# СЕЛЕКЦИЯ И РАСПОЗНАВАНИЕ ЗАДАННЫХ РАДИОИЗЛУЧЕНИЙ ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННОМ РАДИОКОНТРОЛЕ

Безрук В.М.[1], Певцов Г.В.[2]
[1]Харьковский национальный университет радиоэлектроники
[2]Харьковский университет воздушных сил
61166, Харьков, пр. Ленина, 14 кафедра «Сети связи», тел. (057) 702-14-29
e-mail: bezruk@kture.kharkov.ua факс (057) 702-11-13

Methods of radiation selection and recognition under a priori uncertainty conditions with using modern probabilistic models of signals and complex standard images description signals of images are considered.

**Введение.** Автоматизированный радиоконтроль (РК) основан на решении сложной задачи пространственно-спектрально-временной обработки радиоизлучений (РИ) в широком диапазоне частот, которая включает поиск РИ по частоте, времени и направлению, анализ их спектра, измерение параметров РИ, их распознавание. Для упрощения проводится декомпозиция общей задачи обработки на ряд нетрадиционных задач обработки сигналов, в частности: выявление новых неизвестных сигналов, селекция и распознавание заданных видов сигналов, распознавание вида и оценивание параметров модуляции РИ, распознавание источников радиоизлучений.

Из-за действия помех и многих других неконтролируемых факторов сигналы, представляющие соответствующие РИ, носят случайный характер с априори неизвестными статистическими характеристиками. Априорная неопределенность преодолевается с использованием обучающих выборок сигналов. Однако при РК на обработку поступает множество неизвестных РИ, для которых не представляется возможным получить классифицированные обучающие выборки соответствующих сигналов. Это усложняет обработку и распознавание сигналов при автоматизированном РК и определяет необходимость применения нетрадиционных методов, отличающихся от классических, хорошо развитых методов обработки в радиосвязи, радиолокации и радионавигации.

Поэтому существует необходимость дальнейшего развития методов обработки и распознавание сигналов для решения задач автоматизированного РК. Частичное решение этой проблемы рассматривается в монографии [1].

В классических задачах распознавания сигналов обычно полагается, что число проверяемых гипотез $M$ равно числу классов распознаваемых сигналов. Однако в реальных задачах РК наблюдаемое РИ может не принадлежать к заданным классам и должно быть отнесено к $(M+1)$-му классу неизвестных РИ.

В данной работе рассмотрены особенности решения задачи селекции и распознавания заданных РИ. Эта нетрадиционная задача распознавния сигналов сводится к выделению (селекции) из всего множества анализируемых РИ подмножества заданных РИ, представляющих интерес для РК, и последующее их распознавание. Предложены алгоритмы селекции и распознавания РИ на основе разных вероятностных моделей сигналов, а также сложного эталонного описания распознаваемых образов.

**1. Методы селекции и распознавания заданных РИ на основе разных вероятностных моделей сигналов.**

*Постановка задачи.* Считается, что распознаваемые РИ представлены конечномерными сигналами либо векторами их некоторых статистик $\boldsymbol{\varepsilon}$, по реализациям которых принимаются решения. Полагается, что существуют $(M+1)$-а гипотезы, которые могут быть сделаны в отношении наблюдаемых сигналов: $H^i$, $i=\overline{1,M}$ – для заданных РИ (сигналов), $H^0$ – для неизвестных РИ (сигналов), объединенных в $(M+1)$-й класс. Плотности вероятности заданных сигналов $W(\boldsymbol{\varepsilon}^i \mid H^i, \boldsymbol{\alpha}^i)$, $i=\overline{1,M}$ известны с точностью до векторных параметров $\boldsymbol{\alpha}^i$, $i=\overline{1,M}$, а для $(M+1)$-го класса плотность вероятности неизвестна. Из-

вестны также априорные вероятности гипотез $P(H^i) = P_i$, причем $\sum_{i=0}^{M} P_i = 1$. Полагается также, что получены обучающие выборки $M$ заданных сигналов $\{\varepsilon_r^i,\ r = \overline{1,n_i};\ i = \overline{1,M}\}$, а обучающая выборка для $(M+1)$-го сигнала $(i = 0)$ отсутствует либо является непредставительной.

Показатель качества распознавания сигналов $k_э(\mathbf{a})$ при наличии всей необходимой информации о распознаваемых сигналах характеризуется средним риском

$$R = \sum_{i=0}^{M} \sum_{\substack{l=0 \\ l \neq i}}^{M} c_{li} P_i P\left(\frac{G^l}{i}\right) = \sum_{i=1}^{M} \sum_{l=1}^{M} c_{li} P_i P\left(\frac{G^i}{i}\right) + \sum_{i=1}^{M} c_{0i} P_i P\left(\frac{G^0}{i}\right) + P_0 \sum_{l=0}^{M} c_{l0} P\left(\frac{G^l}{0}\right), \qquad \textbf{(1)}$$

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

Классическое нерандомизированное решающее правило выполняет 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 сигналу, третье слагаемое – за счет отнесения $(M+1)$-го сигнала к заданным сигналам. В соответствии с имеющейся априорной информацией можно найти оценки первых двух составляющих в (1). Оценить величину третьей составляющей не представляется возможным. Для учета третьей составляющей можно ввести показатель объема критической области отклонения гипотезы $H_0$ о действии $(M+1)$-го сигнала. Эта область имеет смысл собственной области $M$ заданных сигналов.

В общем виде решающие правила распознавания заданных сигналов при наличии неизвестных сигналов основаны на построении собственных областей $M$ заданных сигналов в выборочном пространстве сигналов или их статистик (признаков). При попадании наблюдаемых реализаций в одну из собственных областей, принимается решение о действии заданного сигнала. В противном случае принимается решение о действии неизвестного сигнала.

Форма собственных областей определяется конкретными видами плотностей распределения для заданных сигналов и зависит от выбранной вероятностной модели сигналов. Приведем методы селекции и распознавания заданных РИ, основанные на использовании некоторых вероятностных моделей сигналов.

*Методы селекции и распознавания РИ на основе авторегрессионной модели.* Для описания реальных РИ, представленных сигналами с энергетическим спектром с ярко выраженными экстремумами, может быть использована авторегрессионная (АР) модель. При дополнительном предположении гауссового распределения может быть получено решающее правило селекции и распознавания заданных РИ, определяемое соотношениями:

$$H^i:\ K_k(\mathbf{x}) \geq \Lambda_k,\quad k = \overline{1,M}, \qquad \textbf{(2а)}$$

$$K_k(\mathbf{x}) - K_i(\mathbf{x}) + \ln\frac{(2\pi\sigma_i)^{p_i - L}}{(2\pi\sigma_k)^{p_k - L}} \geq \ln\frac{P_k}{P_i}, \qquad \textbf{(2б)}$$

$$H^{M+1}:\ K_k(\mathbf{x}) < \Lambda_k,\quad k = \overline{1,M}. \qquad \textbf{(2в)}$$

Здесь $K_k(\mathbf{x}) = \frac{1}{2\sigma_k^2}\left[\sum_{l=p+1}^{L}\left(x_l - \mu_k - \sum_{j=1}^{p_k}\phi_j^k (x_{l-j} - \mu_k)\right)^2\right]$; $\Lambda_k = \ln\frac{(2\pi)^{\frac{L}{2}}\sigma_k^{L-p_k}\lambda_k}{P_k}$ – пороговые значения, определяемые из условия обеспечения заданных вероятностей правильного распознавания заданных сигналов; $p_k$, $a_j^k$ – порядок и параметры АР модели для $k$-го сигнала. Неизвестные параметры АР моделей необходимо оценить, в частности, методом Юла–Уокера, с использованием классифицированных обучающих выборок заданных сигналов.

Решение в пользу $i$-го заданного сигнала принимается в два этапа: при выполнении

хотя бы одного из неравенств (2а), а также при выполнении системы неравенств (2б). Когда выполняются неравенство (2в), решение принимается в пользу неизвестных сигналов из $M+1$-го класса.

Проведены исследования показателей качества решения задачи селекции и распознавания $M$ заданных радиосигналов при наличии радиосигналов из $M+1$-го класса с применением решающего правила (2). Использованы выборки сигналов, полученные для типовых РИ, характерных для автоматизированного РК. Оценивались: $P_{н/з}$ – средняя вероятность ошибочных решений о действии неизвестных сигналов из $M+1$- го класса при условии предъявления $M$ заданных сигналов; $P_{з/н}$ – средняя вероятность ошибочных решений о действии $M$ заданных сигналов при условии предъявления неизвестных сигналов из $M+1$- го класса. В результате исследований получены значения оценок $P_{н/з}$ и $P_{з/н}$, не превышающие 0,05, что приемлемо для автоматизированного РК. При этом имеет место обмен значений одной вероятности ошибки на другую при различных пороговых значениях в решающем правиле (2).

*Методы селекции и распознавания РИ на основе модели в виде смесей распределений.* При автоматизированном РК важной задачей анализа новых обнаруженных РИ является селекция и распознавание сигналов с заданными видами модуляции (ВМ) . Эта более сложная задача по сравнению с рассмотренной выше задачей распознавания заданных видов РИ с фиксированными видами и параметрами модуляции. Сложность обусловлена тем, что здесь распознаванию подлежат целые классы сигналов – радиосигналы с заданным ВМ и возможными значениями параметров модуляции. Распознавание ВМ радиосигналов при РК в реальных условиях затрудняется появлением радиосигналов с новыми неизвестными ранее ВМ.

Указанную задачу предлагается решать как задачу селекции и распознавания классов радиосигналов с заданными ВМ при наличии класса сигналов с неизвестными ВМ. Решающее правило селекции и распознавания заданных сигналов конкретизировано с учетом описания классов радиосигналов с заданными ВМ вероятностной моделью в виде смесей распределений для последовательности отсчетов квадратурных составляющих $\xi(k) = (A_c(k), A_s(k)), k = 0,1,2,\ldots,N-1$ с выхода цифрового радиоприемного устройства

$$W(A_c) = \sum_{j=1}^{Q} q_j \frac{1}{\sigma_j\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(A_c - m_{cj})^2}{2\sigma_j^2}\right\}, \qquad W(A_s) = \sum_{j=1}^{Q} q_j \frac{1}{\sigma_j\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(A_s - m_{sj})^2}{2\sigma_j^2}\right\}, \quad \textbf{(3)}$$

где $(q_j,\ j=\overline{1,Q})$ – дискретное взвешивающее распределение, определяющее вероятности компонент в смеси; $\sigma_j^2$, $m_{cj}$, $m_{sj}$ – соответственно дисперсии и математические ожидания компонент смеси.

Решение о ВМ радиосигналов принимается по $2N$-мерному вектору $\xi$ независимых квадратурных составляющих сигналов $A_c(n)$ и $A_s(n)$ в два этапа:

1) если хотя бы для одного значения $i$ ($i=\overline{1,M}$) выполняется неравенство $P_i W(\xi/H^i, \lambda\alpha_i) \ge$ **(4а)** то принимается решение в пользу $M$ заданных ВМ радиосигналов;

при выполнении неравенства (4а) на втором этапе выполняется распознавание заданных ВМ радиосигналов, т.е. принимается решение в пользу $i$-го сигнала при выполнении системы неравенств $P_i W(\xi/H^i, \boldsymbol{\alpha}_i) \ge P_l W(\xi/H^l, \boldsymbol{\alpha}_l)$, $l=\overline{1,M}$, $l \ne i$. **(4б)**

2) если же при всех $i=\overline{1,M}$ $P_i W(\xi/H^i, \lambda\boldsymbol{\alpha}_i) <$ **(4в)** то принимается решение в пользу $M+1$-го класса сигналов с неизвестными ВМ;

Параметры такой вероятностной модели – $q_j, j=\overline{1,Q}$, $\sigma_j^2$, $m_{cj}$, $m_{sj}$ выбираются и оцениваются по обучающим выборкам радиосигналов с заданным ВМ и допустимыми значениями параметров модуляции (скорости передачи, разноса частот и т.д.).

Проведены исследования качества распознавания ВМ с помощью решающего пра-

вила (4) для радиосигналов с ВМ: ЧМ2, АТ, КА16, ФМ2, ФМ4, ЧМ4. Получено среднюю вероятность правильного распознавания ВМ не менее 0.9 при вероятности «ложных тревог» не более 0.02, что соответствует требованиям автоматизированного РК.

**3. Методы селекции и распознавания образов при сложном эталонном описании.** При автоматизированном РК возникают задачи распознавания образов (источников РИ), которые обычно имеют сложный состав и могут трактоваться как группа сигналов. Рассмотрены особенности построения сложного эталонного описания образов*:* каждому из образов ставится в соответствие множество разнотипных видов сигналов, заданных частотными, временными, пространственными и другими признаками. Эталоны образов представляют собой совокупности возможных значений или (и) интервалов возможных значений их признаков. При этом интервалы возможных эталонных значений признаков сигналов могут быть как пересекающимися, так и непересекающимися.

Рассмотрено решение задач селекции и распознавания образов применительно к особенностям построения эталонных описаний образов для автоматизированного РК. Синтезированы решающие правила селекции и распознавания на основе сложного эталонного описания распознаваемых образов. Решающие правила по принципу работы и структуре анологичны выше рассмотренным, в частности (4). Однако их отличает вид плотности распределений, который характерен для сложного эталонного описания образов. Эталонные описания образов представляют собой полученные в результате обучения плотности вероятности смешанного типа $w_i(s)$ для значений признака $s$ на множестве объектов распознавания $\mathbf{U}_i$ .

Для случая $\Im$ независимых координат описания распознаваемых образов, который имеет место в большинстве практических задач РК, сложные эталонные описания образов в виде плотностей распределения $w_i(\mathbf{s})$ имеют вид

$$w_i(\mathbf{s}) = \prod_{j=1}^{\Im} \left( \sum_{r=1}^{R_{ij}} I_{ijr} p_{ijr} w_{ijr}(s_j, s'_{ijr}, s''_{ijr}) + \sum_{d=1}^{D_{ij}} I_{ijd} p_{ijd} \delta(s_j - s_{ijd}) \right), \qquad \textbf{(5а)}$$

$$\sum_{r=1}^{R_{ij}} p_{ijr} + \sum_{d=1}^{D_{ij}} p_{ijd} = 1, \sum_{r=1}^{R_{ij}} I_{ijr} p_{ijr} + \sum_{d=1}^{D_{ij}} I_{ijd} p_{ijd} = 1, \forall i \in \{1, 2, \ldots, L\}, \forall j \in \{1, 2, \ldots, \Im\}. \qquad \textbf{(5б)}$$

Здесь $R_i$ взвешенных плотностей вероятности $w_{ir}(s, s'_{ir}, s''_{ir})$ эталонного распределения признака $s$ на каждом $r$-м интервале возможных значений $[s'_{ir}, s''_{ir}]$ и $D_i$ функций Дирака $\delta(s\text{-}s_{id})$ соответствуют дискретным эталонным значениям признака $s$; $p_{ir}$ и $p_{id}$ – априорные условные вероятности того, что при наблюдении образа $\mathbf{U}_i$ выборка признака $s$ будет принадлежать $r$-му интервалу, $r \in \{1, 2, ..., R_i\}$, или иметь $d$-е значение, $d \in \{1, 2, ..., D_i\}$.

**Выводы**

1. Предложены методы селекции и распознавания заданных РИ, учитывающие специфические особенности их представления сигналами при автоматизированном РК.

2. Рассмотренные методы селекции и распознавания являются дальнейшим развитием известных методов распознавания сигналов с учетом класса неизвестных сигналов.

3. Исследованиями показано, что методы обеспечивают приемлемое качество селекции и распознавания РИ для разных практических приложений автоматизированного РК.

**Литература**

1. Безрук В.М., Певцов Г.В. Теоретические основы проектирования систем распознавания сигналов для автоматизированного радиоконтроля: Монография. - Харьков: Коллегиум, 2007.- 430 с.