

29. Scientists from ITMO University proposed a modification of the quantum encryption system with a compact detector. URL: <https://news.itmo.ru/ru/news/9580/> (accessed: 29.09.2023). (In Russ.)
30. Quantum communications to protect communication lines. URL: https://www.smarts.ru/media/filer_public/a8/a0/a8a034b5-bdb6-4762-8c7b-b1778019c77c/22.pdf (accessed: 29.09.2023). (In Russ.)
31. Quantum cryptography / encryption. URL: [https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Квантовая_криптография_\(шифрование\)](https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Квантовая_криптография_(шифрование)). (accessed: 29.09.2023). (In Russ.)
32. ViPNet QSS (Quantum Security System). URL: [https://www.tadviser.ru/index.php/%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%B4%D1%83%D0%BA%D1%82:ViPNet_QSS_\(Quantum_Security_System\)](https://www.tadviser.ru/index.php/%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%B4%D1%83%D0%BA%D1%82:ViPNet_QSS_(Quantum_Security_System)) (accessed: 29.09.2023).
33. Gusev D. Quantum products Info-TeKS. Quantum technology and security. URL: <https://infotecstechfest.ru/upload/iblock/20f/tvtc2bzrgt8sr9fk27myjwo1o4yudjww.pdf> (accessed: 29.09.2023). (In Russ.)
34. The first experimental quantum network in Russia. URL: https://mtuci.ru/about_the_university/news/4813/ (accessed: 29.09.2023). (In Russ.)
35. MTUSI implemented wireless quantum communication based on serial domestic equipment. URL: <https://naked-science.ru/article/column/v-mtusi-realizovali-besprovodnuyu-kvantovuyu> (accessed: 29.09.2023). (In Russ.)

Received 02.10.2023

ТЕХНОЛОГИИ РАДИОСВЯЗИ, РАДИОВЕЩАНИЯ И ТЕЛЕВИДЕНИЯ

УДК 543.42

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРОГОВОГО РЕШЕНИЯ ДЛЯ КАНАЛА С РЕЛЕЕВСКИМИ ЗАМИРАНИЯМИ ПРИ ЗОНДИРОВАНИИ СПЕКТРА КОГНИТИВНОГО РАДИО ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ ДЕТЕКТОРОМ

Елисеев С.Н.¹, Степанова Н.В.²

¹*Московский технический университет связи и информатики, Москва, РФ*

²*Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ*

E-mail: fgupnrsnr@yandex.ru, puhleniw@mail.ru

Характеристики систем зондирования спектра и обнаружение занятости полос спектра в когнитивном радио являются одними из основных аспектов исследования. В случае, когда рассматривается система, в которой первичный пользователь меняется или присутствуют первичные пользователи нескольких типов, используют энергетический детектор. Для работы энергетического детектора основными параметрами, которые определяют вероятностные характеристики обнаружения (вероятность обнаружения пользователя, вероятность ошибки вида «ложная тревога» и вероятность ошибки вида «пропуск цели») будут зависеть от правильного определения порога решений. В данной статье просматривается аналитический подход к определению нормированного порога решений. Цель – проанализировать и определить оптимальное значение порога решений для энергетического детектора в канале с релеевскими замираниями. Рассмотрена система зондирования спектра в когнитивном радио. Определены нормированные величины порогового решения для канала с релеевскими замираниями. Представлены графические иллюстрации результатов анализа и вычислений. Полученные результаты определения пороговых решений являются хорошим приближением для расчета характеристик систем зондирования в когнитивном радио в каналах с релеевскими замираниями, обеспечивая возможность с большей вероятностью определить полосы частот, свободные от первичных пользователей, за счет чего повышается эффективность использования радиочастотного спектра.

Ключевые слова: зондирование спектра, когнитивное радио, Релеевские замирания, энергетический детектор, оптимальная величина порога

Введение

Рост запросов на беспроводные услуги за последние несколько лет иллюстрирует огромный и постоянно растущий спрос бизнес-сообщества, населения и государства. С ростом коммуникаци-

онных приложений спектр становится все более перегруженным. Существующая система назначает разные полосы частот различным пользователям или поставщикам услуг, а для работы в этих полосах необходимо наличие лицензий.

Таким образом, даже если спектр может быть распределен конкретным пользователям, это не обязательно гарантирует, что он используется наиболее эффективно в любое время. Оказывается, что значительная часть радиочастотного спектра может использоваться неэффективно. Это и послужило причиной того, что нелегитимные пользователи могли использовать лицензированные полосы, предполагая, что это не вызовет никаких помех. Когнитивное радио рассматривается как новый подход, который может справиться со спектральными ограничениями. Этот подход предназначен для определения факта использования конкретного сегмента радиочастотного спектра в настоящее время и быстрого перехода к временно неиспользуемому спектру, без вмешательства в передачи других пользователей.

Описание системы зондирования спектра

Зондирование спектра (ЗС) – это ключевая процедура в технологии когнитивного радио с динамическим доступом вторичных пользователей (ВП) к полосе частот, предназначенной для работы лицензированных первичных пользователей (ПП). Зондирование спектра позволяет обнаруживать полосы частот, свободные от сигналов, работающих ПП [1]. Сигнал для ЗС может быть записан как:

$$y_i(n) = \begin{cases} w(n), n \rightarrow H_0 \\ h_i s(n) + w(n), n \rightarrow H_1 \end{cases}, \quad (1)$$

где $y_i(n)$ – сигнал, принимаемый i -ым ВП на интервале зондирования; $0 \leq n \leq N$; $w(n)$ – сигнал помехи типа белый гауссов шум (БГШ); h_i – коэффициент передачи по радиоканалу от ПП к i -му ВП; $s(n)$ – сигнал, передаваемый ПП; H_0 – состояние радиоканала в отсутствии сигнала $s(n)$; H_1 – состояние радиоканала при наличии сигнала $s(n)$.

Задача ЗС состоит в следующем: по сигналу $y_i(n)$ на интервале длительностью N обнаружить наличие сигнала $s(n)$. Таким образом, задача ЗС является двухальтернативной задачей статистической теории проверки гипотез [1]. Решение в пользу одной из двух гипотез выносится по правилу:

$$\begin{aligned} Y_i > \lambda & \text{ решение } H_1, \\ Y_i < \lambda & \text{ решение } H_0, \end{aligned} \quad (2)$$

где λ – значение порога решения; Y_i – функционал, обладающий свойствами достаточной статистики, т.е. содержащий в сжатом виде всю информацию, которая имела в сигнале $y_i(n)$ об истинности гипотез H_0 и H_1 [2]. В случае энергетического детектора (ЭД):

$$Y_i = \sum_{n=0}^N |y_i(n)|^2. \quad (3)$$

В ряде работ рассматривался критерий оптимизации порога решения в форме суммарного значения вероятности ошибочного решения P_e :

$$P_e = P_m + P_{fa} = P(Y_i < \lambda / H_1) + P(Y_i > \lambda / H_0), \quad (4)$$

где $P_m = 1 - P_d$ – вероятность ошибки вида, «пропуск цели», когда фиксируется, как истинная ги-

потеза H_0 , при работающем ПП;

$P_d = P(Y_i > \lambda / H_1)$ – вероятность обнаружения, работающего ПП;

P_{fa} – вероятность ошибки вида «ложная тревога», когда фиксируется, как истинная гипотеза H_1 , при отсутствующем сигнале ПП.

В работе [2] получены аналитические выражения λ_0 – оптимального значения порога, которое минимизирует (4) по условию $\frac{\partial P_e}{\partial \lambda} = 0$ в канале с $h_i = \text{const}$, т.е. в канале только с аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ). Тогда λ_0 в таком случае – функция трех аргументов N , σ_ω^2 – дисперсии АБГШ и соответственно значение γ отношения сигнал/шум (SNR) равняется:

$$\gamma = |h_i|^2 \times \frac{\sigma_s^2}{\sigma_\omega^2} = |h_i|^2 \times \gamma_T, \quad (5)$$

где σ_s^2 – мощность отсчета сигнала $s(n)$, σ_ω^2 – мощность шумового отсчета, γ_T – отношение сигнал/шум на передающей стороне радиоканала.

$$\lambda_0 = \frac{N \sigma_\omega^2}{2} \left(1 \pm \sqrt{1 + 2\gamma \left(1 + \frac{(1 + 2\gamma) \ln(1 + 2\gamma)}{N \gamma^2} \right)} \right), \quad (6)$$

где $\ln$ – натуральный логарифм.

Определение порогового решения для канала с Релеевскими замираниями

Рассматривая каналы с замираниями, требуется в (4) переходить к $\overline{P_m}$ – средней величине вероятности «пропуск цели», являющейся математическим ожиданием P_m , полученным усреднением по распределению случайной величины γ . Для рассматриваемых в работе Релеевских замираний, γ имеет экспоненциальное распределение [1; 2]:

$$f(\gamma) = \frac{1}{\bar{\gamma}} e^{-\gamma/\bar{\gamma}}, \quad (7)$$

где $\bar{\gamma}$ – среднее значение SNR.

Точное выражение для λ_{Op} – значение оптимального порога для усредненного значения $\overline{P_e} = \overline{P_m} + P_{fa}$ (формула 9[2]), получить в компактном виде, пригодном для анализа не удается.

Альтернативный путь заключается в усреднении значений λ_0 из (6) по распределению γ из (7).

Для упрощения интегрирования и получения более компактного результата учтем следующие обстоятельства:

1) случай низких значений SNR, $\gamma < 1$ проанализирован в [2], где показано, что $\bar{P}_e$ имеет минимум около значения $\lambda_{Op} \approx N\sigma_\omega^2$;

2) вклад слагаемого $\frac{(1+2\gamma)\ln(1+2\gamma)}{N\gamma^2}$ в значения порога (5) для $\gamma \geq 1$ и $N=10$ не превышает 6,6% от точных значений λ_0 , при $N=50$ менее 2,5%, с ростом SNR эта погрешность уменьшается.

В результате приближенное значение нормализованного искомого параметра $\lambda_{On} = \frac{\lambda_{Op}}{N\sigma_\omega^2}$ вычисляется следующим образом:

$$\lambda_{On} = \frac{1}{2} \int_0^\infty (\sqrt{1+2\gamma\bar{\gamma}}) \frac{1}{\gamma} e^{\gamma/\bar{\gamma}} d\gamma =$$

$$= \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \times \frac{\sqrt{a}(\sqrt{\pi} \operatorname{erfc}(\frac{1}{\sqrt{a}}) + \frac{2e^{-\frac{1}{a}}}{\sqrt{a}})e^{\frac{1}{a}}}{2}, \quad (8)$$

где $a = \bar{\gamma}$. На рисунке 1 представлен график значений по параметру λ_{Op} , рассчитанный по формуле (8).

Результаты

Можно убедиться, что результирующая функция (8) в диапазоне значений аргумента $1 \leq \bar{\gamma} < \infty$ является непрерывной, монотонно-возрастающей выпуклой функцией, и, следовательно, в первом приближении она может быть аппроксимирована $y(\bar{\gamma})$ линейно-ломанной функцией для двух интервалов $\bar{\gamma}$:

$$y(\bar{\gamma}) = k_1\bar{\gamma} + b_1 \quad \text{для} \quad 1 \leq \bar{\gamma} < 11, \\ y(\bar{\gamma}) = k_2\bar{\gamma} + b_2 \quad \text{для} \quad 11 \leq \bar{\gamma} < \infty. \quad (9)$$

По логике определения порогового значения, естественно выбрать в (9) критерий наилучшего равномерного приближения [5]: параметры аппроксимирующей функции определяются таким образом, чтобы в интервале приближения наибольшее по абсолютной величине отклонение функции от непрерывной аппроксимирующей функции было бы минимально возможным. При этом наибольшее по абсолютной величине отклонение аппроксимирующего полинома (9) (в данном случае степени $n=1$) от функции (8) будет минимально возможным, если в интервале приближения – это отклонение не менее чем $n+2$ раза принимает свои последовательно чередующиеся предельные зна-

чения $+/-L$. В нашем случае, учитывая выпуклый характер функции (8) имеем $-L, +L, -L$.

Процедуру определения параметров линейно-ломанной аппроксимации (9) рассмотрим подробно на примере интервала $\bar{\gamma}$

Шаг 1. Определим значения коэффициентов в уравнении хорды, пересекающей кривую (8) в точках $\bar{\gamma}=1, 11$.

Шаг 2. Определим Δ – максимальное отклонение значений функции (8) от значений вышеопределенной хорды на интервале $\bar{\gamma}$

Шаг 3. Сдвинем по оси ординат линейную функцию (9), добавив к свободному члену b_1 слагаемое $\Delta/2$.

Полученная линейная функция, как можно видеть, является наилучшей линейной аппроксимацией функции (8)

$$y(\bar{\gamma}) = k_1\bar{\gamma} + b_1 + \Delta/2.$$

В соответствии с исходными данными, приведенными на рисунке 1, были определены значения коэффициентов в уравнениях (9):

$$k_1 = 0,089, b_1 = 1,147, k_2 = 0,0542, b_2 = 1,49.$$

Соответствующий график приведен на рисунке 1а.

Для вычисления усредненного значения вероятности ошибки $\bar{P}_e$ в канале с Релеевскими замираниями воспользуемся формулами (1) и (6) (последняя получена из общей формулы замираний Накагами) из [2], а так же свойствами Q-функции:

$$Q(x) = 1 - Q(-x); Q(x) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right);$$

$$\bar{P}_e = 1 - \exp\left[\frac{1}{2N\bar{\gamma}^2} + \frac{1}{\lambda}(1 - \lambda_{On})\right] \times$$

$$\times Q(\sqrt{N} * (1 - \lambda_{On}) + \frac{1}{N\bar{\gamma}}). \quad (10)$$

Для расчета $\bar{P}_e$ берем λ_{On} , рассчитанный по формуле (8), сначала $N=10$, потом считаем при $N=50$. Полученные графические иллюстрации $\bar{P}_e$ приведены ниже. Из которых можно видеть, что с ростом N , уменьшается вероятность ошибки, так как при больших значениях N увеличивается точность расчетов.

Порог, используемый в алгоритмах обнаружения на основе детектора энергии, зависит от величины мощности шума. Следовательно, небольшая ошибка оценки мощности шума приводит к значительным потерям производительности системы зондирования [6]. В [7] рассмотрена методология определения оценочного значения, чтобы выбрать порог, при котором будет достигнута постоянная частота ложных срабатываний. Ите-

рациональный алгоритм был предложен для поиска порога решения в [8]. Пороговое значение определяется итеративно для достижения указанного уровня достоверности, то есть вероятности ложных срабатываний. Прямые методы, основанные на измерениях энергии, обсуждались в [9] для неизвестных сценариев мощности сигнала. Данный метод адаптивно оценивает уровень шума. Следовательно, он подходит для практических случаев, когда дисперсия шума неизвестна.

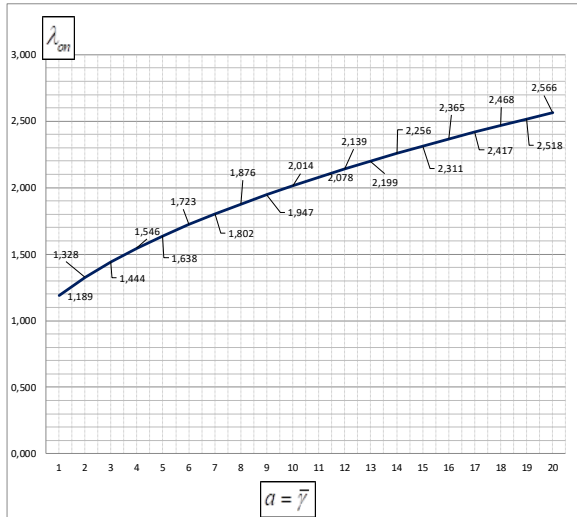


Рисунок 1. График значений по параметру λ_{On}

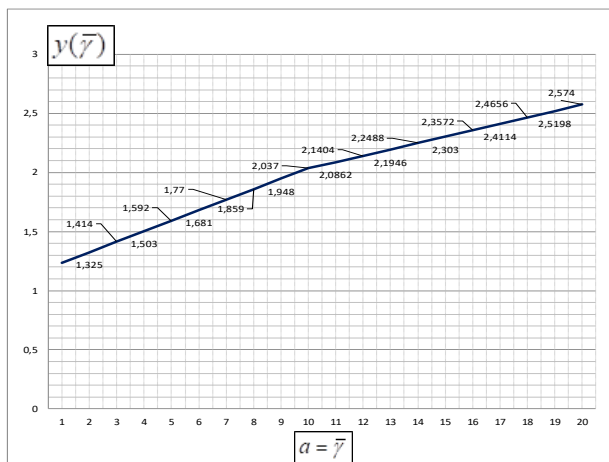


Рисунок 1а. График линейно-ломаной аппроксимации $y(\bar{\gamma})$

Поэтому при получении формулы (7) авторы полагали величину мощности шума σ_w^2 постоянной детерминированной величиной. В реальных условиях, по целому ряду причин [4; 5] мощность шума может быть определена с некоторой степенью неопределенности.

При анализе характеристик энергетического детектора [4; 5] применяют модель ограниченной неопределенности: точное или номинальное значение σ_w^2 лежит в ограниченном интервале:

$$\frac{\sigma_w^2}{\rho} \leq \sigma_w^2 \leq \rho \sigma_w^2, \quad (11)$$

где ρ – параметр, характеризующий степень неопределенности σ_w^2 .

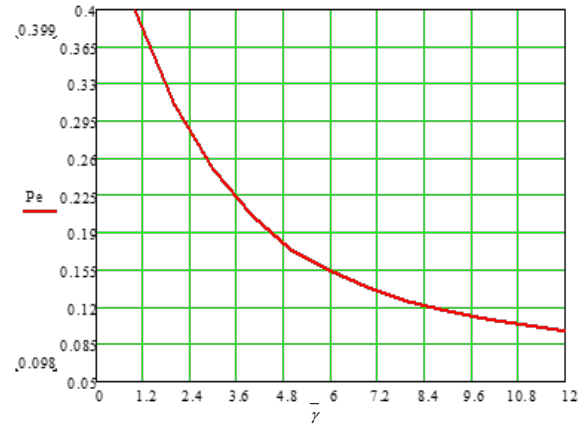


Рисунок 2. График значения вероятности ошибки в канале с Релеевскими замираниями при $N=10$

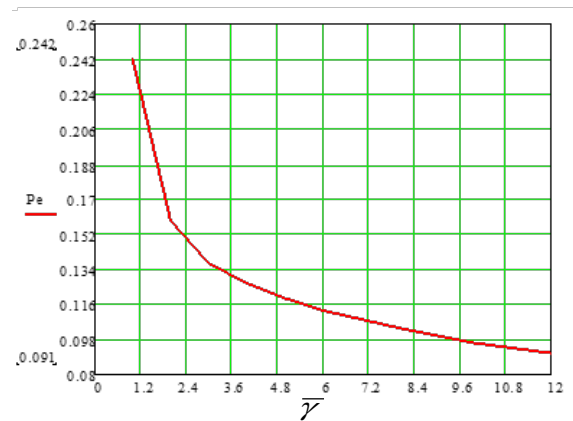


Рисунок 3. График значения вероятности ошибки в канале с Релеевскими замираниями при $N=50$

Распределение случайной величины σ_w^2 подчиняется равномерному закону распределения [5]. Таким образом, значения $\bar{\gamma}$ в (10) должны рассматриваться в интервале $\frac{\bar{\gamma}}{\rho} \leq \bar{\gamma} \leq \rho \bar{\gamma}$.

Ниже приведены графики значений вероятности ошибки в канале с Релеевскими замираниями на рисунке 4:

- 1) $\bar{P}_e$ при $N=10$; $\bar{\gamma} = 1 \dots 12$;
- 2) $\bar{P}_{e1}$ при $N=10$; $\bar{\gamma} = \bar{\gamma} / \rho$, где $\rho = 1,5$;
- 3) $\bar{P}_{e2}$ при $N=10$; $\bar{\gamma} = \rho \bar{\gamma}$, где $\rho = 1,5$.

На рисунке 5 приведены графики значений вероятности ошибки в канале с Релеевскими замираниями:

- $\bar{P}_e$ при $N=50$; $\bar{\gamma} = 1 \dots 12$;
- $\bar{P}_{e1}$ при $N=50$; $\bar{\gamma} = \bar{\gamma} / \rho$, где $\rho = 1,5$;
- $\bar{P}_{e2}$ при $N=50$; $\bar{\gamma} = \rho \bar{\gamma}$, где $\rho = 1,5$.

По графикам на рисунке 4 видно, что более низкая вероятность ошибки будет $\bar{P}_e 2$ при $\bar{\gamma} = \rho \bar{\gamma}$ и $\bar{P}_e$ при $\bar{\gamma} = 1 \dots 12$. Значения у них почти одинаковые, чего нельзя сказать про $\bar{P}_e 1$. Здесь значение вероятности ошибки больше. Проанализировав следующий график, на рисунке 5, и сравнив его с первым графиком на рисунке 4, можно отметить, что при одинаковых λ_{op}, ρ , вероятность ошибки меньше при большем значении N . Это связано с тем, что чем больше мы берем точек, тем более достоверным и точным получается результат. Также при большем значении ρ и в интервале от $\bar{\gamma} \leq \rho \bar{\gamma}$ вероятностная характеристика лучше.

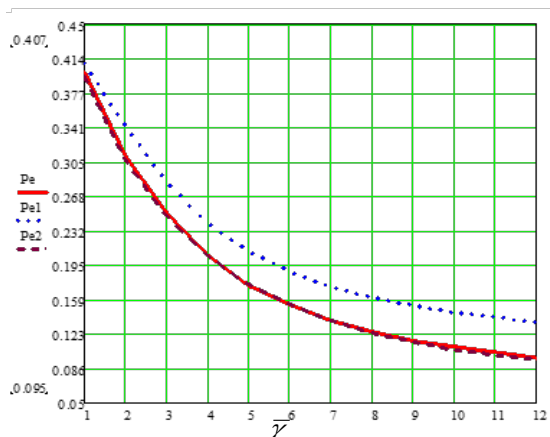


Рисунок 4. Графики значений вероятности ошибки в канале с Релеевскими замиряниями, при $N=10$

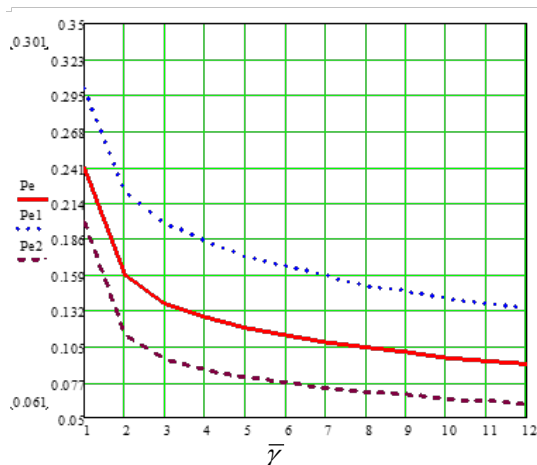


Рисунок 5. Графики значений вероятности ошибки в канале с Релеевскими замиряниями: при $N=50$

Заключение

Зондирование спектра на основе детектора, требующее минимум априорных сведений о ПП, демонстрирует весьма устойчивое качество характеристик обнаружения в широком диапазоне значений SNR. Изменения в этом показателе могут быть обусловлены как ограниченной точностью мониторинга свойств канала и мощности шума, так и объективной природой нестационарности ра-

диоокружения [10]. Полученные в данной работе результаты позволяют прогнозировать диапазон ожидаемых характеристик обнаружения и граничные их значения в сценариях «наихудшего случая».

Литература

1. Letaif K., Zhang W. Cooperative Communications for Cognitive Radio Networks // Proceeding of the IEEE. 2009. Vol. 97, no. 5. P. 878–893.
2. Atapattu S., Tellambura Ch., Jiang H. Spectrum Sensing via Energy Detector in Low SNR // Proceeding on IEEE International Conference on Communications. 2011. DOI:10.1109/ICC.2011.5963316
3. Eliseev S.N., Stepanova N.V., Trifonova L.N. Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks with Rayleigh fading // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы (WECONF-2020): материалы XXIII международной научной конференции. Санкт-Петербург, 2020. С. 224–235.
4. Najafabadi Z.H. Impact of wireless channel uncertainty upon M-ary distributed detection systems // Stars library university of Central Florida, 2016. P. 1–29.
5. Liu Y., Li F., Hu G. Performance Analysis of Cooperative Spectrum Sensing under Noise Uncertainty // Applied Mathematics and Information Sciences. 2012. no. 6-2S. P. 587S–593S.
6. Sahai A., Hoven N., Tandra R. Some fundamental limits on cognitive radio // Allerton Conference on Communication, Control and Computing. Monticello, Illinois, 2004. P. 1–11.
7. A scalable dynamic spectrum allocation system with interference mitigation for teams of spectrally agile software defined radios/ M.P. Oliveri [et al.] // IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks. Baltimore, 2005. P. 170–179.
8. A framework for RF spectrum measurements and analysis/ F. Weidling [et al.] // IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks. Baltimore, 2005. Vol. 1. P. 573–576.
9. Spectrum sensing with forward methods/ J. Lehtomäki [et al.] // IEEE Military Communications Conference. Washington, 2006. P. 1–7.
10. Tang H. Some physical layer issues of wide-band cognitive radio systems // IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks. Baltimore, 2005. P. 151–159.

Получено 16.05.2023

Елисеев Сергей Николаевич, д.т.н., профессор, профессор кафедры теории электрических цепей Московского технического университета связи и информатики. 123423, Российская Федерация, г. Москва, Северо-Западный Административный округ, ул. Народного Ополчения, 32. Тел. +7 937 649 06 35. E-mail: fgupnrsnr@yandex.ru

Степанова Наталья Вениаминовна, старший преподаватель кафедры радиоэлектронных систем Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики. 443010, Российская Федерация, г. Самара, ул. Л. Толстого, 23. Тел. +7 917 115 71 50. E-mail: puhleniw@mail.ru

DETERMINATION OF THE THRESHOLD SOLUTION FOR A CHANNEL WITH RAY-LEIG FADING WHEN PROBING THE COGNITIVE RADIO ENERGY DETECTOR SPECTRUM

Eliseev S.N.¹, Stepanova N.V.²

¹Moscow technical university of communications and informatics, Moscow, Russian Federation

²Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russian Federation

E-mail: fgupnrsnr@yandex.ru, puhleniw@mail.ru

Spectrum sensor system performance and detection of spectrum band occupancy in cognitive radio are among of the main research aspects. When considering a system in which the primary user changes or there are multiple types of primary users, an energy detector is used. For energy detector operation, the main parameters that determine probabilistic characteristics of detection (probability of user detection, probability of a «false alarm» error and probability of a «missing target» error) will depend on the correct determination of the decision threshold. This article reviews an analytical approach to the normalized decision threshold determination. The purpose is to analyze and determine the optimal decision threshold value for an energy detector in a channel with Rayleigh fading. A spectrum sensing system in cognitive radio is considered. Normalized values of the threshold solution for a channel with Rayleigh fading are determined. Graphic illustrations of the analysis results and calculations are presented. Results obtained for determining threshold solutions may be considered a proper approximation for calculating the characteristics of sensing systems in cognitive radio in channels with Rayleigh fading, providing the opportunity to determine frequency bands free of primary users more likely, thereby increasing the efficiency of use of the radio frequency spectrum.

Keywords: *spectrum sensing, cognitive radio, Rayleigh fading, energy detector, optimal threshold value*

DOI: 10.18469/ikt.2023.21.1.10

Eliseev Sergey Nikolaevich, Moscow Technical University of Communications and Informatics, 32, People's Militia Street, Moscow, 123423, Russian Federation; Professor of Electric Circuit Theory Department, Doctor of Technical Sciences, Professor. Tel. +7 937 649 06 35. E-mail: fgupnrsnr@yandex.ru

Stepanova Natalya Veniaminovna, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation; Senior teacher of Radioelectronic Systems the Department. Tel. +7 917 115 71 50. E-mail: puhleniw@mail.ru

References

1. Letaif K., Zhang W. Cooperative Communications for Cognitive Radio Networks. *Proceeding of the IEEE*, 2009, vol. 97, no. 5, pp.878–893.
2. Atapattu S., Tellambura Ch., Jiang H. Spectrum Sensing via Energy Detector in Low SNR. *Proceeding on IEEE International Conference on Communications*, 2011, DOI:10.1109/ICC.2011.5963316.
3. Eliseev S.N., Stepanova N.V., Trifonova L.N. Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks with Rayleigh fading. *Volnovaya elektronika i infokommunikacionnye sistemy*

- (WECONF-2020): *materialy XXIII mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii*. Saint Petersburg, 2020, pp. 224–235. (In Russ.)
4. Najafabadi Z.H. Impact of wireless channel uncertainty upon M-ary distributed detection systems. Stars library university of Central Florida, 2016, pp. 1–29.
 5. Liu Y., Li F., Hu G. Performance Analysis of Cooperative Spectrum Sensing under Noise Uncertainty. *Applied Mathematics and Information Sciences*, 2012, no. 6-2S, pp.587S–593S.
 6. Sahai A., Hoven N., Tandra R. Some fundamental limits on cognitive radio. *Allerton Conference on Communication, Control, and Computing*. Monticello, Illinois, 2004, pp. 1–11.
 7. Olivieri M.P. et al. A scalable dynamic spectrum allocation system with interference mitigation for teams of spectrally agile software defined radios. *IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*. Baltimore, 2005, pp.170–179.
 8. Weidling F. et al. A framework for RF spectrum measurements and analysis. *IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*. Baltimore, 2005, vol. 1, pp. 573–576.
 9. Lehtomäki J. et al. Spectrum sensing with forward methods. *IEEE Military Communications Conference*. Washington, 2006, pp. 1–7.
 10. Tang H. Some physical layer issues of wide-band cognitive radio systems. *IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*. Baltimore, 2005, pp.151–159.

Received 16.05.2023

УДК 681.518.5

МЕТОД ИТЕРАЦИОННОГО СОВМЕЩЕНИЯ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ СИГНАЛОВ НА БАЗЕ ЛИНЕАРИЗАЦИИ ДЛЯ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

Диязитдинов Р.Р.

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ

E-mail: r.diyazitdinov@psuti.ru

Представлен метод совмещения телевизионных сигналов для систем технического зрения на базе линеаризации. Актуальность разработанного метода заключается в уменьшении погрешности при совмещении сигналов на фоне помех, возникающих из-за изменения условий освещенности, а также в обеспечении высокой скорости обработки. Показано, что идея совмещения заключается в замене в математической модели совмещаемых сигналов тригонометрических функций на приближенные значения, и в добавлении в модель двух переменных – аддитивной и мультипликативной составляющей. Оценка всех параметров совмещения проводится в результате решения системы линейных уравнений, которая определяется в результате разложения совмещаемого сигнала в ряд Тейлора. Проведен эксперимент, показывающий корректное совмещение телевизионных сигналов с помощью предложенного метода, а также сделано сравнение с методом полного перебора по показателям погрешности измерения и скорости обработки. Отмечено, что работа будет полезна для разработчиков измерительных систем технического зрения, в которых обработка ведется в режиме реального времени.

Ключевые слова: совмещение, итерационный, телевизионный сигнал, линеаризация, техническое зрение, оптический поток, аддитивная и мультипликативная составляющая

Введение

Обработка сигналов систем видеонаблюдения, и, в том числе, технического зрения, является перспективным направлением в науке и промышленной технике.

Телевизионный сигнал обладает высокой информативностью по сравнению с сигналами от датчиков (акселерометров, гироскопов, одометров и т.д.). Эта особенность позволяет исполь-

зовать телевизионные сигналы для построения интеллектуальных систем технического зрения. Одной из важных задач при обработке является совмещение сигналов. Эта задача возникает при распознавании объектов, слежении за движущимися объектами, определении их положения, формировании панорамных изображений, сжатии видеосигналов и т.д.

Развитие современной вычислительной техники позволяет решать многие задачи обработки