

УДК 004.735

И. С. Трубин

ДИНАМИЧЕСКОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СПЕКТРА В КОГНИТИВНЫХ СЕТЯХ СВЯЗИ

В статье представлена классификация моделей динамического доступа к спектру применяемых при исследовании и анализе когнитивных сетей связи. Кратко рассмотрены основные методы решения задач динамического распределения спектра. Показаны основные различия между понятиями когнитивное радио и когнитивная сеть с точки зрения инфокоммуникационных технологий. Существующий в настоящее время механизм статического распределения спектрального ресурса, пригодного для современных мобильных телекоммуникационных технологий, между конечными пользователями недостаточно эффективен. В работе рассматриваются модели динамического распределения спектра позволяющие, в рамках концепции когнитивного радио, повысить эффективность используемого спектрального ресурса. В рамках модели иерархического доступа к спектру рассмотрены основные методы динамического распределения спектра, реализуемые в системах когнитивного радио. Идеи, заложенные в иерархической модели доступа к спектру, не противоречат сложившимся правилам в области управления спектральными ресурсами. В заключении отмечено, что выбор той или иной технологии распределения спектра тесно связан с характеристиками детектирования и заданными характеристиками качества обслуживания пользователей в сети, реализующей принципы когнитивного радио.

Ключевые слова: когнитивные сети, когнитивное радио, динамическое распределение спектра.

Характерной особенностью современного общества является постоянное увеличение количества информации, которой вынужден оперировать человек. Когнитивные технологии оказывают значительное влияние на развитие телекоммуникаций. Можно выделить следующие направления эффективного использования когнитивности в телекоммуникациях: первое – беспроводные

когнитивные сети, основанные на принципах когнитивного радио, эффективном использовании спектра и управлении частотными ресурсами; второе – реализация так называемого «дружественного интерфейса» между пользователем и сетью; третье – организация эффективной и гибкой системы технической эксплуатации, обладающей функциями прогнозирования поведения сети в различных ситуациях; четвертое – поддержка новых видов услуг, обеспечивающих решение важных задач для индивидуального пользователя телекоммуникационной сети и общества в целом, например, организация работы на дому для ряда категория офисных работников [1].

Одно из первых развернутых определений понятия «когнитивные сети» с точки зрения разработчиков инфокоммуникационных технологий дано Райаном Томасом (Ryan W. Thomas) в докладе на конференции IEEE DySPAN в 2005 году [2] и приведено в его диссертации – «Когнитивная сеть представляет собой сеть с познавательным процессом, который может воспринимать текущие условия работы сети, а затем планировать и осуществлять принятые решения в этих условиях. Сеть может обучаться и использовать накопленные данные для принятия последующих решений с учетом «end-to-end» маршрутизации» [3].

Следует различать понятия когнитивная сеть и когнитивного радио. Основные различия связаны с масштабами поставленных целей [4]. В когнитивной сети главной целью является обеспечение качества обслуживания «из конца в конец». Когнитивное же радио в большей степени связано с работой радиосистем. Большинство исследований в области когнитивного радио связаны с работой сетей на физическом уровне, а точнее с определением возможностей влияния когнитивных процессов на качество работы радиосистемы и доступные ресурсы.

Таким образом, наличие в сети узлов, реализующих принципы когнитивного радио, недостаточно, чтобы данную сеть можно было назвать когнитивной. Когнитивное радио базируется на принципах программно-определяемого радио, а когнитивные сети используют принципы программно-

адаптируемых (управляемых) сетей. Еще одним существенным отличием когнитивных сетей от когнитивного радио является то, что когнитивная сеть может быть гетерогенной, как проводной, так и беспроводной (в общем случае даже смешанной).

Развитие радиовещания, цифрового телевидения, беспроводных систем связи происходит так стремительно, что все более остро встает вопрос об эффективности использования частотного спектра. Основным механизмом распределения спектрального ресурса на сегодня является так называемое лицензирование. Оно подразумевает закрепление того или иного частотного диапазона за тем или иным оператором, предоставляющим услуги конечному пользователю, на конкурсной основе. Соответственно, лицензированный спектр может использоваться только тем оператором, за которым он закреплен.

Существенное влияние на стабильность соединения между узлами любой беспроводной сети оказывает радиообстановка. Радиосреда в месте развёртывания сети сказывается на распространении радиоволн вследствие особенностей местного рельефа, погодных условий и некоторых других параметров. Поэтому довольно трудно подобрать такие универсальные характеристики для устройств связи, чтобы они одинаково хорошо работали в любых условиях. Более того, развёртывание временных сетей в условиях перегруженного городского спектра трудновыполнимо, поскольку де-юре свободных частот слишком мало, а де-факто используются они нерационально.

С одной стороны, как показывают исследования, использование частотного ресурса неодинаково эффективно во всей полосе частотного спектра и зависит от частоты, пространства и времени [5]. С другой стороны, электромагнитный спектр, пригодный для современных мобильных телекоммуникаций, является конечным ресурсом. Данные обстоятельства позволяют говорить о неэффективности существующего механизма распределения спектрального ресурса, который на сегодня является статическим практически во всех доступных полосах частот. Один из подходов к решению

проблемы неэффективного использования спектрального ресурса был предложен в работах Митолы [6] и вылился в концепцию когнитивного радио.

Когнитивное радио – это интеллектуальная беспроводная система связи, способная анализировать окружающую обстановку и приспосабливаться к ней посредством обучения, реагируя на изменения в окружении изменением своих собственных параметров (например, несущей частоты, мощности, способа модуляции) в реальном времени с целью увеличения эффективности использования спектрального ресурса [7]. Изменение параметров интеллектуальной сети связи основывается на активном отслеживании нескольких факторов во внешнем и внутреннем радио окружении, таких как спектр радиочастоты, поведение пользователя и состояние сети.

В системах когнитивного радио принято различать первичных и вторичных пользователей. Первичный пользователь обладает эксклюзивными правами на использование некоторой лицензированной полосы частот. Вторичный пользователь обладает правом использования лицензированной полосы частот только в том случае, если она не занята первичным пользователем. Передача прав на использование спектра от первичных пользователей вторичным с последующим динамическим распределением спектра между ними позволит значительно увеличить эффективность использования спектрального ресурса [8].

К настоящему времени сложилась ситуация, когда для описания технологий распределения спектра между первичными и вторичными пользователями в когнитивных радиосетях используют большое число разнообразных технических терминов. При этом некоторые из них противопоставляются друг другу: динамический доступ спектра против динамического распределения спектра, право собственности на спектральный диапазон против свободного использования спектра, гибкий доступ к спектру против объединения спектра, spectrum overlay против spectrum underlay. До сих пор можно встретить использование термина когнитивное радио как синонима

динамического распределения спектра. В данной работе будем придерживаться классификации моделей динамического доступа, предложенной в [9] рис. 1.

Динамическая модель эксклюзивного использования спектра (Dynamic Exclusive Use Model). В рамках данной модели предусматривается, как и в действующих правилах регулирования использования радиочастотного спектра, выдача разрешений (лицензий) на использование радиочастот или радиочастотных каналов, но допускается некоторая дополнительная степень свободы при закреплении частот. В рамках модели предлагается рассматривать два подхода: право собственности на спектр и динамическое назначение спектра. В первом случае допускается возможность для лицензированного пользователя перепродавать часть своих частот, а также предоставляется свобода в выборе используемых технологий. Второй подход (динамическое назначение спектра) для улучшения эффективности использования спектрального ресурса предполагает привязывать распределение спектра в конкретном месте и в конкретное время к строго определенным службам (сервисам), основываясь на статистических данных о трафике.

Модель эксклюзивного использования не может устранить пробелы в спектре в результате импульсного характера беспроводного трафика.

Модель свободного распределения (Open Sharing Model) основана на свободном доступе одноранговых пользователей к спектральному диапазону. В рамках этой модели исследовались централизованная и распределенная стратегии распределения. Последователи этой модели в качестве положительного примера общественного регулирования и распределения спектра приводят успешное развитие беспроводных систем, работающих в нелицензируемых спектральных диапазонах – промышленные, научные и медицинские системы (ISM).

Технические науки

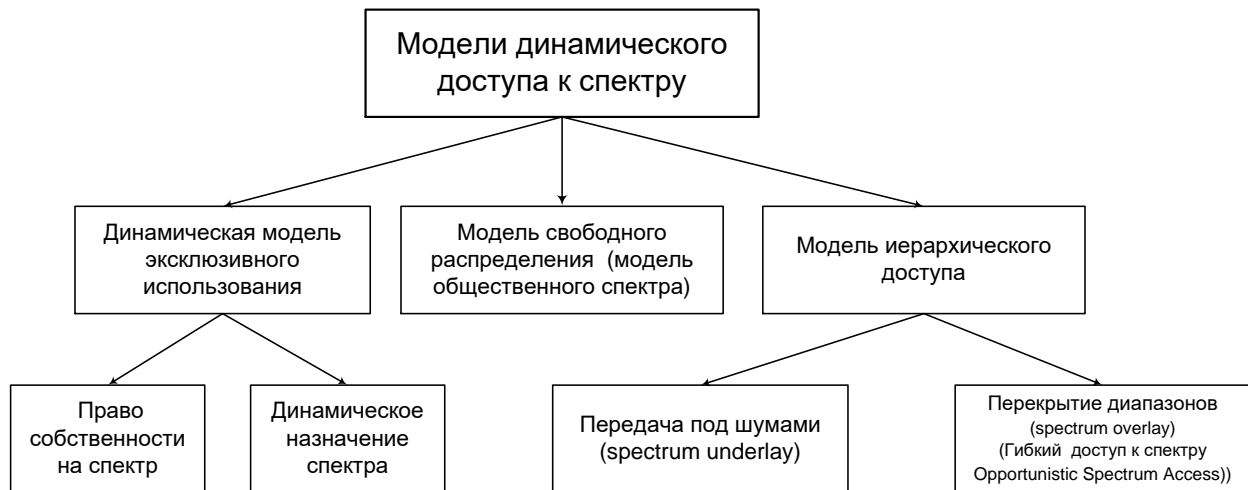


Рис. 1. Классификации моделей динамического доступа к спектру

Модель иерархического доступа (Hierarchical Access Model). В данной модели присутствует разделение пользователей на первичных и вторичных. Основная идея состоит в том, что вторичные пользователи могут использовать лицензированные (для первичных пользователей) спектральные диапазоны, но при этом накладываются жесткие ограничения на помехи, создаваемые для первичных пользователей. Существует два подхода распределения и совместного использования спектра первичными и вторичными пользователями: spectrum underlay и spectrum overlay. В первом подходе вторичным пользователям разрешена работа с малой мощностью, не превышающей шумовой порог для систем первичных пользователей. Это так называемая передача под шумами. Такой подход может быть реализован при использовании вторичными пользователями сверхширокополосных систем передачи [10].

Во втором подходе (spectrum overlay), впервые рассмотренном Митолой [6] как спектральное объединение (spectrum pooling) и известном так же как гибкий доступ к спектру (opportunistic spectrum access), ограничения накладываются не на мощность передатчика вторичного пользователя, на время, место передачи и частоты, которые возможно использовать. Соответственно в данной ситуации вторичные пользователи определяют незанятые области спектра и осуществляют передачу, не мешая первичным пользователям (рис. 2).

Идеи, заложенные в иерархической модели доступа к спектру, не противоречат сложившимся правилам в области управления спектральными ресурсами. Для повышения эффективности использования спектра оба подхода (overlay и underlay) могут быть задействованы совместно.

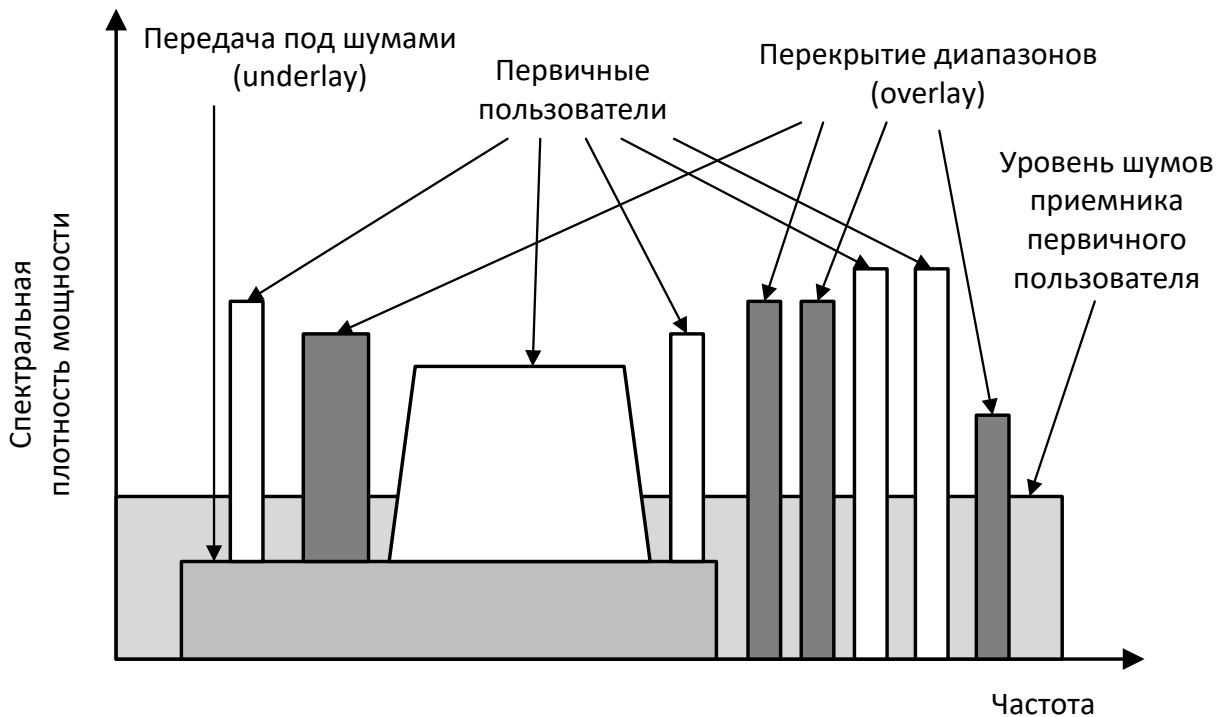


Рис. 2. Пример работы когнитивной радиосистемы в режимах underlay и overlay

Существуют различные методы динамического распределения спектра в системах когнитивного радио [11–14] (Рис. 3.). Распределение спектра между базовыми станциями стандарта IEEE 802.22 на основе алгоритма раскрашивания графа рассмотрено в работе [11]. Работа [12] посвящена теоретико-игровым моделям и алгоритмам распределения спектра между приемопередающими устройствами в сетях когнитивного радио. В работе [13] рассматриваются модели аукционов, направленных на распределение спектра между приемопередающими терминалами путем управления мощностью узлов-передатчиков, результатом которых является временная передача прав на использование некоторого частотного диапазона от первичного пользователя вторичному. Периодический аукцион передачи прав первичного использования частотных диапазонов рассматривается в работе [14].

Технические науки

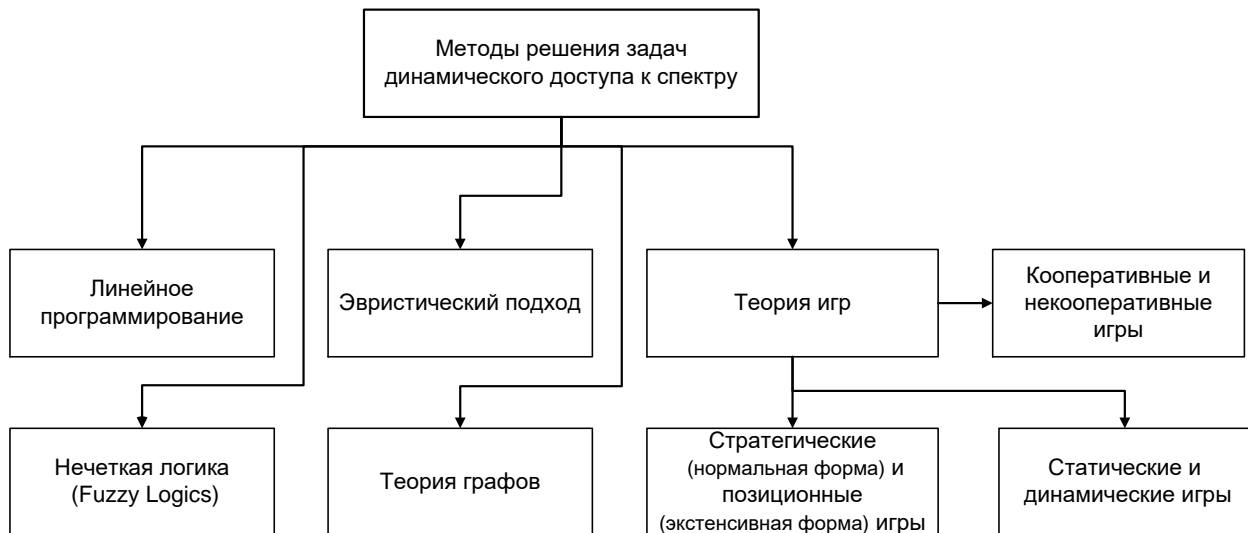


Рис. 3. Методы решения задач динамического распределения спектра

Методы линейного программирования могут быть применены при решении задачи координации доступа к спектру нескольких пользователей когнитивной радиосети, использующих один приемопередатчик в полудуплексном режиме [15].

Среди всех методов, которые применимы для решения задач, связанных с динамическим доступом к спектру эвристический подход, относится к самым простейшим. Он позволяет использовать субоптимальные эвристические алгоритмы для снижения сложности решения задачи. Так, например, в [16] рассмотрен эвристический алгоритм для решения проблемы назначения каналов для вторичных пользователей кооперативной когнитивной системы.

Нечеткая логика применяется в тех ситуациях, когда необходимо принимать решение на основе неопределенной, неточной или неполной информации. Элементы нечеткой логики применяли в [17] для максимизации доступа к спектру вторичных пользователей когнитивной радиосети. В [18] система, основанная на нечеткой логике, применялась для контроля доступа к спектру. Было сформировано 27 нечетких правил на основе лингвистических знаний о спектральном доступе, полученных от группы экспертов. В качестве дескрипторов при формировании базы знаний эксперты использовали:

эффективность использования спектра вторичными пользователями; их степень мобильности и расстояние до первичного пользователя.

В тех случаях, когда структура исследуемой когнитивной сети априорно известна, для решения задачи распределения спектральных ресурсов применяют методы теории графов. Распределение спектра между базовыми станциями стандарта IEEE 802.22 на основе алгоритма раскрашивания графа рассмотрено в работе [11].

Методы теории игр, хорошо зарекомендовавшие себя при решении экономических задач, в последнее время находят применение и в других сферах. В когнитивном радио алгоритмы теории игр рассматриваются в качестве достаточно эффективной модели решения задач динамического доступа к спектральным ресурсам [19]. В рамках теоретико-игрового подхода система когнитивного радио представляется в виде игры $G(N, S, u)$, где N – количество игроков (рассматриваются все пары приемник-передатчик); S – пространство стратегий – множество параметров, определяемое для каждого игрока в отдельности (параметры антенны, используемые алгоритмы кодирования и модуляции, мощность передатчика и т. д.); u – множество функций выигрыша конкретных игроков (максимальная эффективность использования спектра, максимальная скорость передачи данных и т. д.).

Предполагается, что игрок в процессе игры может оценивать, тем или иным способом, результат, который зависит не только от его действий, но и от поведения других игроков. Обычно это реализуется в виде процедуры максимизации функции выигрыша каждого из игроков, с учетом влияния на решение действий других игроков. Решение для устойчивого состояния принято называть равновесием Нэша (Nash Equilibrium). Это соответствует стратегии для каждого игрока при которой он получает оптимальную выгоду в контексте выбора других игроков. То есть ни один из участников игры не может увеличить выигрыш, изменяя свою стратегию, если другие игроки своих стратегий не меняют.

Рассмотрим кратко основные типы игр. В зависимости от взаимодействия с другими игроками выделяют кооперативные и некооперативные игры. В кооперативных играх как правило присутствует объединение игроков в группы (коалиции), в рамках которых заключаются определенные соглашения между игроками, определяющие распределение суммарного выигрыша. В данном подходе существует общий управляющий канал для обмена информацией о принятых игроками коалиции стратегиях. Используя кооперацию при принятии решений о выборе стратегии в данном типе игр, коалиция достигает равновесия Нэша, удовлетворяющего всех ее членов.

Некооперативные игры основываются на анализе поведения одного игрока, его стремления к единоличному выигрышу. Поэтому в некоторых случаях они более детально описывают ситуации и выдают более точные результаты. Однако в таких играх для достижения равновесия Нэша необходимы более быстросходящиеся алгоритмы.

Игры в нормальной форме или стратегические игры характеризуются тем, что игроки выбирают стратегию поведения одновременно в начале игры. Такие игры всегда можно описать с помощью платежной матрицы, используя три составляющие: число игроков; область выбора стратегий и вид функции полезности (выигрыша). Пример матрицы для одного первичного (USER 1) и одного вторичного (USER 2) пользователя показан в таблице 1.

Таблица 1

Пример платежной матрицы

	USER 2 стратегия L	USER 2 стратегия R
USER 1 стратегия U	4,3	-1,-1
USER 1 стратегия D	5,5	0,0

Каждая ячейка таблицы, содержит вектор платежей (значений функции полезности), соответствующий одному из возможных исходов игры. Например, если первичный пользователь реализует стратегию U, а вторичный стратегию L,

то значение функции полезности для первичного пользователя будет равно 4, а для вторичного – 3.

В случае реализации игры в экстенсивной форме игроки принимают решения о выборе стратегии реагируя на действия других игроков. Вся игра делится на этапы. После каждого этапа игроки имеют возможность наблюдать за выходными данными и проводить их анализ до начала следующего. Игры в развернутой форме представляются обычно в виде ориентированного дерева и содержат четыре основных элемента: узлы (вершины), определяющие выбор игрока (позиции игры); ветви, характеризующие стратегии игроков (ходы игрока); вектора значений функции полезности (возможные исходы) и множество, определяющее доступную для игроков информацию (классы информации).

В зависимости от способа принятия решения выделяют статические и динамические игры. В статических играх игроки принимают решения изолированно, не зная какие решения в данный момент времени приняты соперниками. В динамических играх обычно устанавливается некоторый порядок и определяется количество информации, доступное игрокам в различные интервалы времени. В таких играх игрокам предоставляется возможность наблюдать друг за другом и принимать решения в зависимости от стадии игры, на которой они находятся.

Более подробное описание применения теории игр в когнитивном радио можно найти в обзоре [20]. Игровые подходы к распределению ресурсов в когнитивных радиосистемах реализуются в рамках двух основных подходов: монетарном и ресурсном. В первом случае, как правило, в качестве функции полезности выступает финансовая выгода либо для первичного, либо для вторичного пользователя. При ресурсной модели функция полезности связана с оптимизацией пространственного распределения спектра при ограничениях на количество используемых каналов. Ярким примером игрового подхода могут служить модели аукционов, рассмотренные в работах [13] и [14].

Среди отечественных публикаций можно отметить работы Д.В. Ошмарина [8, 12, 21], посвященные теоретико-игровым моделям и алгоритмам распределения спектра между приемопередающими устройствами в сетях когнитивного радио.

В заключение следует отметить, что выбор той или иной технологии распределения спектра тесно связан с характеристиками детектирования и заданными характеристиками качества обслуживания пользователей в сети, реализующей принципы когнитивного радио. Но следует понимать, что в рамках когнитивного подхода в телекоммуникационных сетях, решается более широкий спектр задач чем динамическое распределение спектра, являющееся безусловно одной из важнейших областей применения когнитивного радио.

Список литературы

1. *Комашинский В. И.* Когнитивные системы и телекоммуникационные сети / В. И. Комашинский, Н. А. Соколов // Вестник связи. 2011. № 10. С. 4–8.
2. Cognitive Networks / Ryan W. Thomas [et al.] // First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005. P. 352–360. DOI: 10.1109/DYSPAN.2005.1542652.
3. *Ryan W. Thomas* Cognitive Networks / PhD thesis // Virginia Polytechnic Institute and State University. 2007. Blacksburg, Virginia.
4. *Daniel H. Friend* Cognitive Networks: Foundations to Applications / PhD thesis // Virginia Polytechnic Institute and State University. 2009. Blacksburg, Virginia.
5. *Cabric D.* Implementation issues in spectrum sensing for cognitive radios / D. Cabric, S. Mishra, R. Brodersen // Proceedings of Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers. 2004. V. 1. P. 772–776.
6. *Mitola J.* Cognitive radio: making software radios more personal / J. Mitola, G. Q. Maguire, Jr. // IEEE Personal Communications. 1999. V. 6, is. 4. P. 13–18.
7. *Marinho J.* Cognitive Radio: Technology Survey and Future Research Directions / J. Marinho, E. Monteiro // 4 Congresso do Comite Portugues da URSI, Lisboa. 2010.
8. *Ошмарин Д. В.* Динамическое распределение спектра в беспроводных сетях следующего поколения // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. 2010. № 4 (1). P. 158–164.

9. *Zhao Q.* A Survey of Dynamic Spectrum Access / Q. Zhao, B. Sadler // IEEE Signal Processing Magazine. 2007. V. 24. № 3. P. 79–89.
10. Когнитивные сверхширокополосные радиосистемы как метод повышения эффективности использования радиочастотного спектра / Т. П. Косичкина [и др.] // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2015. Т. 9. № 12. С. 37–43.
11. Enhancements to cognitive radio based IEEE 802.22 air-interface / Sengupta S. [et al.] // IEEE International Conference on Communications, ICC'07. 2007. P. 5155–5160.
12. *Ошмарин Д. В.* Теоретико-игровая модель распределения спектрального ресурса в системе когнитивного радио // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность: материалы II Всерос. молодеж. науч.-техн. конф. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2009. Кн. 2. С. 84–89.
13. Auction-based spectrum sharing / Huang J. [et al.] // Mobile Networks and Applications. 2006. V. 11. P. 405–418.
14. Auction driven dynamic spectrum allocation: optimal bidding, pricing and service priorities for multi-rate, multiclass CDMA / V. Rodriguez [et al.] // Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2005. PIMRC 2005. IEEE 16th International Symposium. 2005. V. 3. P. 1850–1854.
15. *Bany Salameh H. A.* Throughput-oriented channel assignment for opportunistic spectrum access networks // Mathematical and Computer Modeling. 2011. V. 53. № 11–12. P. 2108–2118.
16. *Bkassiny M.* Optimal Channel and Power Allocation for Secondary Users in Cooperative Cognitive Radio Networks / M. Bkassiny, Sudharman K. Jayaweera // Second International ICST Conference, Revised Selected Papers: Mobile Lightweight Wireless Systems (MOBILIGHT 2010). P. 180–191.
17. Maximum Possibility of Spectrum Access in Cognitive Radio Using Fuzzy Logic System / K.Gowrishankar [et al.] // IJERA. 2012. V. 2, is. 4. P. 1408–1415. URL: <https://arxiv.org/pdf/1303.1740>.
18. *Hong-Sam T. Le* Opportunistic spectrum access using Fuzzy Logic for cognitive radio networks / Hong-Sam T. Le, Hung D // Second International Conference on Communications and Electronics, HUT-ICCE 2008. DOI: 10.1109/CCE.2008.4578965. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4578965>.
19. CRANs (Cognitive Radio Ad Hoc Network) a Survey / A. Saleem [et al.] // Proc. of International Conference on Communication Information Technology and Robotics N&N Global Technology 2015. P. 1–6. DOI: 08.ICCITR.2015.1.15.
20. Game theory for cognitive radio networks: An overview / B. Wang [et al.] // Computer Networks. 2010. V. 54. P. 2537–2561. DOI:10.1016/j.comnet.2010.04.004.

21. *Ошмарин Д. В.* Распределение канальных ресурсов в сетях когнитивного радио на основе теории игр // Бизнес-информатика. 2010. № 4 (14). С. 38–45.

ТРУБИН Игорь Сергеевич – доктор технических наук, профессор кафедры радиоэлектронных средств, Вятский государственный университет. 610000, г. Киров, ул. Московская, 36.

E-mail: trubin@vyatsu.ru.