

Кооперативное зондирование спектра в когнитивных радиосетях с регенеративной ретрансляцией сигналов в канале доставки

С.Н. Елисеев¹, Л.Н. Трифонова², Н.В. Степанова²

¹ Московский технический университет связи и информатики
111024, Россия, г. Москва,
ул. Авиамоторная, 8а

² Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики
443010, Россия, г. Самара,
ул. Л. Толстого, 23

Аннотация – Зондирование спектра на частотах «белых пятен» является важной функцией для сетей когнитивного радио. Характеристики обнаружения лицензированных пользователей одиночными вторичными пользователями будут ухудшаться под влиянием замираний в радиоканалах, как в каналах зондирования, так и каналах доставки результатов. Надежное обнаружение лицензируемых первичных пользователей реализуется на базе кооперации вторичных пользователей – кооперативного зондирования спектра. В статье рассмотрена возможность построения канала доставки по схеме регенеративной ретрансляции «жестких» однобитовых локальных решений в форме двоичной фазовой модуляции сигналов от удаленных вторичных пользователей на центральную станцию, которая формирует глобальное решение о результате зондирования. Определены потенциальная величина выигрыша схемы с ретрансляцией по отношению к схеме с прямой, непосредственной передачей и условия оптимального размещения ретранслятора в каналах с релейскими замираниями.

Ключевые слова – когнитивные радиосети, спектральное зондирование, регенеративная ретрансляция, битовая вероятность ошибок, BPSK, релейские замирания.

Введение

Кооперативное зондирование спектра в настоящее время рассматривается как основной метод динамического доступа к полосе частот радиочастотного спектра для пользователей сетей когнитивного радио (ВП – вторичных пользователей). В условиях реальной радиочастотной обстановки, в частности наличия зон затенения, препятствий распространения радиоволн, замираний радиосигнала, не всегда возможно надежно обнаружить в зоне покрытия сети когнитивного радио (КРС) лицензированного первичного пользователя (ЛП), то есть решить задачу зондирования спектра [1]. В кооперативном зондировании спектра (КоЗС) отдельные ВП по разрешению центральной станции (ЦС) циклически выполняют мониторинг частотной полосы с целью обнаружить в ней присутствие излучения ЛП. На языке статистической проверки гипотез каждый i -й ВП формирует сигнал локального решения D_i либо о наличии ЛП (истинности гипотезы H_1), либо об отсутствии ЛП (истинности гипотезы H_0). Последнее решение означает разрешение возможности допуска ВП к работе в зондируемой полосе частот. Сигналы локальных решений вторичных пользователей по каналу доставки сообщений передают на ЦС, в которой выполняется «слияние» локальных ре-

шений по определенному правилу для получения общего «глобального» решения о начале работы всех ВП.

Описание системы КоЗС

Обобщенная структура схемы КоЗС приведена на рис. 1.

Когда ВП распределены на большой площади зоны покрытия, характеристики достоверности сообщений, получаемых на ЦС от части этих ВП, являются неудовлетворительными. Пример такой ситуации показан на рис. 2.

Как это следует из рис. 2, значительная доля ВП расположена в пределах одного кластера – ограниченной части от всей зоны покрытия КРС. В случае неудачного расположения этого кластера по условиям радиообстановки (наличия препятствий, затенений и глубоких замираний) в канале зондирования, или канале доставки, или в обоих каналах сразу, его вклад в эффект КоЗС может оказаться недостаточным для получения достоверных характеристик обнаружения. Предположим, что в то же время прочие ВП распределены подобно ВП1, то есть рядом с ЦС, но удаленно от ЦС и так же, как ВП2: далеко от ЦС, но недалеко от ЦС. Тогда ВП1 и ему подобные, имея, в силу близости к ЦС, достоверные результаты зонди-

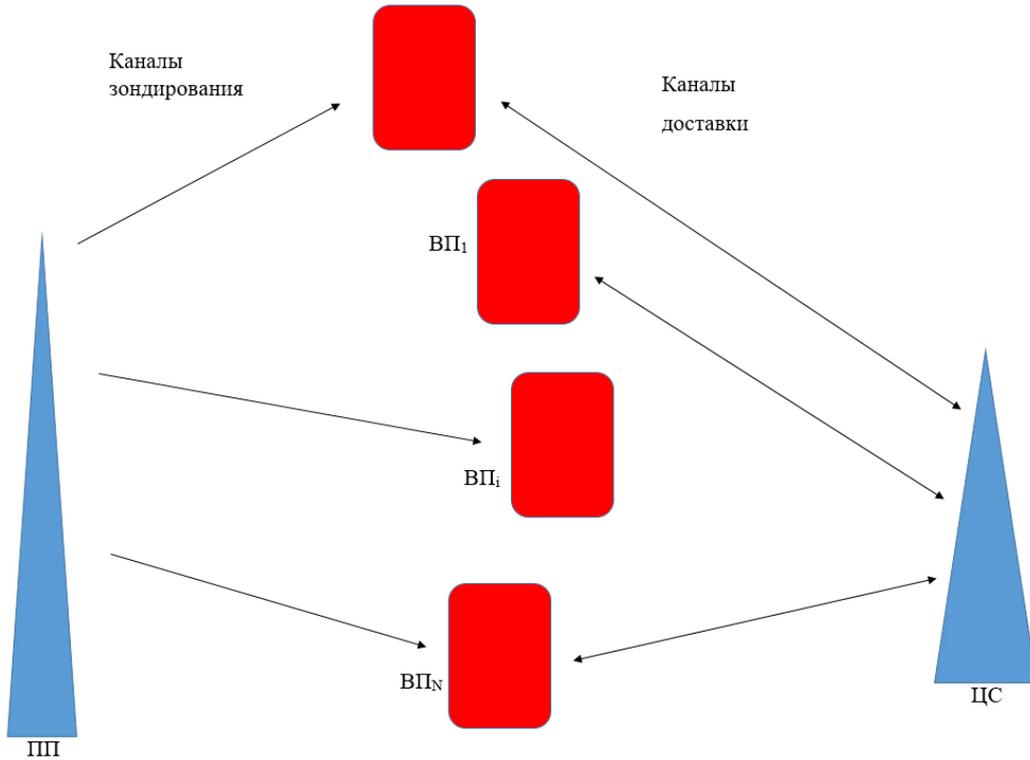


Рис. 1. Обобщенная структурная схема кооперативного зондирования спектра в сети когнитивного радио
Fig. 1. Generalized block diagram of cooperative spectrum sensing in the cognitive radio network

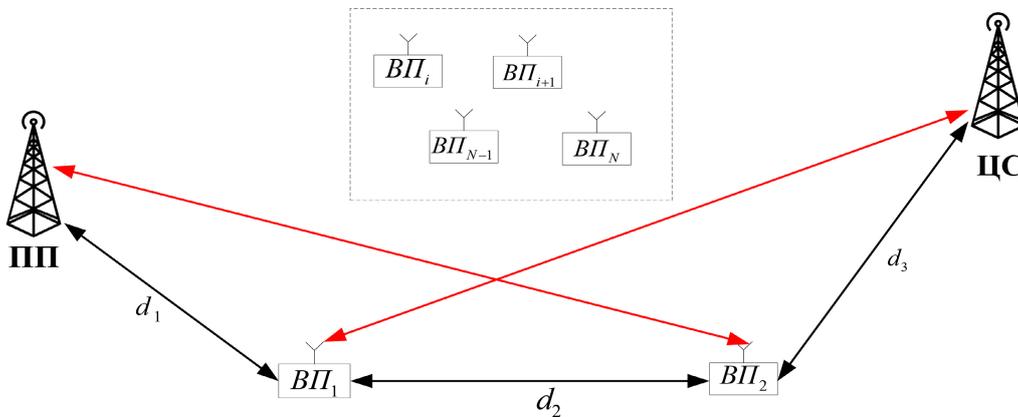


Рис. 2. Пример конфигурации сети когнитивного радио
Fig. 2. Example of a cognitive radio network configuration

рования, должны передавать их по протяженным цифровым каналам доставки с высоким уровнем вероятности ошибок в нем. Относительно вклада пользователей, размещенных как ВП2, результат также получается неудовлетворительным ввиду их удаленности от ПП и малой достоверности по этой причине результатов зондирования.

В данной работе предлагается использовать ВП2 в качестве регенеративного ретранслятора сообщений с результатами зондирования ВП1 как это иллюстрирует рис. 3.

Ожидается, что в результате вместо двух мало-достоверных сообщений с локальными решени-

ями о присутствии ПП на ЦС принимается одно достоверное сообщение.

В случае однопороговых «жестких» однобитовых локальных решений схема рис. 3 отображается эквивалентной схемой бинарного двухзвенного канала, который изображен на рис. 4.

Обозначим A_1 и B_1 события присутствия и отсутствия ПП в КРС, обнаруживаемые пороговыми детекторами ВП. Эти локальные решения отображаются символами соответственно +1 и -1 и передаются по бинарному двухзвенному каналу (БДК) доставки методом ВРСК-двоичной фазовой модуляции [2] с применением когерентной демо-

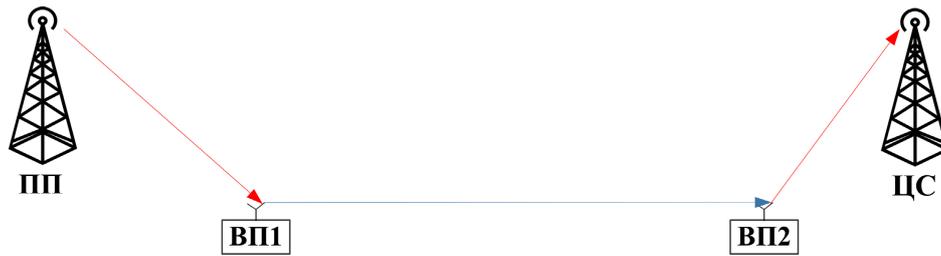


Рис. 3. Канал доставки с ретранслятором ВП2
 Fig. 3. Delivery channel with a repeater VP2

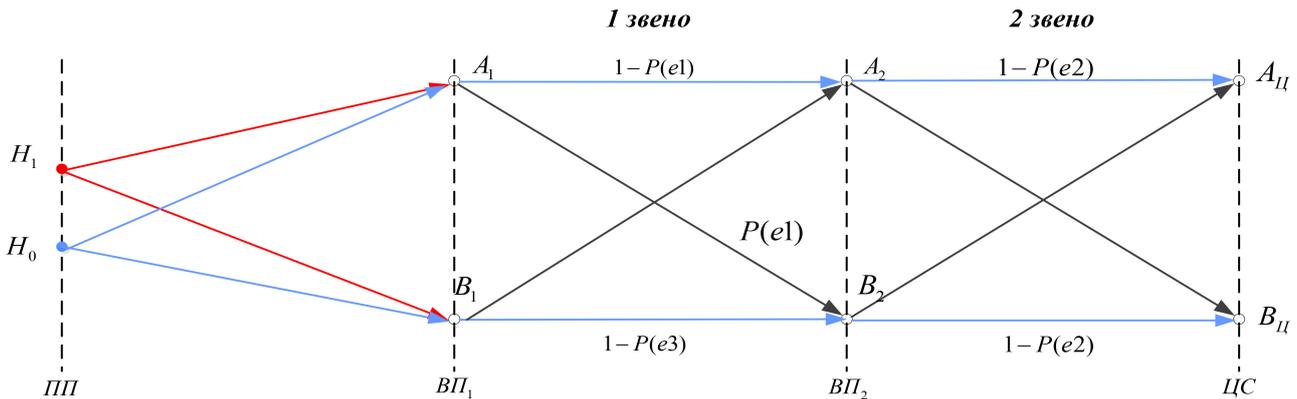


Рис. 4. Схема зондирования спектра с бинарным двухзвенным каналом (БДК) доставки
 Fig. 4. Scheme of spectrum sensing with a binary two-link channel (BDC) of delivery

дуляции на ВП2 и ЦС. Характеристики качества обнаружения ПП получаемые при пороговом значении энергии $\lambda = E_{\text{П}}$, имеют вид:

– вероятность обнаружения ПП (в соответствующей точке схемы с БДК) при истинной гипотезе H_1 :

$$P(A/H_1) = P(E > \lambda = E_{\text{П}});$$

– вероятность ошибки «пропуска цели» (в соответствующей точке БДК) при H_1 фиксируется отсутствием ПП:

$$P(B/H_1) = P(E < \lambda = E_{\text{П}}),$$

– вероятность «ложной тревоги» (в соответствующей точке БДК) при истинной гипотезе H_0 фиксируется присутствием ПП:

$$P(A/H_0) = P(E > \lambda = E_{\text{П}}).$$

Влияние БДК-доставки на вышеприведенные характеристики оценивается в общем виде по следующим формулам:

$$P(A_{\text{Ц}}/H_1) = [P(A_1/H_1)(1-P_1) + P(B_1/H_1)P_1](1-P_2) + [P(A_1/H_1)P_1 + P(B_1/H_1)(1-P_1)]P_2, \quad (1a)$$

$$P(B_{\text{Ц}}/H_1) = [P(A_1/H_1)(1-P_1) + P(B_1/H_1)P_1]P_2 + [P(A_1/H_1)P_1 + P(B_1/H_1)(1-P_1)](1-P_2), \quad (1b)$$

$$P(A_{\text{Ц}}/H_0) = [P(A_1/H_0)(1-P_1) + P(B_1/H_0)P_1](1-P_2) + [P(A_1/H_0)P_1 + P(B_1/H_0)(1-P_1)]P_2, \quad (1c)$$

где P_1 и P_2 – вероятности ошибочного приема бит сообщений локальных решений для каждого звена БДК – ВП1–ВП2 и ВП2–ЦС соответственно.

В данной работе рассматриваются модели для обоих каналов, включающие помехи в виде аддитивного белого гауссова шума [3], каждый канал характеризуется своим коэффициентом передачи h , величина которого неизменна в пределах T – интервала зондирования (условие локальной стационарности канала). Воздействие канала на принимаемый сигнал рассматривается как произведение факторов:

– потери на трассе, определяемой множителем ослабления $(d_0/d_t)^\alpha$, где d_0 – референтное расстояние; d_t – расстояние между передатчиком и приемником; $\alpha = 3,5-4$ – показатель затухания на трассе [2];

– множитель замираний сигнала малого масштаба C_t , при которых мгновенные значения случайные величины с нормальным (гауссовским) законом распределения и нулевым математическим ожиданием, следовательно модуль $|h|$ имеет релеевское распределение, а величина мощности

и, следовательно, S – среднее значение отношения сигнал/шум (ОСШ) – экспоненциальное распределение [3].

В результате для каждого ВП и ЦС S_t величина ОСШ в канале зондирования на приеме S_t имеет вид

$$S_t = SC_t = S_0 \left(d_0/d_t \right)^\alpha C_t, \quad (2)$$

где S_0 – среднее значение ОСШ на расстоянии d_0 от ПП; C_t – текущее значение ОСШ с распределениями $F(\lambda)$; $G(\lambda)$ – условные интегральные функции распределения накопленной энергии E_i i -го ВП, соответственно, при гипотезах H_0 и H_1 для релеевских замираний и белого гауссовского шума [3]:

$$F(\lambda) = \int_0^\lambda f(E | H_0) dE = 1 - \frac{\Gamma\left(u, \frac{\lambda}{2}\right)}{\Gamma(u)}, \quad (3a)$$

$$G(\lambda) = \int_0^\lambda f(E | H_1) dE = 1 - e^{-\frac{\lambda}{2}} \sum_{n=0}^{u-2} \frac{1}{n!} \left(\frac{\lambda}{2}\right)^n + \left(\frac{1+\gamma}{\gamma}\right)^{u-1} \times \left[e^{-\frac{\lambda}{2(1+\gamma)}} - e^{-\frac{\lambda}{2}} \sum_{n=0}^{u-2} \frac{1}{n!} \left(\frac{\lambda\gamma}{2(1+\gamma)}\right)^n \right]. \quad (3b)$$

Выполним анализ влияния канала доставки с ретрансляцией на достоверность передачи результатов зондирования. Результаты зондирования передаются по звеньям канала доставки посредством BPSK-сигналов с когерентной демодуляцией на приеме. Вероятность битовой ошибки (BER), в зависимости от среднего значения ОСШ имеет вид [3]

$$BER_m = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{S_m}{(S_m + 1)^{\frac{1}{2}}} \right], \quad m = 1, 2. \quad (4)$$

Разлагая (4) в ряд и сохраняя только первые два члена разложения, получаем приближенное выражение

$$BER_m \sim \frac{1}{4S_m}. \quad (5)$$

Отметим, что удовлетворительное качество приближения достигается при $S_m \geq 5$, для меньших значений $5 \geq S_m \geq 1$, если учесть третий член разложения. Обозначим расстояния ПП-ВП1- d_1 , ВП1-ВП2- d_2 , ВП2-ЦС- $d_3 = \mu d_2$. Отбрасывая в выра-

жении для BER_{PT} канала доставки в целом слагаемое $BER_1 BER_2$ ввиду его малости, получаем:

$$BER_{PT} \approx BER_1 + BER_2 = \frac{1}{\left[4(S_1 + S_2)\right]} = \frac{1}{4} \left(\frac{S_1 + S_2}{S_1 S_2} \right). \quad (6)$$

Таким образом вероятность ошибки канала с ретрансляцией является средним гармоническим вероятностей ошибки звеньев.

Для всех ВП можно считать одинаковыми параметры S_0 , d_0 и α , тогда (6) принимает вид

$$BER_{PT} = \frac{1}{4S_0} \left(\frac{d_2}{d_0} \right)^\alpha (1 + \mu^\alpha). \quad (7)$$

Когда ВП1 передает результат зондирования непосредственно на ЦС, то имеем:

$$BER_{PP} = \frac{1}{4S_0} \left(\frac{d_2}{d_0} \right)^\alpha (1 + \mu)^\alpha. \quad (8)$$

Введем показатель потерь, равный:

$$K_{\Pi} = \frac{BER_{PP}}{BER_{PT}} = \frac{(1 + \mu)^\alpha}{(1 + \mu^\alpha)}. \quad (9)$$

Максимального значения показатель потерь достигает при $\mu^{\alpha-1} = 1$, т. е. при равенстве $d_2 = d_3$. Следовательно, можно сделать вывод, что для получения минимальной потери достоверности ВП ретранслятор целесообразно выбирать на равном удалении между зондирующим ВП и ЦС.

При значении $K_{\Pi} = 1$ вероятности ошибок в отдельных звеньях $P_1 = P_2 = p$ и формулы (1a) и (1c) приобретают вид:

$$P_{PT}(A_{Ц}/H_1) = P(A_1/H_1)(1-2p)(1-p) + p; \quad (10a)$$

$$P_{PT}(A_{Ц}/H_0) = P(A_1/H_0)(1-2p)(1-p) + p. \quad (10b)$$

При непосредственной доставке сообщений от ВП1 на ЦС без ретрансляции:

$$P_{\Pi}(A_{Ц}/H_1) = P(A_1/H_1)(1-2P_{\Pi}) + P_{\Pi}; \quad (11a)$$

$$P_{\Pi}(A_{Ц}/H_0) = P(A_1/H_0)(1-2P_{\Pi}) + P_{\Pi}. \quad (11b)$$

При непосредственной доставке сообщений от ВП2 на ЦС без ретрансляции:

$$P_{\Pi}(A_{Ц}/H_1) = P(A_1/H_1)(1-2p) + p; \quad (12a)$$

$$P_{\Pi}(A_{Ц}/H_0) = P(A_1/H_0)(1-2p) + p. \quad (12b)$$

Расчет $P(A_1/H_1)$ выполняется по формуле (3b), а расчет $P(A_1/H_0)$ – по (3a). Вероятности битовых ошибок вычисляются по точным формулам (4). ОСШ в рассматриваемом примере получены для

Таблица. Характеристики обнаружения рассмотренных вариантов
Table. Detection characteristics of the considered options

	ОСШ	1	3	5	10	15	$P(A_1/H_1)$	$P(A_1/H_0)$
	BER	0,14645	0,067	0,0435	0,02327	0,0159		
Ретран. ВП1-ЦС	P_d	0,6738	0,773	0,80658	0,837	0,848	0,8738	0,446
	P_f	0,4158	0,427	0,432	0,438	0,441		
Прям ВП1-ЦС	P_d	0,589	0,6485	0,6824	0,7318	0,76		
	P_f	0,486	0,479	0,474	0,467	0,4624		
Прям ВП2-ЦС	P_d	0,618	0,623	0,629	0,635	0,637	0,641	
	P_f	0,4618	0,453	0,451	0,448	0,448		

значения параметра $\alpha = 4$ и соотношения расстояний, указанных на рис. 2:

$$d_3 = d_2 = 2d_1.$$

Полученные результаты сведены в таблицу.

Заключение

Вклад локального решения одного ВП в общее, «глобальное» решение определяется логическим правилом их объединения или слияния [1; 3], но, как показано в [4], при любом правиле «слияния» вида К-из-N (K решений из N ВП, участников зондирования в пользу одной из двух, конкуриру-

ющих гипотез) для установленных на ЦС требований к вероятностям «ложной тревоги» – $P_{ЛТ}$ и «пропуска цели» – $P_{ПЦ}$; величина BER в канале доставки не должна превышать пороговой величины, однозначно определяемой правилом «слияния» и значениями $P_{ЛТ}$ и $P_{ПЦ}$ (см. [4], формулы (9) и (12)). Следовательно, переход от непосредственной передачи по каналу доставки к регенеративной ретрансляции позволяет обеспечить выполнение более строгих требований к характеристикам обнаружения лицензированных пользователей в когнитивных радиосетях.

Список литературы

1. Letaief K.B., Zhang W. Cooperative communications for cognitive radio networks // Proceedings of the IEEE. 2009. Vol. 97. № 5. P. 878–895. DOI: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2009.2015716>.
2. Прокис Дж. Цифровая связь. М.: Радио и связь, 2000. 800 с.
3. Sun C., Zhang W., Letaief K.B. Cooperative spectrum sensing for cognitive radios under bandwidth constraints // 2007 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. 2007. P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/WCNC.2007.6>.
4. Chaudhari S., Lundén J., Koivunen V. BEP walls for collaborative spectrum sensing // 2011 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). 2011. P. 2984–2987. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2011.5946285>.

References

1. Letaief K.B., Zhang W. Cooperative communications for cognitive radio networks. *Proceedings of the IEEE*, 2009, vol. 97, no. 5, pp. 878–895. DOI: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2009.2015716>.
2. Prokis J. *Digital Communication*. Moscow: Radio i svjaz', 2000, 800 p. (In Russ.)
3. Sun C., Zhang W., Letaief K.B. Cooperative spectrum sensing for cognitive radios under bandwidth constraints. *2007 IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, 2007, pp. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/WCNC.2007.6>.
4. Chaudhari S., Lundén J., Koivunen V. BEP walls for collaborative spectrum sensing. *2011 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 2011, pp. 2984–2987. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2011.5946285>.

Physics of Wave Processes and Radio Systems 2020, vol. 23, no. 2, pp. 43–48

Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks with regenerative relay of signals in the delivery channel

Sergey N. Eliseev¹, Lyudmila N. Trifonova², Natalia V. Stepanova²

¹ Moscow Technical University of Communications and Informatics
8a, Aviamotornaya Street,
Moscow, 111024, Russia

² Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics
23, L. Tolstoy Street,
Samara, 443010, Russia

Abstract – The spectrum sensing at the frequencies of «white spaces» is an important feature for cognitive radio networks. The characteristics of detection of licensed primary users by single secondary users will deteriorate under the influence of fading in the radio channels, both in the sensing channels and in the reporting channels of results. Reliable detection of licensed primary users is implemented on the basis of the secondary users cooperative spectrum sensing. The article considers the possibility of constructing the reporting channel based on the scheme of regenerative relaying of «hard» single-bit local solutions in the form of binary phase-shift keying of signals from remote secondary users to a Central Station, which forms a global decision about the result of sensing. The potential value of the gain of the scheme with relay in relation to the scheme with direct transmission and the conditions for optimal placement of the repeater in channels with Rayleigh fades are determined.

Keywords – cognitive radio networks, spectral sensing, regenerative relay, bit error rate, BPSK, Rayleigh fading.

Информация об авторах

Елисеев Сергей Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры теории электрических цепей Московского технического университета связи и информатики, г. Москва, Россия.

Область научных интересов: цифровая обработка сигналов, мобильная связь, телерадиовещание.

E-mail: fgupnrnsnr@yandex.ru

Трифорова Людмила Николаевна, аспирант, инженер кафедры радиоэлектронных систем Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, г. Самара, Россия.

Область научных интересов: нанотехнологии, методы и средства цифровой обработки сигналов и их применение в системах радиосвязи и радиовещания.

E-mail: lyudmila.trifonova.2012@mail.ru

Степанова Наталья Вениаминовна, старший преподаватель кафедры радиоэлектронных систем Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, г. Самара, Россия.

Область научных интересов: цифровая обработка сигналов, мобильная связь, телерадиовещание.

E-mail: osina-nv@psuti.ru

Information about the Authors

Sergey N. Eliseev, Doctor of Technical Sciences, professor of the Department of Theory of Electrical Circuits, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia.

Research interests: digital signal processing, mobile communications, television and audio broadcasting.

E-mail: fgupnrnsnr@yandex.ru

Lyudmila N. Trifonova, postgraduate student, engineer of the Department of Radioelectronic Systems, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russia.

Research interests: nanotechnology, methods and means of digital signal processing and their application in radio communication and broadcasting systems.

E-mail: lyudmila.trifonova.2012@mail.ru

Natalia V. Stepanova, senior lecturer of the Department of Radioelectronic Systems, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russia.

Research interests: digital signal processing, mobile communications, television and audio broadcasting.

E-mail: osina-nv@psuti.ru