

УДК 621.396.218:004.94

## СОСТАВ И ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ДАННЫХ ДЛЯ МОДЕЛИ КОГНИТИВНОЙ СИСТЕМЫ СВЯЗИ НА БАЗЕ LTE

канд. техн. наук, доц. **Р. П. БОГУШ**, **Е. Р. АДАМОВСКИЙ**, канд. техн. наук **В. М. ЧЕРТКОВ**  
(Полоцкий государственный университет)

*Статья посвящена проблеме вторичного использования лицензированного частотного спектра путем предоставления доступа пользователям с помощью технологии когнитивного радио в сети беспроводной связи четвертого поколения. Рассматриваются структура и формат передаваемых данных для сети LTE в приложении к задаче построения модели когнитивной системы связи. Представлены роль и принципы формирования карты радиосреды, предложены структура и состав данных для ее реализации. Выполнено моделирование получения и организации данных в программной среде MatLab с использованием пакета LTE Waveform Generator, для представления и записи данных использован формат HDF5. Приводятся результаты моделирования.*

**Ключевые слова:** когнитивное радио, карта радиосреды, вторичные и первичные пользователи, динамический доступ к спектру, LTE Waveform Generator.

**Введение.** Развитие телекоммуникационных систем, включая современные сети сотовой связи, а также увеличение числа их пользователей приводит к ситуации дефицита частотного ресурса, что усугубляется его нерациональным использованием [1]. Задача снижения нагрузки на системы связи является актуальной на протяжении последних десятилетий и находит решение в виде технологий когнитивного радио (Cognitive Radio) (КР), предложенных в [2; 3], и динамического доступа к спектру (Dynamic Spectrum Access, DSA) [4–6].

Технология КР определяется как радиосистема, которая способна получать сведения об особенностях собственной работы, накапливать их и на основе этого адаптировать параметры связи, включая предыдущий опыт [7]. Технология DSA устанавливает, что с первичными пользователями (Primary Users, PU) лицензированный многочастотный диапазон открыт и вторичным пользователям (Secondary Users, SU) на условиях ограничений создаваемых ими помех [8]. Принципы КР используются в реализациях на базе различных стандартов: IEEE 802.22 WRAN [33], IEEE 802.11af [9], IEEE 802.11ah [10]. Действие КР основано на обнаружении «белых пятен» (white spaces) – частей спектра, доступных для передачи данных по беспроводным интерфейсам связи в текущий момент времени без создания помех службам с более высоким приоритетом [11].

Системы КР используют принцип, который включает в себя наблюдение, анализ, планирование, решение, действие и обучение [12] на основе следующей информации: локализация; тип географической среды; текущее использование спектра PU и SU; передвижение устройств; источник собственного питания; правила распределения спектра, определяемые пользователем или поставщиком услуг; возможности устройств (максимальные мощности передатчиков); намерения пользователей и их приоритеты для возможности прогнозирования трафика [13].

Хранение и обработка информации для когнитивных устройств осуществляется при помощи карты радиосреды (Radio Environment Map, REM) [20], которая представляет собой пространственно-временную базу данных (БД) всех радиочастотностей в сети [21]. Основной целью REM является обеспечение возможности получения информации вторичными пользователями о состоянии радиосреды за счет постоянного взаимного обмена данными с ними, что позволяет более эффективно использовать лицензированный спектр путем заполнения «белых пятен».

**Организация и особенности протоколов передачи данных LTE.** Технология LTE (Long Term Evolution) или E-UTRAN (Evolved Universal Terrestrial Access Network) представлена консорциумом 3GPP [14] в документах серии Release 8 в 2008 году [15] и является одним из стандартов 4G, который сегодня используется наиболее широко.

В LTE реализованы два режима передачи: FDD (Frequency Division Duplex) и TDD (Time Division Duplex), т.е. частотное и временное разделение сигнала. В восходящей линии связи (uplink) от устройства к базовой станции (БС, eNodeBS) применяется технология SC-FDMA (Single-Carrier Orthogonal Frequency Division Multiple Access) [16], а для нисходящей (downlink) используется технология OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) [17].

В разных странах лицензируются отдельные частотные полосы (bands), предусмотренные спецификацией LTE TS 36.101 [19]. В Республике Беларусь наиболее широко используются band 3 (1800+) и band 7 (2600) [20; 21]. Каждая полоса характеризуется режимом передачи (FDD/TDD) и нижней и верхней частотой. Сигналы нисходящей или восходящей линии связи могут занимать частотный диапазон шириной от 1,4 до 20 МГц. Границы частотного диапазона, занимаемого сигналом, всегда определяются симметрично относительно несущих частот (carriers). Следует отметить, что наибольшая полоса пропускания (bandwidth) для LTE-

Advanced на данный момент составляет 100 МГц [18], поэтому количество частотных диапазонов в лицензируемых частотных полосах (bands) ограничено пятью. Частотный диапазон, занимаемый нисходящим или восходящим сигналом, является набором поднесущих частот (subcarriers), отстоящих друг от друга на 15 кГц [17]. Ресурсные блоки (РБ) включают 12 поднесущих (180 кГц) и по длительности организованы в виде одного временного слота (slot). Каждый OFDM символ на поднесущей образует ресурсный элемент (РЭ).

В таблице 1 представлены каналы с различной шириной полосы и соответствующее им число РБ и поднесущих [22].

Таблица 1. – Конфигурации каналов различной ширины

Ширина канала, МГц	1,4	3	5	10	15	20
Количество ресурсных блоков	6	15	25	50	75	100
Количество поднесущих частот	72	180	300	600	900	1200

Каждый слот занимает 0,5 мс и состоит из 6 или 7 OFDM-символов. Два соседних слота попарно образуют подкадр (subframe) длительностью 1 мс. Кадр (frame), занимающий по времени 10 мс, состоит из 20 слотов. В случае FDD нисходящий и восходящий каналы передаются на разных частотах, поэтому в каждом кадре выделяется по 10 подкадров для передачи данных (рисунок 1). Таким образом, один РБ может содержать 72 или 84 РЭ.

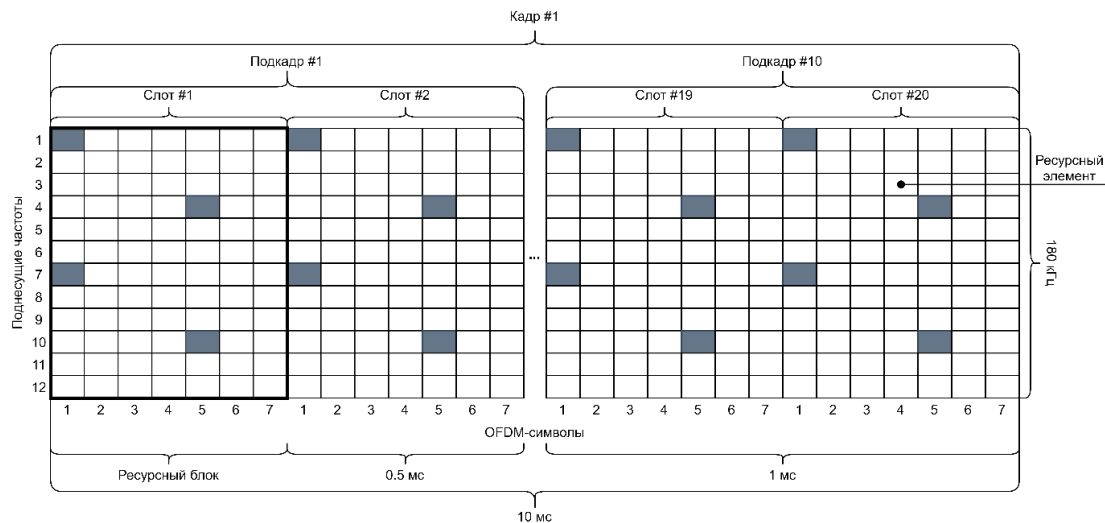


Рисунок 1. – Структура сигнала LTE в частотно-временном представлении

Согласно технической спецификации LTE TS 36.101 в структуру передаваемого радиосигнала включаются опорные (пилотные, синхронизирующие) символы. В downlink-канале опорные сигналы находятся в первом или пятом символе (см. рисунок 1). Для uplink-канала используется 2 вида опорных сигналов: демодулированные (DM-RS) и зондовые (SRS).

Общий вид кадра сигнала downlink-канала LTE (6 РБ, 1 слот), формируемого базовой станцией, показан на рисунке 2. Структура кадра сигнала включает в себя: канал для передачи пользовательских данных (PDSCH); опорные сигналы (Cell RS); первичный и вторичный сигнал синхронизации (PSS и SSS); физический широковещательный канал (PBCH); канал, управляющий индикатором формата (PCFICH); канал для гибридной процедуры повторного запроса (PHICH); канал управления (PDCCH).

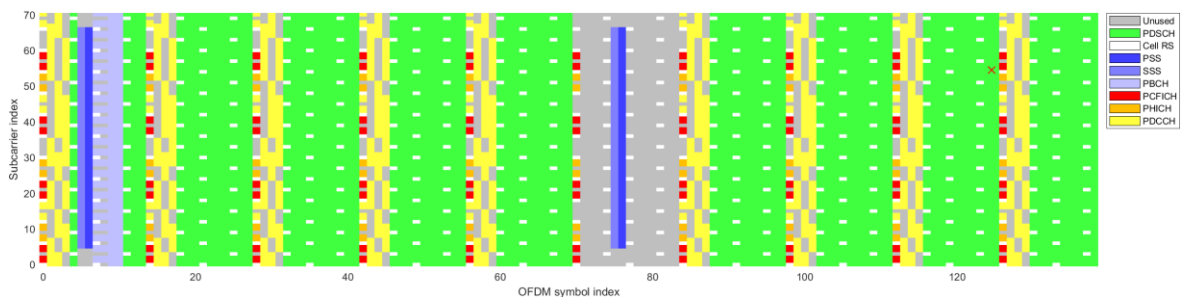


Рисунок 2. – Структура кадра сигнала базовой станции LTE

Общий вид кадра сигнала uplink-канала LTE (6 РБ, 1 слот), формируемый абонентским устройством, показан на рисунке 3. Структура кадра сигнала включает в себя физический канал пользовательского трафика (PUSCH) и опорные сигналы (PUSCH DRS) [23].

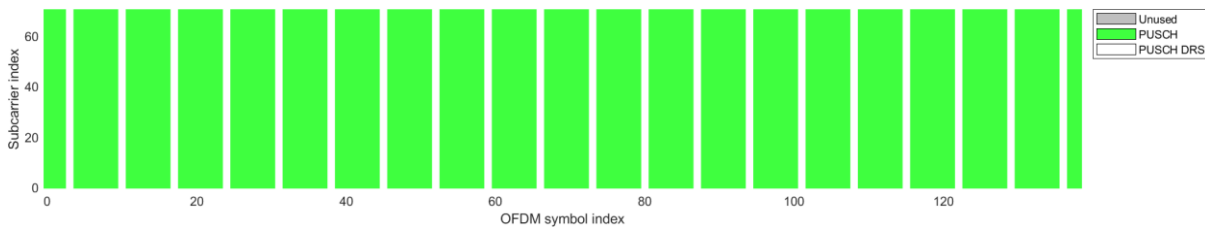


Рисунок 3. – Структура кадра сигнала абонентского устройства LTE

Базовая станция может работать в одной из лицензированных оператором частотных полос. На практике диапазоны между станциями распределяются так, чтобы соседние БС не создавали помех друг другу. Принцип жесткого повторного использования частот ( $F_1, F_2, F_3$ ) между сотами [24] продемонстрирован на рисунке 4.

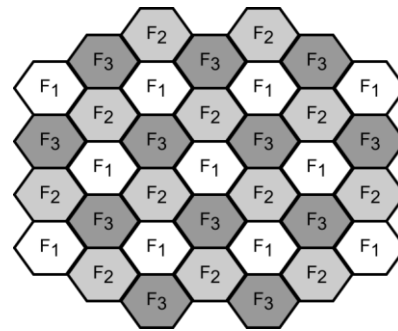


Рисунок 4. – Принцип жесткого повторного использования частот между сотами

Излучение базовых станций ограничено требованиями норм [25]. В качестве типовых значений максимальной выходной мощности приводятся значения 31–43 дБм (1,26–19,95 Вт). Диапазон регулировки мощности в пользовательском канале составляет от –28 дБ (и менее) до –3 дБ (и более). Частота регулировки уровня сигнала равна 1500 Гц [26].

В процессе работы абонентское устройство (АУ) осуществляет поиск канала связи с наилучшим приемом, а после его обнаружения подключается к соответствующей БС, предварительно синхронизировавшись с ней при помощи сигналов PSS и SSS. В восходящем направлении канал PUSCH используется для передачи данных пользователя. Канал PUSCH организован независимо от пользовательских данных и используется для передачи индикатора качества канала CQI, запроса на получение расписания доступных ресурсов и обратной связи. Для его передачи используется один РБ в каждом слоте одного субкадра. Канал произвольного доступа PRACH используется для запроса инициализации связи, при переходе в активный режим и т.д. При этом для его передачи устройству назначается интервал в ресурсной сетке шириной 6 ресурсных блоков [27].

**Роль и формирование REM.** Роль REM в цикле работы когнитивных радиосистем показана на рисунке 5, из которого следует, что на всех этапах работы, кроме непосредственно результирующего действия, устройствам необходим обмен информацией с базой данных.

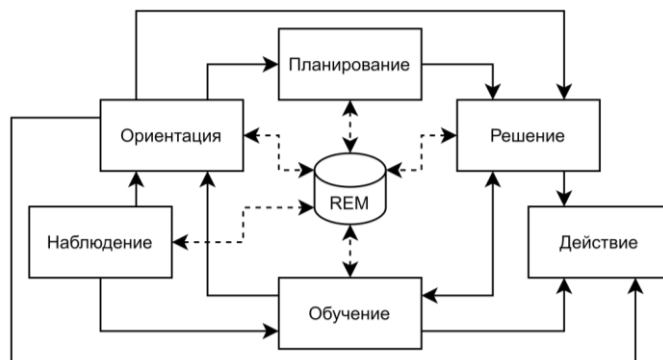


Рисунок 5. – Роль REM в КР

При создании REM решаются следующие задачи: определение структуры и наполнение БД, выбор формы хранения информации, организация упорядочивания данных и осуществления доступа к ним [28]. На практике формирование REM подразумевает работу с большими объемами данных и требует быстрого действия для обеспечения Cognitive Radio System (CRS) актуальной и корректной информацией, которая зачастую может быть получена лишь косвенными методами, например, интерполированием данных. Следовательно, для построения наиболее эффективной CRS требуется установить параметры на основе моделирования, например такие, как взаимосвязь точности модели и плотности датчиков [29].

Сведения о «белых пятнах» в спектре на основе предсказания являются ценной исходной информацией для реализации CRS, поскольку это обеспечивает эффективность ее работы. Предсказание состояния радиосреды должно выполняться на основе данных REM и генерировать информацию для КР, включающую сведения о свободных и ограниченных в пространстве и времени частотных ресурсах.

Построение REM реализуется двумя методами: анализом сигналов из разных точек и попыткой оценки значения в произвольной точке в этой области с помощью интерполяции (прямой метод); оценкой местоположения передатчиков и их параметров, а затем – оценкой уровня сигнала в любом месте области за счет применения модели распространения (косвенный метод) [6].

В работах [1; 30] описаны основные принципы построения карты REM, которая представляется в виде набора таких модулей, как блок хранения и сбора данных (storage and acquisition, REM-SA), менеджер REM, измерительные устройства (Measurement Capable Devices, MCD) и графический пользовательский интерфейс (Graphical User Interface, GUI). REM-SA обменивается инструкциями с MCD и собирает результаты измерений. Менеджер REM выполняет обработку запросов и обмен данными с объектами (рисунок 6) [1]. После обработки измерений формируется интерференционная карта.

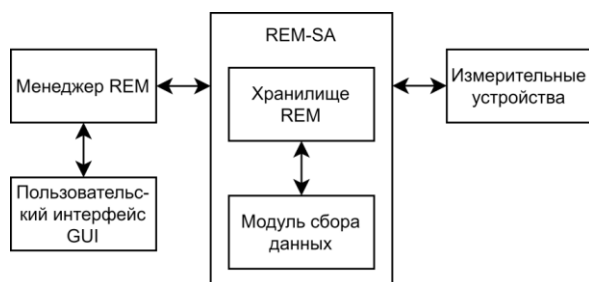


Рисунок 6. – Структура REM

Показатели качества REM можно количественно оценить по среднеквадратической ошибке (RMSE), вычисляемой в каждой точке сетки как разность значений мощности сигнала (received signal strength, RSS) или опорных символов (reference signal received power, RSRP) между вычисленной и истинной картой REM [13]. В работах [6; 31] точность оценки качества REM предлагается определять по ошибке локализации передатчика и мощности передаваемого сигнала, а также метрикам – коэффициенту правильной зоны обнаружения (CDZR) и коэффициенту зоны ложной тревоги (FAZR).

**Состав и структура представления данных для REM LTE.** На основе информации о принципах функционирования системы связи LTE и решаемых с помощью REM задач, предлагается выделить ключевые параметры для карты REM, которые необходимы для построения имитационной модели. Параметры основных объектов имитационной модели представлены в таблице 2.

Таблица 2. – Объекты модели и их параметры

Объект	Параметр	Размерность	Единица измерения	Описание
1	2	3	4	5
Карта REM	Набор частот	$N_{sub}$	кГц	Набор моделируемых поднесущих частот, следующих с шагом 15 кГц
	Ослабление сигнала	1	–	Коэффициент затухания сигнала $\alpha$ в формуле потерь при распространении
	Карта распространения сигналов	$T \times (X \times Y) \times (N_{sub} \times 140)$	–	Массив $[X, Y]$ ячеек, каждая из которых содержит $T$ временных слоев, на которых отражено состояние $N_{sub}$ поднесущих частот в течение 1 кадра (140 символов)
	Шаг сетки	1	м	Расстояние между элементами сетки REM
	Временной отсчет	1	frame	Значение времени $T_i$ от момента начала моделирования

Окончание таблицы 2

1	2	3	4	5
Базовая станция eNodeBS	Идентификатор станции	1	–	Уникальный номер базовой станции
	Местоположение станции	2	–	Координаты ячейки, в которой располагается базовая станция
	Рабочий диапазон станции	$f_{BS}$	Гц	Перечень $f_{BS}$ из $N_{sub}$ частот, на которых работает базовая станция
	Подключенные к станции устройства	$N_{UE}$	–	Идентификаторы подключенных к базовой станции $N_{UE}$ абонентских устройств в момент времени $T$
	Занятые downlink-частоты станции	$N_{UE} \times f_{down(i)}$	Гц	Список поднесущих частот, выделенных для передачи данных от базовой станции к каждому абонентскому устройству $f_{down(i)}$
	Занятые uplink-частоты станции	$N_{UE} \times f_{up(i)}$	Гц	Список поднесущих частот, выделенных для передачи данных от каждого абонентского устройства $f_{up(i)}$ к базовой станции
	Мощность передатчика станции	1	дБм	Уровень излучаемого станцией сигнала
Абонентское устройство UE	Идентификатор устройства	1	–	Уникальный номер абонентского устройства
	Местоположение устройства	2	–	Координаты ячейки, в которой располагается абонентское устройство
	Рабочий диапазон устройства	$f_{UE}$	Гц	Перечень $f_{UE}$ из $N_{sub}$ частот, которые поддерживает абонентское устройство
	Рабочая станция устройства	1	–	Идентификатор базовой станции, к которой подключено абонентское устройство
	Выделенные uplink-частоты устройства	$f_{up(i)}$	Гц	Список поднесущих частот, выделенных для передачи данных от абонентского устройства $f_{up(i)}$ к рабочей базовой станции
	Статус передачи устройства	1	–	Состояние абонентского устройства: осуществляется ли передача в момент времени $T$ или нет
	Мощность передатчика устройства	1	дБм	Уровень излучаемого абонентским устройством сигнала

Раздел REM содержит построенную карту радиосреды и соответствующий ей номер кадра LTE от начала моделирования. Раздел eNodeBS описывает характеристики всех БС, которые реализованы в модели, включая идентификатор, местоположение, рабочий диапазон частот, а также информацию, необходимую для взаимодействия с АУ: их номера и выделенные ресурсы для передачи данных вверх и вниз. Аналогично раздел UE представляет информацию об АУ: идентификатор, текущее местоположение и статус, поддерживаемые частотные диапазоны, мощность передатчика, а также ресурсы для обмена информацией с выбранной БС. Таким образом, помимо состояния радиосреды, требуются данные о самих объектах: их положение в пространстве, рабочие характеристики и текущее состояние, что позволит осуществлять прогнозирование более точно за счет учета большего количества параметров.

**Моделирование представления данных.** Модель построена в программной среде MatLab с использованием пакета LTE Waveform Generator и включает в себя следующие шаги:

1. Инициализация модели. Создание объектов eNodeBS и UE, назначение их атрибутов, формирование расписания перемещения и сеансов связи каждому абонентскому устройству, выделение памяти под REM, предварительные расчеты для последующих вычислений затухания сигнала.

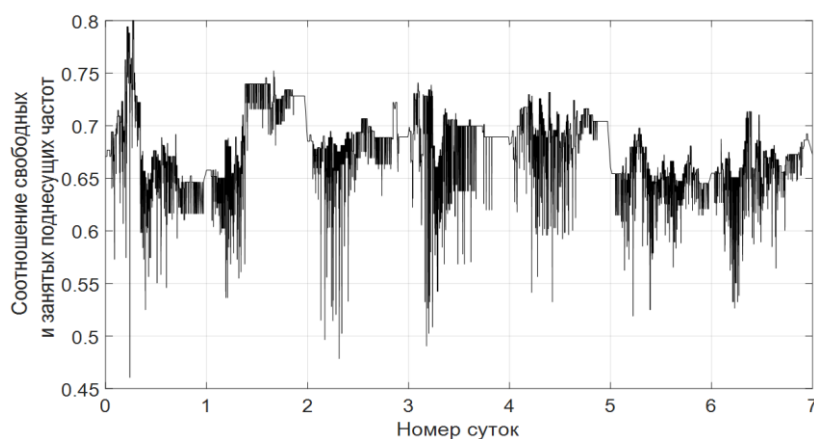
2. Основной цикл. Перемещение АУ согласно расписанию на новые позиции, оценка радиосреды, при необходимости – подключение к другой БС с лучшими условиями приема, формирование кадра для передачи данных. Генерация первичной карты – размещение сигналов объектов в соответствующих им ячейках. Изменение статусов передачи данных для каждого АУ согласно расписанию. Построение полной

карты REM путем вычисления конечных состояний всех ячеек модели с учетом влияния остальных источников сигнала. Кодирование карты с целью экономии ресурсов и устранения избыточности данных, сохранение результата на носитель информации. Следует отметить, что запись информации происходит не каждый кадр, а лишь тогда, когда в модели происходит какое-либо изменение, например, отключение абонента или его перемещение.

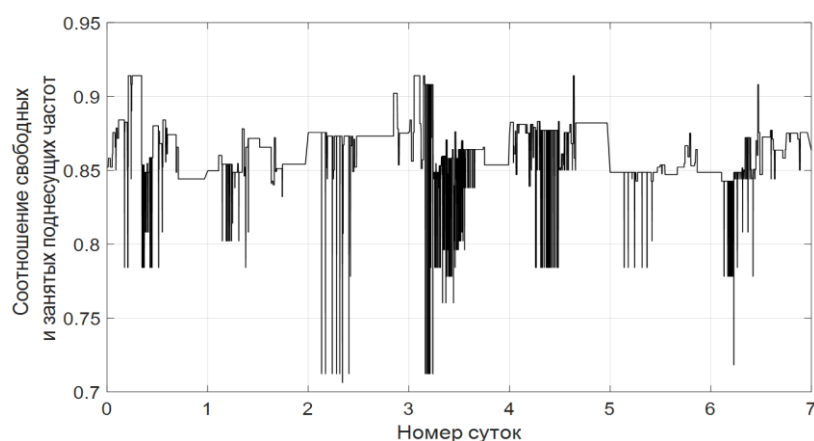
Для записи данных выбран формат HDF5 [32], широко используемый для хранения больших объемов данных в научной среде и поддерживаемый средой MatLab. Файлы HDF5 имеют разрешение «.h5» и дополнительно архивируются в формат «.zip», что позволяет уменьшить их объем в 50 раз.

Полученные данные можно представить различным образом, например, как динамику изменения процентного соотношения свободных поднесущих от их общего числа в определенных ячейках, т.е. в числовом диапазоне [0; 1]. Меньшее значение соотношения означает присутствие в данной точке сигналов от большого количества объектов, занимающих в спектре суммарно более широкую полосу, что с точки зрения вторичного пользователя означает ухудшение радиообстановки. Большее значение свидетельствует о меньшей загруженности спектра и более широких возможностях для установки канала передачи между когнитивными устройствами.

На рисунке 7 продемонстрировано сравнение состояния радиосреды по процентному отношению свободных поднесущих в течение 1 кадра LTE на временном интервале 168 часов (7 суток): вблизи одной из станций в центре моделируемой сетки (рисунок 7, а), на удалении от скопления источников сигнала на краю карты (рисунок 7, б).



а



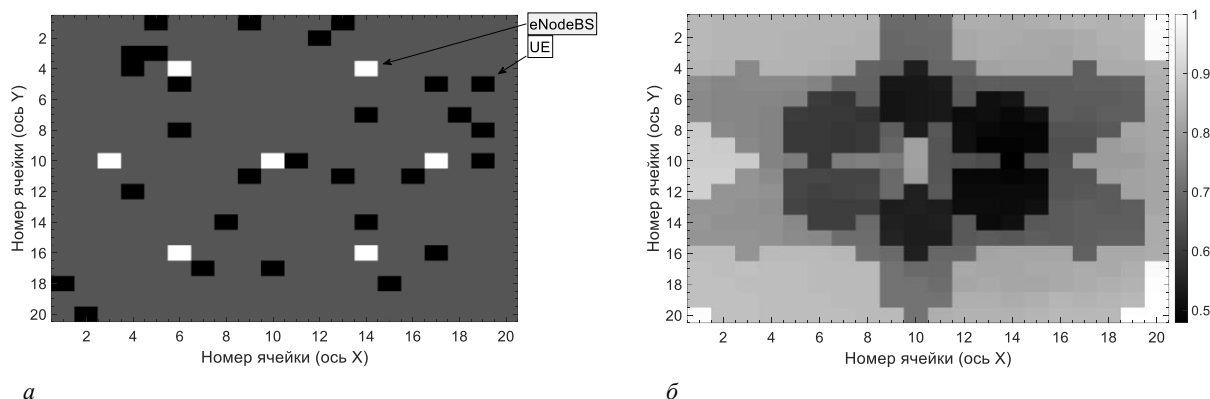
б

**а** – вблизи станций; **б** – на удалении от станций

**Рисунок 7.** – Динамика занятости поднесущих частот в течение 7 дней

Рисунок 7 демонстрирует разницу в динамике загруженности спектра в активном регионе и области с наименьшим количеством объектов. В первом случае по результатам моделирования наблюдается среднее отношение свободных поднесущих 0,5–0,6, при этом в течение суток присутствуют нерегулярные

скачки значений. Во втором случае свободными остаются 85–90% частот, девиации уровня менее выражены. Исходное расположение объектов на сетке показано на рисунке 8, а. Соотношение количества свободных частот для одного из кадров представлено на рисунке 8, б.



а – расположение объектов; б – распределение отношения свободных частот 1 кадра LTE  
**Рисунок 8. – Информационные слои сетки модели**

Сопоставление рисунков 8, а и 8, б подтверждает выводы по рисунку 7 о том, что вблизи станций загруженность спектра выше, чем вдали от них. Анализ показывает, что рисунок 8, б имеет практически симметричную форму. Из этого следует, что именно БС, выполняя роль узла связи, обеспечивает вокруг себя зону с наименьшим количеством свободных частот для использования вторичными пользователями. В свою очередь, влияние АУ на результирующее значение отношения свободных поднесущих сравнительно невелико.

**Заключение.** Одной из быстроразвивающихся в мире информационных систем с применением когнитивных технологий является телекоммуникационная система когнитивной радиосвязи. Основным способом повышения эффективности использования частотного ресурса является механизм динамического управления спектром, согласно которому вторичным пользователям предоставляется возможность использовать диапазоны первичных пользователей на то время, пока они свободны. Для моделирования когнитивной системы на базе технологии LTE одной из первичных задач является определение состава данных для формирования карты радиосреды, которая используется для хранения и обработки информации для обеспечения когнитивных функций пользовательского оборудования. С учетом специфики функционирования основных объектов такой системы определен набор параметров для REM и выполнено моделирование с использованием пакета LTE Waveform Generator, подтверждающее возможность использования полученных результатов для имитационной модели когнитивной системы связи на базе LTE.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Radio Environment Maps: The Survey of Construction Methods / M. Pesko [et al.] // KSII Transactions on Internet and Information Systems. – Vol. 8. – № 11. – 2014. – DOI: 10.3837/tiis.2014.11.008.
2. Mitola, J. Cognitive Radio for Flexible Mobile Multimedia Communications / J. Mitola // IEEE International Workshop on Mobile Multimedia Communications. – 1999. – P. 3–10.
3. Mitola, J. Cognitive radio: Making software radios more personal / J. Mitola // IEEE Pers. Commun. – 1999. – Vol. 6. – № 4. – P. 13–18.
4. 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.
5. Dwarakanath, R. C. Modeling of interference maps for Licensed Shared Access in LTE-advanced networks supporting Carrier Aggregation / R. C. Dwarakanath, J. D. Naranjo, A. Ravanshid // 2013 IFIP Wireless Days (WD). – 2013. – P. 1–6. – DOI: 10.1109/WD.2013.6686457.
6. Alfattani, S. Indirect Methods for Constructing Radio Environment Map / S. Alfattani, A. Yonzacoglu // 2018 IEEE Canadian Conference on Electrical & Computer Engineering (CCECE) – 2018. – P. 1–5. – DOI: 10.1109/CCECE.2018.8447654.
7. Мирошникова, Н. Е. Обзор систем когнитивного радио / Н. Е. Мирошникова // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2013. – Т. 7. – № 9. – С. 108–111.
8. Косичкина, Т. П. Исследование моделей помех в системах когнитивного радио / Т. П. Косичкина, Г. Н. Иванов, В. О. Евдокимов // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. – 2018. – Т. 18. – № 4. – С. 965–970.
9. Feng, X. Enabling co-channel coexistence of 802.22 and 802.11af systems in TV White Spaces / X. Feng, Q. Zhang, B. Li // 2013 IEEE International Conference on Communications (ICC). – 2013. – P. 6040–6044. – DOI: 10.1109/ICC.2013.6655567.
10. IEEE 802.11AH: the WiFi approach for M2M communications / T. Adame [et al.] // IEEE Wireless Communications Magazine. – IEEE, 2014.

11. Региональное содружество в области связи: справочник по перспективам внедрения систем когнитивного радио в диапазоне УВЧ в странах участников РСС [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.rcc.org.ru/netcat\\_files/874/1100/h\\_f78e12d30f93fa2ce77ae42b7c6b9939](https://www.rcc.org.ru/netcat_files/874/1100/h_f78e12d30f93fa2ce77ae42b7c6b9939). – Дата доступа: 28.06.2021.
12. Технологии построения когнитивного радио и когнитивных сетей и их влияние на рынок радиочастотных ресурсов и качество обслуживания пользователей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.itu.int/en/ITU-D/ICT-Applications/Documents/StPtDocs/Session\\_4\\_Aksenov.pdf](https://www.itu.int/en/ITU-D/ICT-Applications/Documents/StPtDocs/Session_4_Aksenov.pdf). – Дата доступа: 28.06.2021.
13. Radio environment map as enabler for practical cognitive radio networks / H. B. Yilmaz [et al.] // IEEE Communications Magazine. – Vol. 51. – № 12. – 2013. – P. 162–169. – DOI: 10.1109/MCOM.2013.6685772.
14. 3GPP Website [Electronic resours]. – Mode of access: <https://www.3gpp.org/>. – Date of access: 28.06.2021.
15. 3GPP Technologies: Long Term Evolution [Electronic resours]. – Mode of access: <https://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-lte>. – Date of access: 28.06.2021.
16. Hyung, G. M. Single Carrier FDMA for Uplink Wireless Transmission / G. M. Hyung, L. Junsung, D. J. Goodman // IEEE Vehicular Technology Magazine. – Vol. 1. – № 3. – 2006. – P. 30–38.
17. LTE CA Technology Development [Electronic resours]. – Mode of access: [https://www.5gamericas.org/wpcontent/uploads/2019/07/4G\\_Americas\\_Carrier\\_Aggregation\\_FINALv1\\_0\\_3.pdf](https://www.5gamericas.org/wpcontent/uploads/2019/07/4G_Americas_Carrier_Aggregation_FINALv1_0_3.pdf). – Date of access: 28.06.2021.
18. Hui, L. OFDM-Based Broadband Wireless Networks. Design and Optimization / L. Hui, L. Guoqing. – 2006. – DOI: 10.1002/0471757195.fmatter.
19. Specification 36.101 E-UTRA; UE radio transmission and reception [Electronic resours]. – Mode of access: [https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36\\_series/36.101/](https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.101/). – Date of access: 28.06.2021.
20. Какие частоты выделены сотовым операторам в Беларуси [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://mpt.gov.by/ru/faq/kakie-chastoty-vydeleny-sotovym-operatoram-v-belarusi>. – Дата доступа: 28.06.2021.
21. LTE frequency band [Electronic resours]. – Режим доступа: [https://www.sqimway.com/lte\\_band.php](https://www.sqimway.com/lte_band.php). – Дата доступа: 28.06.2021.
22. Описание физического уровня LTE [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://anisimoff.org/lte/phy\\_description.html](http://anisimoff.org/lte/phy_description.html). – Дата доступа: 28.06.2021.
23. Организация каналов в LTE [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://anisimoff.org/lte/channels.html>. – Дата доступа: 28.06.2021.
24. Основы сотовой связи стандарта GSM [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://afu.com.ua/gsm>. – Дата доступа: 19.09.2021.
25. Требования к параметрам электромагнитной совместимости оборудования систем базовых станций и ретрансляторов стандарта LTE [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://digital.gov.ru/common/upload/Prilozhenija\\_k\\_pravilam\\_129.pdf](https://digital.gov.ru/common/upload/Prilozhenija_k_pravilam_129.pdf). – Дата доступа: 19.09.2021.
26. Технические характеристики радиопередающих устройств базовых станций UMTS для режима FDD [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://1234g.ru/3g/umts/tehnicheskie-kharakteristiki-radiopereadayushchikh-ustrojstv-bazovoykh-stantsij-umts-dlya-rezhima-fdd>. – Дата доступа: 19.09.2021.
27. Физический уровень LTE [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://russianelectronics.ru/fizicheskij-uroven-lte/>. – Дата доступа: 19.09.2021.
28. Flexible and Spectrum Aware Radio Access through Measurements and Modelling in CRS [Electronic resours]. – Mode of access: [http://www.lopezbenitez.es/tech\\_reports/FARAMIR\\_D21.pdf](http://www.lopezbenitez.es/tech_reports/FARAMIR_D21.pdf). – Date of access: 28.06.2021.
29. On the construction of Radio Environment Maps for Cognitive Radio Networks / Z. Wei [et al.] // 2013 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). – 2013. – P. 4504–4509. – DOI: 10.1109/WCNC.2013.6555304.
30. Radio environment maps for military cognitive networks: density of small-scale sensor network vs. map quality / M. Suchański [et al.] // Cognitive Radio-Oriented Wireless Networks. – 2019. – P. 195–207. – DOI: 10.1007/978-3-030-25748-4\_15.
31. Yilmaz, H. B. Location estimation-based radio environment map construction in fading channels / H. B. Yilmaz, T. Tugcu // Wirel. Commun. Mob. Comput. – 2015. – P. 421–430.
32. The HDF5 library & file format [Electronic resours]. – Mode of access: <https://www.hdfgroup.org/solutions/hdf5/>. – Date of access: 28.06.2021.

Поступила 23.09.2021

## DATA COMPOSITION AND REPRESENTATION FOR COGNITIVE COMMUNICATION SYSTEM MODEL BASED ON LTE

R. BOHUSH, Y. ADAMOVSKIY, V. CHERTKOV

*The paper discusses to the problem of secondary use of the licensed frequency spectrum by providing access to users using cognitive radio technology in the fourth generation LTE wireless communication network. The structure and format of transmitted data in such a network are considered as applied to the problem of constructing a model of a cognitive communication system. The role and principles of the formation of a radio environment map are presented. Structure and composition of data for REM construction are proposed. Modeling of the formation and presentation of data in the MatLab environment using the LTE Waveform Generator package has been performed. HDF5 is used for data recording. The simulation results are presented.*

**Keywords:** cognitive radio, radio environment map, dynamic spectrum access, primary users, secondary users, LTE waveform generator.