

ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДОВ ОБНАРУЖЕНИЯ НЕИЗВЕСТНЫХ СИГНАЛОВ**Введение**

В настоящее время внедрение новых радиосистем ограничивается загруженностью частотных диапазонов и недостаточно эффективным использованием частотного ресурса [1, 2]. Одним из решений данной проблемы стало появление стандарта IEEE 802.22, который определяет работу радиосистем на основе применения технологий когнитивного радио (КР) [3]. При этом осуществляется поиск частотных каналов, временно не используемых первичными (лицензионными) пользователями, и предоставление их вторичным пользователям. Для этого необходимо следить за изменением сигнально-помеховой обстановки в частотных каналах путем проведения автоматизированного радиомониторинга. В анализируемых частотных каналах возможны следующие ситуации [2]:

1. На фоне помехи не наблюдаются сигналы, которые существовали в предыдущие циклы обзора, что может быть признаком снятия с эксплуатации систем, излучающих эти сигналы.

2. На фоне помехи появились новые, но ранее известные сигналы, что является признаком появления излучающей системы, которая работала в данном частотном канале в предыдущие циклы обзора.

3. На фоне помехи появились новые ранее неизвестные сигналы, что может служить признаком работы новых нелицензионных систем в данном частотном канале.

Таким образом, в результате анализа наблюдений в анализируемых частотных каналах должно приниматься решение о действии либо смеси сигнала с шумом, либо только шума, что фактически представляет собой задачу обнаружения сигналов на фоне шума. После обнаружения сигналов в частотном канале необходимо принять решение: действует либо неизвестный сигнал, либо ранее известный сигнал и какой именно. В общем случае задача анализа сигнально-помеховой ситуации в анализируемых частотных каналах представляет достаточно сложную задачу обнаружения и распознавания заданных сигналов при наличии неизвестных сигналов. Следует отметить, что при радиомониторинге сигналы в частотных каналах носят, как правило, случайный характер. Поэтому возникает необходимость решения задач обнаружения и распознавания случайных сигналов на фоне шума. При этом имеет место априорная неопределенность относительно вероятностных характеристик сигналов и шума.

В статье рассмотрены особенности решения только задачи обнаружения сигналов на фоне шума в условиях априорной неопределенности. Известны разные методы обнаружения сигналов при неполных сведениях о сигналах: в частности энергетический метод, метод согласованной фильтрации, метод циклостационарной функции [4]. Эти методы обнаружения основаны на использовании тех или иных сведений об обнаруживаемом сигнале. Существуют также методы обнаружения сигналов при априорной неопределенности, которые основаны на использовании обучающих выборок сигналов и шума [5]. Однако особенностью задач обнаружения сигналов при радиомониторинге является отсутствие возможности получения информации о виде сигнала или обучающих выборок сигналов в силу разнообразия видов и изменения характеристик сигналов в разных частотных каналах [2]. Это ограничивает возможности использования указанных методов обнаружения сигналов при проведении автоматизированного радиомониторинга.

В данной статье анализируются неклассические методы обнаружения случайных сигналов с неизвестными характеристиками, которые основаны только на знании вероятностных свойств шума в анализируемом частотном канале [6].

Решающие правила обнаружения неизвестных сигналов

При обработке наблюдений 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 $W(\mathbf{x}/\boldsymbol{\alpha}^0)$, представленной L -мерным вектором дискретных отсчетов наблюдений \mathbf{x} , $\boldsymbol{\alpha}^0$ – неизвестный векторный параметр плотности распределения. Задается обучающая выборка реализаций шума $\{\mathbf{x}_r^0, r = \overline{1, n_0}\}$, которая может быть использована для оценивания неизвестного векторного параметра $\boldsymbol{\alpha}^0$. Информация о вероятностных характеристиках сигнала отсутствует. Необходимо решить задачу обнаружения неизвестного сигнала на фоне шума, заданного своей обучающей выборкой.

Для решения сформулированной задачи обнаружения неизвестного сигнала может быть использовано следующее решающее правило [6]:

$$H^1: W(\mathbf{x}/\boldsymbol{\alpha}^0) > \lambda \text{ – принимается гипотеза о наличии сигнала,} \quad (1a)$$

$$H^0: W(\mathbf{x}/\boldsymbol{\alpha}^0) \leq \lambda \text{ – отвергается гипотеза о наличии сигнала,} \quad (1б)$$

где λ – некоторое пороговое значение, выбираемое из условия обеспечения заданной вероятности ложной тревоги.

С учетом аналитического выражения для гауссового распределения вектора наблюдений \mathbf{x} принятие решений с помощью решающего правила (1) сводится к сравнению с порогом маллахановского расстояния вектора наблюдений \mathbf{x} до эталона в сигнальном пространстве [6]:

$$H^1: (\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}^0)^{tr} (\mathbf{R}^0)^{-1} (\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}^0) > \Delta^0, \quad (2a)$$

$$H^0: (\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}^0)^{tr} (\mathbf{R}^0)^{-1} (\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}^0) \leq \Delta^0, \quad (2б)$$

где $\boldsymbol{\mu}^0, \mathbf{R}^0$ – оценки среднего вектора и корреляционной матрицы, определяющие эталон, которые могут быть получены по обучающей выборке шума; Δ^0 – некоторое пороговое значение.

В частности, решающее правило типа (2) может быть получено также и в спектральной области, когда наблюдения \mathbf{x} представляется вектором коэффициентов разложений \mathbf{b} в некотором ортонормированном базисе:

$$H^1: (\mathbf{b} - \boldsymbol{\mu}_b^0)^{tr} (\mathbf{R}_b^0)^{-1} (\mathbf{b} - \boldsymbol{\mu}_b^0) > \Delta_b^0, \quad (3a)$$

$$H^0: (\mathbf{b} - \boldsymbol{\mu}_b^0)^{tr} (\mathbf{R}_b^0)^{-1} (\mathbf{b} - \boldsymbol{\mu}_b^0) \leq \Delta_b^0, \quad (3б)$$

где $\mathbf{b}, \boldsymbol{\mu}_b^0, \mathbf{R}_b^0$ – отображение параметров соответственно $\mathbf{x}, \boldsymbol{\mu}^0, \mathbf{R}^0$ в спектральную область, определяемую выбранным ортонормированным базисом.

Для случая гауссового распределения и некоррелированности координат векторов наблюдений во временной либо спектральной области решающее правило обнаружения неизвестных сигналов представляется в виде соотношений [6]:

$$\sum_{j=1}^N \frac{(c_j - \mu_{jc}^0)^2}{(\sigma_{jc}^0)^2} > \Delta_c^0; \quad H^0: \sum_{j=1}^N \frac{(c_j - \mu_{jc}^0)^2}{(\sigma_{jc}^0)^2} \leq \Delta_c^0, \quad (4)$$

где c_j – координаты векторов наблюдений, μ_{jc}^0 – оценки математических ожиданий и дисперсий координат c_j , Δ_c^0 – некоторые пороговые значения, выбираемые из условия обеспечения заданной вероятности ложной тревоги.

Если решение принимается по выборке наблюдений объемом v реализаций, решающее правило (4) принимает вид:

$$H^1: \sum_{r=1}^v \sum_{j=1}^N \frac{(c_j - \mu_{jc}^0)^2}{(\sigma_{jc}^0)^2} > \Delta_{cv}^0; \quad H^0: \sum_{r=1}^v \sum_{j=1}^N \frac{(c_j - \mu_{jc}^0)^2}{(\sigma_{jc}^0)^2} \leq \Delta_{cv}^0, \quad (5)$$

Возможны и другие варианты решающих правил обнаружения неизвестных сигналов, в частности по оценкам энергетических спектров наблюдений в некотором ортонормированном базисе.

Результаты исследований решающих правил обнаружения сигналов

Для исследования рассмотренных решающих правил была использована установка, которая включала SDR приемник, состыкованный с компьютером, и соответствующее программное обеспечение [7]. С помощью данной установки осуществлялось сканирование заданного диапазона частот и проводилась запись в оцифрованном виде выборок реализаций сигналов и шума, действующих в выбранных частотных каналах.

Получены обучающие и контрольные выборки реализаций сигналов и шума, наблюдаемых в частотных каналах с полосой 125 кГц в диапазоне частот стандарта IEEE 802.22. Была выбрана частота дискретизации наблюдений, равная 250 кГц. Накоплены обучающих и контрольных выборок сигналов и шума объем по 1000 реализаций, каждая из которых включала 256 дискретных отсчетов, взятых с частотой 250 кГц.

Полученные выборки наблюдений использованы для проведения исследований рассмотренных решающих правил обнаружения неизвестных сигналов. Исследования проводились методом статистических испытаний. При этом решающие правила были программно реализованы 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 сигналов на фоне шума в выбранном частотном канале.

Поскольку решающие правила обнаружения неизвестных сигналов основаны на использовании вероятностных свойств шума, вначале проведены исследования статистических характеристик шума в выбранном частотном канале. По обучающим выборкам шума построена гистограмма распределений его выборочных значений (рис. 1), а также найдены оценки корреляционной функции шума (рис. 2). Из анализа полученных результатов можно сделать предположение о гауссовом распределении выборочных значений шума, а также об их некоррелированности. Близкие результаты были получены по выборкам реализаций шума, действующего в других частотных каналах.

Полученные результаты исследований статистических характеристик шума дают основание использовать решающие правила обнаружения неизвестных сигналов (4), (5), которые основаны на предположениях о гауссовом распределении и некоррелированности выборочных значений шума.

Также были проведены исследования статистических характеристик шума в случае представления наблюдений \mathbf{x} в ортонормированном базисе дискретных экспоненциальных функций (ДЭФ). При этом рассматривалось спектральное представление 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 отсчетов амплитудного спектра шума, которая имеет вид близкий к рис. 2. Это дает основание использовать решающие правила обнаружения неизвестных сигналов (4), (5), основанные на гауссовом распределении и некоррелированности спектральных отсчетов шума.

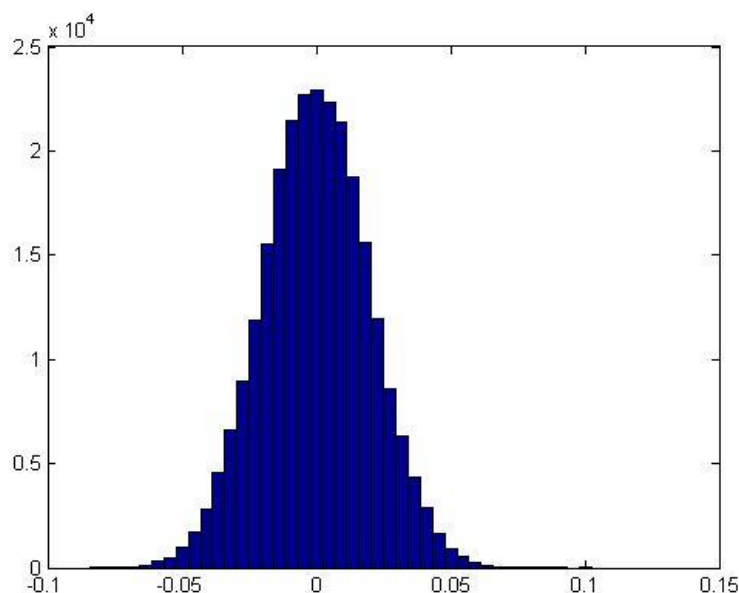


Рис. 1. Гистограмма распределений выборочных значений шума

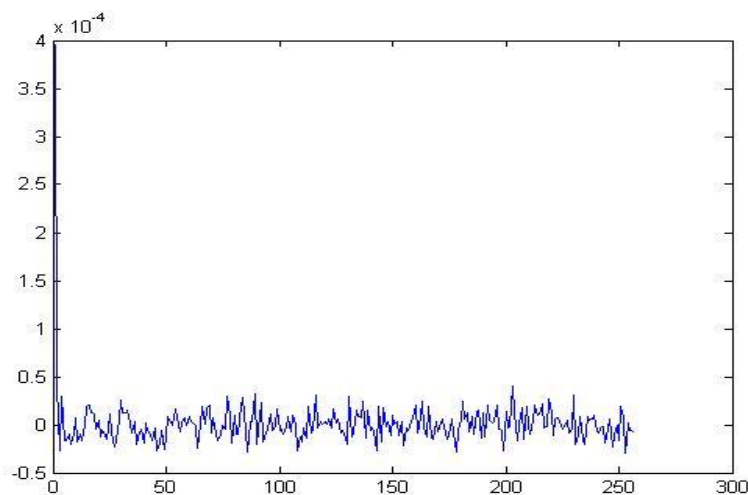


Рис. 2. Оценка корреляционной функции шума

С использованием накопленных выборок реальных сигналов, действующих в анализируемых частотных каналах, проведены сравнительные исследования рабочих характеристик обнаружения неизвестных сигналов на фоне шума для решающих правил обнаружения, реализованных во временной и спектральной области. На этапе обучения по накопленным выборкам шума находились параметры решающих правил. Пороговое значение Δ_c^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.1 приведен амплитудный спектр одного из сигналов, который рассматривался как неизвестный сигнал, действующий на фоне шума в анализируемом частотном канале. Для этого случая проведены исследования рабочих характеристик обнаружения в виде зависимости оценок вероятности правильного обнаружения $P(1/1)$ от соотношения сигнал-шум (ОСШ) SNR. Оценки $P(1/1)$ были получены как отношение числа опытов n , в

которых приняты правильные решения, к общему числу опытов N , равному объему контрольной выборки из 1000 реализаций. На рис. 3 приведены полученные зависимости для решающего правила (5), реализованного соответственно во временной и спектральной области при фиксированной вероятности ложной тревоги $P(1/0) = 0,04$. Оценки $P(1/1)$ были получены при разных значениях $v = 1, 2, 3$.

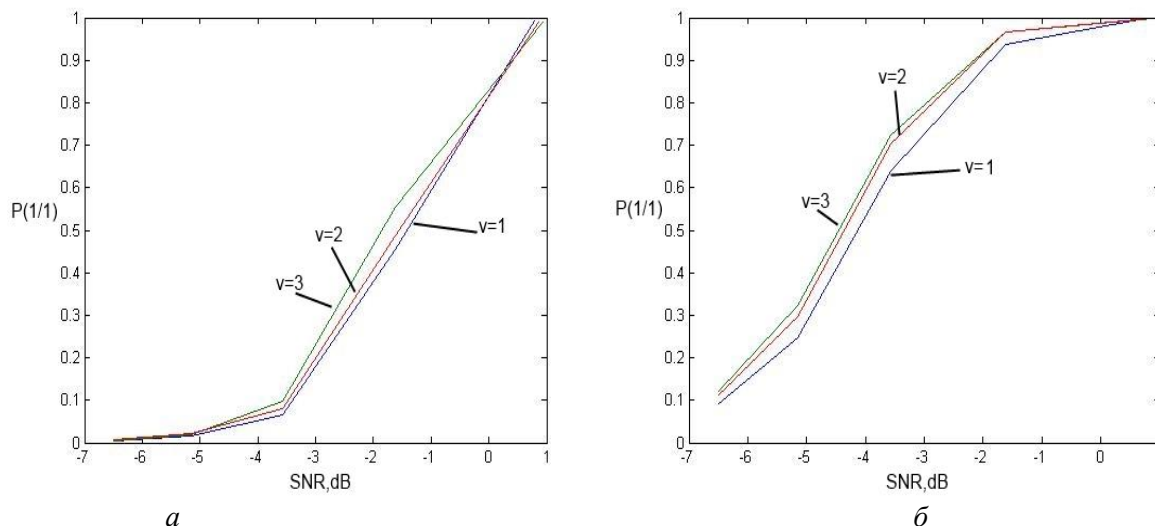


Рис. 3. Зависимости оценок вероятности правильного обнаружения неизвестных сигналов от ОСШ во временной области (а) и спектральной области (б) при вероятности ложной тревоги $P(1/0) = 0,04$

Из анализа результатов исследований следует, что рассмотренные решающие правила могут быть использованы 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. Также видно, что переход к представлению наблюдений в спектральной области в виде отсчетов амплитудного спектра в базисе ДЭФ обеспечивает существенно большие значения вероятности правильного обнаружения неизвестных сигналов при прочих равных условиях по сравнению с временным представлением наблюдений.

Выводы

1. Рассмотрены нетрадиционные методы обнаружения неизвестных сигналов, действующих на фоне шума в анализируемом частотном канале. Методы обнаружения базируются на решающих правилах, в которых используется информация только о статистических характеристиках шума. Неизвестные статистические характеристики шума могут быть оценены по соответствующей обучающей выборке помехи.

2. Исследования решающих правил обнаружения неизвестных сигналов проведены методом статистических испытаний на выборках реальных сигналов и шума, полученных с использованием установки, которая включала сканирующий приемник и специальное программное обеспечение.

3. Исследованы статистические характеристики шума, действующие в частотных каналах. В частности, построены гистограммы распределений и получены оценки корреляционных функций выборочных значений шума. Их анализ показывает, что можно предполагать гауссово распределение и некоррелированность отсчетов шума. Это дает основание использовать соответствующие решающие правила обнаружения неизвестных сигналов.

4. Проведены сравнительные исследования решающих правил обнаружения неизвестных сигналов на фоне шума, представленных как во временной области, так и в спектральной области в виде амплитудного спектра в базисе ДЭФ. С использованием выборок реальных сигналов и шума методом статистических испытаний получены характеристики обна-

ружения неизвестных сигналов в виде зависимостей оценок вероятности правильного обнаружения от соотношения сигнал-шум при фиксированной вероятности ложной тревоги.

5. Полученные результаты исследований характеристик обнаружения свидетельствуют о возможности применения предложенных решающих правил для обнаружения неизвестных сигналов в частотных каналах при автоматизированном радиомониторинге. Это позволит решать задачи анализа сигнально-помеховых ситуаций с целью выявления незанятых частотных каналов в рамках технологии когнитивных радиосетей.

Список литературы: 1. *Реєстр присвоєнь радіочастот (централізовані присвоєння)* [Электронный ресурс] // УДЦР. – Режим доступа: <http://www.ucrf.gov.ua/> 2. *Коханович, Г. Ф., Бабак, В.П., Фисенко, В.М.* Специальный радиомониторинг. – Киев : МК-Прес, 2007. – 384 с. 3. *Haykin S.* Cognitive Radio: Brain-empowered Wireless Communications // IEEE Journal on Selected Areas in Commun. – 2005. – Vol. 23, No. 2. – pp. 201-220. 4. *Mata-Moya D. de la, Jarabo-Amores M. P., Rosa-Zurera M., Nieto Borge J. C. and Lopez-Ferreras F.* Combining MLPs and RBFNNs to Detect Signals With Unknown Parameters // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2009. – Vol. 58, No. 9. – pp. 2989-2995. 5. *Теория обнаружения сигналов* / П.С. Акимов, П.А. Бакут, В.А. Богданович и др. – М. : Радио и связь, 1984. – 440 с. 6. *Безрук В.М., Певцов Г.В.* Теоретические основы проектирования систем распознавания сигналов для автоматизированного радиоконтроля. – Харьков : Коллегиум, 2007. – 430 с. 7. *SDR and CR Boost Wireless Communications* [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.electronicdesign.com>

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию 07.10.2017