

ОБНАРУЖЕНИЕ И РАСПОЗНАВАНИЕ СИГНАЛОВ В УСЛОВИЯХ АПРИОРНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННОМ РАДИОМОНИТОРИНГЕ

БЕЗРУК В.М., ИВАНЕНКО С.А.

Рассматриваются вопросы обнаружения и распознавания сигналов в частотных каналах, которые возникают в процессе проведения автоматизированного радиомониторинга. Отличительной особенностью таких задач обработки сигналов является повышенная априорная неопределенность, которая определяется появлением сигналов с неизвестными вероятностными характеристиками. Приводятся результаты исследований алгоритмов обнаружения неизвестных сигналов на фоне заданного шума, а также распознавания заданных сигналов при наличии неизвестных сигналов. Исследования выполняются путем статистических испытаний на выборках реальных сигналов и помех, характерных для задач радиомониторинга в когнитивных радиосетях.

Ключевые слова: радиомониторинг, частотный канал, обнаружения и распознавание, заданные и неизвестные сигналы, решающее правило, статистические испытания.

1. Введение

В целях контроля за использованием радиочастотного ресурса проводится автоматизированный радиомониторинг (РМ). Радиомониторинг представляет сложную задачу пространственно-спектрально-временной обработки радиоизлучений (РИ), существующих в широком диапазоне частот [1]. Для упрощения решения проводится ее декомпозиция на ряд относительно самостоятельных задач обработки, в частности, обнаружение РИ, существующих в отдельных частотных каналах, селекция и распознавание заданных видов РИ, выявление неизвестных РИ, распознавание видов и оценивание параметров модуляции РИ. Эти задачи сводятся к обработке соответствующих им сигналов, получаемых на выходе сканирующих радиоприемных комплексов. При этом в результате анализа наблюдений в каждом частотном канале вначале принимается решение о действии смеси сигнала с шумом либо только шума, что фактически представляет собой задачу обнаружения сигнала на фоне шума. После обнаружения сигнала в частотном канале следует принимать решение: действует либо ранее известный сигнал и какой именно его вид, либо неизвестный сигнал. Далее определяется вид и оцениваются параметры модуляции неизвестных сигналов.

Следует отметить, что из-за действия помех и многих других неконтролируемых факторов наблюдаемые в частотных каналах сигналы носят случайный характер с априори неизвестными статистическими характеристиками. Априорная не-

определенность обычно преодолевается с использованием обучающих выборок заданных сигналов и шума. Однако при РМ на обработку поступает множество неизвестных сигналов, для которых отсутствует возможность получить классифицированные обучающие выборки. Это усложняет обнаружение и распознавание сигналов при РМ и определяет актуальность использования неклассических методов обнаружения и распознавания сигналов в условиях повышенной априорной неопределенности [2, 3]. Необходимость обработки сигналов возникает в рамках работы когнитивного радио, которая регламентирована стандартом IEEE 802.22.

В данном исследовании рассмотрены методы обнаружения неизвестных сигналов на фоне шума, а также методы селекции и распознавания заданных сигналов при наличии неизвестных сигналов. Методы основаны на описании наблюдений, действующих в частотных каналах, вероятностной модели в виде ортогональных разложений. Приводятся результаты исследований методов обнаружения и распознавания сигналов, которые получены путем статистических испытаний на выборках реальных сигналов и шумов, характерных для задач обработки при автоматизированном РМ.

2. Обнаружение неизвестных сигналов на фоне заданного шума

При обнаружении сигналов, наблюдаемых в анализируемом частотном канале, выдвигаются две гипотезы: H^1 – действует сигнал на фоне шума; H^0 – действует только шум. Полагается, что шум описывается многомерной плотностью распределения $W(\bar{x}/\bar{\alpha}^0)$, $\bar{\alpha}^0$ – неизвестный векторный параметр. Задается обучающая выборка реализаций шума $\{\bar{x}_r^0, r = 1, n_0\}$, которая может быть использована для оценивания параметра $\bar{\alpha}^0$. При этом информация о вероятностных характеристиках сигнала отсутствует. Необходимо решить задачу обнаружения неизвестного сигнала на фоне заданного шума для описания наблюдений в частотном канале вероятностной моделью в виде ортогональных разложений. Для решения данной задачи может быть использовано решающее правило [4]:

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

– принимается гипотеза о наличии сигнала,

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

– отвергается гипотеза о наличии сигнала.

Здесь λ – 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 \vec{x} представляются в спектральной области коэффициентами разложений c_j в некотором ортонормированном базисе. При исследованиях выбирался базис дискретных экспоненциальных функций (ДЭФ). В предположении гауссовского распределения и некоррелированности коэффициентов разложений c_j в базисе ДЭФ решающее правило обнаружения неизвестных сигналов (1) представляется в виде соотношений [4]:

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

где c_j – коэффициенты разложений вектора наблюдений в базисе ДЭФ; μ_{jc}^0 – оценки математических ожиданий и дисперсий коэффициентов разложений c_j ; Δ_c^0 – некоторое пороговое значение, выбираемое из условия обеспечения заданной вероятности ложной тревоги. Указанные параметры решающего правила оцениваются по обучающей выборке реализаций шума. Если решение принимается по выборке наблюдений объемом v реализаций, решающее правило (2) имеет следующий вид [4]:

$$\begin{aligned} H^1: \sum_{r=1}^v \sum_{j=1}^N \frac{(c_{jr} - \mu_{jc}^0)^2}{(\sigma_{jc}^0)^2} > \Delta_{cv}^0; \\ H^0: \sum_{r=1}^v \sum_{j=1}^N \frac{(c_{jr} - \mu_{jc}^0)^2}{(\sigma_{jc}^0)^2} \leq \Delta_{cv}^0. \end{aligned} \quad (3)$$

Рабочие характеристики рассмотренных решающих правил обнаружения неизвестных сигналов исследованы на выборках реальных сигналов и шума, которые были получены с помощью сканирующего приёмника SDR, стыкованного с компьютером [5]. Для этих целей был использован USB DVB-T тюнер, который с помощью специального программного обеспечения регистрировал наблюдения в УКВ диапазоне. В качестве программной части SDR комплекса использовалась программа SDR#. Записи дискретных отсчетов наблюдений в выбранном частотном канале шириной 125 кГц производились с частотой дискретизации 250 кГц. Накоплены обучающие и контрольные выборки сигналов и шума

объемом по 1000 реализаций, каждая из которых включала 256 дискретных отсчетов

Исследования были выполнены путем статистических испытаний. При этом решающие правила были программно реализовано в среде MATLAB. Обучающие выборки реализаций шума использовались для оценивания неизвестных параметров исследуемых решающих правил. Контрольные выборки реализаций сигналов и шума использовались для получения оценок вероятностей правильного обнаружения неизвестного сигнала на фоне шума при фиксированной вероятности ложной тревоги.

Вначале по обучающим выборкам шума построены гистограммы распределений выборочных значений, а также найдены оценки корреляционной функции шума в спектральной области при представлении наблюдений \vec{x} в базисе ДЭФ. Рассматривалось спектральное представление шума в виде отсчетов амплитудного спектра в базисе ДЭФ. Получено, что спектральное представление наблюдений шума подчиняется распределению Райса, которое при определенных условиях переходит в гауссово распределение. Вычисленная оценка корреляционной функции спектрального представления шума свидетельствует об отсутствии коррелированности его отсчетов. Это дает основание использовать решающие правила обнаружения неизвестных сигналов в виде (2) и (3).

При исследованиях предъявлялись контрольные выборки реализаций наблюдений шума, а также аддитивной смеси сигнала и шума, действующих в выбранном частотном канале. Приведем результаты исследований решающего правила (3) для предъявления сигнала с широкополосной частотной модуляцией, который рассматривался как неизвестный сигнал. Для этого случая получены рабочие характеристики обнаружения в виде зависимости оценок вероятности правильного обнаружения сигнала $P(1/1) = n/N$ от отношения сигнал-шум SNR. Здесь n – число опытов, в которых приняты правильные решения, N – общее число опытов.

На рис. 1 приведены полученные зависимости при фиксированной вероятности ложной тревоги $P(1/0) = 0,04$ и при разных значениях выборки наблюдений $v = 1, 2, 3$.

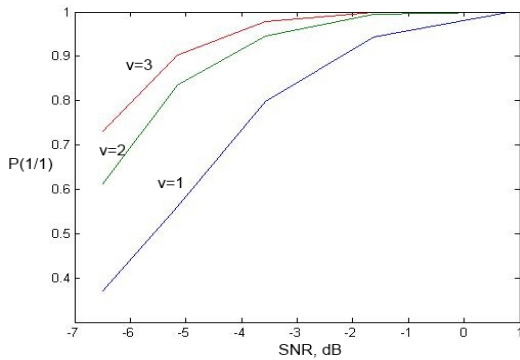


Рис. 1. Зависимость вероятности правильного обнаружения неизвестного сигнала на фоне заданного шума от отношения «сигнал-шум»

Анализ результатов исследований показал, что рассмотренное решающее правило может быть использовано для обнаружения неизвестных сигналов на фоне заданного шума в анализируемом частотном канале. При этом могут быть достигнуты приемлемые значения вероятности правильного обнаружения неизвестных сигналов путем выбора необходимых значений SNR и v .

3. Селекция и распознавание заданных сигналов при наличии неизвестных сигналов

В отношении наблюдений в частотном канале \bar{X} могут выдвигаться $(M+1)$ -а гипотезы:

$H^i, i = \overline{1, M}$ – для заданных сигналов, H^0 – для неизвестных сигналов, объединенных в $(M+1)$ -й класс. Плотности вероятности заданных сигналов $W(\bar{x} | \bar{\alpha}^i), i = \overline{1, M}$ задаются с точностью до

векторных параметров $\bar{\alpha}^i, i = \overline{1, M}$, 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 реализаций M сигналов $\{\bar{x}_r^i, r = \overline{1, n_i}; i = \overline{1, M}\}$, а обучающая выборка для $(M+1)$ -го класса неизвестных сигналов ($i = 0$) отсутствует.

Такие исходные данные для распознавания сигналов могут быть охарактеризованы термином «повышенная априорная неопределенность» и фокусируют нетрадиционную задачу селекции и распознавания заданных сигналов при наличии неизвестных сигналов [4].

Нерандомизированное решающее правило распознавания осуществляет разбиение выборочно-го пространства сигналов на $(M+1)$ -ну непере-секающуюся область. При этом для распознавания заданных сигналов при наличии неизвестных сигналов имеют место такие составляющие ве-

роятности принятия ошибочных решений: из-за перепутывания M заданных сигналов между собой, в результате отнесения заданных сигналов к $(M+1)$ -му классу неизвестных сигналов, за счет отнесения сигналов из $(M+1)$ -го класса неизвестных сигналов к M заданным сигналам.

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

при выполнении условий:

$$H^i : P_i W(\bar{x} / \bar{\alpha}^i) \geq \lambda^i, i = \overline{1, M} \quad (4a)$$

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

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

$$H^0 : P_i W(\bar{x} / \bar{\alpha}^i) < \lambda^i, i = \overline{1, M}, \quad (4в)$$

то принимается гипотеза H^0 о действии неизвестных сигналов.

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

Таким образом, согласно этому правилу решение в пользу i -го заданного сигнала принимается в два этапа: при выполнении хотя бы одного из неравенств (4а), а также при выполнении системы неравенств (4б). Когда выполняются неравенства (4в), решение принимается в пользу неизвестных сигналов из $(M+1)$ -го класса.

В решающем правиле [4] не используется информация о плотности распределения $(M+1)$ -го класса сигналов и не требуется его обучающая выборка. Постановка и решение рассмотренной задачи распознавания – это формализация требования содержательного характера о необходимости выделить (селектировать) и распознать M заданных сигналов и отнести в $(M+1)$ -й класс неизвестные сигналы, информация о которых отсутствует.

Рассмотрим случай, когда для описания сигналов в частотном канале используется вероятностная модель в виде ортогональных разложений. В частности, рассмотрим представление сигналов в виде отсчетов амплитудного спектра в базисе дискретных экспоненциальных функций. В предположении гауссовского распределения и некоррелированности координат вектора спектральных отсчетов решающее правило (4а)-(4в) упрощается и принимает следующий вид [4]:

$$H^i : \sum_{j=1}^N \frac{(c_j - \mu_{jc}^i)^2}{(\sigma_{jc}^i)^2} \leq \Delta_c^i, \quad i = \overline{1, M},$$

$$\sum_{j=1}^N \frac{(c_j - \mu_{jc}^i)^2}{(\sigma_{jc}^i)^2} \leq \sum_{j=1}^N \frac{(c_j - \mu_{jc}^k)^2}{(\sigma_{jc}^k)^2}, \quad k = \overline{1, M}, \quad (5)$$

$$H^0 : \sum_{j=1}^N \frac{(c_j - \mu_{jc}^i)^2}{(\sigma_{jc}^i)^2} > \Delta_c^i, \quad i = \overline{1, M}.$$

Здесь c_j – отсчеты амплитудного спектра сигналов в базисе ДЭФ; μ_{jc}^i , $(\sigma_{jc}^i)^2$ – оценки математических ожиданий и дисперсий спектральных отсчетов c_j , которые оцениваются по обучающим выборкам заданных сигналов; N – размерность спектрального представления сигналов; Δ_c^i – некоторые пороговые значения, выбираемые из условия обеспечения заданной вероятности правильного распознавания заданных сигналов.

Исследования решающего правила селекции и распознавания заданных сигналов при наличии неизвестных сигналов (5) выполнены путем статистических испытаний. В ходе эксперимента были накоплены выборки реализаций 9 реальных сигналов, соответствующих РИ в диапазоне частот, регламентированном для работы стандарта IEEE 802.22. Записи выборок реализаций сигналов получены с помощью SDR приёмника [5]. Накоплены обучающие и контрольные выборки по 1000 реализаций каждого сигнала. Решающее правило (5) было программно реализовано в среде MATLAB.

На рис. 2 изображены усредненные амплитудные спектры 5-ти сигналов, которые были использованы в качестве заданных известных сигналов.

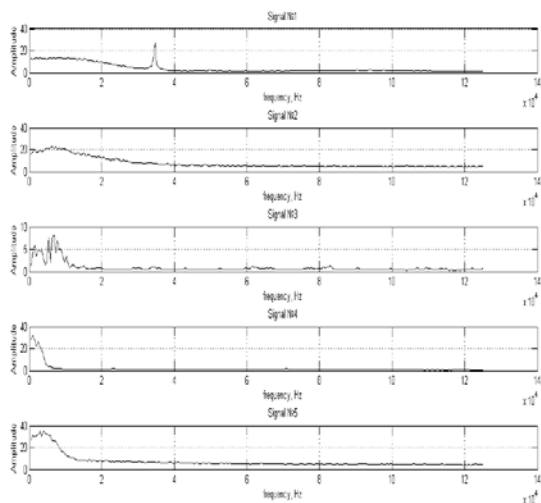


Рис. 2. Усредненные амплитудные спектры заданных сигналов

Спектры сигналов получены с помощью дискретного преобразования Фурье (ДПФ) реализаций сигналов длительностью по 512 дискретных отсчётов.

На рис. 3 изображены усредненные амплитудные спектры сигналов, которые были использованы в качестве неизвестных.

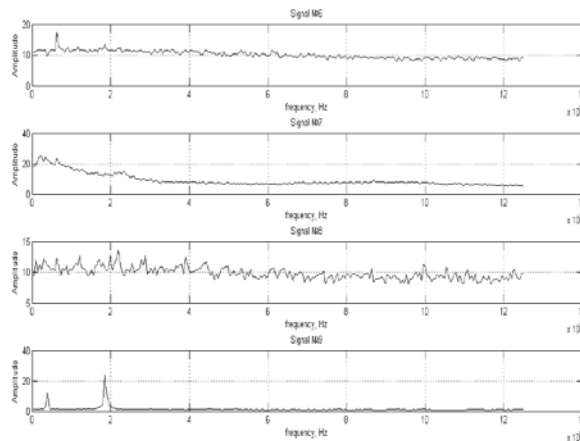


Рис. 3. Усредненные амплитудные спектры неизвестных сигналов

В результате исследований вероятностных свойств реализаций реальных сигналов получено, что выбранное спектральное представление сигналов подчиняется распределению Райса, которое при определенных условиях переходит в гауссовское распределение. Кроме того, вычисленные оценки корреляционной функции спектрального представления реальных сигналов свидетельствуют об отсутствии коррелированности отсчетов амплитудных спектров сигналов. Это дает основание использовать решающие правила распознавания сигналов в виде (5).

Накопленные обучающие выборки реализаций заданных известных сигналов применялись для оценивания параметров решающего правила (5). В рабочем режиме предъявлялись контрольные выборки реализаций заданных известных и неизвестных сигналов. Путем статистических испытаний были получены оценки вероятности правильного и ошибочного распознавания заданных и неизвестных сигналов в виде отношений числа правильно либо ошибочно отнесенных реализаций к общему числу предъявленных реализаций соответствующих сигналов.

Оценивались такие показатели качества распознавания:

- вероятности ошибочных решений о действии неизвестных сигналов из $(M + 1)$ -го класса при условии предъявления заданных сигналов $P((M + 1) / i), i = \overline{1, M}$;
- вероятности ошибочных решений о действии заданных сигналов при условии предъявления

неизвестных сигналов из $(M+1)$ -го класса $P(i / (M+1))$, $i = 1, M$.

Полученные оценки показателей качества распознавания сигналов приведены в таблице.

Результаты селекции и распознавания заданных сигналов при наличии неизвестных сигналов

Вероятности правильного и ошибочного распознавания сигнала	№ сигнала, (i)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P(1/i)$	0.81	0	0	0	0	0	0	0	0
$P(2/i)$	0	0.87	0	0	0.05	0	0	0	0
$P(3/i)$	0	0	0.91	0	0	0	0	0	0
$P(4/i)$	0	0	0.01	0.99	0	0	0	0	0
$P(5/i)$	0	0	0	0	0.87	0	0	0	0
$P((M+1)/i)$	0.19	0.08	0	0	0.13	1	1	1	1

На основе данных, приведенных в таблице, получены усредненные значения составляющих вероятности ошибочных решений:

о действии неизвестных сигналов из $(M+1)$ -го класса при условии предъявления заданных сигналов

$$\bar{P}((M+1)/i) = \sum_{i=1}^M \frac{P((M+1)/i)}{M} = 0.08;$$

о действии заданных сигналов при условии предъявления неизвестных сигналов в количестве T из $(M+1)$ -го класса неизвестных сигналов:

$$P(i / (M+1)) = \sum_{i=1}^M \sum_{l=1}^T \frac{P(i/l)}{T * M} = 0;$$

о перепутывании заданных сигналов между собой:

$$P(i / (M+1)) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \frac{P(i/j)}{M^2} = 0.012.$$

Полученные результаты исследований на выборках реальных сигналов подтверждают возможность использования рассмотренного решающего правила (5) для решения задачи селекции и распознавания заданных сигналов при наличии класса неизвестных сигналов.

3. Выводы

1. Предложен неклассический метод решения задач обнаружения сигналов с неизвестными вероятностными характеристиками на фоне шума, который задан своей обучающей выборкой реализаций.

2. Предложен неклассический метод селекции и распознавания заданных сигналов, представленных своими обучающими выборками реализаций, при наличии сигналов с неизвестными вероятностными характеристиками.

3. Проведены исследования предложенных методов обнаружения и распознавания сигналов путем статистических испытаний с использованием выборок реализаций реальных сигналов и помех, характерных для задач радиомониторинга.

4. Получены приемлемые для практики оценки показателей качества обнаружения и распознавания сигналов, что дает основание использовать предложенные методы обработки наблюдений в частотных каналах при проведении автоматизированного радиомониторинга в когнитивных радиосетях.

Литература: 1. Коханович Г. Ф., Бабак В.П., Фисенко В.М. Специальный радиомониторинг. Киев: МК-Прес, 2007. 2. Webb A. Statistical pattern recognition. – New York: Wiley, 2002. 3. Watanabe S. Methodologies of pattern recognition. Academic Press, 2014. 4. Безрук В.М., Певцов Г.В. Теоретические основы

проектирования систем распознавания сигналов для автоматизированного радиоконтроля. Харьков: Коллегиум, 2007. 5. Jondral F. K. Software-defined radio: basics and evolution to cognitive radio // EURASIP journal on wireless communications and networking. 2005. Т. 2005, №. 3. С. 275-283.

Transliterated bibliography:

1. Kohanovich G.F., Babak V.P., Fisenko V.M. Special'nyj radiomonitoring. Kiev: MK-Pres, 2007.

2. Webb A. Statistical pattern recognition. New York: Wiley, 2002.

3. Watanabe S. Methodologies of pattern recognition. Academic Press, 2014.

4. Bezruk V.M., Pevcov G.V. Teoreticheskie osnovy proektirovaniya sistem raspoznavaniya signalov dlja avtomatizirovannogo radiokontrolja. Har'kov: Kollegium, 2007.

5. Jondral F. K. Software-defined radio: basics and evolution to cognitive radio // EURASIP journal on wireless communications and networking. 2005. Т. 2005, №. 3. С. 275-283.

Поступила в редколлегию 05.05.2018

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Баранник В.В.

Безрук Валерий Михайлович, д-р техн. наук, проф., зав. каф. информационно-сетевой инженерии ХНУРЭ. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Науки, 14, e-mail: valeriy_bezruk@ukr.net

Иваненко Станислав Андреевич, аспирант, ассистент кафедры информационно-сетевой инженерии ХНУРЭ. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Науки, 14, e-mail: sta-ivanenko@yandex.ru

Bezruk Valeriy, doctor of technical Sciences, professor, head of the Information and Network Engineering Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, 61166.Ukraine, KHNURE, Kharkov, Nauka Avenue, 14, valeriy_bezruk@ukr.net 0677223118

Ivanenko Stanislav, PhD student, assistant of Information and Network Engineering Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, 61166.Ukraine, Kharkov, Nauka Avenue, 14, sta-ivanenko@yandex.ru 0993249717.