

# Зв'язок

УДК 621.391

doi: 10.26906/SUNZ.2018.2.135

В.М. Безрук, С.А. Иваненко

*Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков*

## ОБНАРУЖЕНИЕ И РАСПОЗНАВАНИЕ СИГНАЛОВ В УСЛОВИЯХ ПОВЫШЕННОЙ АПРИОРНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ В ЗАДАЧАХ РАДИОМОНИТОРИНГА

*В данной работе рассматриваются неклассические методы обнаружения и распознавания сигналов в условиях повышенной априорной неопределенности, которые основаны на разных вероятностных моделях сигналов и помех. Проведены исследования методов обработки сигналов путем статистических испытаний на выборках реальных сигналов и шумов, характерных для РМ. В результате исследований получены оценки вероятностей правильного обнаружения и распознавания сигналов, приемлемые для работы в комплексах автоматизированного РМ.*

**Ключевые слова:** обнаружение, распознавание, сигнал, помеха, априорная неопределенность, радиомониторинг.

### Введение

Одной из важных задач контроля за использованием радиочастотного спектра является проведение автоматизированного радиомониторинга (РМ) [1-5]. Следует отметить, что при автоматизированном РМ из-за действия шума и многих других неконтролируемых факторов сигналы в частотных каналах носят случайный характер с априори неизвестными статистическими характеристиками. Априорная неопределенность обычно преодолевается с использованием обучающих выборок, которые могут быть получены для заданных сигналов и шума. Однако при РМ на обработку поступает также множество неизвестных сигналов, для которых отсутствует возможность получить обучающие выборки. Это усложняет решение задач обнаружения и распознавания сигналов и определяет актуальность применения специальных методов обнаружения и распознавания сигналов в условиях повышенной априорной неопределенности, которые отличаются от классических методов, которые обычно применяются в областях радиосвязи, радиолокации и навигации [6-9].

В данной статье рассматриваются неклассические методы решения задач обработки случайных сигналов в частотных каналах при повышенной априорной неопределенности, в частности, методы обнаружения неизвестных сигналов на фоне помех, селекции и распознавания заданных сигналов при наличии неизвестных сигналов, распознавания заданных видов модуляции радиосигналов. Методы обнаружения и распознавания сигналов основаны на описании сигналов разными вероятностными моделями, адекватными решаемым задачам обработки сигналов, в частности, в виде ортогональных разложений сигналов, авторегрессионных процессов, сме-

си распределений сигналов. Приводятся результаты экспериментальных исследований задач обнаружения и распознавания сигналов при РМ, которые проведены путем статистического моделирования на выборках сигналов и помех, характерных для автоматизированного РМ.

### 1. Особенности постановки задач распознавания сигналов в условиях повышенной априорной неопределенности

В известных статистических методах распознавания образов преодоление априорной неопределенности относительно статистических характеристик представляющих их сигналов осуществляется с использованием обучающих выборок реализаций сигналов [6-9]. Кроме того, обычно полагается, что число проверяемых гипотез  $M$  равно числу классов распознаваемых сигналов. Однако в реальных задачах автоматизированного РМ возникают ситуации, когда наблюдаемый сигнал может не принадлежать к заданным классам сигналов и должен быть отнесен к  $(M+1)$ -му не заданному в вероятностном смысле классу неизвестных сигналов. Причем обучающие выборки сигналов из  $(M+1)$ -го класса в силу их разнообразия либо вообще не могут быть получены, либо являются неrepresentативными. Такие неклассические задачи распознавания, которые возникают при автоматизированного РМ называются задачами распознавания сигналов в условиях повышенной априорной неопределенности [6].

Рассмотрим особенности формализованной постановки задачи распознавания заданных сигналов при наличии неизвестных сигналов. Будем полагать, что распознаваемые сигналы представлены конеч-

номерными векторами некоторых статистик наблюдений  $\bar{x}$ , по реализациям которых принимаются решения. Задаются  $(M+1)$  гипотезы, которые могут быть сделаны в отношении наблюдаемых сигналов:  $H^i, i = \overline{1, M}$  – для заданных сигналов,  $H^0$  – для неизвестных сигналов, объединенных в  $(M+1)$ -й класс. Плотности вероятности заданных сигналов  $W(\bar{x} | \bar{\alpha}^i), i = \overline{1, M}$  заданы с точностью до случайных векторных параметров  $\bar{\alpha}^i, i = \overline{1, M}$ , а для  $(M+1)$ -го класса сигналов плотность вероятности неизвестна. Заданы также априорные вероятности гипотез  $P(H^i) = P_i$ , причем  $\sum_{i=0}^M P_i = 1$ . Полагается также, что заданы обучающие выборки для  $M$  сигналов  $\{\bar{x}_r^i, r = \overline{1, n_i}; i = \overline{1, M}\}$ , а обучающая выборка для  $(M+1)$ -го класса сигналов отсутствует либо является непредставительной.

Показатель качества распознавания сигналов при наличии всей априорной информации о распознаваемых сигналах может характеризоваться средним риском

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

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.

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 сигнала из  $(M+1)$ -го класса. Эта область имеет смысл собственной области  $M$  заданных сигналов.

## 2. Задача селекции распознавания заданных сигналов при наличии неизвестных сигналов

Для сформулированной неклассической задачи распознавания заданных сигналов при наличии неизвестных сигналов может быть использовано следующее решающее правило селекции и распознавания заданных сигналов [3, 4]:

если выполняются неравенства

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

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

при выполнении системы неравенств

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

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

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

Здесь  $W(\bar{x} / \bar{\alpha}^i)$  – плотности распределения заданных сигналов,  $\bar{\alpha}^i$  – параметры, которые оцениваются по обучающим выборкам для  $M$  заданных сигналов; пороговое значение  $\lambda$  определяется из условия обеспечения заданной вероятности правильного распознавания заданных сигналов.

Решающие правила (2), (3) дают общее решение поставленной задачи селекции и распознавания заданных сигналов при наличии неизвестных сигналов. Эти решающие правила могут быть конкретизированы для выбранной вероятностной модели, которая используется для описания обрабатываемых сигналов. В работе [4] приведены особенности решающих правил распознавания, когда сигналы описываются вероятностной моделью в виде ортогональных разложений, дающей представление сигналов вектором спектральных отсчетов сигналов в некотором ортонормированном базисе.

В частности, при выборе для описания сигналов вероятностной модели в виде гауссовских авторегрессионных процессов решающее правило распознавания (2) принимает следующий вид [3]:

если выполняется система неравенств

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

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

то принимается гипотеза о действии  $i$ -го заданного сигнала;

если выполняются неравенства)

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

то принимается гипотеза о действии неизвестного сигнала.

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

соотношение, определяющее нормированную ошибку предсказания в авторегрессионной модели;  $p_l, a_j^l$  – порядок АР модели и коэффициенты авторегрессии для  $l$ -го сигнала;  $\Lambda_l$  – 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 [3]:

- при выполнении условий

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

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

$$l = \overline{1, M}, \quad l \neq i$$

принимается гипотеза о действии  $i$ -го заданного сигнала;

- если выполняются условия

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

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

В приведенных решающих правилах распознавания полагается, что для неизвестных параметров распределений находятся их оценки, вычисленные по обучающим выборкам для заданных сигналов.

Рассмотрим практические особенности применения рассмотренных решающих правил распознавания сигналов при решении некоторых прикладных задач обнаружения и распознавания в области автоматизированного РМ.

### 3. Обнаружение неизвестных сигналов на фоне помех в частотных каналах

При обнаружении РИ, наблюдаемых в частотных каналах выдвигаются две гипотезы:  $H^1$  – действует сигнал на фоне шума;  $H^0$  – действует только шум. Полагается, что шум описывается многомерной плотностью распределения  $W(\bar{x}/\bar{\alpha}^0)$ . Задается обучающая выборка реализаций шума  $\{\bar{x}_r^0, r = \overline{1, n_0}\}$ , которая может быть использована для оценивания неизвестного параметра  $\bar{\alpha}^0$ . Информация о вероятностных характеристиках сигнала отсутствует. Необходимо решить задачу обнаружения неизвестного сигнала на фоне шума, заданного своей обучающей выборкой.

Для решения сформулированной задачи обнаружения неизвестных сигналов может быть использовано следующее решающее правило:

$$H^1 : W(\bar{x}/\bar{\alpha}^0) > \lambda - \quad (5)$$

принимается гипотеза о наличии сигнала,

$$H^0 : W(\bar{x}/\bar{\alpha}^0) \leq \lambda -$$

отвергается гипотеза о наличии сигнала.

Здесь  $\lambda$  – некоторое пороговое значение, выбираемое из условия обеспечения заданной вероятности ложной тревоги.

При описании наблюдений в частотном канале вероятностной моделью в виде ортогональных разложений векторы наблюдений  $\bar{x}$  представляются в спектральной области коэффициентами разложений  $c_j$  в некотором ортонормированном базисе. При исследованиях выбирался ортонормированный базис дискретных экспоненциальных функции (ДЭФ).

Для случая гауссовского распределения и некоррелированности спектральных коэффициентов разложений наблюдений  $\bar{x}$  решающее правило обнаружения неизвестных сигналов (5) представляется в виде соотношений:

$$\sum_{j=1}^N \frac{(c_j - \mu_{jc}^0)^2}{(\sigma_{jc}^0)^2} > \Delta_c^0; \quad H^0 : \sum_{j=1}^N \frac{(c_j - \mu_{jc}^0)^2}{(\sigma_{jc}^0)^2} \leq \Delta_c^0, \quad (6)$$

где  $c_j$  – коэффициенты разложений вектора наблюдений  $\bar{x}$ ,  $\mu_{jc}^0$  – оценки математических ожиданий и дисперсий координат  $c_j$ , которые оцениваются по обучающей выборке помехи;  $\Delta_c^0$  – некоторые пороговые значения, выбираемые из условия обеспечения заданной вероятности ложной тревоги.

Если решение принимается по выборке наблюдений объемом  $v$  реализаций, решающее правило (6) принимает следующий вид:

$$H^1 : \sum_{r=1}^v \sum_{j=1}^N (c_{jr} - \mu_{jc}^0)^2 / (\sigma_{jc}^0)^2 > \Delta_{cv}^0; \quad (7)$$

$$H^0 : \sum_{r=1}^v \sum_{j=1}^N (c_{jr} - \mu_{jc}^0)^2 / (\sigma_{jc}^0)^2 \leq \Delta_{cv}^0,$$

Проведены исследования рабочих характеристик рассмотренных решающих правил обнаружения неизвестных сигналов на фоне заданной помехи. Исследования были проведены методом статистического моделирования на выборках реализаций реальных сигналов и помех, которые были получены с помощью приёмника SDR, подключенного к компьютеру [12]. Проводились записи в оцифрованном виде выборок реализаций сигналов и шума, действующих в выбранных частотных каналах с полосой 125 кГц в УКВ диапазоне. Накоплены обучающие и контрольные выборки сигналов и шума объемом по 1000 реализаций, каждая из которых включала 256 дискретных отсчетов наблюдений, взятых с частотой 250 кГц.

Вначале проведен анализ статистических характеристик шума в выбранном частотном канале. По обучающим выборкам шума построена гистограмма распределений его выборочных значений (рис. 2), а также найдены оценки корреляционной функции шума (рис. 3).

Также были проведены исследования статистических характеристик шума в случае представления наблюдений  $\bar{x}$  в ортонормированном базисе ДЭФ. При этом рассматривалось спектральное представ-

ление наблюдений шума в виде отсчетов амплитудного спектра в базисе ДЭФ. В результате анализа получено, что такое спектральное представление наблюдений шума подчиняется распределению Райса, которое при определенных условиях переходит в гауссово распределение. Вычислена также оценка корреляционной функции выборочных значений амплитудного спектра шума, которая имеет вид близкий к рис. 3. Это дает основание использовать решающие правила обнаружения неизвестных сигналов (6), (7), которые получены для таких предположений.

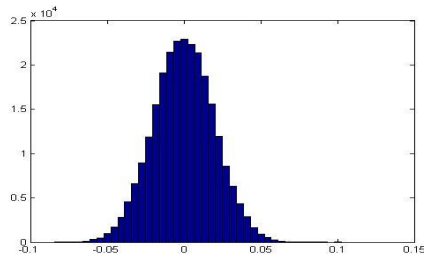


Рис. 2 Гистограмма распределений выборочных значений шума в частотном канале

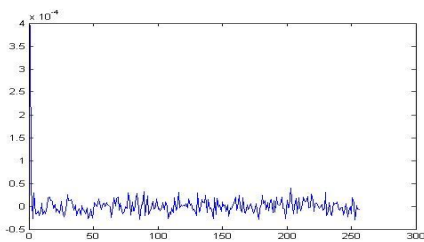


Рис. 3 Оценка корреляционной функции выборочных значений шума в частотном канале

На этапе обучения по накопленным выборкам шума находились параметры решающих правил. Пороговое значение  $\Delta_{cv}^0$  выбиралось из условия обеспечения заданной вероятности ложной тревоги. В рабочем режиме подавались реализации наблюдений в виде аддитивной смеси сигнала и шума, действующих в выбранном частотном канале. Путем статистических испытаний с использованием контрольных выборок реализаций сигналов были получены оценки вероятности правильного обнаружения неизвестных сигналов. Исследования проведены для разных типов сигналов, действующих в частотных каналах. Для примера на рис. 4 приведен амплитудный спектр одного из сигналов, который рассматривался как неизвестный сигнал, действующий на фоне шума в анализируемом частотном канале.

По контрольным выборкам этого сигнала проведены исследования характеристик обнаружения в виде зависимости оценок вероятности правильного обнаружения  $P(1/1)$  от соотношения сигнал-шум (ОСШ) SNR. Оценки  $P(1/1)$  были получены в виде  $P(1/1) = n_1 / N$ , где  $n_1$  - число опытов, в которых

приняты правильные решения о действии сигнала на фоне шума,  $N$  - общее число опытов. На рис. 5 приведены полученные зависимости для решающего правила (7) при фиксированной вероятности ложной тревоги  $P(1/0) = 0,04$ . Оценки  $P(1/1)$  были получены при разных значениях  $v = 1, 2, 3$ .

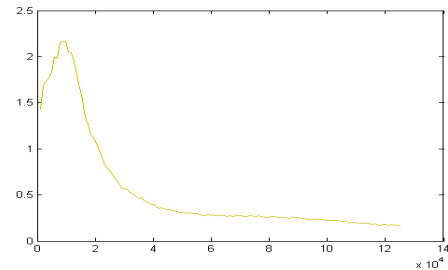


Рис. 4. Амплитудный спектр сигнала

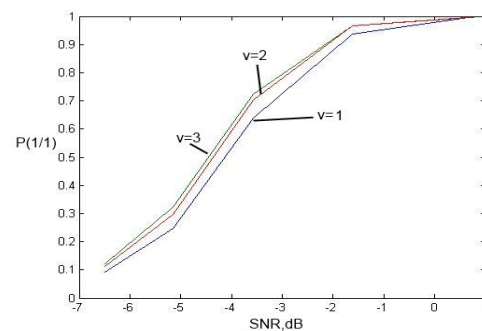


Рис. 5. Зависимости оценок вероятности правильного обнаружения неизвестных сигналов от ОСШ при вероятности ложной тревоги  $P(1/0) = 0,04$  и разных значениях  $v = 1, 2, 3$ .

Из анализа результатов исследований следует, что рассмотренное решающее правило может быть использовано для решения задачи обнаружения неизвестных сигналов на фоне шума в анализируемых частотных каналах. При этом могут быть достигнуты приемлемые значения вероятности правильного обнаружения неизвестных сигналов путем выбора необходимого ОСШ.

#### 4. Селекция и распознавание заданных сигналов

При радиомониторинге частотных диапазонов часто возникает необходимость из всего множества анализируемых РИ выделить некоторые известные ранее РИ, для которых могут быть получены обучающие выборки сигналов. Решение такой задачи представляет собой задачу селекции и распознавания заданных сигналов при наличии неизвестных сигналов. В частности, для радиомониторинга средств связи соответствующие РИ представляются радиосигналами с энергетическими спектрами, которые характеризуются наличием ярко выраженных экстремумов. Для вероятностного описания таких сигналов рационально использовать авторегрессионную (АР) модель. При этом решающее правило

селекции и распознавания заданных сигналов определяется соотношениями (3).

Проведено исследование задачи селекции и распознавания заданных сигналов методом статистического моделирования на выборках радиосигналов с различным видом и параметрами модуляции, характерных для задач РМ (рис. 4).

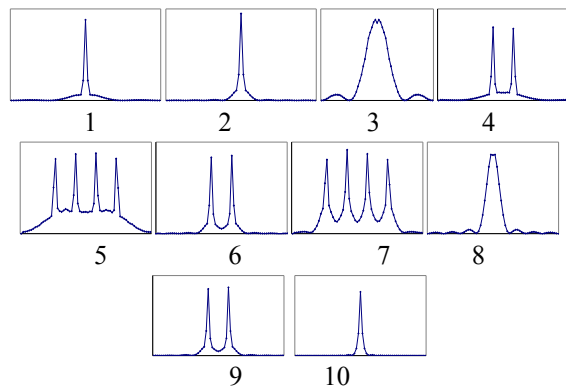


Рис. 6. Энергетические спектры радиосигналов для типовых РИ, использованных при исследованиях

Размерность исходного описания сигналов составляла  $L = 512$ , объемы обучающих и контрольных выборок для каждого сигнала составляли 1000 реализаций.

Получена зависимость оценки средней вероятности ошибочного распознавания  $M$  заданных сигналов  $\hat{P}_{\text{ош. ср.}}$  от используемого порядка АР модели  $p$  (рис. 7). Видно, что при выборе порядка АР модели  $p=20$  уже достигается достаточно высокое качество распознавания сигналов.

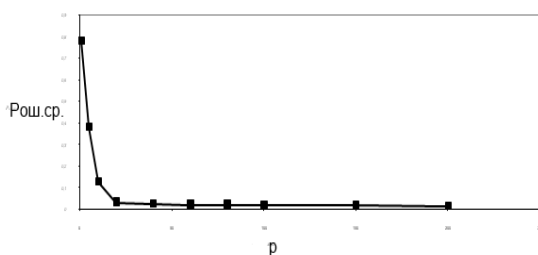


Рис. 7. Зависимость средней вероятности ошибочного распознавания сигналов  $\hat{P}_{\text{ош. ср.}}$  от порядка АР модели  $p$

Исследованы также показатели качества решения задачи распознавания  $M$  заданных сигналов при наличии сигналов из  $M+1$ -го класса с применением решающего правила (3). В качестве  $M$  заданных сигналов использовались сигналы 1–5, остальные пять сигналов представляли  $M+1$ -й класс неизвестных сигналов. В результате исследований получены диаграммы обмена показателей качества распознавания в виде зависимости оценок  $P_{\text{н/з}}$  от  $P_{\text{з/н}}$  при различных длительностях реализаций сигналов  $L=256$  и  $L=512$  (рис. 4).

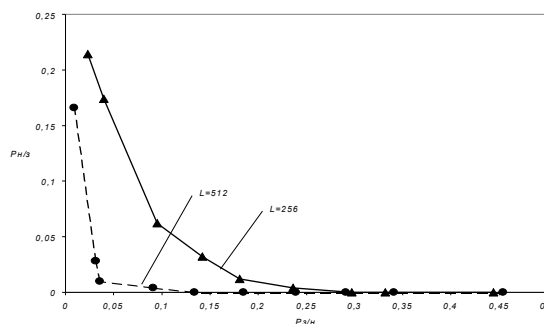


Рис. 8. Диаграммы обмена ошибок распознавания заданных радиосигналов при наличии неизвестных сигналов  $P_{\text{з/н}}$ ,  $P_{\text{н/з}}$  для разных значений  $L$

## 5. Распознавание видов модуляции радиосигналов при их описании вероятностной моделью в виде смеси распределений

В условиях возрастающей загрузки радиодиапазона при автоматизированном РК важной задачей является распознавание видов модуляции (ВМ) для новых выявленных РИ. Эта более сложная задача распознавания по сравнению с выше рассмотренной задачей распознавания заданных видов РИ с фиксированными видами и параметрами модуляции. Сложность обусловлена тем, что здесь распознаванию подлежат целые классы сигналов – радиосигналов с определенным ВМ и разными возможными значениями параметров модуляции. Распознавание ВМ радиосигналов при РМ в реальных условиях затрудняется из-за случайного характера передаваемых сообщений, действия помех, а также появления радиосигналов с новыми неизвестными ранее ВМ, для которых отсутствуют необходимые априорные сведения.

Указанную задачу предлагается решать как задачу распознавания классов радиосигналов с известными ВМ при наличии класса сигналов с неизвестными ВМ. При этом общий вид алгоритма селекции и распознавания заданных сигналов конкретизирован с учетом описания классов радиосигналов с заданными ВМ вероятностной моделью в виде смесей распределений (4). Решение о ВМ принимается по реализациям радиосигналов в виде последовательностей отсчетов квадратурных составляющих

$$\xi(k) = (A_c(k), A_s(k)), \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1,$$

полученных с выхода цифрового радиоприемного устройства. Исследования проведены для радиосигналов со различными видами модуляции (рис. 9). Сигналы наблюдались на фоне помехи в виде гауссовского белого шума. Видно, что эти проекции отсчетов квадратурных составляющих определяют характерные области для каждого вида модуляции. Здесь же по каждой из координат приведены гистограммы распределений значений квадратурных составляющих сигналов.

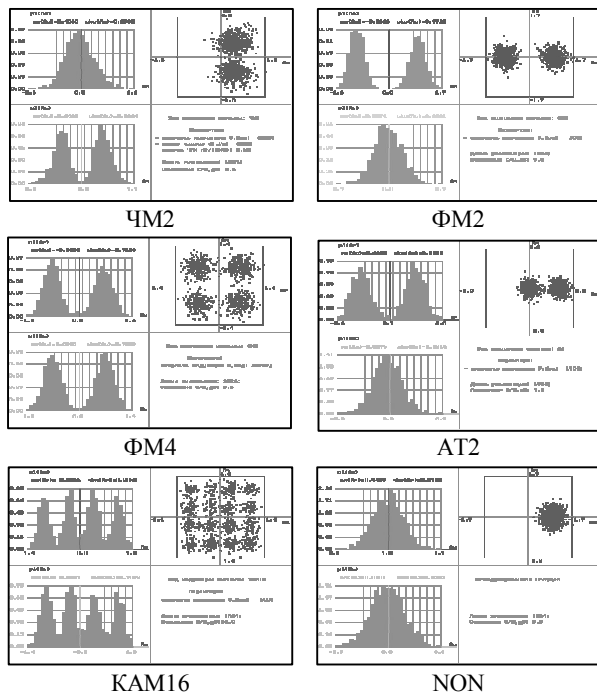


Рис. 9. Гистограммы распределений и проекции отсчетов радиосигналов с различным видом модуляции в пространстве квадратурных составляющих ( $A_c, A_s$ )

Из анализа содержания поставленной задачи распознавания ВМ радиосигналов следует, что подходящей вероятностной моделью для описания сигналов с разным ВМ может служить модель в виде смеси распределений и соответствующее решающее правило (4). При этом в предположении независимости отсчетов квадратурных составляющих вероятностные свойства сигналов определяются смесями гауссовских распределений отсчетов квадратурных составляющих в виде

$$\begin{aligned}
 W(A_c) &= \sum_{j=1}^Q q_j \frac{1}{\sigma_j \sqrt{2\pi}} \exp\left[-(A_c - m_{cj})^2 / (2\sigma_j^2)\right], \\
 W(A_s) &= \sum_{j=1}^Q q_j \frac{1}{\sigma_j \sqrt{2\pi}} \exp\left[-(A_s - m_{sj})^2 / (2\sigma_j^2)\right],
 \end{aligned} \tag{8}$$

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

При этом может быть использовано частный случай правила принятия решений (4) о ВМ радиосигналов по  $2L$ -мерному вектору  $\vec{\xi}$  независимых квадратурных составляющих сигналов  $A_c(n)$  и  $A_s(n)$ :

если хотя бы для одного значения  $i$  ( $i = \overline{1, M}$ ) выполняется неравенство

$$P_i W(\vec{\xi} / \vec{\alpha}_i) \geq \lambda^i, \tag{9,а}$$

то принимается решение в пользу  $M$  заданных ВМ радиосигналов;

если же при всех  $i = \overline{1, M}$

$$P_i W(\vec{\xi} / \vec{\alpha}_i) < \lambda^i, \tag{9,б}$$

то принимается решение в пользу  $M+1$ -го класса сигналов с неизвестными ВМ;

2) при выполнении неравенства (9а) на втором этапе производится распознавание заданных видов модуляции радиосигналов, т.е. принимается решение в пользу  $i$ -го ВМ при выполнении системы неравенств

$$P_i W(\vec{\xi} / \vec{\alpha}_i) \geq P_l W(\vec{\xi} / \vec{\alpha}_l), \quad l = \overline{1, M}, \quad l \neq i. \tag{9,в}$$

Пороговые значения  $\lambda^i$  определяются из условия обеспечения требуемой вероятности правильного распознавания  $i$ -го ВМ радиосигнала. Оценки показателей эффективности распознавания ВМ получены путем статистических испытаний на выборках радиосигналов с различным ВМ (рис. 9) при разных значениях скорости манипуляции в диапазоне 100–2400 Бод. Для каждого вида сигнала получены обучающие и контрольные выборки по 500 реализаций длиной по  $N=1024$  отсчета. Качество распознавания ВМ радиосигналов оценивалось следующими показателями качества:  $P_{(M/M+1)}$  – средняя вероятность ошибочного принятия решения в пользу сигналов с заданным ВМ при действии сигналов из  $M+1$ -го класса;  $P_{(M+1/M)}$  – средняя вероятность ошибочного принятия решения в пользу сигналов из  $M+1$ -го класса при действии сигналов с заданным ВМ;  $P_M$  – средняя вероятность ошибки за счет перепутывания сигналов внутри класса сигналов с заданными ВМ.

На рис. 10 приведены результаты распознавания ВМ в виде диаграммы обмена показателями качества распознавания  $P_{(M/M+1)}$  и  $P_{(M+1/M)}$ , полученной при  $L=1024$  и при соотношении сигнал/шум 9.54 дБ.

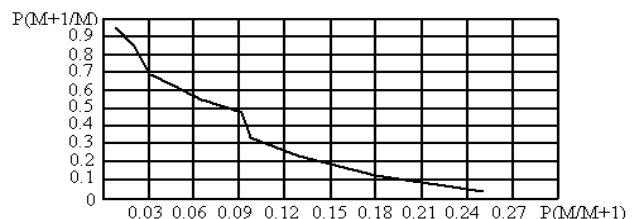


Рис. 10. Диаграмма обмена показателей качества распознавания заданных видов модуляции радиосигналов

Были исследованы зависимости вероятностей ошибок распознавания от длины реализаций сигналов  $L$ . При исследованиях при каждом значении  $L=8, 16, 32, 64, 128, 256, 512, 1024$  пороговые значения  $\lambda_i$  выбирались исходя из условия обеспечения требуемой вероятности  $P_{(M+1/M)} = 0,05$ . Полученные зависимости приведены на рис. 11. Видно, что при  $L < 64$  качество распознавания существенно ухудшается, а при  $L > 256$  обеспечивается приемлемое качество распознавания ВМ.

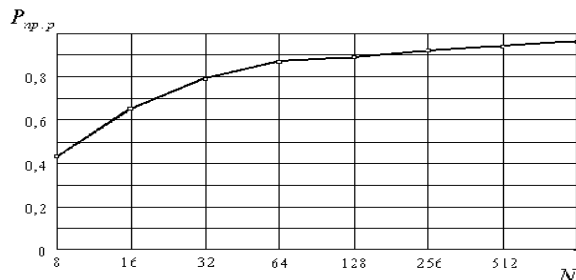


Рис. 11. Зависимость вероятности правильного распознавания ВМ от длины реализаций сигналов

Рассмотренное решающее правило распознавания ВМ (9) обеспечивает среднюю вероятность правильного распознавания ВМ не менее 0,9 при вероятности «ложной тревоги» не более 0,02.

## Выводы

1. Приведены решающие правила обнаружения неизвестных сигналов на фоне помех, селекции и распознавания заданных сигналов при наличии неизвестных сигналов, распознавания заданных видов модуляции радиосигналов, которые основаны на описании сигналов разными вероятностными моделями, адекватными решаемой задаче обработки.

2. Исследованы практические особенности решения задач обнаружения и распознавания РИ путем статистического моделирования с использованием выборок реальных сигналов и помех, характерных для автоматизированного РМ.

## Список литературы

1. Калужный Н.М., Николаев И.М., Ковшарь В.А. Системная методология оценивания эффективности функционирования национальных систем радиочастотного мониторинга на основе пространственно-частотно-временного подхода // Прикладная радиоэлектроника. – 2013. – №. 12. – С. 375-386.
2. Weber C., Peter M., Felhauer T. Automatic modulation classification technique for radio monitoring // Electronics Letters. – 2015. – Т. 51, No. 10. – P. 794-796.
3. Безрук В.М., Певцов Г.В. Теоретические основы проектирования систем распознавания сигналов для автоматизированного радиоконтроля. – Харьков: Коллегиум, 2007. – 430 с.
4. Рембовский А.М. Радиомониторинг: задачи, методы, средства / А.В. Ашихмин, В.А. Козьмин, А.М. Рембовский. – М.: Горячая линия – Телеком, 2012. – 641 с.
5. Специальный радиомониторинг / Коханович Г.Ф., Бабак В.П., Фисенко В.М. – Киев: МК-Прес, 2007. – 384 с.
4. Основы спектральной теории распознавания сигналов / Омельченко, В.А. – Х.: Вища школа, 1983. – 156 с.
5. Borghlund A. Statistical Pattern Recognition // International Journal of Computer (IJC). – 2014. – Т. 7, № 1.
6. Handbook of pattern recognition and computer vision. / Hau C. C. – World Scientific, 2015.
7. Methodologies of pattern recognition. / Watanabe S. – Academic Press, 2014.
8. Мерков А. Б. Распознавание образов. Введение в методы статистического обучения // М.: Едиториал УРСС. – 2011. – Т. 256.
9. Helstrom C. W. Statistical Theory of Signal Detection: International Series of Monographs in Electronics and Instrumentation. – Elsevier, 2013. – Т. 9.
10. An introduction to signal detection and estimation. / Poor H. V. – Springer Science & Business Media, 2013.
11. Signal detection theory and ROC analysis in psychology and diagnostics: Collected papers. / Swets J. A. – Psychology Press, 2014.
12. SDR and CR Boost Wireless Communications [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.electronicdesign.com>.

Надійшла до редколегії 19.02.2018

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Г.В. Певцов, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків.

## ВІЯВЛЕННЯ ТА РОЗПІЗНАВАННЯ СИГНАЛІВ В УМОВАХ ПІДВИЩЕНОЇ АПРІОРНОЇ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ В ЗАДАЧАХ РАДІОМОНІТОРИНГУ

В.М. Безрук, С.А. Іваненко

В даній роботі розглядаються неklasичні методи виявлення та розпізнавання сигналів в умовах підвищеної апріорної невизначеності, які засновані на різних імовірнісних моделях сигналів і перешкод. Проведені дослідження методів обробки сигналів шляхом статистичних випробувань на вибірках реальних сигналів і шумів, характерних для РМ. В результаті досліджень отримано оцінки ймовірності правильного виявлення та розпізнавання сигналів, прийнятні для роботи в комплексах автоматизованого РМ.

**Ключові слова:** виявлення, розпізнавання, апріорна невизначеність, радіомониторинг.

## DETECTION AND RECOGNITION OF SIGNALS UNDER CONDITIONS OF HIGH A PRIORI UNCERTAINTY IN THE TASKS OF RADIO MONITORING

V.M. Bezruk, S.A. Ivanenko

In this paper, it is consider a non-classical methods of the detection and recognition of signals in case of high a priori uncertainty, which are based on different probabilistic models of signals and interferences. Researches of methods of processing of signals by statistical tests on samples of the real signals and noises characteristic of PM are carried out. As a result of the research, estimates of the probability of correct signal detection and recognition are obtained, which are acceptable for operation in automated PM complexes.

**Keywords:** detection, recognition, signal, interference, a priori uncertainty, radio monitoring.