20. Morjakov S.I., Nesterov S.M., Skorodumov I.A. Autofocusing algorithms for inverse-synthesized two-dimensional radar images of objects. *Zhurnal radioelektroniki*, 2018, no. 8. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/aug18/11/text.pdf> (accessed: 20.03.2020). (In Russ.)
21. Gorjachkin O.V. Automatic focusing of images in synthetic aperture radar. *Trudy nauchnyh zavedenij svyazi. Analiz signalov i sistem svyazi*, 1996, no. 161, pp. 128–134. (In Russ.)

Received 16.07.2020

УДК 543.42

КАНАЛЫ ДОСТАВКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ЗОНДИРОВАНИЯ СПЕКТРА В ДВУХЪЯРУСНЫХ СЕТЯХ КОГНИТИВНОГО РАДИО

Степанова Н.В.

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ

E-mail: puhleniw@mail.ru

Для сетей когнитивного радиозондирования спектра является наиболее важной функцией. Так как вероятности обнаружения первичных пользователей вторичными пользователями могут ухудшаться под влиянием шумов, помех, релеевских замираний, нужно выбрать наиболее подходящую архитектуру сети для улучшения характеристик как в каналах доставки, так и в каналах зондирования. В статье рассматривается задача зондирования лицензированной полосы частот с целью обнаружения первичного пользователя сети когнитивного радио с двухъярусной архитектурой сети, на первом, нижнем ярусе вторичные пользователи концентрируются в отдельных малых частях зоны покрытия сети (кластерах), находящихся на значительных расстояниях от центра слияния локальных результатов зондирования отдельных вторичных пользователей. Эти локальные результаты ретранслируются базовыми станциями кластеров на центр слияния.

Ключевые слова: когнитивное радио, зондирование спектра, канал доставки, вероятность сообщений, вероятность ошибки, OFDMA, QPSK-ММ модуляция, модуляция ортогональная 4-FSK, первичный пользователь

Введение

Рассматриваемая архитектура сети – это целесообразный вариант построения радиодоступа в сетях когнитивной технологии, характерными особенностями которых служат: а) большая территориальная зона радиопокрытия; б) диапазон сравнительно длинных волн и, соответственно, габаритных антенн; в) значительный процент среди вторичных пользователей (ВП) сети составляют устройства D2D, работающие в пределах кластеров – локальных зон, каждая из которых занимает лишь малую часть территории общей зоны покрытия сети. Общий принцип сети двухъярусной архитектуры иллюстрирует рисунок 1, на котором лицензированный первичный пользователь обозначен как ПП. Показаны каналы зондирования и доставки [1].

Принцип сети двухъярусной архитектуры

На нижнем ярусе базовая станция (БС) каждого собирает результаты зондирования спектра (ЗС) отдельными ВП, зарегистрированными в нем и после приема и демодуляции сообщений, ретранслирует их на центр слияния (ЦС), центральную станцию всей сети, управляющую ее

работой, выполняющую объединение всех локальных результатов ЗС и выносящую решение о допуске и прекращении работы ВП в сети. Совокупность радиоканалов БС-ЦС образует второй, верхний ярус сети. Результаты ЗС i -м ВП передаются по каналу доставки в формате 2-битовых сообщений – $a_i b_i$. Если старший бит $a_i = 1$, это означает: ПП обнаружен, если $a_i = 0$, то ПП в сети отсутствует. Значения младшего бита b_i указывает на достоверность решения: если $b_i = 1$, то показатель «правдоподобия» бита a_i выше установленного порогового значения, если $b_i = 0$, то ниже.

Рисунок 1. Архитектура двухъярусной сети

Рисунок 2. Модуляция 4-FSK

Определим характеристики обнаружения составных каналов доставки сети кооперативного ЗС [4].

Модель канала доставки

В качестве модели канала доставки предлагается следующая модель:

- замирания в обеих частях составного канала полагаем релейскими;
- ввиду наиболее вероятного применения технологии когнитивного радио в лицензированных диапазонах телерадиовещания, в которых доминируют системы OFDM, предполагается в основе каналов доставки использовать OFDMA;
- в радиоканале между БС и ЦС сообщения передаются, используя QPSK-НМ-модуляцию и когерентный метод демодуляции;
- в радиоканале ВП-БС на передаче модуляция ортогональная 4-FSK [2], на приеме используется некогерентная демодуляция.

Выбор вида модуляции и демодуляции сделан по следующим причинам:

- на верхнем ярусе выбран более сложный и более помехоустойчивый вид модуляции, обладающий наряду с другими свойствами способностью не увеличивать трафик в канале доставки по сравнению с 1-битовой передачей [3];
- на нижнем ярусе со значительно большим числом ВП по сравнению с БС для снижения сложности устройств, а значит, уменьшения энергозатрат по опыту применения систем DMR [1] используется модуляция 4-FSK в ее ортогональном варианте (см. рисунок 2), идеально подходящем для встраивания в OFDMA-сигналы, и не увеличивает трафик в канале доставки. Предлагается отображение дибитов передаваемых сообщений, минимизирующее вероятность двойных ошибок в демодуляторе по степени их влияния на достоверность обнаружения.

Вероятность ошибки приема символа в составной двухпролетной линии с демодуляцией на ретрансляторе, как хорошо известно, достаточно точно может быть выражена как

$$P = P_{e1} + P_{e2}, \quad (1)$$

где P – вероятность ошибки составной радиолитии; P_{e1} – вероятность ошибки на первом пролете ВП-БС; P_{e2} – вероятность ошибки на втором пролете БС-ЦС.

Так как битовые ошибки при передаче a_j и b_i при подсчете характеристик обнаружения имеют разный вес, рассмотрим полную диаграмму состояний сообщений (см. рисунок 3) в канале доставки от m -го ВП через i -ю БС на ЦС.

Ниже введены обозначения для вероятностей сообщений, битовых ошибок и средних значений ОСШ в соответствии с моделью радиолитии из [5]:

$$\begin{aligned} P_{00}^B &= P_{00}^B(1 - 3P_e) + P_e(P_{11}^B + P_{10}^B + P_{01}^B) = \\ &= P_{00}^B(1 - 4P_e) + P_e, \\ P_{01}^B &= P_{01}^B(1 - 3P_e) + P_e(P_{11}^B + P_{10}^B + P_{00}^B) = \\ &= P_{01}^B(1 - 4P_e) + P_e, \\ P_{10}^B &= P_{10}^B(1 - 3P_e) + P_e(P_{11}^B + P_{01}^B + P_{00}^B) = \\ &= P_{10}^B(1 - 4P_e) + P_e, \\ P_{11}^B &= P_{11}^B(1 - 3P_e) + P_e(P_{01}^B + P_{10}^B + P_{00}^B) = \\ &= P_{11}^B(1 - 4P_e) + P_e, \end{aligned} \quad (2)$$

где P_{ij}^B – вероятность обнаружения сообщения ij в канале зондирования; P_{ij}^B – вероятность приема сообщения ij на базовой станции; P_{ij}^{II} – вероятность приема сообщения ij на центральной станции; $i, j \in 0, 1$ для i ; $0, 1$ для j ;

$$P_{e1} = 3 / (2 + S_1) - 3 / (3 + 4S_1) + 1 / (3 + 4S_1), \quad (3)$$

где S_1 – среднее значение отношения «сигнал/шум» 4-FSK [3];

Рисунок 3. Диаграмма состояний сообщений

Таблица. Параметры формулы (9)

	Пролет 1 (ВП-БС)		Пролет 2 (БС-ЦС)	
Дистанция пролета	d_{1m}	2	$d_{2m} = \mu d_{1m}$	8
Показатель затухания	α_1	2,5	α_2	2
Референтная дистанция	d_0	1	d_0	1
Уровень «сигнал/шум» в т. d_0	S_0	40	S_0	400

$$P_{e2} = 1 / 2(1 - \sqrt{S_2} / (S_2 + 1)) \cong 1 / 4S_2, \quad (4)$$

где S_2 – среднее значение отношения «сигнал/шум» BPSK [2]; K_1 , K_2 – коэффициенты иерархичности битов в QPSK-НМ, равные

$$K_1 = 1 / \sin \theta, \quad (5)$$

$$K_2 = 1 / \cos \theta, \quad (6)$$

K_{12} – коэффициент поправки для одновременной ошибки в обоих битах.

$$K_{12} = K_1 \times K_2 \times 1 / 4S_2. \quad (7)$$

Рассматривая выражения для вероятности событий a_i, b_j на ЦС, которые при отбрасывании слагаемых второго порядка малости, содержащих произведения $P_{e1}P_{e2}$, могут быть преобразованы к виду [9]:

$$P_{ij}^H = P_{ij}^B (1 - 4P_{e1}) + P_{e1} - P_{e2} \times \left[K_1(1 - P_{ij}^-) + K_2(1 - P_{ji}^-) + K_{12}(1 - P_{ji}^-) \right]. \quad (8)$$

Можно видеть, что вероятность P_{ij}^H по сравнению с P_{ij}^B -вероятностью обнаружения этого события в канале ЗС уменьшается на величину, пропорциональную взвешенной сумме вероятностей

ошибок на отдельных пролетах линии ВП-ЦС в канале доставки [6; 8].

В случае двухъярусной сети КР должны соблюдаться соотношения между пролетами, сведенные в таблицу для модели радиоканала, использованной в [7]:

$$S_{mn} = S_{0n} \left(\frac{d_0}{d_{mn}} \right)^{\alpha} \overline{C_{mn}}, \quad (9)$$

где S_{0n} – среднее значение ОСШ на расстоянии d_0 от ПП, $n = 1, 2$ – номера пролетов ВП-БС и БС-ЦС; $\overline{C_{mn}}$ – среднее значение С/Ш для релейских замираний и белого гауссовского шума.

По условиям технической целесообразности соотношения параметров для «сигнал/шум» сведены в таблицу.

Для пролета 2 возьмем $\mu = 4$, а $\theta = 25^\circ$.

По формуле (8), полагая для $\overline{C_{mn}} = 1$, имеем из (2) $P_{e1} = 0,13$, а из (3) $P_{e2} = 0,037$.

Заключение

При непосредственной передаче от ВП на ЦС для обеспечения величины $P_{e1} = 0,13$ даже при переходе на передачу более помехоустойчивой модуляцией QPSK потребуются увеличение мощности на передаче от ВП не менее чем на порядок. При умеренном числе ВП в одном кластере это приведет к 100-кратному расходу энергии в расчете на один кластер [10]. Таким образом, для пользователей сети когнитивного радио с критически важными показателями энергоэффективности должна быть рекомендована двухъярусная архитектура сети.

Литература

1. Letaief K.B., Zhang W. Cooperative communications for cognitive radio networks // Pro-

- ceedings of the IEEE. 2009. Vol. 97, no. 5. P. 878–895. DOI: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2009.2015716>
2. 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>
 3. Cooperative spectrum sensing with double threshold and censoring in Rayleigh faded cognitive radio network / A. Bhowmick [et al.] // Wireless Personal Communications. 2015. Vol. 2, no. 2. P. 1–24.
 4. Eliseev S.N., Trifonova L.N., Stepanova N.V. Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks with Rayleigh fading // 2020 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF 2020). 2020. P. 9131156. DOI: <https://doi.org/10.1109/WECONF48837.2020.9131156>
 5. Финк Л.М. Теория передачи дискретных сигналов. М.: Сов. радио, 1970. С. 240–245.
 6. Елисеv С.Н., Трифонова Л.Н., Степанова Н.В. Кооперативное зондирование спектра в когнитивных радиосетях с регенеративной ретрансляцией сигналов в канале доставки // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2020. Т. 23, № 2. С. 43–48. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2020.23.2.43-48>
 7. Елисеев С.Н. Трансляция мультимедиа контента в зоне вещания с многонациональным населением // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2015. Т. 9, № 7. С. 11–15.
 8. Ganesan G., Li Y. Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks // Proceedings First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks. 2005. P. 137–143. DOI: <https://doi.org/10.1109/DYSPAN.2005.1542628>
 9. Geirhofer S., Tong L., Sadler B. Dynamic spectrum access in the time domain: Modeling and exploiting white space // Proceedings of the IEEE. 2007. Vol. 45, no. 5. P. 66–72.
 10. Marcus M. Unlicensed cognitive sharing of TV spectrum: the controversy at the federal communications commission // Proceedings of the IEEE. 2005. Vol. 43, no. 5. P. 24–25.

Получено 08.12.2020

Степанова Наталья Вениаминовна, начальник учебного отдела управления организации учебного процесса Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики. 443010, Российская Федерация, г. Самара, ул. Л. Толстого, 23. Тел. +7 846 339-11-15. E-mail: puhleniw@mail.ru

CHANNELS FOR DELIVERY OF SPECTRA SENSING RESULTS ON DUAL-STAGE COGNITIVE RADIO NETWORKS

Stepanova N.V.

*Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russian Federation
E-mail: puhleniw@mail.ru*

Spectrum sensing is the most important function for cognitive radio networks. Since the probabilities of detecting primary users by secondary users can deteriorate under the influence of noise, interference, Rayleigh fading, it is necessary to choose the most suitable network architecture to improve the characteristics in both the delivery channels and in the sounding channels. This article discusses the task of sensing a licensed frequency band in order to detect the primary user of a cognitive radio network with a two-tier network architecture, on the first, lowest tier, secondary users are concentrated in separate small parts of the network coverage area (clusters) located at considerable distances from the center of the fusion of local sounding results individual secondary users. These local results are relayed by the base stations of the clusters to the merger center.

Keywords: *cognitive radio, spectrum sensing, delivery channel, message probability, error probability, OFDMA, QPSK-HM modulation, orthogonal 4-FSK modulation, primary user.*

DOI: 10.18469/ikt.2020.18.4.12

Stepanova Natalya Veniaminovna, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation; Head of the Educational Department of the Management of the Organization of the Educational Process. Tel. +7 846 339-11-15. E-mail: puhleniw@mail.ru

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. 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>
3. Bhowmick A. et al. Cooperative spectrum sensing with double threshold and censoring in Rayleigh faded cognitive radio network. *Wireless Personal Communications*, 2015, vol. 2, no. 2, pp. 1–24.
4. Eliseev S.N., Trifonova L.N., Stepanova N.V. Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks with Rayleigh fading. *2020 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF 2020)*, 2020, p. 9131156. DOI: <https://doi.org/10.1109/WECONF48837.2020.9131156>
5. Fink L.M. *Discrete Signal Transmission Theory*. Moscow: Sov. Radio, 1970, pp. 240–245. (In Russ.)
6. Eliseev S.N., Trifonova L.N., Stepanova N.V. Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks with regenerative relay of signals in the delivery channel. *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, 2020, vol. 23, no. 2, pp. 43–48. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2020.23.2.43-48>
7. Eliseev S.N. Broadcasting multimedia content in a broadcasting area with a multinational population. *T-Comm: Telekommunikatsii i transport*, 2015, vol. 9, no. 7, pp. 11–15. (In Russ.)
8. Ganesan G. Li Y. Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks. *Proceedings First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, 2005, pp. 137–143. DOI: <https://doi.org/10.1109/DYSPAN.2005.1542628>
9. Geirhofer S., Tong L., Sadler B. Dynamic spectrum access in the time domain: Modeling and exploiting white space. *Proceedings of the IEEE*, 2007, vol. 45, no. 5, pp. 66–72.
10. Marcus M. Unlicensed cognitive sharing of TV spectrum: the controversy at the federal communications commission. *Proceedings of the IEEE*, 2005, vol. 43, no. 5, pp. 24–25.

Received 08.12.2020

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ И БЕЗОПАСНОСТЬ ОБОРУДОВАНИЯ

УДК 004.75

ТЕХНОЛОГИИ ОБЛАЧНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ В ИНТЕГРИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ

Орехов С.Е., Артамонов Д.П., Иванов С.А.

Филиал Военной академии РВСН им. Петра Великого, Серпухов, РФ

E-mail: majorose@mail.ru

В статье представлены результаты исследований по обоснованию применимости современных технологий распределенных вычислений Hadoop/MapReduce и параллельных сетевых трактов в перспективных интегрированных системах управления. Под интегрированной системой управления понимается такая система управления, в которую встроены программные интерфейсы взаимодействия с обеспечивающей ее автоматизированной системой связи. Отличительной особенностью интегрированных систем управления является совместное использование общей универсальной аппаратно-программной платформы, которая динамически реконфигурируется под требования той или иной системы. Реконфигурация платформы должна обеспечивать высокие показатели функциональной устойчивости и эффективности решения клиентских запросов, для чего проанализированы существующие технологии обработки больших данных и предложен вариант их модификации, учитывающий потенциальные возможности параллельных сетевых трактов. Практическая реализация представленных концептуальных положений позволит существенно снизить информационную нагрузку на сетевую инфраструктуру и повысить эффективность функционирования системы управления.

Ключевые слова: дивергентный подход, децентрализация информационной сети, многомерная маршрутизация пакетов, виртуализация каналов, распределенные вычисления, модифицированная модель MapReduce