

---

---

# Системы, сети и устройства телекоммуникаций

---

---

УДК 004.73:006

## Разработка алгоритмов когнитивного радио стандарта IEEE 802.22

**Малыхин Василий Игоревич** – магистр кафедры оптимизации систем управления Института кибернетики. ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет». E-mail: malykhinvi@gmail.com.

**Замятина Оксана Михайловна** – кандидат технических наук, доцент кафедры оптимизации систем управления. ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет». E-mail: zamyatina@tpu.ru.

**Фофанов Олег Борисович** – кандидат технических наук, заведующий кафедрой оптимизации систем управления. ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет». E-mail: ofofano@tpu.ru.

Адрес: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

*Аннотация:* Статья посвящена стандарту беспроводных региональных сетей IEEE 802.22, актуального в качестве средства обеспечения широкополосного доступа к сети Интернет в сельской местности. Разъяснены причины, препятствующие распространению данного стандарта в настоящее время. Рассмотрена имитационная модель алгоритма выбора каналов беспроводной сети стандарта IEEE 802.22, разработанная с помощью программного продукта Arena, объяснён выбор платформы, а также трудности, связанные с реализацией модели на ней. Приведены исходные данные для модели, описаны её подсистемы. Приведены результаты проведённых с моделью экспериментов, направленных на моделирование нагрузки сети до 60 пользователей в минуту, запрашивающих объем трафика равный 0.5–2 МБ, разъяснён алгоритм выбора свободного канала в сети данного стандарта. Предложен вариант решения выявленной проблемы неэффективного использования спектра каналов.

*Ключевые слова:* когнитивное радио, беспроводная региональная сеть, стандарт IEEE 802.22, имитационная модель, спектральный этикет, алгоритм смены каналов.

---

### Актуальность

В настоящее время широкополосный доступ в интернет доступен в городах или крупных населенных пунктах. Доступ же в интернет в отдаленной от городской инфраструктуры сельской местности в основном отсутствует либо достаточно дорог. Одним из перспективных решений данной проблемы является использование беспроводных региональных сетей, на сегодняшний день представленных единственным стандартом – IEEE 802.22 [1, 2].

Стандарт беспроводной связи IEEE 802.22 был предложен в 2004 году, утверждён IEEE-SA Standart Board (Institute of Electrical and Electronics Engineers) в декабре 2009 года [2].

В настоящее время внедрению и широкому распространению стандарта IEEE 802.22 препятствуют два фактора:

- отсутствие устройств работающих с данным стандартом;
- удовлетворённость пользователей существующим стандартом 802.11.

Несмотря на препятствующие факторы, изучение нового стандарта является актуальной и своевременной задачей. Не вызывает сомнений, что сфера информационно - телекоммуникационных систем развивается стремительно, и решение о переходе на новый стандарт может быть принято быстро.

В связи с вышесказанным, данная статья посвящена изучению и алгоритмической реализации стандарта IEEE 802.22.

В процессе изучения стандарта была разработана имитационная модель системы, исследованы и модифицированы эталонные алгоритмы выбора оптимального канала связи и

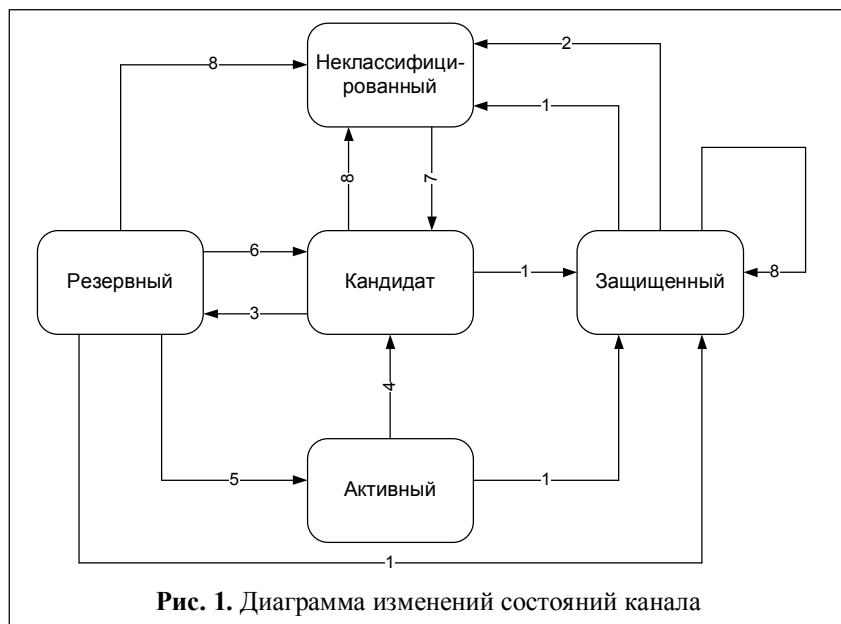


Рис. 1. Диаграмма изменений состояний канала

проведён ряд экспериментов по обработке внутренних и внешних запросов на смену канала.

#### Исходные данные для модели

Основой когнитивной составляющей стандарта является система статусов каналов. Переход из одного статуса в другой регламентируется политиками стандарта. Статусы каналов и переходы между ними представлены на рис. 1 (цифрами 1-8 обозначены события, инициирующие переход).

События, инициирующие смену статуса:

1. Активный, резервный или канал-кандидат получают статус защищенного, если обнаружен лицензионный пользователь на этом канале.

2. Не обнаружено лицензионных пользователей на канале.

3. Не обнаружено лицензионных пользователей на канале-кандидате и выполнено сканирование в течение необходимого времени всеми абонентскими станциями (АС).

4. Канал освобожден от использования WRAN сервисом.

5. Канал становится активным вследствие назначения WRAN сервисом.

6. Требования к времени проверки резервного канала не выполнены одной или несколькими АС.

7. Сканирование ранее не классифицированного канала не выявило лицензионных пользователей на данной частоте.

8. Канал не был просканирован в течение необходимого промежутка времени одной или несколькими АС. Если канал был в статусе защищенного, то статус канала не меняется.

Кроме наличия лицензионных пользователей на определение статуса каналов влияют также статусы каналов соседних сот WRAN.

Выбор канала в соте должен осуществляться согласно правилу спектрального этикета (Spectrum Etiquette) таким образом, чтобы выбранные каналы не пересекались с каналами соседней соты или пересекались с наименьшим числом. Неследование этикету может привести к тому, что выбор частот в одной соте делает невозможным функционирование соседней соты [3].

#### Моделирование

При создании имитационной модели было принято решение разбить всю модель на подсистемы:

- подсистема передачи данных;
- подсистема сканирования каналов;
- подсистема генерации периодов тишины (QP);
- подсистема генерации лицензионных пользователей;
- подсистема выбора канала.

Взаимосвязь подсистем представлена на рис. 2.

**Подсистема передачи данных** занимается непосредственной транспортировкой данных. Передача данных осуществляется в течение всего времени, кроме QP, при условии, что свободен активный канал. При отсутствии активного канала управление передается подсистеме выбора канала. На время выбора активного канала, данные буферизируются.

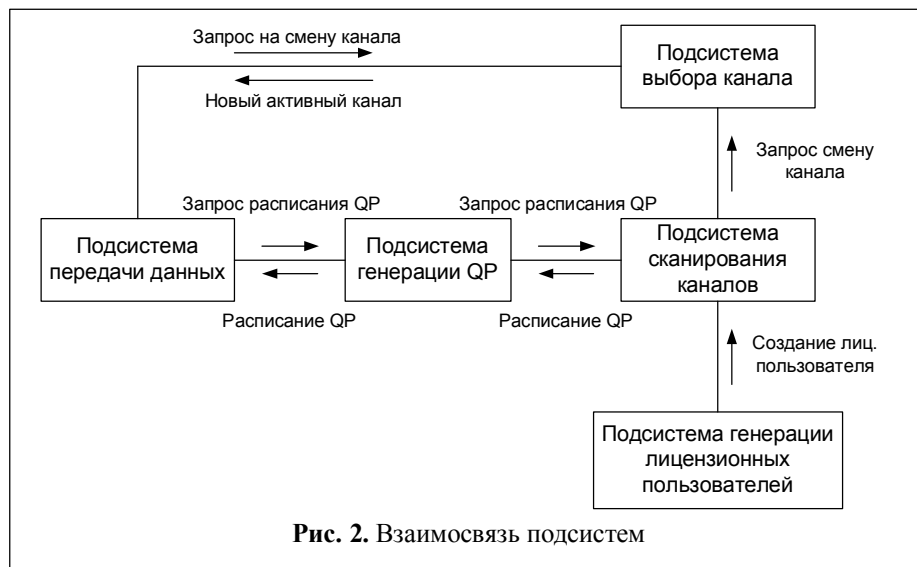


Рис. 2. Взаимосвязь подсистем

**Подсистема генерации QP** выступает в роли планера QP. QP – период времени, в течение которого базовая станция (БС) и все ассоциированные с ней АС производят сканирование каналов. Любая передача данных в течение QP запрещена. Если длительности и частоты появления QP не хватает для выполнения запланированных задач сканирования какой-нибудь АС, то либо увеличивается периодичность поступления QP, либо планируются специальные межфреймовые QP, длительность которых выше, чем у внутрифреймовых.

**Подсистема сканирования каналов** инициирует проверки каналов в соответствии с типом канала. При обнаружении помех на любом канале кроме активного, система меняет его статус на защищенный. При возникновении помехи на активном канале подсистема передает управление подсистеме выбора канала.

**Подсистема выбора канала** осуществляет создание списка резервных каналов и выбор наиболее приоритетного из них. В зависимости от того, как были получены каналы, варьируется алгоритм назначения приоритета. Резервный канал с наивысшим приоритетом становится активным. В данной подсистеме происходит определение режима работы сети 802.22 (нормальный или режим взаимодействия). Если работа данной подсистемы инициирована подсистемой передачи данных, то после выбора канала возобновляется передача данных [4].

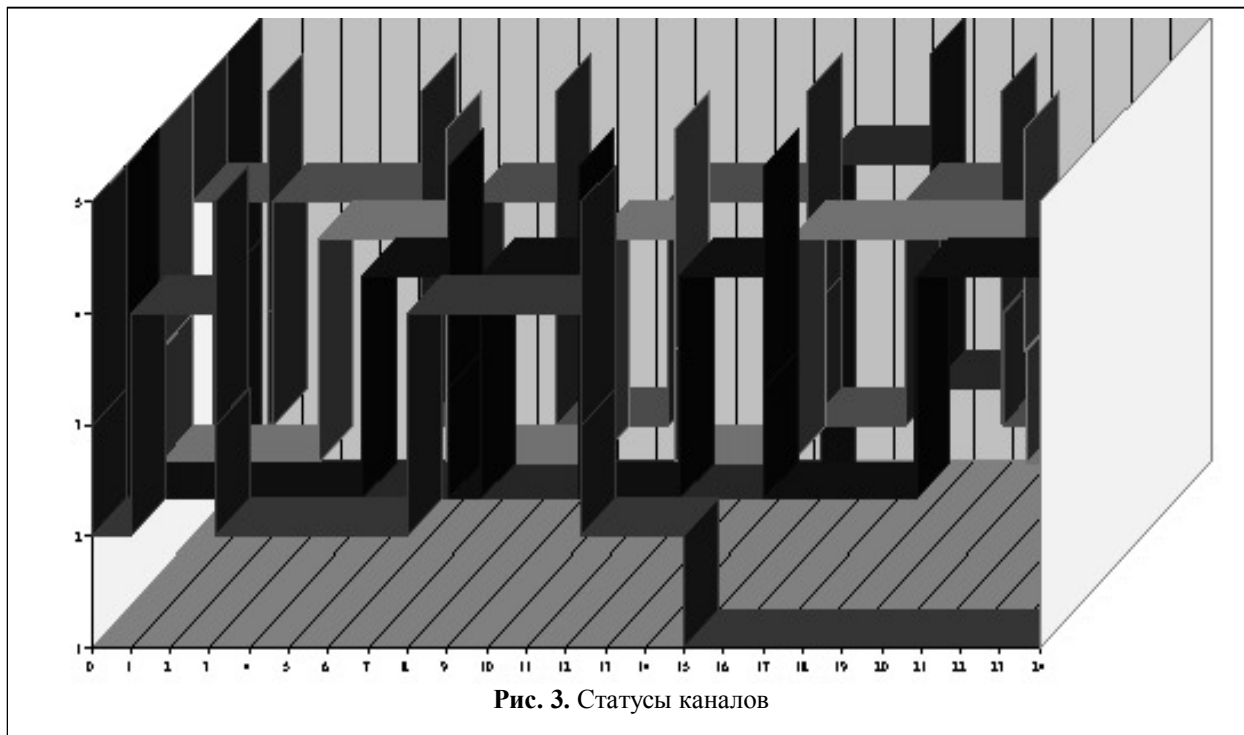
Запрос на смену канала может возникнуть в двух случаях. Во-первых, при появлении лицензионного пользователя на активном канале. Во-вторых, при появлении другой БС, оперирующей в зоне действия текущей БС на одном и том же активном канале. Данные факты отслеживаются с помощью подсистемы сканирования каналов. Третьей причиной

является наличие резервного канала с более высоким приоритетом по сравнению с активным каналом.

Связь между подсистемами генерации лицензионных пользователей и сканирования каналов неявная. Обе подсистемы работают параллельно. При возникновении лицензионного пользователя, сохраняется глобальная переменная, которая в дальнейшем проверяется при сканировании каналов.

Имитационная модель была построена с помощью программного продукта *Arena* [5]. При создании модели приходилось учитывать ограничения версии ПО. Проблему с ограничением модулей удалось решить, используя связку модулей *Assign* и *Decide*, последовательно задавая различные параметры внутри *Assign*, а затем проверяя данные параметры в *Decide*, можно реализовать достаточно сложные алгоритмы. Также были использованы паттерны моделирования, позволяющие наиболее оптимально смоделировать циклы, параллельные процессы, буферизацию данных, очередь каналов для проверки и т.д. [7, 8].

Ограничение по количеству сущностей в модели можно решить двумя способами, во-первых, на этапе проектирования модели, а во-вторых, с помощью грамотного использования очередей и разбиения сущностей.



На этапе проектирования было установлено, что для адекватной оценки нагрузки на сеть невозможно использовать одну сущность на один запрос пользователя. Необходимо инкапсулировать несколько запросов пользователя в одну сущность. Сущность содержит в себе информацию о том, сколько пользователей запросили ресурс сети и в каком объеме.

Разбиение модели на подсистемы позволило сделать модель более понятной, менее связанной и гибкой. Инкапсулирование конкретного функционала менеджера спектра (МС) делает возможным поэтапное создание и тестирование модели. Кроме того, выбранная модель данных позволяет обойти ограничения программной среды *Arena*, налагаемые на количество логических блоков в модели и количество сущностей.

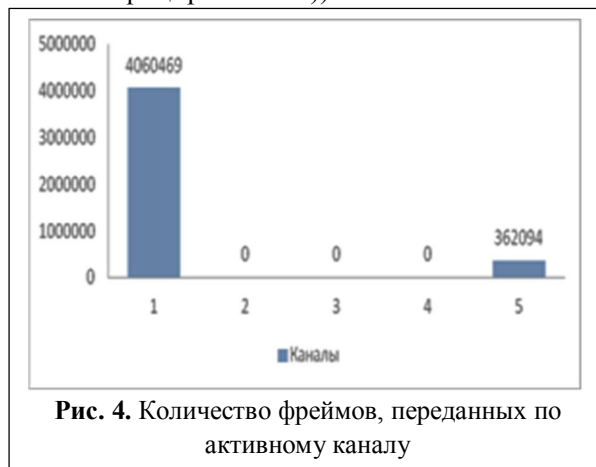
#### Эксперименты

Примем, что генерируется [1; 60] запросов в минуту. Под запросом подразумевается необходимость передачи данных в размере 0.5-2 МБ. Количество каналов с допустимым соотношением сигнал/шум равно 5. Скорость каждого канала представлена в таблице 1.

Таблица 1. Параметры каналов

Номер канала	Пропускная способность (Мбит/с)
1	3
2	5
3	10
4	15
5	22

Изменение статусов каналов представлено на рис. 3 (по горизонтальной оси отмечены интервалы времени (24 часа), по вертикальной – статусы каналов (1 – активный, 2 – резервный, 3 – кандидат, 4 – защищенный, 5 – неклассифицированный)).



На рис. 4 видно, что в качестве активного канала самое длительное время использовался

канал с самой низкой пропускной способностью. Низкая эффективность использования спектра может быть обусловлена тем, что при выборе канала использовалось правило спектрального этикета, а также тем, что смена канала, согласно стандарту, происходит лишь в случае появления лицензионного пользователя или другой исключительной ситуации.

Используем модифицированные алгоритмы: периодическое сканирование и отказ от минимизации количества переключений каналов. На рис. 5 видно, что выбор активного канала стал более оптимальным.

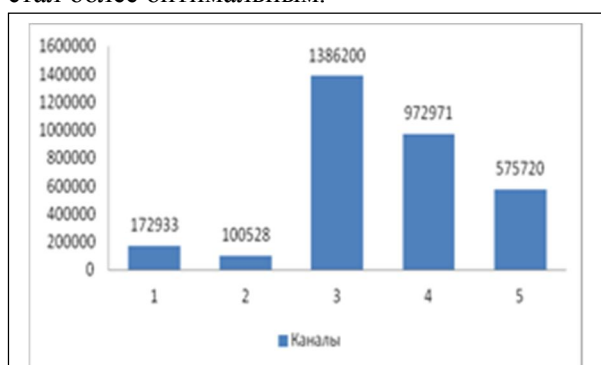


Рис. 5. Количество фреймов, переданных по активному каналу

Сводная таблица результатов исследования внешних запросов представлена ниже (1 – эталонный алгоритм, 2 – алгоритм с периодическим сканированием, 3 – периодическое сканирование и модификация спектрального этикета).

Таблица 2 Результаты моделирования

Параметр	1	2	3
Средняя общая пропускная способность (Мбит/с)	7.79	8.27	13.14
Средняя пропускная способность на пользователя (Мбит/с)	0.65	0.61	1
Количество переданных данных в сутки (ГБ)	21.9	43,8	88.8
Количество данных на один запрос (МБ)	0.5	1	2

Рассмотрим более детально причины неэффективного использования спектра, а также варианты оптимизации алгоритмов выбора и смены активного канала.

### Алгоритмы

Как стандарт беспроводной сети, стандарт IEEE 802.22 описывает ряд основных алгоритмов, связанных с инициализацией БС и АС,

установкой соединения, обменом служебной информацией между БС и БС (или АС). Данные алгоритмы, с небольшими изменениями, можно встретить в спецификациях других стандартов беспроводных сетей [6]. В случае с когнитивным радио интерес представляют алгоритмы работы с каналами, прежде всего алгоритм выбора и смены канала.

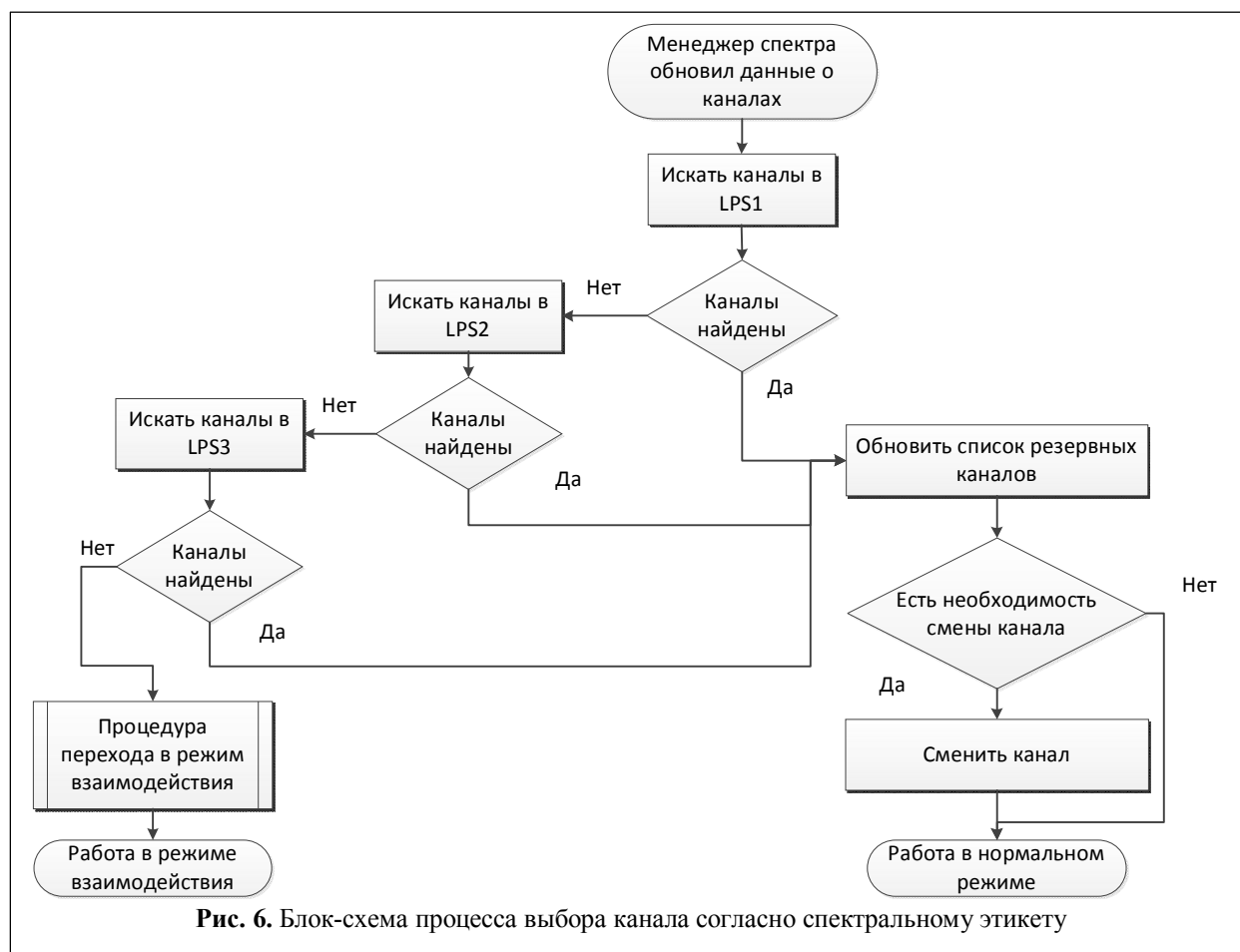
Основой когнитивной составляющей является алгоритм выбора свободного канала. В рамках стандарта 802.22 он называется спектральным этикетом. Согласно спектральному этикету выбор канала в соте должен осуществляться таким образом, чтобы выбранные каналы не пересекались с каналами соседней соты или пересекались с наименьшим числом. Не следование этикету может привести к тому, что выбор частот в одной соте делает невозможным функционирование соседней соты. Количество вероятных коллизий при смене канала несколькими сотами можно снизить, если избегать использования одних и тех же резервных каналов. Блок-схема выбора канала согласно этикету представлена на рис. 6.

Для функционирования в рамках спектрального этикета вводятся дополнительные наборы каналов:

- *WRAN occupied Channel Set*: активные каналы соседней соты;
- *Neighbor WRAN Backup Channel Set*: резервные каналы соседней соты;
- $LocalPrioritySet1 = (Backup\ Channel\ Set\ AND\ Candidate\ Channel\ Set) \setminus (WRAN\ occupied\ Channel\ Set\ AND\ Neighbor\ WRAN\ Backup\ Channel\ Set)$ ;
- $LocalPrioritySet2 = (Backup\ Channel\ Set\ AND\ Candidate\ Channel\ Set) \setminus (WRAN\ occupied\ Channel\ Set)$ ;
- $LocalPrioritySet3 = WRAN\ occupied\ Channel\ Set$ .

Спектральный этикет применяется в следующих случаях:

- обнаружение лицензионного пользователя;
- обнаружение соседней WRAN соты;
- изменение активного канала по требованию;
- конкурентный запрос соседней WRAN соты.



Сценарий взаимодействия БС согласно спектральному этикету:

1. Менеджер спектра каждой БС строит список каналов согласно их статусу.

2. Обновление списка резервных каналов, выбирается один или несколько из *LocalPrioritySet1*. Если *LocalPrioritySet1* пуст, то обновить резервные каналы, используя каналы из *LocalPrioritySet2*. Если *LocalPrioritySet2* также пуст, то обновить резервные каналы, используя *LocalPrioritySet3*. При выборе каналов необходимо минимизировать количество БС, использующих один и тот же канал.

3. Если необходимо сменить активный канал, то выбрать резервный канал с наивысшим приоритетом. Перейти на шаг 2, обновить список резервных каналов.

4. Если новый активный канал также активный канал соседней соты, начать процедуру конкурентного взаимодействия между сотами.

5. Обновить активный и резервные каналы соседних сот.

На момент выпуска стандарта база лабораторных исследований, касающихся когнитивного радио была еще достаточно мала, а производительность прототипов – достаточно низка.

Исследования в области когнитивного радио, проведенные после выпуска стандарта, показывают, что скорость переключения каналов может быть достаточно высокой. Исследователями из Radio Technology Systems of Ocean Grove, New Jersey [1] был создан прототип устройства, способного работать в диапазоне от 100 МГц до 7.5 ГГц. Данное устройство позволяет сканировать диапазон частот и переключаться между каналами в течение 50 мкс [1]. Поэтому, минимизацией количества переключений соседних сот можно пренебречь, а использование спектрального этикета свести к двум случаям: если канал найден среди доступных каналов, то работать в нормальном

режиме, если нет – в режиме конкурентного взаимодействия (рис. 7). При этом в качестве основного критерия используется максимальная пропускная способность канала.

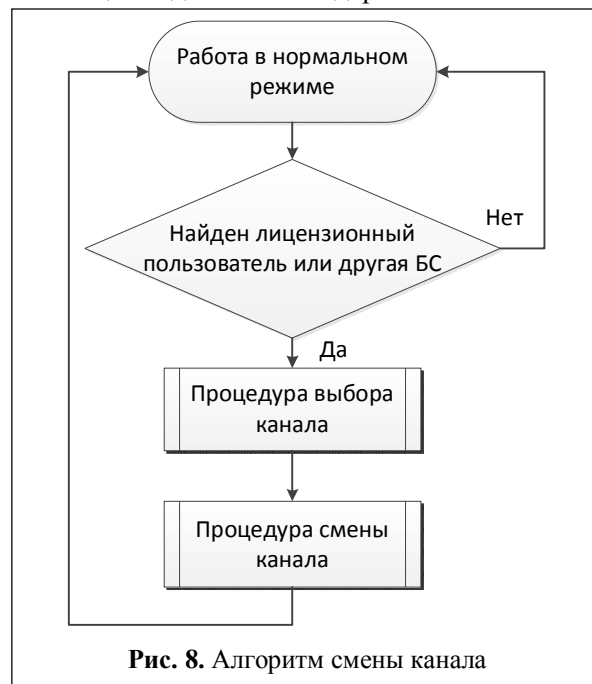


Во время моделирования было выяснено, что смена канала при возникновении исключительной ситуации может привести к неэффективному использованию спектра, когда каналы с большей пропускной способностью не используются (рис. 8). Данную проблему можно решить с помощью реализации периодического сканирования доступных резервных каналов и выбора наилучшего канала (рис. 9).

### Выводы

В рамках данной работы было проведено исследование стандарта беспроводных региональных сетей IEEE 802.22 – первого стандар-

та, базирующегося на когнитивном радио. Были проанализированы и систематизированы различные зарубежные источники литературы, касающиеся данного стандарта.



Анализ когнитивных алгоритмов стандарта показал, что данный алгоритм можно существенно улучшить, и выявил необходимость построения имитационной модели для исследования алгоритмов выбора канала.

В процессе работы была смоделирована нагрузка на сеть: до 60 пользователей в минуту, запрашивающих объем трафика равный 0.5-2 МБ. При этом средняя скорость в расчете на конечного пользователя составила 1 Мбит/с.

Проведенные исследования показали, что при отказе от минимизации количества переключений активных каналов в соседних сотах и реализации периодического выбора оптимального канала удается увеличить производительность сети в 4 раза.

### Литература

1. Тэлбот Д. Frequency-Hopping Radio Wastes Less Spectrum // MIT Technology Review, [2013]. Дата обновления: 13.08.2012. URL: <http://www.technologyreview.com/news/428182/frequency-hopping-radio-wastes-less-spectrum/> (дата обращения: Август 13, 2012).
2. IEEE standards association. (2011). Wireless Regional Area Networks (WRAN) – Specific requirements. Part 22: Cognitive Wireless RAN Medium Ac-

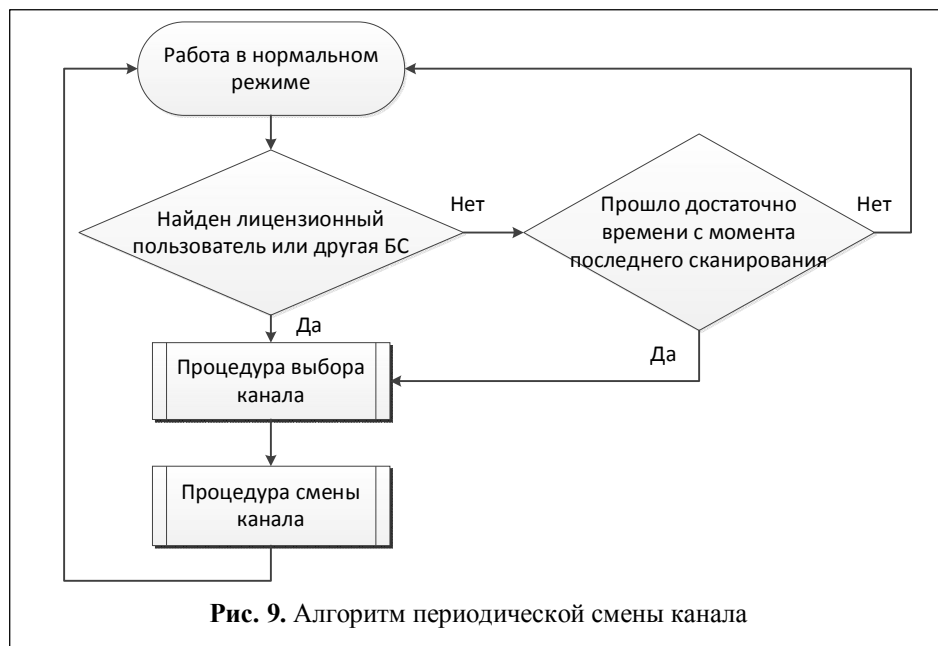


Рис. 9. Алгоритм периодической смены канала

cess Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Policies and Procedures for Operation in the TV Bands. New York.

3. Крайнов А.Ю., Мещеряков Р.В., Шелупанов А.А. Модель надежности передачи информации в защищенной распределенной телекоммуникационной сети // Известия Томского политехнического университета. 2008. № 5. С. 60–63.

4. Мещеряков Р.В., Росошек С.К., Шелупанов А.А., Сонькин М.А. Криптографические протоколы в системах с ограниченными ресурсами // Вычислительные технологии. 2007. № S1. С. 51–61.

5. Arena Simulation Software. URL: [http://www.arenasimulation.com/Arena\\_Home.aspx](http://www.arenasimulation.com/Arena_Home.aspx) (дата обращения: Июль 12, 2013).

6. Мещеряков Р.В., Шелупанов А.А., Зырянова Т.Ю. Характеристики надежности распределенных криптографических информационно-телекоммуникационных систем с ограниченными ресурсами // Вычислительные технологии. 2007. № S1. С. 62–67.

7. Замятина О.М. Метод моделирования и комплексного анализа бизнес-процессов // Известия Томского политехнического университета. 2005. Т. 308. № 6. С. 180–186.

8. Zamyatina O.M., Zamyatin A.V. The original method compared to existing modeling techniques // В сборнике: 8th Korea-Russia International Symposium on Science and Technology – Proceedings: KORUS 2004 8th Korea-Russia International Symposium on Science and Technology, KORUS 2004. sponsors: Tomsk Polytechnic University, University of Ulsan, Novosibirsk State Technical University. Tomsk, 2004. С. 189–191.

Поступила 28 октября 2013 г.

English

## The development of the cognitive IEEE 802.22 radio standard algorithm

**Malykhin Vasily Igorevich**– Master, Department of Optimization of Management Systems Institute of Cybernetics. Federal state budgetary educational institution of higher professional education “National Research Tomsk Polytechnic University” .

**Zamyatina Oksana Mikhaelovna** - Candidate of Engineering, Associate Professor Department of Optimization of Management Systems Federal state budgetary educational institution of higher professional education “National Research Tomsk Polytechnic University” .

**Fofanov Oleg Borisovich** – Candidate of Engineering, Associate Professor, The Head of the Department of Optimization of Management Systems Federal state budgetary educational institution of higher professional education “National Research Tomsk Polytechnic University” .

Address: 634050, г. Tomsk, st. Lenin, 30.

**Abstract:** The paper is devoted to the IEEE 802.22 standard of wireless regional networks which provides broadband access to the Internet in a rural areas. The reasons for hindering the spread of this standard are explained. The simulation model of selection algorithm of channels of IEEE 802.22 wireless network developed with the help of Arena software is considered, the selection of a platform as well as the difficulties related to the implementation of the model on it are explained here. The initial data for the model is given, the model subsystems are described. The results of the performed experiments directed to the simulation of a network load up to 60 users per minute, requesting .5-2 MB traffic are given, the algorithm of selection of the



clear channel in a network of this standard type is explained. The solution of the found problem of inefficient use of the channel spectrum is proposed.

*Key words:* cognitive radio, wireless regional network, IEEE 802.22 standard, simulation model, spectral etiquette, algorithm of channel change.

### References

1. *Talbot D.* Frequency-Hopping Radio Wastes Less Spectrum//MIT Technology Review, [2013]. Date of update(up-dating): 8/13/2012. URL: <http://www.technologyreview.com/news/428182/frequency-hopping-radio-wastes-less-spectrum/> (date of reversal(call): August 13, 2012).
2. IEEE standards association. (2011). Wireless Regional Area Networks (WRAN) - Specific requirements. Part 22: Cognitive Wireless RAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Policies and Procedures for Operation in the TV Bands. New York.
3. *Krajnov A.Ju., Meshherjakov R.V., Shelupanov A.A.* A Model of Information Transmission Reliability in Secure Distributed Telecommunication Network // *Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta*. 2008. <sup>1</sup> 5. P. 60–63.
4. *Meshherjakov R.V., Rososhek S.K., Shelupanov A.A., Sonkin M.A.* Cryptographic Protocols in the Systems with Limited Resources. *Vychislitel'nye tehnologii*. 2007. №1. P. 51–61.
5. Arena Simulation Software. URL: [http://www.arenasimulation.com/Arena\\_Home.aspx](http://www.arenasimulation.com/Arena_Home.aspx) (data obrashhenija: Ijul' 12, 2013).
6. *Meshherjakov R.V., Shelupanov A.A., Zyrjanova T.Ju.* Reliability Performances of Distributed Cryptographic Information-Telecommunication Systems with Limited Resources. *Vychislitel'nye tehnologii*. 2007. №. 1. P. 62–67.