

ОБНАРУЖЕНИЕ НЕИЗВЕСТНЫХ СИГНАЛОВ В КОГНИТИВНЫХ РАДИОСЕТЯХ

Безрук В.М., Иваненко С.А.

Кафедра “Информационно-сетевая инженерия”, Харьковский национальный университет
радиоэлектроники, Украина

Background. This work is devoted to detection of unoccupied frequency channels in the cognitive radio networks. An overview of the basic methods of detection of the primary users of the radio resource is given. An algorithms of detection of unknown signals when monitoring the radio spectrum is proposed.

Objective. The objective of this work is the research of algorithms for detecting unknown signals during radio monitoring in cognitive radio networks.

Methods. There is the research of algorithms of detection of unknown signal which was performed by the method of statistical tests.

Results. Quality indicators of detecting of unknown signals were researched. The algorithms of detection of signals in cognitive radio networks were considered. The proposed algorithms must increase the efficiency of detection of free frequency channels.

Conclusions. Estimations of quality indicators of detection of unknown signals were obtained by computer research. For example, there is the dependence of the probability of correct detection on the signal-to-noise ratio for different decision rules.

Key words: radio spectrum, radio monitoring, cognitive radio, methods of detecting of signals, unknown signals.

1. Введение

Современные тенденции развития информационных систем и технологий направлены на повышение эффективности их эксплуатации. В настоящее время широко внедряются беспроводные радиотехнологии, использующие частотный ресурс. В настоящее число пользователей частотного ресурса неуклонно растёт и частотный диапазон достаточно переполнен. Однако, как показывает анализ, эффективность использования частотного ресурса оказывается невысокой [1], что приводит к проблеме внедрения новых беспроводных радиотехнологий.

Одним из решений данной проблемы стало появление стандарта IEEE 802.22, который определяет работу радиосистем в диапазоне частот от 54 МГц до 698 МГц. Данный стандарт разработан на основе применения технологии когнитивного радио (КР) [2-6]. При этом осуществляется поиск «спектральных дыр», то есть участков частотного диапазона, неиспользуемых в данный момент времени первичными (лицензионными) пользователями и предоставление их вторичным пользователям.

Например, для служб телерадиовещания выделена большая полоса частот, отдельные участки которой временами не используются и могут быть предоставлены для организации связи с целью сбора данных от различных датчиков

коммунальных служб и систем безопасности, систем оповещения персонала в больницах и др.

Основной задачей системы КР является слежение за динамикой изменений сигнально-помеховой обстановки при радиомониторинге. Это означает фиксацию следующих сигнальных ситуаций, которые складываются в каждый интервал времени наблюдения в анализируемых частотных каналах:

1. Не наблюдаются сигналы, которые наблюдались ранее. Такая ситуация может быть признаком изменения дислокации или снятия с эксплуатации систем, излучающих эти сигналы в этом частотном канале.

2. Появились новые, но ранее известные сигналы. Естественно, что это признак появления излучающей системы, которая ранее работала в этом частотном канале.

3. Появились новые неизвестные сигналы, что может служить признаком работы новых, ранее неизвестных систем.

Получение информации об использовании частотного ресурса может выполняться двумя способами [2]:

- из базы данных системы когнитивного радио;
- путём радиомониторинга заданного частотного диапазона.

Основные методы обработки полученной информации при радиомониторинге можно классифицировать следующие образом:

- обнаружение работы приёмного устройства первичного пользователя (cooperative method);
- обнаружение работы передающего устройства первичного пользователя (non-cooperative method),
- определение уровня интерференции.

Для выявления незанятых частотных каналов должен проводиться анализ сигнально-помеховой обстановки в частотных каналах. В результате принимается решение о действии либо смеси сигнала с помехой, либо только помехи в анализируемом частотном канале, что фактически представляет собой задачу обнаружения сигнала на фоне помехи.

Следует отметить, что при радиомониторинге сигналы и помехи в частотных каналах носят, как правило, случайный характер в силу разных причин. Поэтому возникает необходимость решения задач обнаружения случайных сигналов на фоне случайной помехи. При этом имеет место априорная неопределённость относительно вероятностных характеристик сигналов и помех.

Известно применение в этих условиях следующих методов обнаружения сигналов [2]:

- энергетический метод;
- метод согласованной фильтрации;
- метод циклостационарной функции.

Эти методы обнаружения основаны на использовании тех или иных сведений о сигнале.

Энергетический метод является наиболее распространённым, благодаря его малой вычислительной сложности и простоте реализации. Основным недостатком является его малая пригодность при обнаружении сигналов с малым соотношением «сигнал-помеха», а также сложность определения необходимого порога срабатывания, учитывая постоянно меняющуюся сигнальную и помеховую обстановку.

Преимущества метода согласованной фильтрации является малое время анализа и малое время наблюдений для получения необходимого уровня ложной тревоги или пропуска сигнала. К недостаткам можно отнести необходимость применения определённого вида приёмного устройства для приема сигналов каждого класса первичных пользователей. Это делает данный метод непрактичным для широкого применения в когнитивных радиосетях.

Метод с использованием циклостационарной функции основан на исходной избыточности, которая присуща сигналу. Преимущество метода в том, что он способен достаточно хорошо отличать обнаруживаемый сигнал от помехи. Это возможно

даже в случае, когда полезный сигнал находится ниже уровня шума. К недостаткам метода можно отнести большую вычислительную сложность и значительное время наблюдения.

Известны также методы обнаружения сигналов в условиях априорной неопределённости, которая преодолевается с использованием соответствующих обучающих выборок реализаций [7]. Однако особенностью задач обнаружения сигналов при радиомониторинге является отсутствие возможности получения обучающих выборок сигналов в силу разнообразия сигналов в частотных каналах. Это ограничивает возможности использования этих методов обнаружения сигналов при радиомониторинге.

В данной статье рассмотрены нетрадиционные методы обнаружения неизвестных сигналов, которые основаны лишь на знании вероятностных свойств помехи в анализируемых частотных каналах [8,9]. Проведены исследования характеристик обнаружения для соответствующих решающих правил путем статистических испытаний на выборках реализаций реальных сигналов и помех, полученных при автоматизированном радиомониторинге.

2. Решающие правила обнаружения неизвестных сигналов

При обработке наблюдений в анализируемых частотных каналах выдвигаются две гипотезы:

$H^1 : x(t) = S(t) + \xi(t)$ – действует полезный сигнал на фоне помехи;

$H^0 : x(t) = 0 + \xi(t)$ – действует только помеха.

Для задачи обнаружения известных сигналов на фоне заданной помехи может быть использовано решающее правило, основанное на сравнении отношения правдоподобия с некоторым пороговым значением [7].

Априорная неопределённость, имеющая место при радиомониторинге, преодолевается с использованием обучающих выборок, которые используются для получения оценок неизвестных параметров плотностей распределения сигналов и помехи. Однако специфика реальных задач обнаружения сигналов при радиомониторинге такова, что на обработку поступают неизвестные сигналы, для которых не представляется возможным получить обучающие выборки. В этих условиях традиционные методы обнаружения сигналов в условиях априорной неопределённости не могут быть использованы. Поэтому возникает необходимость решения нетрадиционных задач

обнаружения неизвестных сигналов на фоне известных помех, которые действуют в анализируемых частотных каналах.

В работе [9] предложены методы обнаружения неизвестных сигналов на фоне помехи, заданной в вероятностном смысле. При этом для обнаружения неизвестных сигналов в анализируемом частотном канале может быть использовано следующее решающее правило:

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

- принимается гипотеза о наличии сигнала;

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

- отвергается гипотеза о наличии сигнала.

Здесь $W(\bar{X}/\bar{\alpha}^0)$ - многомерная плотность распределения помехи, представленной L -мерным вектором дискретных отсчетов \bar{X} , $\bar{\alpha}^0$ - параметр плотности распределения, λ - некоторое пороговое значение, определяемое из условия обеспечения заданной вероятности ложной тревоги.

С учетом аналитического выражения для гауссовского распределения вектора наблюдений \bar{X} решающее правило (1) сводится к сравнению с порогом малаханобисового расстояния вектора \bar{X} до эталона $\bar{\mu}^0$:

$$H^1: (\bar{X} - \bar{\mu}^0)^T (R^0)^{-1} (\bar{X} - \bar{\mu}^0) > \Delta,$$

$$H^0: (\bar{X} - \bar{\mu}^0)^T (R^0)^{-1} (\bar{X} - \bar{\mu}^0) \leq \Delta. \quad (2)$$

Здесь $\bar{\mu}^0, R^0$ - оценки среднего вектора и корреляционной матрицы, полученные по обучающей выборке реализаций помехи; Δ - некоторое пороговое значение.

Выбирая базис Карунена-Лоэва, получаем решающее правило (2) в виде соотношений:

$$H^1: \sum_{j=1}^N \frac{(c_j - \mu_{jc}^0)^2}{(\sigma_{jc}^0)^2} > \Delta_c^0; \quad H^0: \sum_{j=1}^N \frac{(c_j - \mu_{jc}^0)^2}{(\sigma_{jc}^0)^2} \leq \Delta_c^0, \quad (3)$$

где $(\sigma_{jc}^0)^2 = \lambda_j$ - собственные числа выборочной корреляционной матрицы помехи R^0 , \bar{c} - представление реализаций \bar{X} в базисе Карунена-Лоэва с размерностью $N < L$.

В случае представления наблюдений \bar{X} в гармоническом базисе может быть использовано решающее правило типа (3), где c_j - это спектральные отсчеты наблюдений в базисе дискретных экспоненциальных функций (ДЭФ).

Если решение принимается по выборке объемом ν реализаций \bar{X}_ν , решающее правило (3) принимает следующий вид:

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

$$H^0: \sum_{r=1}^{\nu} \sum_{j=1}^N \frac{(c_{jr} - \mu_{jc}^0)^2}{(\sigma_{jc}^0)^2} \leq \Delta_{cv}^0 \quad (4)$$

Если наблюдения будут представлены в виде совокупности координат энергетических спектров, то может быть использовано решающее правило, основанное на сравнении евклидовых расстояний текущих оценок энергетического спектра наблюдений до эталона:

$$H^1: \sum_{j=1}^N (G_j - G_{jc}^0)^2 > \Delta_G; \quad H^0: \sum_{j=1}^N (G_j - G_{jc}^0)^2 \leq \Delta_G. \quad (5)$$

Здесь эталоны $G_j^0 = \frac{1}{n_0} \sum_{r=1}^{n_0} (c_{jr}^0 - \mu_{jc}^0)^2$, $j = \overline{1, N}$ - это

оценки координат энергетического спектра помехи, найденные по обучающей выборке объемом n_0

реализаций; $G_j = \frac{1}{\nu} \sum_{r=1}^{\nu} (c_{jr} - \mu_{jc}^0)^2$, $j = \overline{1, N}$ - текущая

оценка энергетического спектра наблюдения, полученная по выборке меньшего объема $\nu \ll n_0$.

Приведенные решающие правила (2) - (5) определяют некоторые возможные алгоритмы обнаружения неизвестных сигналов на фоне помехи, которые могут быть использованы для выявления незанятых частотных каналов в когнитивных радиосетях.

3. Результаты исследований алгоритмов обнаружения неизвестных сигналов

Поскольку эффективность работы когнитивных радиосетей в значительной мере зависит от эффективности выявления незанятых частотных каналов, были проведены сравнительные исследования рассмотренных решающих правил обнаружения сигналов методом статистических испытаний. Для исследований были использованы выборки реализаций реальных сигналов и помех, которые были получены при проведении радиомониторинга заданного диапазона частот. В результате получены зависимости показателей качества обнаружения сигналов от различных условий и параметров исследований.

Для проведения исследований методом статистических испытаний рассмотренные решающие правила обнаружения (2) – (5) реализованы программно в среде MATLAB. Исследования проведены на выборках сигналов и помех, соответствующих радиоизлучениям в полосе частот, которые предусмотрены стандартом IEEE 802.22 для работы когнитивных радиосетей. Цифровые записи реализаций сигналов и помех были получены с использованием SDR оборудование, которое позволяет сканировать и анализировать заданный частотный диапазон, а также производить цифровые записи наблюдений.

Особенностью SDR оборудования является использование оцифрованных сигналов на промежуточной частоте (цифровой ПЧ) для обеспечения работы перепрограммируемых устройств частотной селекции сигналов. Использование цифровой ПЧ стало возможным благодаря появлению высокоскоростных АЦП и ЦАП с большой разрядностью и высокой линейностью, а также высокопроизводительных устройств цифровой обработки сигналов на основе высокоскоростных сигнальных процессоров [10].

В качестве SDR приемника в работе был использован DVB-T TV USB тюнер с установкой и настройкой соответствующего программного обеспечения, в частности, программы SDR# с открытым исходным кодом. Такой тюнер способен обеспечить прием радиоизлучений в диапазонах частот от 24 МГц до 1710 МГц и визуализировать спектры сигналов с различными типами модуляций: AM, FM, WFM, NFM, CW, SSB. На рис. 1 изображена форма спектра одного из сигналов, который рассматривался как неизвестный сигнал, появляющийся на фоне помехи в анализируемом частотном канале.



Рис. 1. Спектр сигнала с широкополосной частотной модуляцией

В результате использования указанного оборудования и программного обеспечения были получены и записаны в оцифрованном виде обучающие и контрольные выборки реализаций помех и сигналов, действующих в частотных каналах согласно стандарта IEEE 802.22.

Обучающие выборки реализаций помехи использованы для оценивания параметров решающих правил (2) - (4). Контрольные выборки сигналов и помехи использованы для проведения статистических испытаний и получения оценок вероятностей правильного обнаружения неизвестных сигналов и вероятностей ложной тревоги. Для получения оценок методом статистических испытаний использовались контрольные выборки реализаций сигналов и помех объемом по 1000 реализаций длительностью $L=512$ временных отсчетов.

В результате получены зависимости вероятности правильного обнаружения неизвестного сигнала $P(1/1)$ от соотношения сигнал-шум SNR (ОСШ) при фиксированной вероятности ложной тревоги $P(1/0)$. На рис. 2 такие зависимости приведены для решающего правила (4) для случая представления наблюдений в базисе ДЭФ и при фиксированной вероятности ложной тревоги $P(1/0) = 0.04$.

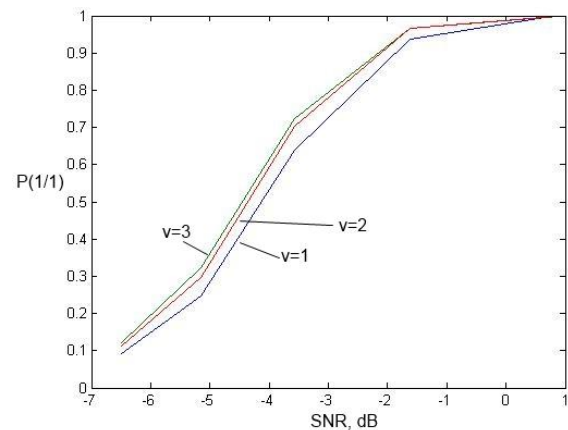


Рис. 2. Зависимость вероятности правильного обнаружения сигналов от ОСШ для решающего правила (4) (при $P(1/0) = 0,04$)

Видно, что возрастание вероятности правильного обнаружения неизвестного сигнала может быть обеспечено как при возрастании ОСШ, так и числа реализации v , предъявляемых на обработку.

Для этого же решающего правила также получены зависимости правильного обнаружения сигнала $P(1/1)$ от вероятности ложной тревоги $P(1/0)$ при разных ОСШ (рис. 3). Эти зависимости показывают, как может производиться обмен между собой значений этих показателей качества.

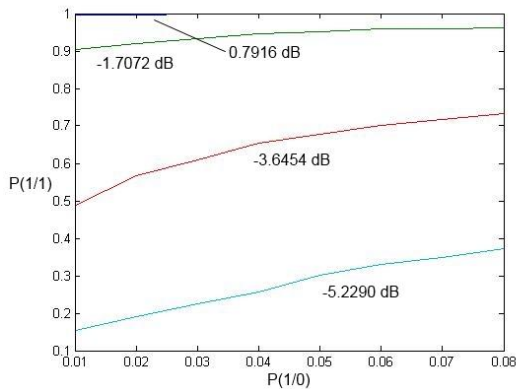


Рис. 3. Зависимость вероятности правильного обнаружения сигнала от вероятности ложной тревоги для разных ОСШ для решающего правила (4) ($\nu = 1$)

Аналогичные зависимости получены для решающего правила обнаружения сигналов (5) для случая представления наблюдений оценками координат энергетического спектра наблюдений в базисе ДЭФ при разном объеме выборки реализаций ν , по которым находились текущие оценки энергетического спектра (рис. 4, рис. 5).

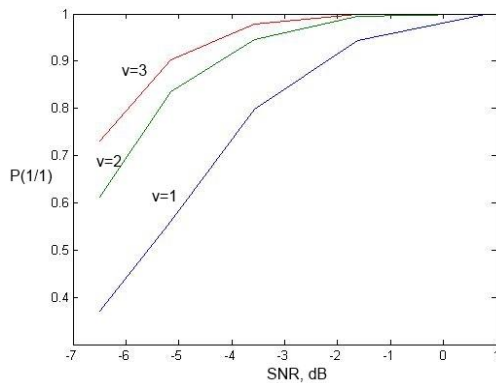


Рис. 4. Зависимость вероятности правильного обнаружения от ОСШ для решающего правила (5) (при $P(1/0) = 0,04$)

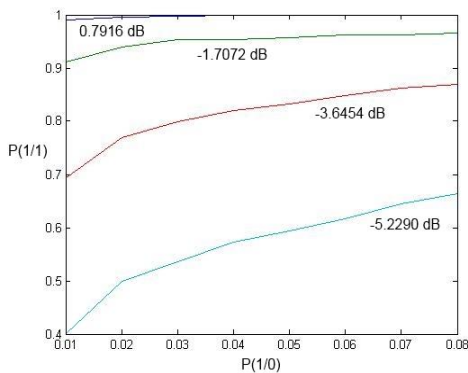


Рис. 5. Зависимость вероятности пропуска сигнала от вероятности ложной тревоги для разных ОСШ для решающего правила (5) ($\nu = 1$)

Видно, что улучшение показателей качества обнаружения достигается не только с улучшением ОСШ, но и при увеличении объема выборки реализаций для принятия решений. Кроме того, сравнивая полученные результаты обнаружения сигналов для решающих правил (4) и (5), можно сделать вывод, что решающее правило (5) обладает более высокой вероятностью правильного обнаружения при более низких значениях ОСШ.

Зависимости, приведенные на рис. 4 и рис. 5, показывают как можно подбирать условия обнаружения для получения приемлемых показателей обнаружения неизвестных сигналов.

Полученные результаты исследований подтверждают работоспособность рассмотренных алгоритмов обнаружения неизвестных сигналов. На выборках реальных сигналов и помех получены значения показателей качества обнаружения неизвестных сигналов, которые приемлемы для решения практических задач радиомониторинга в когнитивных радиосетях.

Выводы

В работе рассмотрены основные особенности радиомониторинга, применение которых возможно в рамках концепции когнитивного радио. Определены основные преимущества и недостатки существующих методов обнаружения. Выявлено, что основными требованиями к их работе является высокая скорость обработки, малое время наблюдения, а также малые энергозатраты на реализацию, что в свою очередь является противоречивыми факторами. Одним из способов разрешения этого противоречия может быть применение методов многокритериальной оптимизации.

Предложен вариант преодоления априорной неопределённости, возникающей в процессе мониторинга радиоспектра, который заключается в использовании неклассических методов обнаружения сигналов, основанных на использовании информации лишь о помехе.

В результате исследований получены различные зависимости показателей качества обнаружения. Приведены зависимости вероятности правильного обнаружения неизвестных сигналов от ОСШ, а также вероятности пропуска сигнала от вероятности ложной тревоги, при разных значениях ОСШ. Получены приемлемые значения вероятностей правильного обнаружения сигналов и ложной тревоги, что подтверждает работоспособность рассмотренных алгоритмов обнаружения

неизвестных сигналов. Это дает основание рекомендовать их для использования при радиомониторинге в когнитивных радиосетях.

Литература

1. Реєстр присвоєнь радіочастот (централізовані присвоєння) [Электронный ресурс]//УДЦР – Режим доступа: <http://www.ucrf.gov.ua/>
2. Ž. Tabaković, "A Survey of Cognitive Radio Systems" [Электронный ресурс]]// A Survey of Cognitive Radio Systems – Режим доступа: https://www.fer.hr/download/repository/KDI_Tabakovic_Zeljko.pdf
3. B. Wild, K. Ramchandran, "Detecting Primary Receivers for Cognitive Radio Applications", in Proc. of IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN 2005), pp. 124-130.
4. S. Haykin, "Cognitive Radio: Brain-empowered Wireless Communications", IEEE Journal on Selected Areas in Commun., Vol. 23, No. 2, February 2005, pp. 201-220.
5. D. Cabric, S. M. Mishra and R. Brodersen, "Implementation Issues in Spectrum Sensing for Cognitive Radios", Conference Record of the 38th Conference on Signals, Systems and Computers, November 2004, pp. 772-776.
6. S. M. Mishra, A. Sahai and R. Brodersen, "Cooperative Sensing Among Cognitive Radios", in Proc. of IEEE International Conference (ICC 2006), June 2006, pp. 1658-1663.
7. Теория обнаружения сигналов / П.С. Акимов, П.А. Бакут, В.А. Богданович и др.; под ред. П.А. Бакута. М.: Радио и связь, 1984. 440 с.
8. Омельченко, В.А. Основы спектральной теории распознавания сигналов. - Харьков: Вища школа, 1983. - 156с.
9. Безрук В.М., Певцов Г.В. Теоретические основы проектирования систем распознавания сигналов для автоматизированного радиоконтроля. - Харьков: Коллегиум, 2007. - 430 с.
10. SDR And CR Boost Wireless Communications//www.electronicdesign.com.

Безрук В.М., Іваненко С.А.

Виявлення невідомих сигналів в когнітивних радіомережах.

Проблематика. На данному етапі розвитку бездротових технологій спостерігається стрімкий зріст об'ємів інформаційних послуг, а також швидкості передачі інформації. Щоб задовільнити ці потреби, слід використовувати додаткові смуги частот. Однак, на даний момент більша частина радіоспектру вже зайнята для використання. Для вирішення цієї проблеми може бути використана концепція когнітивного радіо, ефективність використання якої в значній мірі залежить від алгоритмів виявлення сигналів в частотних каналах.

Мета. Метою роботи є дослідження алгоритмів виявлення невідомих сигналів під час радіомоніторингу у когнітивних радіомережах.

Методи. Дослідження алгоритмів виявлення невідомих сигналів проведено методом статистичних випробувань.

Результати. Досліджені показники якості виявлення невідомих сигналів. Запропоновані алгоритми виявлення мають підвищити ефективність виявлення незайнятих частотних каналів, і тим самим поліпшити функціонування когнітивних радіомереж.

Висновки. У роботі розглянуті неklasичні методи виявлення невідомих сигналів, застосування яких можливо у рамках концепції когнітивного радіо. Ці методи відрізняються від класичних тим, що вони використовують інформацію лише про шум. В результаті комп'ютерного дослідження були отримані оцінки показників якості виявлення невідомих сигналів. Ці оцінки підтверджують працездатність та можливість використання запропонованих алгоритмів під час радіомоніторингу у когнітивних радіомережах.

Ключові слова: когнітивне радіо, методи виявлення сигналів, невідомі радіосигнали, радіоспектр, радіомоніторинг, частотний ресурс, невідомі сигнали.

Безрук В.М., Іваненко С.А.

Обнаружение неизвестных сигналов в когнитивных радиосетях.

Проблематика. На данном этапе развития беспроводных технологий наблюдается стремительный рост объемов информационных услуг, а также скорости передачи информации. Для обеспечения этих потребностей, следует использовать дополнительные полосы частот. Однако, на данный момент большая часть радиоспектра уже занята для использования. Для решения этой проблемы может быть использована концепция когнитивного радио, эффективность использования которой в значительной степени зависит от алгоритмов обнаружения сигналов в частотных каналах.

Цель. Целью работы является исследование алгоритмов обнаружения неизвестных сигналов во время радиомониторинга в когнитивных радиосетях.

Методы. Исследование алгоритмов обнаружения неизвестных сигналов проведено методом статистических испытаний.

Результаты. Исследованы показатели качества обнаружения неизвестных сигналов. Предложенные алгоритмы обнаружения должны повысить эффективность обнаружения незанятых частотных каналов, и тем самым улучшить функционирование когнитивных радиосетей.

Выводы. В работе рассмотрены неклассические методы выявления неизвестных сигналов, применение которых возможно в рамках концепции когнитивного радио. Эти методы отличаются от классических тем, что они используют информацию только о шуме. В результате компьютерного исследования были получены оценки показателей качества обнаружения неизвестных сигналов. Эти оценки подтверждают работоспособность и возможность использования предложенных алгоритмов при проведении радиомониторинга в когнитивных радиосетях.

Ключевые слова: когнитивное радио, методы обнаружения сигналов, неизвестные радиосигналы, радиомониторинг, радиоспектр, частотный ресурс, неизвестные сигналы.