



УДК 621.391

В. Л. Литвинов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

А. В. Гуцин

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

## Применение теории устойчивых паросочетаний для распределения ресурсов в сетях когнитивного радио

*Рассмотрены принципы работы многопользовательских когнитивных радиосетей как адаптивных информационно-коммуникационных систем. Обозначен круг задач, который предстоит решить при создании радиосетей по данной технологии. В качестве решения задачи распределения ресурсов предлагается использовать теоретико-игровые методы теории устойчивых паросочетаний.*

### Когнитивное радио, устойчивые паросочетания, распределение ресурсов, спектральный мониторинг, теория игр

Одна из проблем, стоящих перед разработчиками радиовещательного оборудования, – это проблема перегруженности радиочастотного диапазона. Наибольшая дальность распространения, минимальный эффект Доплера, возможность передачи данных вне зоны прямой видимости – эти и другие требования определяют тот частотный диапазон, который используют технологии, разработанные и стандартизованные еще в 60-х гг. XX в. Таким образом, становится очевиден повышенный интерес к технологии когнитивного радио. Данная технология позволяет решить проблему перегруженности частотного диапазона за счет повторного использования уже занятых частот устаревшими и менее эффективными средствами беспроводной передачи данных.

Когнитивное радио – это радиосистема, которая использует технологии радиосвязи с программируемыми параметрами и другие технологии для автоматического настраивания режима работы для достижения желаемых целей. Такая радиосистема способна накапливать знания об условиях эксплуатации, а также динамической и самостоятельной адаптации своих эксплуатационных параметров к

соответствующей среде и может запоминать результаты своих действий и используемые модели для той или иной окружающей среды.

В рамках идеи повторного использования частотного диапазона с применением когнитивного радио определяют понятия первичного и вторичного пользователя. Первичный пользователь – это приемопередающая радиосистема, которая осуществляет обмен данными в присвоенном ей диапазоне частот. Вторичный пользователь – это приемопередающая радиосистема, которая осуществляет передачу данных в том же диапазоне частот, что и первичный пользователь. Передача данных вторичного пользователя должна осуществляться в «белых пятнах» частотного и временного диапазонов таким образом, чтобы первичный пользователь ничего не знал о вторичном пользователе и не испытывал его отрицательного влияния. «Белое пятно» – это область частотного диапазона, в которой нет сигнала первичного пользователя. «Белые пятна» могут быть как постоянными, так и переменными во времени. В зависимости от взаимного расположения первичного и вторичного пользователей «белые пятна» могут существовать для одного вторичного

пользователя и отсутствовать для другого. Одни когнитивные радиостанции могут находиться в непосредственной близости от первичного пользователя, другие могут быть настолько далеко, что мощность его сигнала ниже уровня шума.

Для когнитивной радиосистемы можно сформулировать следующую постановку задачи. Задача условно делится на 3 части: задача мониторинга частотного диапазона для поиска «белых пятен» [1], задача формирования сигнала передатчика с необходимыми свойствами для отправки данных в «белом пятне» спектрального диапазона и задача эффективного (справедливого) распределения частотно-временного ресурса между пользователями сети в зависимости от их потребностей и расположения. Последняя задача актуальна и для любой радиосистемы с множественным доступом, следовательно, представляет наибольший интерес.

Для простоты будем полагать, что используется когнитивная радиосистема с множественным доступом с централизованной архитектурой. Чтобы сформулировать данную задачу, необходимо представить список пользователей  $I$ , список каналов  $H$  и список предпочтений каждого пользователя относительно доступных каналов  $\succ = (\succ_i)$ , где  $i \in I$ . Следовательно, задача эффективного распределения частотно-временного ресурса между пользователями может быть представлена в виде кортежа  $\langle I, H, \succ \rangle$ .

Прежде чем переходить к решению поставленной задачи, необходимо определить критерии, по которым будет формироваться список предпочтений каждого пользователя относительно того или иного канала.

Самый разумный и распространенный критерий качества канала связи – отношение сигнал / шум (ОСШ). Для каждого пользователя ОСШ при передаче данных в одном и том же «белом пятне» может достаточно сильно отличаться. Это связано с переходной характеристикой канала связи от данного пользователя  $i$  ( $i \in I$ ) к базовой станции, с отсутствием или наличием в этом канале замирания и т. д. Вторым критерием является размер «белого пятна» – ширина полосы, которую может использовать пользователь  $i$  за доступный ему промежуток времени. Данный критерий определяет наибольший объем информации, который  $i$ -й пользователь может передать в данном «белом пятне». Очевидно, что «белые пятна» с большей емкостью будут наиболее предпочтительны. Таким

образом может быть сформирован изначальный список предпочтений  $\succ_i$  для  $i$ -го пользователя.

Пусть существует начальное распределение ресурсов при последовательной инициализации пользователей в сети. Кортеж, описывающий задачу, принимает вид  $\langle I, H, \succ, \eta \rangle$ , где  $\eta$  – начальное распределение.

К распределению частотно-временных ресурсов в когнитивной радиосистеме между пользователями ( $\mu(i)$ ) должны предъявляться следующие требования [2]:

1. Распределение должно быть индивидуально рационально, т. е. все пользователи должны после распределения получить не меньше ресурсов, чем имели ( $\mu(i) \succeq_i h_i$  для всех  $i \in I$ ).

2. При распределении  $\mu$  не должно существовать коалиции  $T$  (подмножества  $I$ ) и другого распределения  $\nu$ , для которого:

а)  $\nu(i) \in \{h_j\}_{j \in T}$  для всех  $i \in T$ ;

б)  $\nu(i) \succeq_i \mu(i)$  для всех  $i \in T$ ;

в)  $\nu(i) \succ_i \mu(i)$  хотя бы для одного  $i \in T$ .

Необходим алгоритм, который бы реализовал распределение ресурсов между пользователями согласно обозначенным выше требованиям. Такой алгоритм существует в рамках теоретико-игровых моделей теории устойчивых паросочетаний (matching). Алгоритм был разработан Д. Гейлом и Л. Шепли [2], [3] и носит название «Алгоритм циклов наилучших продаж Гейла» (Gale's Top Trading Cycles (TTC)). Он был первоначально разработан как решение задачи эффективного распределения домов между агентами на рынке жилья.

В данном случае алгоритм будет состоять из следующих шагов:

Шаг 1. Каждый из пользователей сообщает, какой канал он хотел бы занять согласно вершине списка своих предпочтений. Если образуется коалиция, в которой при обмене ресурсами между собой все члены данной коалиции получили бы канал, который соответствовал их наибольшему предпочтению, то такой обмен следует произвести. Все члены данной коалиции получают свои каналы и не рассматриваются на следующем шаге.

Шаг  $n$ . Оставшиеся пользователи сообщают, какой канал из оставшихся они хотели бы занять. Образуется коалиция, в которой пользователи обмениваются между собой своими каналами. Данная коалиция получает свое назначение, и ее члены не рассматриваются на следующем шаге. Шаг следует повторять, пока остается хотя бы один пользователь без назначения.

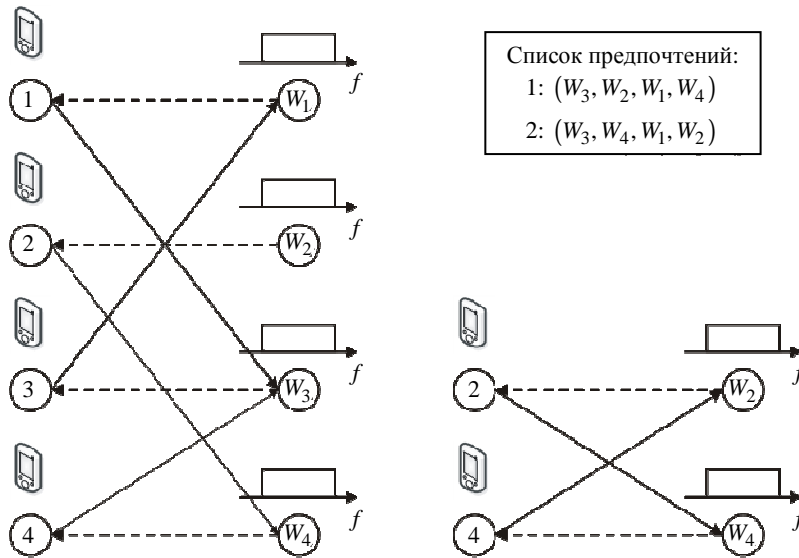


Рис. 1

На рис. 1 показано распределение ресурсов согласно алгоритму ТТС для четырех пользователей.

Как видно из рис. 1, на первом шаге пользователи 1 и 3 составляют коалицию, которой выгодно обменяться каналами между собой. Происходит назначение пользователям каналов согласно списку их предпочтений, после чего пользователи 1 и 3 больше не рассматриваются. На шаге 2 пользователь 2 хочет канал  $W_4$ , а пользователь 4 – канал  $W_3$ , но данный канал уже назначен и больше не рассматривается. Пользователь 4 рассматривает следующий канал в списке своих предпочтений. Это канал  $W_2$ . Пользователи 2 и 4 обмениваются каналами, и алгоритм завершает работу.

В своей статье 1994 г. математик Джинпенг Ма доказал [4], что распределение, составленное в результате алгоритма Gail's ТТС, удовлетворяет ранее перечисленным требованиям 1 и 2. Кроме того, при использовании данного механизма всем участникам распределения выгодно «говорить правду» по поводу своих предпочтений (strategy-proof в англоязычной литературе). Это свойство, очевидно, чрезвычайно важно для решения экономических задач. Для решения данной задачи выгода от него заключается в невозможности повлиять на распределение ресурсов со стороны пользователя.

Таким образом, можно сформулировать следующий алгоритм работы централизованной многопользовательской когнитивной радиосети:

1. Инициализация сети. На данном этапе базовая станция получает информацию из базы данных о расположении сигналов первичного пользователя. Происходит связь всех вторичных

пользователей с базовой станцией на частотах, гарантированно не пересекающихся с сигналами первичного пользователя. Вторичные пользователи передают служебную информацию, в том числе информацию о своем расположении и информацию частотного мониторинга.

2. Первичное назначение каналов связи («белых пятен») для передачи данных. Исходя из информации, полученной из частотного мониторинга, для каждого вторичного пользователя формируется список предпочтений относительно всех доступных каналов связи. Далее возможно 2 варианта назначения каналов. Первый – присвоить каждому пользователю некоторый приоритет и сформировать из них очередь. Первый пользователь в очереди получает канал из вершины его списка предпочтений, второй пользователь получает лучший для него канал из оставшихся и т. д. Второй вариант – сначала раздать каналы случайным образом, а затем распределить каналы с помощью алгоритма Gail's ТТС.

3. Текущее назначение каналов связи. Пользователи продолжают передавать данные на выделенных им частотах, одновременно передавая базовой станции информацию частотного мониторинга. Списки предпочтений пользователей непрерывно обновляются. При появлении в сети некоторого события базовая станция перераспределяет каналы между вторичными пользователями с помощью алгоритма Gail's ТТС. Перераспределение ресурсов может вызвать появление в сети нового пользователя или изменение радиочастотной обстановки таким образом, что хотя бы один вторичный пользователь не может обеспечить необходимое качество связи.

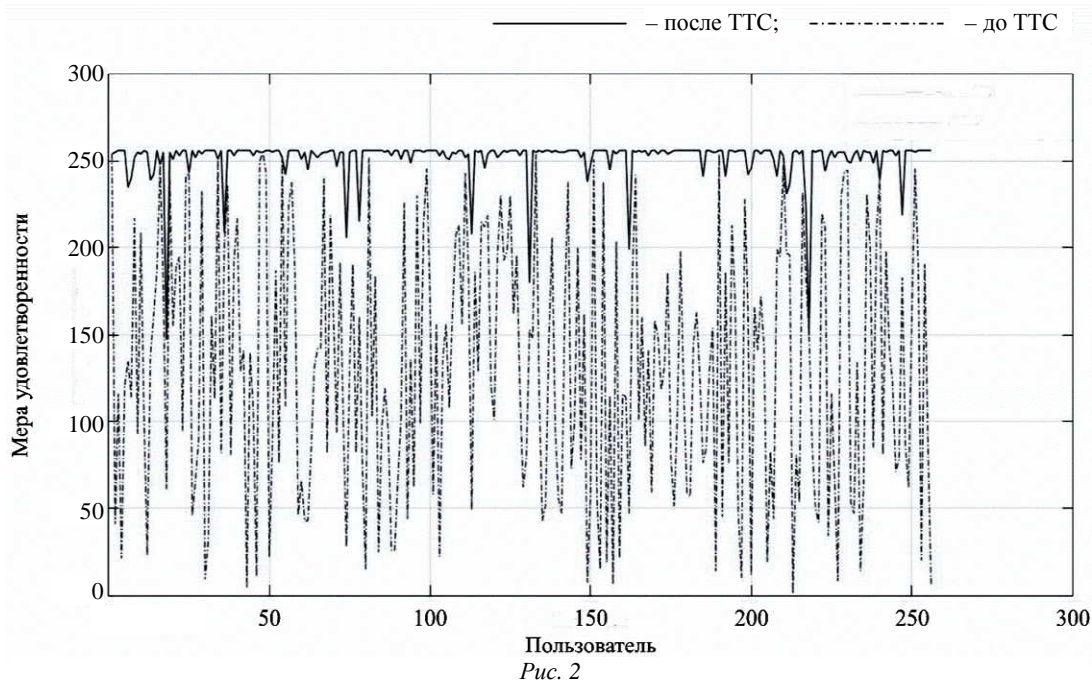


Рис. 2

Результаты симуляции в пакете Matlab для 256 пользователей изображены на рис. 2 и подтверждают все ранее изложенное. Штрихпунктирной линией изображена степень удовлетворенности

пользователя до использования Gail's TTC, сплошной – после.

Одним из важных достоинств данного алгоритма можно признать его простоту реализации и небольшие требования к вычислительным мощностям.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуцин А. В., Литвинов В. Л. Методы спектрального мониторинга для систем когнитивного радио // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании: IV Междунар. науч.-техн. и науч.-метод. конф., СПб., 3–4 марта 2016 г. / СПбГУТ. СПб., 2015. С. 488–492.

2. Gale D., Shapley L. College Admissions and the Stability of Marriage // American Mathematical Monthly. 1962. Vol. 69, № 1. P. 9–15.

3. Shapley L., Scarf H. On Cores and Indivisibility // J. of Mathematical Economics. 1974. Vol. 1. P. 23–28.

4. Ma J. Strategy-Proofness and the Strict Core in a Market with Indivisibilities // Intern. J. of Game Theory. 1994. Vol. 23. P. 75–83.

V. L. Litvinov

Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

A. V. Gushchin

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

## APPLICATION OF THE THEORY OF STABLE MATCHINGS FOR RESOURCE ALLOCATION IN COGNITIVE RADIO NETWORKS

*In the article the principles of the operation of multi-user cognitive radio networks as adaptive information systems are examined. Is designated the circle of tasks, which is in prospect to solve with the creation of radio systems on this technology. As the solution of the allocation problem of resources it is proposed to use game theory methods of the theory of stable matchings.*

**Cognitive radio, stable matchings, resource allocation, spectrum monitoring, game theory**