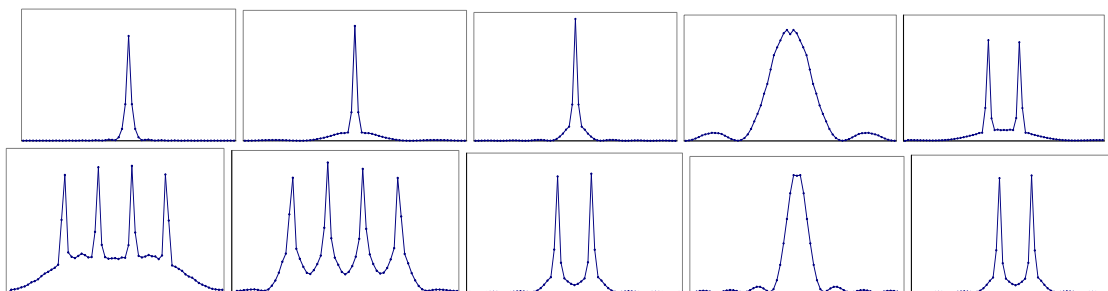


Рис. 5

При исследованиях другой задачи автоматизированного радиомониторинга – задачи распознавания видов модуляции радиоизлучений использовано решающее правило (4) [7]. Исследования проведены на выборках сигналов для радиоизлучений с различными видами модуляции, типичными для автоматизированного радиомониторинга (ASK-2, FSK-2, PSK-2, PSK-4, QAM-16). Получена оценка средней вероятности правильного распознавания видов модуляции, равная 0.9.

При исследованиях задачи автоматизированного распознавания стадий сна по электроэнцефалограммам (ЭЭГ) использовано решающее правило (3). Исследования проведены на выборках реализаций ЭЭГ для 6-ти стадий сна [13]. По классифицированным обучающим выборкам ЭЭГ найдены параметры решающего правила (3). Контрольные выборки использованы при исследованиях практических особенностей решения задачи автоматизированного распознавания стадий сна по ЭЭГ. В результате распознавания выборок ЭЭГ для разных стадий сна получены диаграммы изменений стадий сна, которая приведена на рис. 6. Исследована зависимость оценки средней вероятности ошибочного распознавания стадий сна от интервала наблюдения ЭЭГ T , по которому производится принятие решения о текущей

стадии сна (рис. 7). Получена оценка минимального значения средней вероятности ошибочного распознавания стадий сна $P_{\text{ош.ср.}}=0.15$.

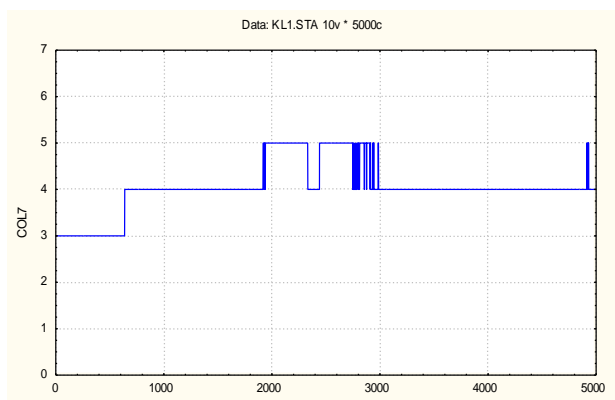


Рис. 4

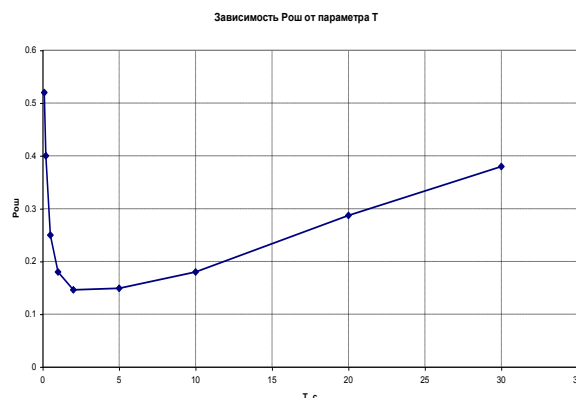


Рис. 5

Разработана методология оптимизации систем распознавания сигналов по совокупности показателей качества распознавания, быстродействия и реализационных затрат [14], которая может быть использована при проектировании устройств распознавания сигналов для решения прикладных задач распознавания.

Выводы

1. Рассмотрено решение нетрадиционных задач распознавания случайных сигналов, когда на распознавание наряду с сигналами, заданными в вероятностном смысле, предъявляются также неизвестные сигналы.
2. Изложены методы селекции и распознавания заданных случайных сигналов при наличии класса неизвестных сигналов для случаев описания сигналов разными вероятностными моделями – в виде ортогональных разложений, авторегрессионных процессов и смеси распределений.
3. Приведены результаты исследований методов селекции и распознавания сигналов, подтверждающие практическую значимость предложенных методов распознавания в области радиолокации, автоматизированного радиомониторинга и медицинской диагностики.

Список литературы: 1. Фукунага К. Введение в статистическую теорию распознавания. – М. : Наука, 1979. – 368с. 2. Омельченко В.А. Основы спектральной теории распознавания сигналов. – Харьков : Вища шк., 1983. – 156с. 3. Горелик А.Л., Гуревич И.Б., Скрипник В.А. Современное состояние проблемы распознавания. Некоторые аспекты. – М. : Радио и связь, 1985. – 162с. 4. Фомин Я.А., Тарловский Г.Р. Статистическая теория распознавания образов. – М. : Радио и связь, 1986. – 186с. 5. Webb A., Statistical Pattern Recognition. – New York: Wiley, 2002. – 256р. 6. Kuncheva L.I., Combining Pattern Classifiers: Methods and Algorithms. New York: Wiley, 2004. – 356р. 7. Безрук В.М., Певцов Г.В. Теоретические основы проектирования систем распознавания сигналов для автоматизированного радиоконтроля. – Харьков : Коллегиум, 2007. – 430с. 8. Computer Simulation of Aerial Target Radar Scattering, Recognition, Detection, and Tracking/Y.D. Shirman, S.A. Gorshkov, S.P. Leshchenko, V.M. Orlenko, S.Y. Sedyshev, O.I. Sukharevskiy/Y.D. Shirman editor. – Boston-London : Artech house, 2002. – 294с. 9. Bezruk V.M., Omelchenko V.A. Recognition of Radar Objects by Range Portraits in the Framework of Orthogonal Series Expansions // The First International Workshop "NOISE RADAR TECHNOLOGY" (Yalta). – 2002. – pp. 245-250. 10. Bezruk V.M. Autoregression Methods of Signals Recognition // Telecommunications and Radio Engineering. – 2003. – volume 56(12-14). – pp. 12-18. 11. Безрук В.М., Лебедев О.Г. Метод радиолокационного распознавания типов объектов при широкополосном зондировании на основе векторной авторегрессионной модели // Прикладная радиоэлектроника. – Харьков, 2005. – Т.4, №3. – с. 336-339. 12. Безрук В.М., Белов Е.Н., Войтович О.А., Нетребенко К.А., Тихонов В.А., Руднев Г.А., Хлопов Г.И., Хоменко С.И. Радиолокационное распознавание метеорообъектов на основе авторегрессионной модели отраженных сигналов // Прикладная радиоэлектроника. – 2010. – № 2. – с. 35–40. 13. Безрук В.М., Коваленко Н.П., Лысенко В.А. Об одном методе распознавания стадий сна по электроэнцефалограммам на основе авторегрессионной модели // Бионика интеллекта. – 2005, №1, с. 45-48. 14. Безрук В.М. Векторная оптимизация та статистичне моделювання в автоматизованому проектуванні систем зв'язку. – Харків : ХНУРЕ, 2002.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 15.02.2013