

Рассматривается обнаружение незанятых частотных каналов в когнитивных радиосетях. Это можно осуществить путём выявления радиосигналов, которые действуют в данных каналах. Поскольку количество средств, использующих частотный ресурс, велико, не представляется возможным знать заранее, какой сигнал необходимо обнаружить. Предлагаются методы обнаружения неизвестных радиосигналов, применение которых позволит определить занятость частотного канала в когнитивных радиосетях.

**Ключевые слова** – беспроводные технологии, методы обнаружения сигналов, когнитивные радиосети, неизвестные радиосигналы, частотные каналы, радиомониторинг.

**Key words** – wireless technology, methods of signal detection, cognitive radio, unknown radio signals, frequency channels, radio monitoring.

## 1. Введение

В настоящее время беспроводные технологии являются одной из наиболее развивающихся отраслей телекоммуникационной индустрии. В частности, она включает мобильную связь, спутниковое телевидение, радиодоступ в интернет, дистанционное управление объектами, в которых непосредственно осуществляется передача информации по радиоканалу. С каждым годом количество систем, использующих радиоресурс, неуклонно растёт. Как показывает анализ, на данный момент эффективность использования радиоспектра в большинстве диапазонов является невысокой [1], а освоение новых частотных диапазонов в силу различных факторов происходит достаточно медленно. Поэтому всё чаще прибегают к процедурам рефарминга и экономному использованию существующих частотных диапазонов путем применения технологий когнитивного радио (КР), концепция которого определена стандартом IEEE 802.22. Эти технологии дают возможность повысить эффективность использования радиоспектра за счет выделения вторичным пользователям частотных каналов в те интервалы времени, когда они являются свободными, т.е. временно не используются первичными пользователями. Это в целом не мешает работе первичным пользователям, за которыми закреплены эти частотные каналы [2, 3]. Эффективность работы когнитивных радиосетей в значительной мере зависит от качества работы алгоритмов выявления незанятых частотных каналов при радиомониторинге задан-

ных диапазонов частот. Эта задача может решаться методами обнаружения сигналов на фоне помех в анализируемых частотных каналах [4]. При радиомониторинге используются следующие методы обнаружения сигналов: энергетический; метод согласованной фильтрации и корреляционный метод; метод выявления свойств циклостационарности, метод на основе применения вероятностных моделей сигналов [5 – 9].

Энергетический метод обнаружения сигналов на фоне помехи основан на вычислении энергии наблюдаемой реализации помехи (либо сигнала с помехой) и сравнении с некоторым пороговым значением [5]. Этот метод наиболее распространён, благодаря малой вычислительной сложности и простоте реализации. Основным его недостатком является возрастание вероятности ложной тревоги при уменьшении соотношения «сигнал-шум», а также сложность определения необходимого порогового уровня с учетом постоянно меняющейся сигнальной и помеховой обстановки.

В методе выявления циклостационарных свойств сигналов используется информация о периодичности статистик полезных сигналов, в частности, математического ожидания, функции автокорреляция или спектральной функции. Такая периодичность обычно имеет место при модуляции несущих сигналов синусоидальной формы или кодировании переданных сигналов [6]. Данный метод обеспечивает лучшие характеристики обнаружения, нежели энергетический метод обнаружения при низком соотношении «сигнал-шум», однако он требует информацию о структуре сигнала и имеет высокую вычислительную сложность. В методах обнаружения сигналов на основе согласованного фильтра или коррелятора используется информация о форме обнаруживаемых сигналов [7]. Эта информация используется для получения частотной характеристики согласованного фильтра либо для формирования опорного сигнала в корреляторе. Данные методы лучше энергетического метода в отношении надёжности обнаружения и сходимости во времени, однако они требуют значительной информации о форме обнаруживаемых сигналах.

В методах обнаружения, основанных на знании вероятностных моделей обнаруживаемых сигналов, используются некоторые статистические характеристики сигналов [8]. Оценки неизвестных характеристик сигналов находятся с использованием обучающих выборок сигналов. Применяются также непараметрические методы обнаружения сигналов, которые приводят к ранговым и знаковым обнаружителям сигналов. В работе [9] проведен сравнительный анализ эффективности разных методов обнаружения сигналов.

Следует отметить, что в указанных методах обнаружения сигналов полагается известной помеха, а также требуется иметь информацию в той или иной форме об обнаруживаемых сигналах. Однако в задачах автоматизированного радиомониторинга такая априорная информация о форме и структуре сигналов либо их статистических характеристиках отсутствует в силу многообразия обнаруживаемых сигналов. При этом возможны разные сигнальные ситуации на фоне помехи: в частотном канале появился сигнал; прекратил действовать сигнал; действовал сигнал и появился еще один сигнал. В каждой из ситуаций необходимо решать задачу обнаружения сигналов на фоне помехи в условиях априорной неопределенности.

Таким образом, существует актуальная необходимость разработки методов обнаружения неизвестных сигналов на фоне помехи, которые не используют информацию об обнаруживаемых сигналах. В этой работе предлагаются методы обнаружения, основанные на применении лишь данных о помехах. Эти методы могут быть использованы в рамках технологий когнитивного радио для выявления незанятых частотных каналов.

## 2. Методы обнаружения неизвестных сигналов

В общем виде задача обнаружения сигнала  $S(t)$  на фоне помехи  $\xi(t)$  может быть сформулирована как проверка бинарных гипотез в отношении принятого сигнала  $x(t)$ :

$$H_1 : x(t) = S(t) + \xi(t), \quad (1)$$

$$H_0 : x(t) = 0 + \xi(t). \quad (2)$$

При проверке бинарных гипотез может быть допущена «ошибка первого рода» и «ошибка второго рода». Вероятность совершения ошибки первого рода часто называется «ложной тревогой». В задачах когнитивного радио вероятность ложного обнаружения является важной характеристикой, так как ложные обнаружения приводят к пропуску свободных частотных каналов. Ошибка второго рода носит название «пропуск цели», что приводит к возникновению коллизий с первичными пользователями. В когнитивных радиосетях должен достигаться компромисс между обоими типами ошибок.

В классических задачах обнаружения сигналов по критерию минимума средней вероятности ошибки оптимальное решение принимается по максимуму отношения правдоподобия:

$$\frac{W(\bar{X} / \bar{\alpha}^1)}{W(\bar{X} / \bar{\alpha}^0)} \geq \frac{P_0}{P_1}, \quad (3)$$

здесь  $W(\bar{X} / \bar{\alpha}^1)$ ,  $W(\bar{X} / \bar{\alpha}^0)$  – функции правдоподобия соответственно сигнала и помехи, которые вычисляются по векторам наблюдений  $\bar{X}$ ;  $\bar{\alpha}^1$ ,  $\bar{\alpha}^0$  – параметры распределений сигнала и помехи;  $P_1$  и  $P_0$  – априорные вероятности присутствия и отсутствия сигнала.

Параметрическая априорная неопределенность обычно преодолевается с применением обучающих выборок сигналов, которые используются для оценивания неизвестных параметров плотностей распределения сигналов в рамках выбранной вероятностной модели сигналов. Однако специфика реальных задач радиомониторинга такова, что на обработку поступают неизвестные сигналы, для которых не представляется возможным получить обучающие выборки в силу их разнообразия.

Поэтому следует применить нетрадиционные методы обнаружения, которые основаны лишь на задании вероятностных характеристик помехи в частотном канале [4]. При этом обнаружение неизвестных сигналов в общем виде определяется следующим решающим правилом:

$$H^1 : W(\bar{X} / \bar{\alpha}^0) < \lambda \quad (4a)$$

– принимается гипотеза о наличии сигнала;

$$H^0 : W(\bar{X} / \bar{\alpha}^0) > \lambda \quad (4б)$$

– отвергается гипотеза о наличии сигнала.

Здесь  $\lambda$  – некоторое пороговое значение, определяемое из условия обеспечения заданного значения вероятности ложной тревоги;  $\bar{\alpha}^0$  – параметр многомерной плотности распределения помехи.

С учетом аналитического выражения для гауссовского распределения вектора наблюдений  $\bar{X}$  принятие решений с помощью решающего правила (4a), (4б) сводится к сравнению расстояния Малаханобиса с порогом:

$$H^1 : (\bar{X} - \bar{\mu}^0)^T (R^0)^{-1} (\bar{X} - \bar{\mu}^0) > \Delta, \quad (5a)$$

$$H^0 : (\bar{X} - \bar{\mu}^0)^T (R^0)^{-1} (\bar{X} - \bar{\mu}^0) \leq \Delta. \quad (5б)$$

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

На основе (5a), (5б) может быть получено решающее правило обнаружения в рамках описания наблюдений вероятностной моделью в виде ортогональных разложений, когда наблюдение  $\bar{X}$  представляется вектором коэффициентов разложения  $\bar{b}$  в некотором ортонормированном базисе:

$$H^1 : (\bar{b} - \bar{\mu}_b^0)^T (R_b^0)^{-1} (\bar{b} - \bar{\mu}_b^0) > \Delta_{\bar{b}}; \quad (6a)$$

$$H^0 : (\bar{b} - \bar{\mu}_b^0)^T (R_b^0)^{-1} (\bar{b} - \bar{\mu}_b^0) \leq \Delta_{\bar{b}}, \quad (6b)$$

где  $\bar{b}$ ,  $\bar{\mu}_b^0$ ,  $R_b^0$  – отображение соответственно  $\bar{X}$ ,  $\bar{\mu}^0$ ,  $R^0$  в координатную область, определяемую выбранным базисом. Выбирая базис Карунена-Лоэва, получаем следующее решающее правило:

$$H^1 : \sum_{j=1}^N \frac{(c_j - \mu_{jc}^0)^2}{(\sigma_{jc}^0)^2} > \Delta_c; \quad (7)$$

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

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

При обеспечении соответствующих нормировок, приводящих к равенству дисперсий в координатном представлении, может быть использовано более простое решающее правило:

$$H^1 : \sum_{j=1}^N (c_j - \mu_{jc}^0)^2 > \Delta_c; \quad (8)$$

$$H^0 : \sum_{j=1}^N (c_j - \mu_{jc}^0)^2 \leq \Delta_c.$$

Если решение принимается по выборке объемом  $v$  реализаций  $\bar{X}_v$ , решающее правило (7) принимает следующий вид:

$$H^1 : \sum_{r=1}^v \sum_{j=1}^N \frac{(c_j - \mu_{jc}^0)^2}{(\sigma_{jc}^0)^2} > \Delta_{cv}; \quad (9)$$

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

Выбирая описание наблюдений в виде совокупности координат энергетических спектров в некотором ортонормированном базисе, получаем решающее правило, основанное на сравнении евклидовых расстояний текущих оценок энергетического спектра наблюдений до эталонов:

$$H^1 : \sum_{j=1}^N (G_j - G_{jc}^0)^2 > \Delta_G; \quad (10)$$

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

Здесь эталоны  $G_j^0 = \frac{1}{n_0} \sum_{r=1}^{n_0} (c_{jr}^0 - \mu_{jc}^0)^2$ ,  $j = \overline{1, N}$  – оценки координат энергетического спектра помехи, найденные по обучающей выборке объемом  $n_0$

реализаций  $n_0$ ;  $G_j = \frac{1}{v} \sum_{r=1}^v (c_{jr} - \mu_{jc}^0)^2$ ,  $j = \overline{1, N}$  – текущая оценка энергетического спектра наблюдения, найденная по выборке объема  $v \ll n_0$ .

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

### 3. Исследования решающих правил обнаружения неизвестных сигналов

Для проверки работоспособности и сравнительного анализа рассмотренных решающих правил обнаружения неизвестных сигналов (5)-(10) проведены их исследования методом статистического моделирования. Для этого решающие правила реализованы программно. Статистические испытания проведены с помощью базовой выборки шести типов псевдослучайных сигналов связи с различным видом и параметрами модуляции [4]. Сигналы получены путем модуляции гармонического сигнала псевдослучайной последовательностью импульсов. Для каждого типа сигнала получены обучающие и контрольные выборки по 100 реализаций из 60 спектральных отсчетов ( $L = 60$ ) с помощью шестидесятиканального анализатора спектра параллельного типа при полосе анализа  $\Phi = 1,5$  кГц и полосе пропускания анализирующих фильтров  $\Delta f = 25$  Гц. Сформированные выборки реализаций спектрограмм сигналов с выхода анализатора спектра вводились в ЭВМ. Спектрограммы сигналов рассматривались как реализации случайного вектора наблюдений  $\bar{X}$  в приведенных решающих правилах обнаружения. Огибающие средних спектров указанных шести типов псевдослучайных сигналов связи приведены на рис. 1.

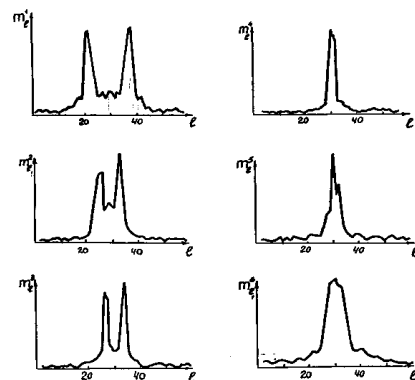


Рис. 1. Усредненные спектры псевдослучайных сигналов связи с различным видом и параметрами модуляции

В целях наглядной иллюстрации каждая реализация базовой выборки спектральных статистик сигналов представлена в двумерном пространстве дискриминантных базисных векторов, построенных по обучающим выборкам сигналов (рис. 2). Здесь хорошо видна раздельная локализация собственных областей каждого типа сигнала. Это дает трактовку и пояснение физического смысла предложенных решающих правил обнаружения неизвестных сигналов. Эта информация используется для построения собственной области помехового сигнала. В этих решающих правилах решение о появлении неизвестного сигнала принимается, если реализации этого сигнала не попадают в собственную область помехового сигнала.

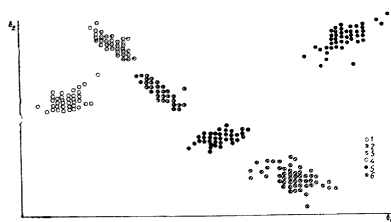


Рис. 2. Проекция реализаций спектрограмм шести типов сигналов в двумерное пространство дискриминантных базисных векторов

С использованием указанных выборок псевдослучайных сигналов связи путем статистического моделирования проведены исследования эффективности разных решающих правил обнаружения неизвестных сигналов (5)-(10). Для этого алгоритмы обнаружения сигналов реализованы программно на ЭВМ. По обучающим выборкам помеховых сигналов получены оценки параметров решающих правил и пороговые значения. Контрольные выборки сигналов использованы для получения оценок показателей качества обнаружения неизвестных сигналов методом статистических испытаний.

Приведем некоторые результаты исследований. В частности, для иллюстрации работоспособности решающих правил обнаружения в таблице приведены результаты обнаружения для решающего правила обнаружения (9), реализованного при  $N=6$ ,  $v=4$  и  $v=6$ . При этом использовались разные виды полезных (неизвестных) сигналов  $\bar{X}^1$  и помеховых сигналов  $\bar{X}^0$ . Эти полезные и помеховые сигналы определились различными комбинациями из описанной выше базовой выборки псевдослучайных сигналов связи в следующем виде: случай А –  $\bar{X}^1 = (\bar{X}_1 + \bar{X}_2 + \bar{X}_5)$ ,  $\bar{X}^0 = (\bar{X}_2 + \bar{X}_5)$ ; случай Б –  $\bar{X}^1 = (\bar{X}_2 + \bar{X}_5)$ ,  $\bar{X}^0 = (\bar{X}_2 + \bar{X}_3)$ ; случай В –

$\bar{X}^1 = (\bar{X}_2 + \bar{X}_3)$ ,  $\bar{X}^0 = (\bar{X}_2)$ . Пороговые значения  $\Delta_G^0$  были выбраны из условия обеспечения вероятности ложной тревоги  $\hat{P}_{(1/0)} = 0,02$ .

Оценки вероятностей пропуска неизвестных сигналов  $P_{(0/1)}$

Оценки значения $P_{(0/1)}$		
$v = 4$	$v = 6$	Вид $\bar{X}^1, \bar{X}^0$
0,08	0,006	Случай А
0,03	0,01	Случай Б
0,24	0,16	Случай В

Полученные результаты исследований подтверждают работоспособность предложенных решающих правил обнаружения неизвестных сигналов на фоне помехи в анализируемых частотных каналах.

### Выводы

1. Предложены нетрадиционные решающие правила обнаружения неизвестных сигналов на фоне помех, которые строятся с использованием информации лишь о помехе в частотных каналах. Эти решающие правила могут быть использованы в технологиях когнитивного радио для выявления свободных частотных каналов.

2. Приведены некоторые результаты экспериментальных исследований решающих правил обнаружения неизвестных сигналов, полученные путем статистического моделирования на выборках псевдослучайных сигналов связи с разным видом и параметрами модуляции. Результаты подтверждают работоспособность предложенного метода обнаружения неизвестных сигналов на фоне помехи.

**Литература:** 1. Wyglinski A. Cognitive Radio Communications and Networks. Academic Press, 2009. 736p. 2. Naykin S. Cognitive Dynamic Systems. Cambridge University Press, 2012. 322 p. 3. Слободянюк П.В., Благодарный В.Г. Радиомониторинг: вчера, сегодня, завтра. Прилуки: Аир-Поліграф, 2010. 352с. 4. Безрук В.М., Певцов Г.В. Теоретические основы проектирования систем распознавания сигналов для автоматизированного радиоконтроля. Харьков: Коллегиум, 2007. 430 с. 5. Zhuang Y., Memik G., and Grosspietsch J. Energy Detection Using Estimated Noise Variance for Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks // IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2008, Apr. 2008). 2008. P. 711–716. 6. Pawelczak P. Cognitive Radio: Ten Years of Experimentation and Development // IEEE Communications Magazine. 2011. Vol. 49, № 3. P. 90–100. 7. Tang H. Some Physical Layer Issues of Wide-band Cognitive Radio Systems // IEEE Int. Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (Baltimore, MD, Jun. 2005). 2005. P. 151–159. 8. D. de la Mata-Moya, M. P. Jarabo-Amores, M. Rosa-Zurera, J. C. Nieto Borge and F. Lopez-Ferreras. Combining MLPs and RBFNNs to Detect Sig-

nals With Unknown Parameters // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2009. Vol. 58, № 9. P. 2989-2995. 9. *Smitha K.G. and Vinod A.P.* Cluster based power efficient cooperative spectrum sensing under reduced bandwidth using location information // AEUE – International Journal of Electronics and Communications. 2012. Vol.66, № 8. P. 619-624.

**Transliterated bibliography:**

- [1] *Wyglinski A.* Cognitive Radio Communications and Networks. Academic Press, 2009. 736 p.
- [2] *Haykin S.* Cognitive Dynamic Systems. Cambridge University Press, 2012. 322 p.
- [3] *Slobodjanjuk P.V., Blagodarnyj V.G.* Radiomonitoring: vchera, segodnja, zavtra.- Priluki: Air-Poligraf, 2010. – 352s.
- [4] *Bezruk V.M., Pevcov G.V.* Teoreticheskie osnovy proektirovanija sistem raspoznavanija signalov dlja avtomatizirovannogo radiokontrolja.-Har'kov: Kollegium, 2007. 430 s.
- [5] *Zhuan Y., Memik G., and Grosspietsch J.* Energy Detection Using Estimated Noise Variance for Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks // IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2008, Apr. 2008). 2008. P. 711–716.
- [6] *Pawelczak P.* Cognitive Radio: Ten Years of Experimentation and Development // IEEE Communications Magazine. 2011. Vol. 49, № 3. P. 90-100.
- [7] *Tang H.* Some Physical Layer Issues of Wide-band Cognitive Radio Systems // IEEE Int. Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (Baltimore, MD, Jun. 2005). 2005. P. 151–159.

- [8] *D. de la Mata-Moya, M. P. Jarabo-Amores, M. Rosa-Zurera, J. C. Nieto Borge and F. Lopez-Ferreras.* Combining MLPs and RBFNNs to Detect Signals With Unknown Parameters // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2009. Vol. 58, № 9. P. 2989-2995.
- [9] *Smitha K.G. and Vinod A.P.* Cluster based power efficient cooperative spectrum sensing under reduced bandwidth using location information // AEUE – International Journal of Electronics and Communications. 2012. Vol.66, № 8. P. 619-624.

Поступила в редколлегию 12.03.2017

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

**Безрук Валерий Михайлович**, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой ИСИ ХНУРЭ. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Науки, 14, тел. 0677223118, e-mail: [valeriy\\_bezruk@ukr.net](mailto:valeriy_bezruk@ukr.net).

**Иваненко Станислав Андреевич**, аспирант, ассистент кафедры ИСИ ХНУРЭ. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Науки, 14, тел. 0993249717, e-mail: [sta-ivanenko@yandex.ru](mailto:sta-ivanenko@yandex.ru).

**Bezruk Valeriy**, doctor of technical Sciences, professor, head of the Information and Network Engineering Department, Kharkiv National University of Radioelectronics. Address: Ukraine, 61166, Kharkov, Nauka Avenue, 14, e-mail: [valeriy\\_bezruk@ukr.net](mailto:valeriy_bezruk@ukr.net).

**Ivanenko Stanislav**, PhD student, assistant of Information and Network Engineering Department, Kharkiv National University of Radio Electronics. Address: Ukraine, 61166, Kharkov, Nauka Avenue, 14, tel. 0993249717, e-mail: [sta-ivanenko@yandex.ru](mailto:sta-ivanenko@yandex.ru)