

Исследование и моделирование работы когнитивного радиостандарта IEEE 802.22

В. И. Малыхин, О. М. Замятина

Статья посвящена исследованию и моделированию работы стандарта беспроводных региональных сетей IEEE 802.22, актуального в качестве средства обеспечения широкополосного доступа к сети Интернет в сельской местности. Разработана имитационная модель выбора каналов беспроводной сети стандарта IEEE 802.22 с помощью программного продукта Arena. Приведены исходные данные для модели, описаны и промоделированы её подсистемы.

Ключевые слова: когнитивное радио, беспроводная региональная сеть, стандарт IEEE 802.22, имитационная модель.

1. Актуальность

В настоящее время широкополосный доступ в интернет доступен в городах или крупных населенных пунктах. Доступ же в интернет в отдалённой 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 Standard Board (Institute of Electrical and Electronics Engineers) в декабре 2009 года [2].

В настоящее время внедрению и широкому распространению стандарта IEEE 802.22 препятствует отсутствие устройств, работающих с данным стандартом.

Несмотря на это, 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 проведён ряд экспериментов по обработке внутренних и внешних запросов на смену канала связи.

2. 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).

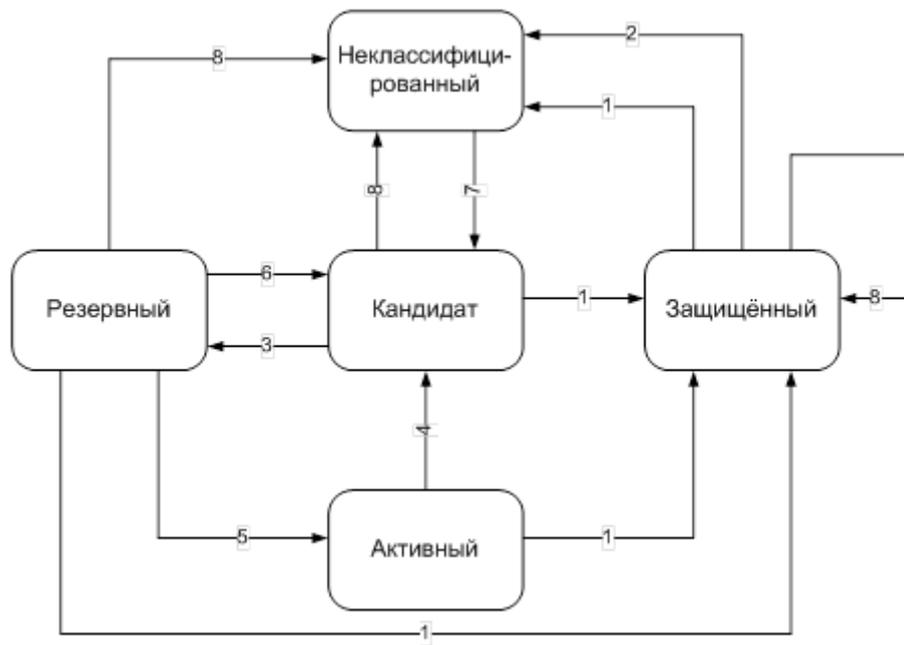


Рис. 1. Диаграмма изменений состояний канала

События, инициирующие смену статуса:

1. Активный, резервный или канал-кандидат получают статус защищённого, 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 освобождён от использования WRAN (Wireless Regional Area Network) сервисом.
5. Канал становится активным вследствие назначения WRAN-сервисом.
6. Требования к времени проверки резервного канала не выполнены одним 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 одним или несколькими АС. Если канал был в статусе защищённого, 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 механизму совместного сосуществования (coexistence) 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.

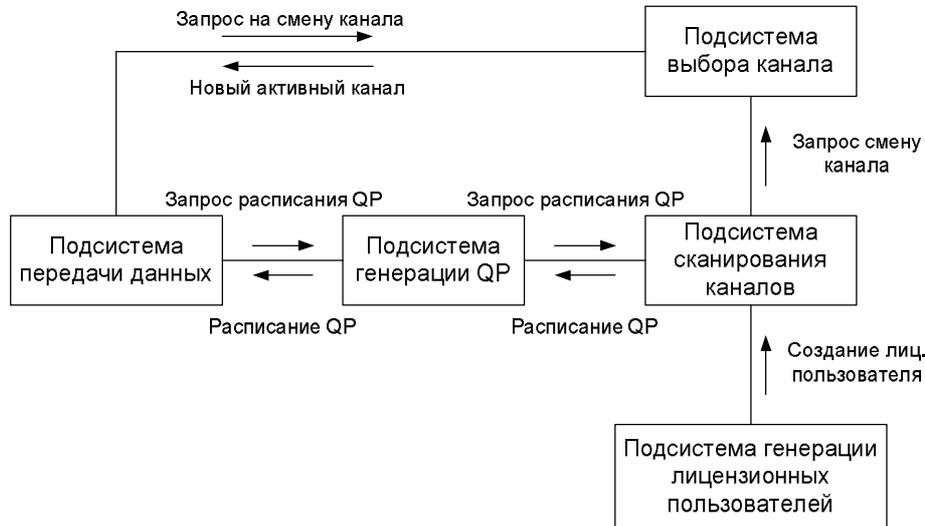


Рис. 2. Взаимосвязь подсистем

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 передаётся подсистеме выбора канала. На время выбора активного канала данные буферизируются.

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 защищённый. При возникновении помехи на активном канале подсистема передаёт 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.

Запрос на смену канала может возникать 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* [3]. 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. [4].

Ограничение по количеству сущностей, обрабатываемых элементов – запросов, 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 объёме.

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.

4. 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 передачи данных каналов представлена в табл. 1.

Таблица 1. Параметры каналов

Номер канала	Скорость передачи данных (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 – защищённый, 5 – неклассифицированный).

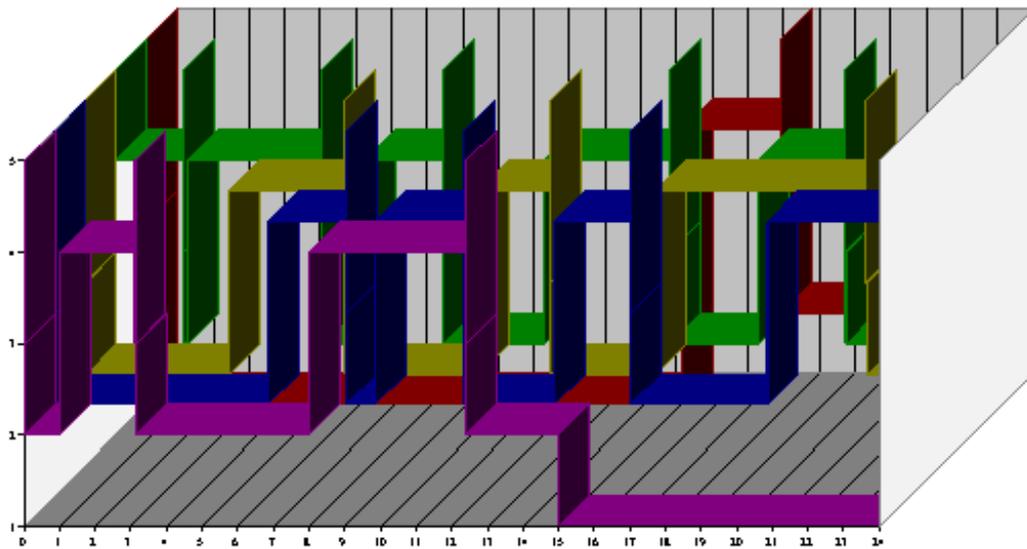


Рис. 3. Статусы каналов

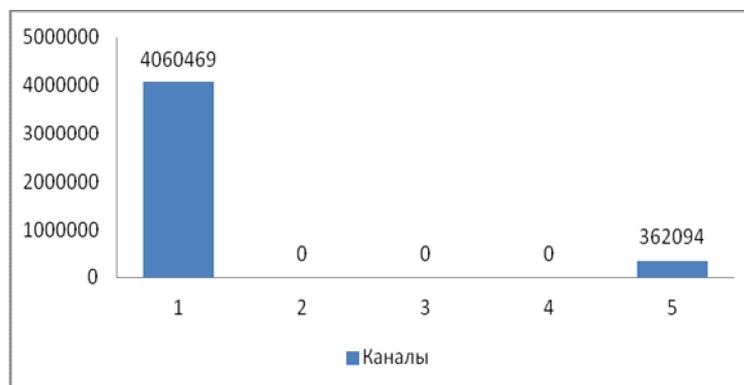


Рис. 4. Количество фреймов, переданных по активному каналу

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.

Используя модифицированные алгоритмы из рис. 5, видно, что выбор активного канала стал оптимальным.

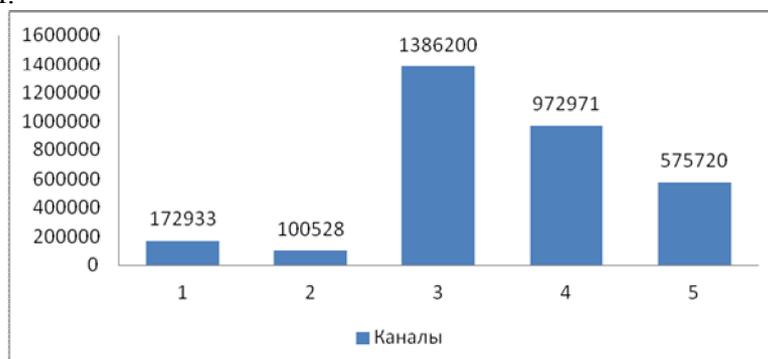


Рис. 5. Количество фреймов, переданных по активному каналу

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.

5. 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. 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. Неследование 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.

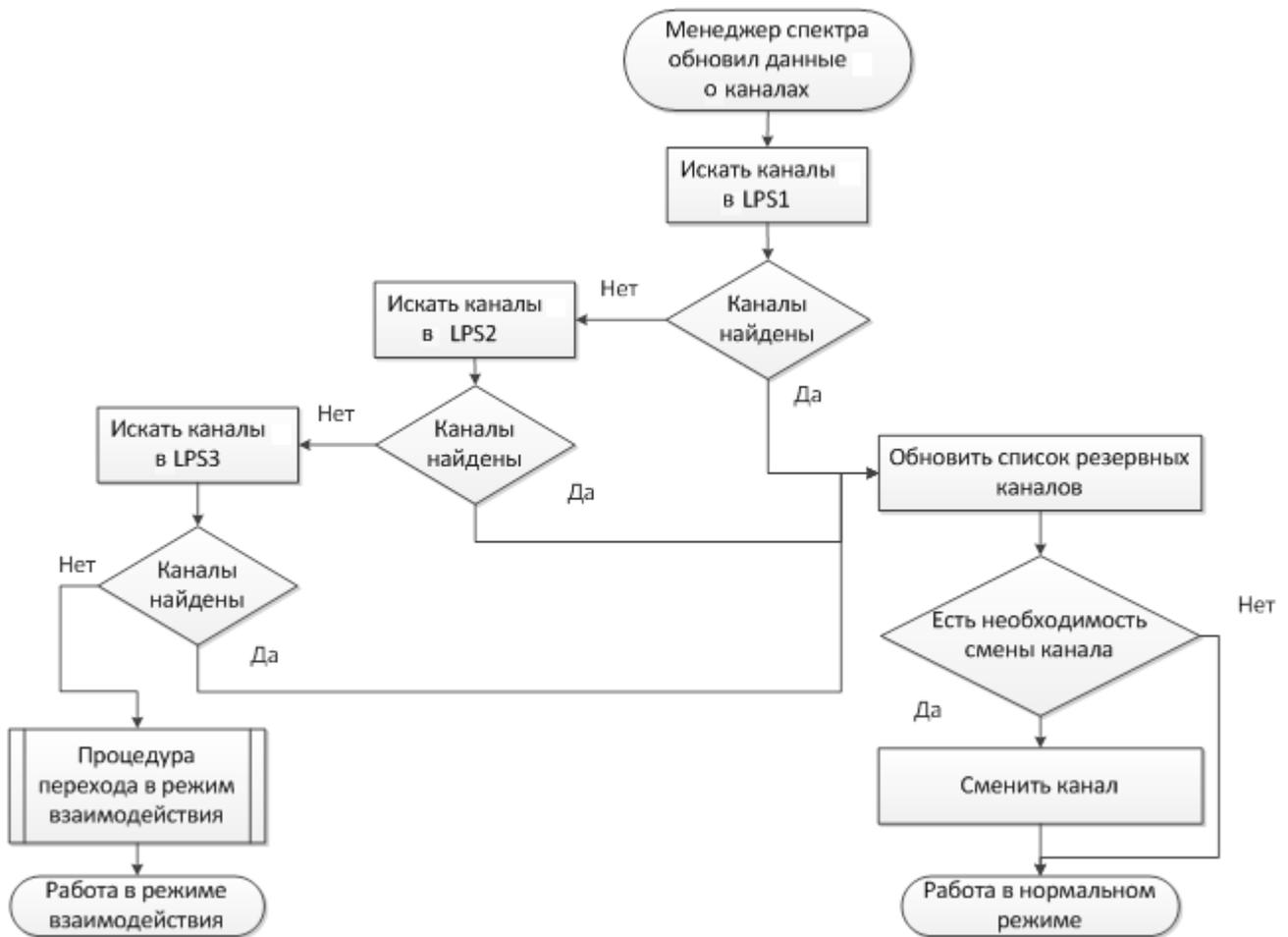


Рис. 6. Блок-схема процесса выбора канала согласно спектральному этикету

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 самым высоким 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 ещё недостаточной, а производительность прототипов – низкой.

Исследования в области когнитивного радио, проведённые 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.

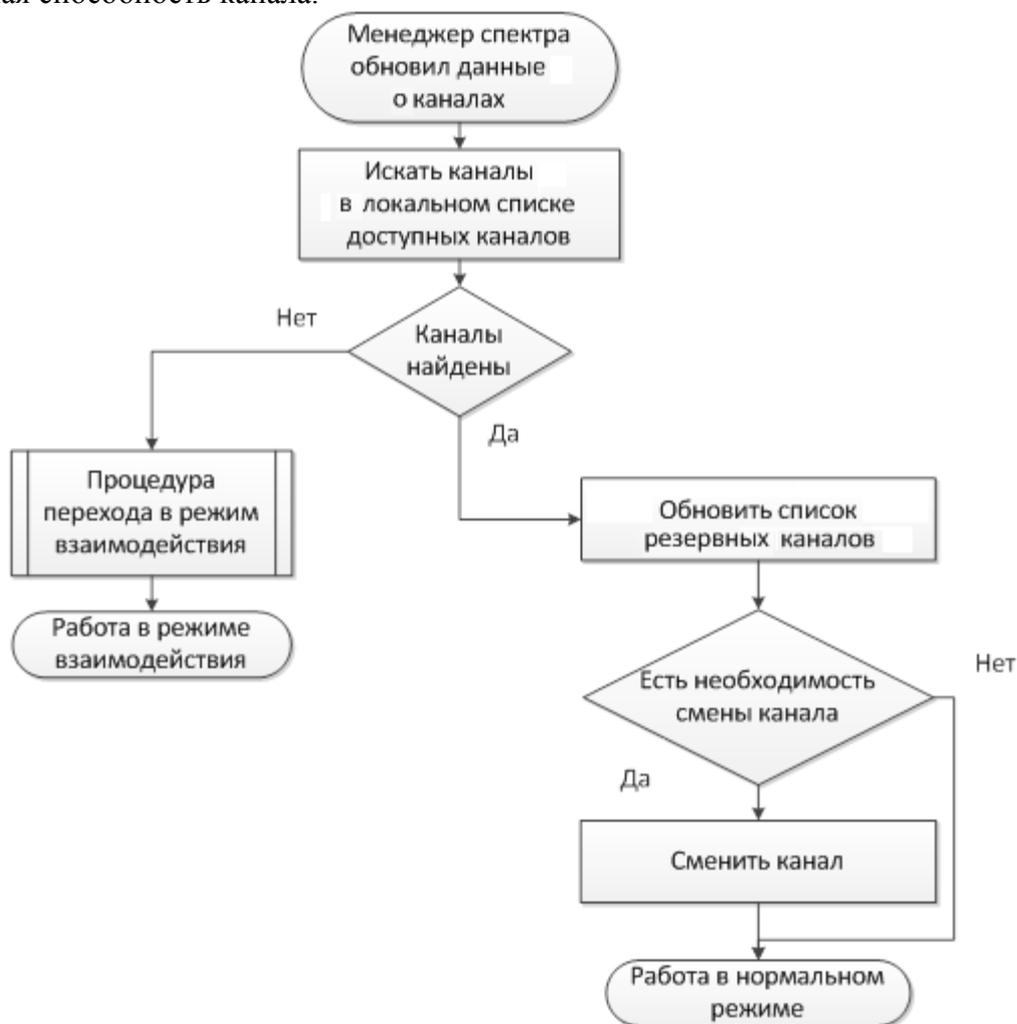


Рис. 7. Блок-схема измененного спектрального этикета

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 мож-

но решить с помощью реализации периодического сканирования доступных резервных каналов и выбора наилучшего канала (рис. 9).

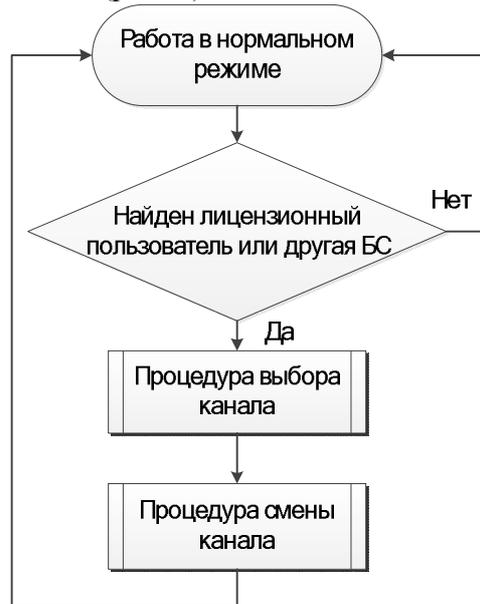


Рис. 8. Алгоритм смены канала

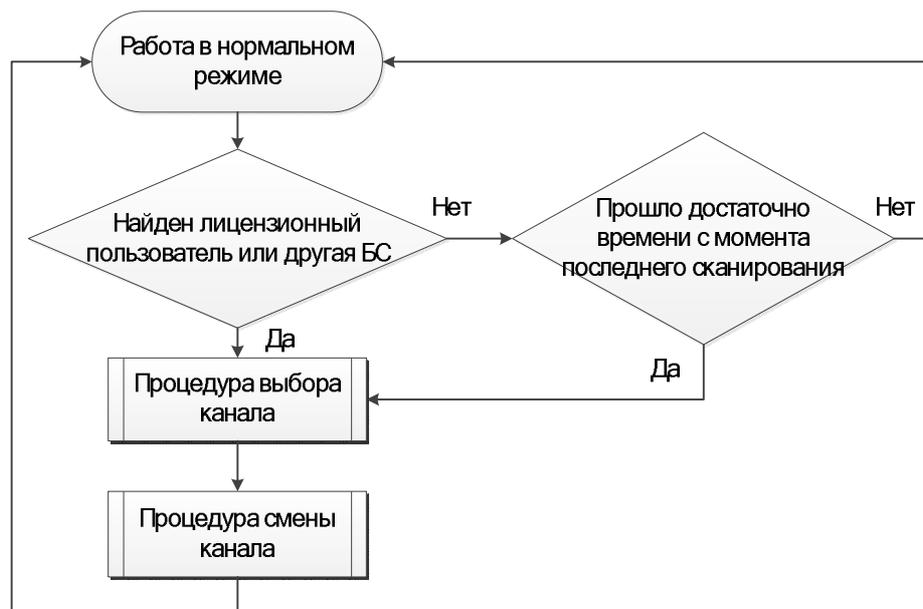


Рис. 9. Алгоритм периодической смены канала

6. Выводы

В рамках данной работы было проведено исследование стандарта беспроводных региональных сетей IEEE 802.22 – первого стандарта, 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 объём трафика равный 0.5–2 МБ. При этом средняя скорость в расчете на конечного пользователя составила 1 Мбит/с.

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

Литература

1. *Talbot D.* Frequency-Hopping Radio Wastes Less Spectrum // MIT Technology Review, [2013]. 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 Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Policies and Procedures for Operation in the TV Bands. New York.
3. Arena Simulation Software: [сайт]. URL: http://www.arenasimulation.com/Arena_Home.aspx (дата обращения: июль 12, 2013).
4. *Замятина О.М., Соколова В.В., Малахова Е.С., Ушакова Е.В.* Имитационная модель компьютерного кластера для оптимизации процесса распределённо-параллельных вычислений // Известия Томского политехнического университета. 2010. Т. 317, № 5. Управление, вычислительная техника и информатика, С. 158–162.

*Статья поступила в редакцию 15.08.2013;
переработанный вариант — 14.01.2014*

Малыхин Василий Игоревич

магистр кафедры оптимизации систем управления Института кибернетики. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (НИ ТПУ) (634050, Томск, пр. Ленина, 30) тел. (3822) 420-760, e-mail: malykhinvi@gmail.com.

Замятина Оксана Михайловна

к.т.н., доцент кафедры оптимизации систем управления Института кибернетики. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (НИ ТПУ) (634050, Томск, пр. Ленина, 30) тел. (3822) 563-625, e-mail: zamyatina@tpu.ru.

Research and simulation of IEEE 802.22 cognitive radio standard operation

V. Malykhin, O. Zamyatina

The paper is devoted to research and simulation of operation of IEEE 802.22 standard for regional wireless networks, which can be used for providing broadband Internet access to rural areas. A simulation model of channel selection of IEEE 802.22 standard wireless network is developed using Arena software. Source data for the model are presented, its subsystems are described and simulated.

Keywords: cognitive radio, regional wireless network, IEEE 802.22 standard, simulation model.