

УДК 004.735

**ДИНАМИЧЕСКОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СПЕКТРА
В БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЯХ СЛЕДУЮЩЕГО ПОКОЛЕНИЯ**

© 2010 г.

Д.В. Ошмарин

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

dmitry.oshmarin@gmail.com

Поступила в редакцию 02.04.2010

Вопрос эффективности использования электромагнитного спектра частот становится краеугольным камнем в современных беспроводных телекоммуникационных сетях и системах. В данной работе рассматривается динамическое распределение спектра между вторичными пользователями на основе аукциона. Производится сравнение посредством моделирования основных характеристик последовательного и одновременного типов аукционов, таких как эффективность, сходимость и прибыльность.

Ключевые слова: когнитивное радио, динамическое распределение спектра, сети следующего поколения.

Введение

Развитие радиовещания, цифрового телевидения и беспроводных систем связи происходит столь 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.

С одной стороны, как показывают исследования [1], использование частотного ресурса неодинаково эффективно во всей полосе частотного спектра и зависит от частоты, пространства и времени. 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 J. Mitola [2, 3] и вылился в концепцию когнитивного радио. Когнитивное радио – это интеллектуальная беспроводная система связи, способная анализировать окружающую обстановку и приспособля-

ваться 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 [4].

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.

В данной статье рассматривается механизм динамического распределения спектра между вторичными пользователями на основе теории аукционов, где в качестве аукциониста выступает первичный пользователь или группа первичных пользователей, а в качестве покупателя – вторичные пользователи. Анализ полученного аукциона ограничивается случаем, когда вторичный пользователь может претендовать только на один диапазон частот из всех разыгрываемых на аукционе.

Обзор литературы

Основополагающими работами в области когнитивного радио принято считать [2, 3].

В [2] рассматривается язык представления знаний о системе связи (RKRL – Radio Knowledge Representation Language) как метод описания и представления знаний в системах когнитивного радио. Механизмы организации и использования спектрального пула вторичными пользователями рассматриваются в [3].

Обзоры когнитивного радио с указанием наиболее перспективных и представляющих научный интерес областей, а также текущих результатов исследований представлены в [4, 5].

Динамическое распределение спектра в системах когнитивного радио рассматривается в работах [6–10]. Распределение спектра между базовыми станциями стандарта IEEE 802.22 на основе алгоритма раскрашивания графа рассмотрено в [6]. Работы [7, 8] посвящены теоретико-игровым моделям и алгоритмам распределения спектра между приемопередающими парами в сетях когнитивного радио. В [9] рассматриваются две модели аукционов, направленных на распределение спектра между приемопередающими парами путем управления мощностью узлов-передатчиков. Периодический аукцион передачи прав первичного использования частотных диапазонов рассматривается в [10].

частотных диапазонах для последующего распределения между вторичными базовыми станциями. Вторичные базовые станции, конкурирующие между собой (например, в случае принадлежности различным операторам мобильной связи), выступают в качестве покупателей частотного ресурса. База данных хранит информацию о доступных частотных диапазонах, первичных и вторичных базовых станциях.

Динамическое распределение спектра в рассматриваемой модели осуществляется спектральным брокером на основе знания о свободных частотных диапазонах посредством аукциона. Длительность использования частотного диапазона указывается первичной базовой станцией в момент передачи информации спектральному брокеру. В течение данного промежутка времени первичная базовая станция не имеет права использовать данный частотный диапазон, что гарантирует отсутствие интерференции между первичным и вторичным пользователями. Соответственно, права на использование спектра в результате аукциона передаются вторичной базовой станции на заранее определенный интервал времени, по окончании которого частотный диапазон должен быть освобожден.

Модель аукциона

Модель сети

Рассмотрим модель сети, показанную на рис. 1. Первичные базовые станции предоставляют спектральному брокеру информацию о частотных ресурсах, которые в данный момент не заняты, выступая в качестве продавцов. Спектральный брокер собирает информацию о свободных

В данной работе рассматривается групповой закрытый аукцион, исходом которого является распределение спектра между вторичными пользователями. Причем каждый вторичный пользователь может стать обладателем только одного частотного диапазона по результатам проведенного аукциона. Определим множество

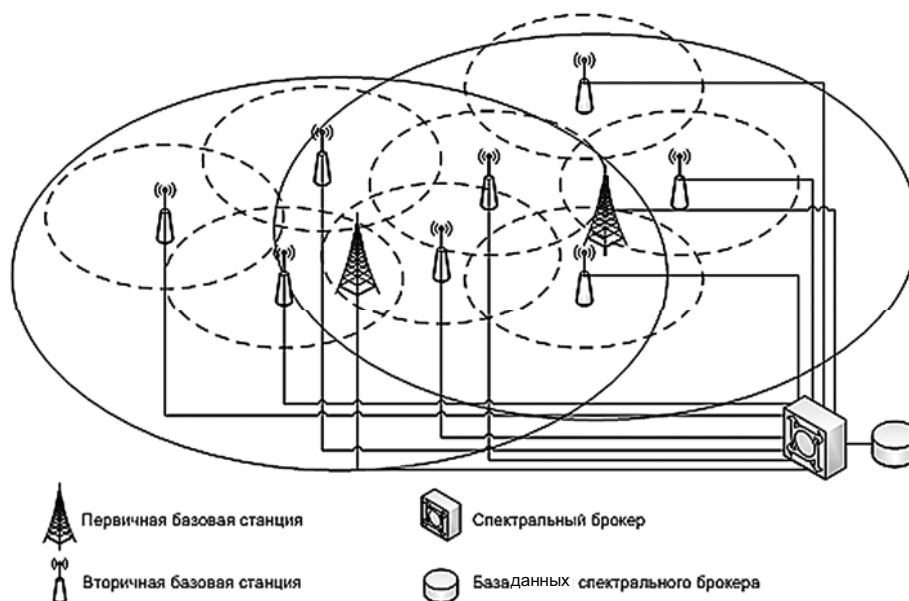


Рис. 1. Модель сети

частотных диапазонов, разыгрываемых на аукционе:

$$S = \{s_1, s_2, \dots, s_M\},$$

где M – количество доступных частотных диапазонов.

Множество оценок частотных диапазонов вторичным пользователем, участвующим в аукционе:

$$V_i = \{v_i^1, v_i^2, \dots, v_i^M\}.$$

Ограничимся рассмотрением случая, когда все частотные диапазоны равноценны для вторичного пользователя, то есть

$$v_i^1 = v_i^2 = \dots = v_i^M = v_i.$$

Выигрыш вторичного пользователя может быть представлен в виде:

$$\Pi_i = \begin{cases} v_i - b_i, & b_i > \max_{j \neq i} b_j \\ 0, & b_i < \max_{j \neq i} b_j \end{cases},$$

где b_i – предложение цены i -го вторичного пользователя.

Так как рассматриваемый аукцион является групповым, то аукционист имеет две возможности продажи частотных диапазонов: последовательную и одновременную. В случае последовательного аукциона каждый частотный диапазон разыгрывается отдельно и после каждого розыгрыша объявляется победитель. В случае одновременного аукциона все M частотных диапазонов разыгрываются за один раз и распределяются между M вторичными пользователями с максимальной ценой предложения.

Предположим, что $N = \{N_1, N_2, \dots, N_n\}$ вторичных пользователей участвуют в групповом аукционе, где разыгрывается $M = \{M_1, M_2, \dots, M_m\}$ частотных диапазонов, $n > m$. Все частотные диапазоны являются равноценными для вторичных пользователей, как оговаривалось ранее, тем самым образуя множество оценок:

$$V_i = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}.$$

Рассмотрим более подробно последовательный аукцион, в котором после каждого розыгрыша спектральный брокер распространяет информацию о выигравшем вторичном пользователе и о цене его предложения. В случае последовательного аукциона удобно начать рассмотрение с момента, когда разыграно k частотных диапазонов и $(n-k)$ вторичных пользователей продолжают участие в аукционе. Предположим, что предложения цены распределены равномерно с плотностью распределения вероятностей:

$$f(b) = \frac{1}{v_{\max}}, \quad (1)$$

где $v_{\max} = \max_i V_i$.

Пусть b_i – предложение цены i -го вторичного пользователя за $(k+1)$ частотный диапазон. В таком случае i -й вторичный пользователь выигрывает аукцион тогда и только тогда, когда его предложение цены больше, нежели предложение цены всех остальных $(n-k-1)$ вторичных пользователей. Для начала определим вероятность того, что предложение цены b_i i -го вторичного пользователя больше, чем предложение цены b_j j -го вторичного пользователя:

$$P(b_i > b_j) = \int_0^{b_i} f(b) db = \frac{b_i}{v_{\max}}. \quad (2)$$

Тогда вероятность выигрыша аукциона i -м вторичным пользователем может быть выражена следующим соотношением:

$$P(b_i > \forall b_j) = \prod_{j=1, j \neq i}^{n-k-1} P(b_i > b_j) = \left(\frac{b_i}{v_{\max}} \right)^{n-k-1}. \quad (3)$$

Таким образом, функция выигрыша вторичного пользователя вычисляется по формуле:

$$\begin{aligned} \Pi_i^{носл} &= P(b_i > \forall b_j) \cdot (v_i - b_i) = \\ &= \left(\frac{b_i}{v_{\max}} \right)^{n-k-1} \cdot (v_i - b_i). \end{aligned} \quad (4)$$

Для получения оптимального предложения цены вторичным пользователем найдем экстремум, для чего продифференцируем функцию выигрыша:

$$\frac{d\Pi_i^{носл}}{db_i} = \frac{(n-k-1) \cdot (v_i - b_i) \cdot b_i^{n-k-2} - b_i^{n-k-1}}{v_{\max}^{n-k-1}}.$$

Найденная точка экстремума является точкой максимума (это справедливо и для ниже рассматриваемых случаев).

Отсюда получим оптимальное предложение цены вторичного пользователя в последовательном групповом аукционе:

$$b_i^{носл} = \frac{(n-k-1) \cdot v_i}{(n-k)}. \quad (5)$$

Далее проанализируем одновременный групповой аукцион и найдем оптимальное предложение цены вторичным пользователем. Как и в случае последовательного аукциона, спектральный брокер распространяет информацию о выигравших вторичных пользователях и их предложениях цены.

Пусть b_i – предложение цены i -го вторичного пользователя за один частотный диапазон. В та-

ком случае i -й вторичный пользователь выиграет аукцион тогда и только тогда, когда его предложение цены будет находиться среди m максимальных предложений. Если множество проигравших вторичных пользователей обозначить через L , то вероятность данного события равна:

$$P(b_i > \forall b_j | j \in L) = \prod_{j=1, j \neq i}^{n-m} P(b_i > b_j) = \left(\frac{b_i}{v_{\max}} \right)^{n-m}. \quad (6)$$

Таким образом, функция выигрыша вторичного пользователя вычисляется по формуле:

$$\Pi_i^{\text{одн}} = P(b_i > \forall b_j | j \in L) \cdot (v_i - b_i) = \left(\frac{b_i}{v_{\max}} \right)^{n-m} \cdot (v_i - b_i). \quad (7)$$

Для получения оптимального предложения цены вторичным пользователем найдем экстремум, для чего продифференцируем функцию выигрыша:

$$\frac{d\Pi_i^{\text{одн}}}{db_i} = \frac{(n-m) \cdot (v_i - b_i) \cdot b_i^{n-m-1} - b_i^{n-m}}{v_{\max}^{n-m}}.$$

Отсюда получим оптимальное предложение цены вторичного пользователя в одновременном групповом аукционе:

$$b_i^{\text{одн}} = \frac{(n-m) \cdot v_i}{(n-m+1)}. \quad (8)$$

Отдельно рассмотрим случай, когда спектральный брокер распространяет информацию не о выигравшей цене предложения, а о минимальной цене предложения в аукционе. Понятно, что в следующем раунде аукциона никто из вторичных пользователей не будет предлагать цену ниже минимальной в предыдущем раунде, так как вероятность выигрыша при этом минимальна и равна 0. Это позволяет нам заменить нижнюю границу предложения цены вторичными пользователями на некоторую величину $b_{\min}$ и записать (1) в виде:

$$f(b) = \frac{1}{v_{\max} - b_{\min}}. \quad (9)$$

Тогда для последовательного группового аукциона (2)–(5) пересчитываются в (10)–(13) соответственно:

$$P(b_i > b_j) = \int_{b_{\min}}^{b_i} f(b) db = \frac{b_i - b_{\min}}{v_{\max} - b_{\min}}, \quad (10)$$

$$P(b_i > \forall b_j) = \prod_{j=1, j \neq i}^{n-k-1} P(b_i > b_j) = \left(\frac{b_i - b_{\min}}{v_{\max} - b_{\min}} \right)^{n-k-1}, \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \Pi_i^{\text{носл}} &= P(b_i > \forall b_j) \cdot (v_i - b_i) = \\ &= \left(\frac{b_i - b_{\min}}{v_{\max} - b_{\min}} \right)^{n-k-1} \cdot (v_i - b_i), \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\Pi_i^{\text{носл}}}{db_i} &= \\ &= \frac{(n-k-1) \cdot (v_i - b_i) \cdot (b_i - b_{\min})^{n-k-2} - (b_i - b_{\min})^{n-k-1}}{(v_{\max} - b_{\min})^{n-k-1}}, \\ b_i^{\text{носл}} &= \frac{(n-k-1) \cdot v_i + b_{\min}}{(n-k)}. \end{aligned} \quad (13)$$

Для одновременного группового аукциона (6), (7) и (8) пересчитываются в (14), (15) и (16) соответственно:

$$\begin{aligned} P(b_i > \forall b_j | j \in L) &= \\ &= \prod_{j=1, j \neq i}^{n-m} P(b_i > b_j) = \left(\frac{b_i - b_{\min}}{v_{\max} - b_{\min}} \right)^{n-m}, \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \Pi_i^{\text{одн}} &= P(b_i > \forall b_j | j \in L) \cdot (v_i - b_i) = \\ &= \left(\frac{b_i - b_{\min}}{v_{\max} - b_{\min}} \right)^{n-m} \cdot (v_i - b_i), \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\Pi_i^{\text{одн}}}{db_i} &= \\ &= \frac{(n-m) \cdot (v_i - b_i) \cdot (b_i - b_{\min})^{n-m-1} - (b_i - b_{\min})^{n-m}}{(v_{\max} - b_{\min})^{n-m}}, \\ b_i^{\text{одн}} &= \frac{(n-m) \cdot v_i + b_{\min}}{(n-m+1)}. \end{aligned} \quad (16)$$

Сравним полученные последовательные и одновременные групповые аукционы посредством моделирования.

Результаты моделирования

Моделирование динамического распределения спектра между вторичными пользователями проводилось для четырех моделей аукциона: последовательного, последовательного с распространением минимального предложения цены, одновременного и одновременного с распространением минимального предложения цены. Целью моделирования являлись анализ и сравнение основных характеристик аукционов, таких как эффективность и сходимость аукциона, выручка аукциониста и средняя прибыль вторичных пользователей.

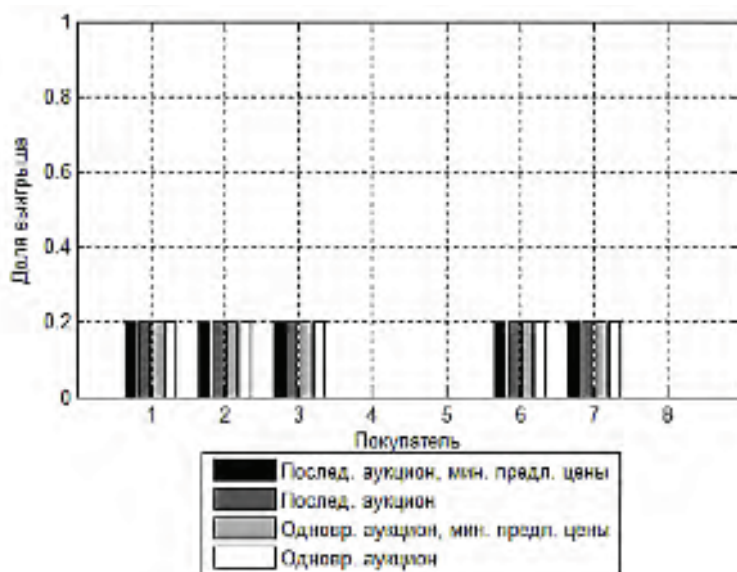


Рис. 2. Гистограмма распределения выигрышей среди вторичных пользователей

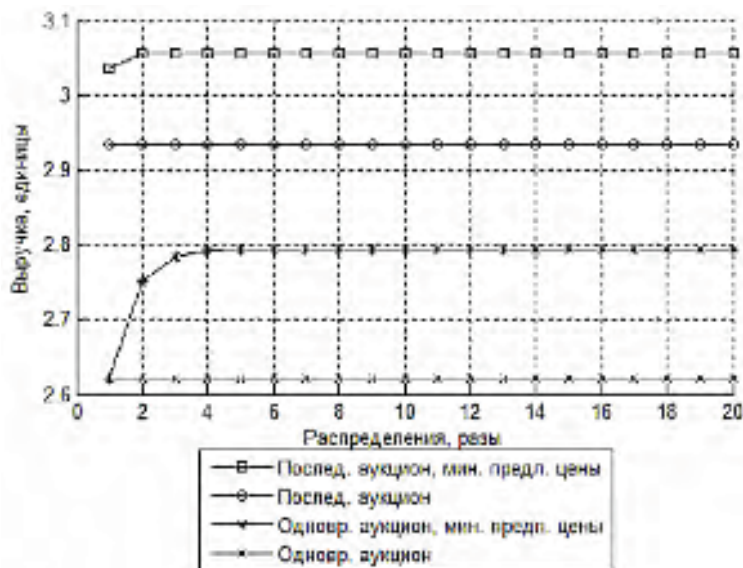


Рис. 3. Выручка аукциониста в различных аукционах

Параметры моделирования:

- Количество вторичных пользователей $n=8$;
- Количество частотных диапазонов $m=5$;
- Оценки частотных диапазонов вторичными пользователями распределены равномерно на интервале $[0,1]$;
- Количество повторений распределения частотных диапазонов равно 20.

Вначале проведем сравнение аукционов с точки зрения их эффективности. В теории аукционов эффективным будет такой аукцион, в котором разыгрываемый предмет достается тому пользователю, который его выше оценивает. На рис. 2 представлена гистограмма распре-

ления выигрышей аукциона среди вторичных пользователей.

Таким образом, все виды рассматриваемых аукционов абсолютно одинаковы с точки зрения эффективности, так как частотные диапазоны распределяются среди одних и тех же вторичных пользователей.

На рис. 3 представлены графики зависимости выручки аукциониста от количества распределений частотных диапазонов между вторичными пользователями.

Наибольшую выручку для аукциониста приносит последовательный аукцион с распространением минимального предложения

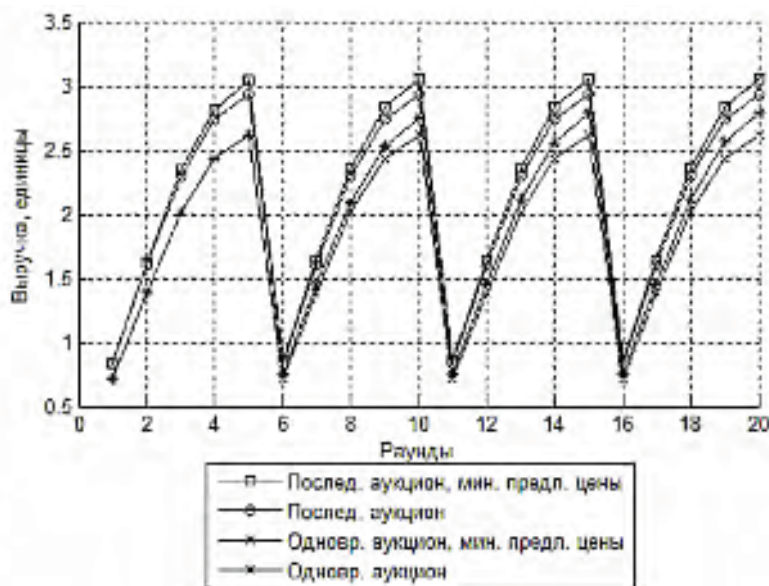


Рис. 4. Динамика увеличения выручки аукциониста в различных аукционах

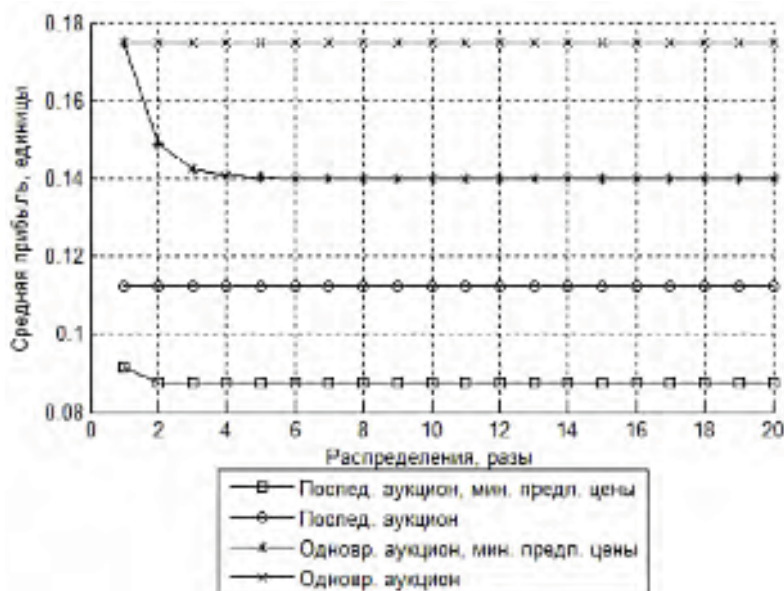


Рис. 5. Средняя прибыль вторичного пользователя в различных аукционах

цены. Вне зависимости от выбора последовательного или одновременного типа аукциона для аукциониста выгодно распространять информацию о минимальном предложении цены, так как это приносит ему дополнительную выручку за счет стимуляции вторичного пользователя к более агрессивному повышению своего предложения цены. На рис. 3 также видно, что сходимость последовательного аукциона выше сходимости одновременного аукциона, так как при последовательном аукционе вторичный пользователь имеет возможность корректировать предложение цены при каждом новом розыгрыше

частотного диапазона, а не один раз за распределение, как это происходит при одновременном аукционе.

На рис. 4 представлена динамика изменения выручки с развитием аукциона. Для удобства представлены только 4 первых распределения из 20.

На рис. 5 приведено сравнение средней прибыли вторичного пользователя в различных типах аукционов. Как видно, для вторичного пользователя участие в простом одновременном аукционе является наиболее выгодным с точки зрения средней прибыли, которую он получит за выигранный частотный диапазон.

Заключение

Современные тренды в развитии беспроводных телекоммуникаций все больше убеждают нас в несостоятельности статического распределения частотных ресурсов. Предлагаемое динамическое распределение спектра среди вторичных пользователей позволяет значительно увеличить эффективность использования частотных ресурсов. Одним из механизмов динамического распределения спектра в системах когнитивного радио может быть распределение на основе аукциона, результатом которого является временная передача прав на использование некоторого частотного диапазона от первичного пользователя вторичному.

В данной работе рассматривается модель сети, где первичные пользователи (первичные базовые станции) передают информацию о свободных частотных диапазонах спектральному брокеру, который организует аукцион среди вторичных пользователей (вторичных базовых станций). Также были рассмотрены модели последовательного и одновременного аукционов с распространением информации о выигрышном и минимальном предложении цены. На основе результатов моделирования сделаны выводы об эквивалентности рассматриваемых аукционов с точки зрения их эффективности и о более высокой скорости сходимости последовательного аукциона. Также в результате моделирования были получены графики зависимости выручки аукциониста и средней прибыли вторичных пользователей и гистограммы распределения частотных диапазонов среди вторичных пользователей в различных аукционах.

Список литературы

1. Cabric D., Misha S.M., Brodesen R.W. Implementation issues in spectrum sensing for cognitive radios // Signals, Systems and Computers, 2004. Conference Record of the Thirty-Eighth Asilomar Conference. 2004. Vol. 1. P. 772–776.
2. Mitola J., Maguire G.Q. Cognitive radio: making software radios more personal // Personal Communications, IEEE. 1999. Vol. 6. P. 13–18.
3. Mitola J. Cognitive radio for flexible mobile communications // Mobile Multimedia Communications, 1999. (MoMuC '99) 1999 IEEE International Workshop. 1999. P. 3–10.
4. Haykin S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications // Selected Areas in Communications, IEEE Journal. 2005. Vol. 23. P. 201–202.
5. Akyildiz I.F., Won-Yeol Lee, Vuran M.C., Shantidev M. NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey // Computer Networks. 2006. Vol. 50. P. 2127–2159.
6. Sengupta S., Brahma S., Chatterjee M., Shancar N.S. Enhancements to cognitive radio based IEEE 802.22 air-interface // Communications, 2007. ICC'07. IEEE International Conference. 2007. P. 5155–5160.
7. Ошмарин Д.В. Теоретико-игровая модель распределения ресурсов в самоорганизующихся системах когнитивного радио // Сборник тезисов, материалы Пятнадцатой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых (ВНКСФ-15, Кемерово – Томск): материалы конференции, тезисы докладов: В 1 т. Т.1 – Екатеринбург – Кемерово: издательство АСФ России, 2009. С. 672–673.
8. Ошмарин Д.В. Теоретико-игровая модель распределения спектрального ресурса в системе когнитивного радио // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность: матер. II Всерос. молодежн. науч.-техн. конф. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2009. Кн. 2. С. 84–89.
9. Huang J., Berry R.A., Honig M.L. Auction-based spectrum sharing // Mobile Networks and Applications. 2006. Vol. 11. P. 405–418.
10. Rodriguez V., Moessner K., Tafasolli R. Auction driven dynamic spectrum allocation: optimal bidding, pricing and service priorities for multi-rate, multi-class CDMA // Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2005. PIMRC 2005. IEEE 16th International Symposium. 2005. Vol. 3. P. 1850–1854.
1. Cabric D., Misha S.M., Brodesen R.W. Implementation issues in spectrum sensing for cognitive radios //

DYNAMIC SPECTRUM ALLOCATION IN NEXT GENERATION WIRELESS NETWORKS

D.V. Oshmarin

The problem of efficient spectrum usage becomes a cornerstone in modern wireless telecommunication networks and systems. In this paper, dynamic spectrum allocation between secondary users based on auction theory is studied. Main characteristics of sequential and concurrent types of auctions such as efficiency, convergence and profitability are compared by means of modeling.

Keywords: cognitive radio, dynamic spectrum allocation, next generation networks.