

УДК: 621.396.218:004.94

Модель формирования карты радиосреды для когнитивной системы связи на базе сотовой сети LTE

Е. Р. Адамовский^a, В. М. Чертков^b, Р. П. Богущ^c

Полоцкий государственный университет,
Республика Беларусь, 211440, г. Новополоцк, ул. Блохина, д. 29

E-mail: ^a e.adamovsky@psu.by, ^b v.chertkov@psu.by, ^c r.bogush@psu.by

Получено 05.10.2021, после доработки — 24.12.2021.
Принято к публикации 03.01.2022.

Статья посвящена вторичному использованию спектра в телекоммуникационных сетях. Акцентируется внимание, что одним из решений данной проблемы является применение технологий когнитивного радио и динамического доступа к спектру, для успешного функционирования которых необходим большой объем информации, включающий параметры базовых станций и абонентов сети. Хранение и обработка информации должны осуществляться при помощи карты радиосреды, которая представляет собой пространственно-временную базу данных всех активностей в сети и позволяет определять доступные для использования в заданное время частоты. В работе представлена двухуровневая модель для формирования карты радиосреды системы сотовой связи LTE, в которой выделены локальный и глобальный уровни, описываемая следующими параметрами: набор частот, ослабление сигнала, карта распространения сигналов, шаг сетки, текущий временной отсчет. Ключевыми объектами модели являются базовая станция и абонентское устройство. К основным параметрам базовой станции отнесены: наименование, идентификатор, координаты ячейки, номер, диапазон, мощность излучения, номера подключенных абонентских устройств, выделенные им ресурсные блоки. Для абонентских устройств в качестве параметров используются: наименование, идентификатор, местоположение, текущие координаты ячейки устройства, идентификатор рабочей базовой станции, частотный диапазон, номера ресурсных блоков для связи со станцией, мощность излучения, статус передачи данных, список номеров ближайших станций, расписания перемещения и сеансов связи устройств. Представлен алгоритм для реализации модели с учетом сценариев перемещения и сеансов связи абонентских устройств. Приводится методика расчета карты радиосреды в точке координатной сетки с учетом потерь при распространении радиосигналов от излучающих устройств. Программная реализация модели выполнена с использованием пакета MatLab. Описаны подходы, позволяющие повысить быстродействие ее работы. При моделировании выбор параметров осуществлялся с учетом данных действующих систем связи и экономии вычислительных ресурсов. Продемонстрированы результаты исследований программной реализации алгоритма формирования карты радиосреды, подтверждающие корректность разработанной модели.

Ключевые слова: карта радиосреды, когнитивное радио, LTE, динамический доступ к спектру

UDC: 621.396.218:004.94

Model for building of the radio environment map for cognitive communication system based on LTE

Y. R. Adamovskiy^a, V. M. Chertkov^b, R. P. Bohush^c

Polotsk State University,
29, Blohina st., Novopolotsk, 211440, Republic of Belarus

E-mail: ^a e.adamovsky@psu.by, ^b v.chertkov@psu.by, ^c r.bogush@psu.by

Received 05.10.2021, after completion — 24.12.2021.

Accepted for publication 03.01.2022.

The paper is devoted to the secondary use of spectrum in telecommunication networks. It is emphasized that one of the solutions to this problem is the use of cognitive radio technologies and dynamic spectrum access for the successful functioning of which a large amount of information is required, including the parameters of base stations and network subscribers. Storage and processing of information should be carried out using a radio environment map, which is a spatio-temporal database of all activity in the network and allows you to determine the frequencies available for use at a given time. The paper presents a two-level model for forming a map of the radio environment of a cellular communication system LTE, in which the local and global levels are highlighted, which is described by the following parameters: a set of frequencies, signal attenuation, signal propagation map, grid step, current time count. The key objects of the model are the base station and the subscriber unit. The main parameters of the base station include: name, identifier, cell coordinates, range number, radiation power, numbers of connected subscriber devices, dedicated resource blocks. For subscriber devices, the following parameters are used: name, identifier, location, current coordinates of the device cell, base station identifier, frequency range, numbers of resource blocks for communication with the station, radiation power, data transmission status, list of numbers of the nearest stations, schedules movement and communication sessions of devices. An algorithm for the implementation of the model is presented, taking into account the scenarios of movement and communication sessions of subscriber devices. A method for calculating a map of the radio environment at a point on a coordinate grid, taking into account losses during the propagation of radio signals from emitting devices, is presented. The software implementation of the model is performed using the MatLab package. The approaches are described that allow to increase the speed of its work. In the simulation, the choice of parameters was carried out taking into account the data of the existing communication systems and the economy of computing resources. The experimental results of the algorithm for the formation of a radio environment map are demonstrated, confirming the correctness of the developed model.

Keywords: cognitive radio, radio environment map, LTE, dynamic spectrum access

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2022, vol. 14, no. 1, pp. 127–146 (Russian).

1. Введение

Развитие телекоммуникационных систем, включая сети сотовой связи, приводит к ситуации дефицита частотного ресурса по причине его нерационального использования [Pesko et al., 2014]. Системам связи при развертывании на определенной территории назначается лицензированный диапазон — частотная область, в рамках которой может осуществляться передача данных. Первичные пользователи системы (Primary Users, PU) используют выделенные частоты согласно установленным правилам, однако при обычной загруженности сети в конкретный момент времени диапазон не задействуется полностью, поскольку проектирование систем связи осуществляется с определенным запасом пропускной способности. Таким образом, часть времени отдельные фрагменты лицензированного спектра не используются. В настоящее время полосы от единиц кГц до сотен ГГц плотно распределены между различными службами, поэтому разрешение проблемы дефицита частотного ресурса на основе рационального использования лицензированных диапазонов является актуальным направлением развития систем связи.

Для решения проблемы дефицита частотного ресурса предлагается использовать технологию динамического доступа к спектру (Dynamic Spectrum Access) [Косичкина и др., 2015; Dwarakanath et al., 2013; Alfattani, Yongacoglu, 2018], которая заключается в открытии лицензированного диапазона для вторичных пользователей (Secondary Users, SU) при условии, что используемые ими каналы в данный момент не используются первичными пользователями [Косичкина и др., 2018].

В практической реализации динамического доступа в качестве основы используется концепция когнитивного радио (CR, Cognitive Radio), которое может воспринимать собственное окружение и адаптировать параметры связи [Мирошникова, 2013], в том числе на основе предыдущего опыта. Задача CR заключается в обнаружении белых пятен (white spaces) [Beibei, Ray Liu, 2011], доступных для использования временно свободных частот без риска создания помех службам с более высоким приоритетом. Пространственно-временная конфигурация белых пятен в определенном временном промежутке может быть с определенной степенью достоверности спрогнозирована на основе регистрации наблюдений (зондирования) радиосреды при наличии в ней периодических процессов. Возможность планирования режима совместного доступа способна повысить эффективность когнитивной радиосистемы.

Для хранения и обработки данных CR используется карта радиосреды [Каретников, 2020] (radio environment map, REM) — пространственно-временная база данных (БД), актуальная карта всех радиоактивностей в сети [Fette, 2006], в задачи которой входит осуществление постоянного взаимного обмена информацией с когнитивными устройствами, что позволяет им эффективно использовать лицензированный спектр на вторичной основе. Построение REM реализуется двумя методами: одновременное зондирование спектра из разных положений в пространстве и оценка значения для произвольной точки с помощью интерполяции (прямой), оценка местоположения передатчиков и их параметров, а затем оценка уровня сигнала в заданной области с использованием определенной модели распространения (косвенный) [Alfattani, Yongacoglu, 2018]. Карта радиосреды может иметь различные реализации в зависимости от особенностей задействованных систем связи, но основные принципы построения REM и ее структура сводятся к общим базовым компонентам: блок хранения и сбора данных (storage and acquisition), менеджер REM, измерительные устройства (measurement capable devices) [Pesko et al., 2014; Suchański et al., 2019]. Показатели качества сформированной REM количественно оцениваются по среднеквадратической ошибке, вычисляемой в каждой точке сетки, как разность значений мощности сигнала для рассчитанных и фактических уровней карты REM [Pesko et al., 2014; Yilmaz et al., 2013]. В работах [Alfattani, Yongacoglu, 2018; Yilmaz, Tugcu, 2015] точность показателя качества формирования REM предлагается оценивать по ошибке локализации передатчика и мощности передаваемого сигнала.

Вычисление состояния радиосреды и ее прогнозирование выполняются на основе данных REM: генерируется информация для КР, включая сведения о свободных и ограниченных в пространстве и времени частотных ресурсах. Состав, качество и доступность информации, содержащейся в REM, определяют ее возможности для прогнозирования и могут быть получены путем построения имитационной модели системы связи. Необходимость программного моделирования обусловлена высоким уровнем сложности и комплексным характером функционирования любой системы связи, что требует учета большого количества факторов: особенности архитектуры системы, протоколы передачи данных, состав и активность действующих объектов, характеристика окружающей среды. На основе выходных данных построенной модели могут быть выделены оптимальные параметры карты REM, необходимой для взаимодействия с целевой системой связи.

Актуальность решения проблемы дефицита спектра подтверждается внедрением концепции КР в различные области и приложения: разработаны стандарты систем связи IEEE 802.22 (WRAN) [IEEE 802.22 Working Group on Wireless Regional Area Networks, 2019], IEEE 802.11af (Super Wi-Fi) [Feng et al., 2013], IEEE 802.11ah (Wi-Fi HaLow) [Adame et al., 2014], которые используют свободные частоты в диапазоне от 50 МГц до 900 МГц для передачи собственных данных. Представленные реализации позволяют заключить, что в дальнейшем значительная часть телевизионного диапазона подвергнется перераспределению для использования развивающихся систем связи. Низкое значение несущей частоты принципиально ограничивает максимальную скорость передачи данных, что для некоторых реализаций является более критичным фактором, чем дальность. Исходя из этого, в ближайшем будущем следует ожидать рост потребности использования лицензированных диапазонов в области УВЧ (ультравысоких частот), которая может быть удовлетворена при помощи систем когнитивной связи. В данном частотном диапазоне функционируют современные системы связи третьего (UMTS) и четвертого (LTE) поколения, однако в настоящее время подходы для использования на вторичной основе частот от 1 до 3 ГГц не разработаны, что обусловлено более сложными правилами функционирования соответствующих систем связи.

Таким образом, целью данной статьи является реализация модели формирования базы данных REM для современной системы сотовой связи 4G LTE, на основе выходных данных которой когнитивная система способна осуществлять прогнозирование состояния радиосреды для использования вторичными пользователями.

2. Построение модели карты радиосреды

Предлагается модель, задача которой заключается в формировании выходных данных, содержащих информацию о динамике занятости частотного ресурса в виде карты REM, которая может быть использована когнитивными устройствами для прогнозирования состояния радиосреды в будущем.

Модель реализует функционирование системы сотовой связи 4G LTE с рядом допущений: сигналы распространяются в условиях городской зоны и содержат только блоки данных с пользовательской информацией; не учитывается высота подвеса антенны; мощность излучения станций и устройств не изменяется со временем; направленность излучения равномерна для всех углов; фаза сигналов, доплеровский эффект не учитываются; аналогично [Dwarakanath et al., 2013] не учитываются эффекты быстрого замирания и затенения.

Многоуровневая [Bednarek et al., 2018] структура модели включает в себя следующие уровни.

1. Глобальный уровень — совокупность необходимой для инициализации работы модели информации; агрегатор выходных данных, формируемых ее объектами; содержит всю описывающую радиосцену информацию и характеристики радиосреды.

2. Локальный уровень — объекты, их параметры и генерируемые ими сигналы. В качестве объекта выступает обособленная структура, действующая согласно установленным правилам. Таким образом, объектно-ориентированный подход позволяет представить модель как совокупность объектов, реализующих заданные наборы данных и функционал.

Объектами модели являются базовая станция (БС), также eNodeBS (Base Station), и абонентское устройство (АУ), также UE (User Equipment), которые формируют сигналы, помещаемые в сетку карты REM (RF-REM — слой, представляющий зону покрытия LTE радиосигналом [Pesko et al., 2014]).

В разных странах лицензируются отдельные частотные полосы (bands), предусмотренные спецификацией LTE TS 36.101. Каждая полоса характеризуется режимом передачи (частотное и временное разделение, FDD/TDD), нижней и верхней частотой. Для нисходящей передачи (от станции к устройству) применяется технология OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing, мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов), а для восходящей — SC-FDMA (Single-Carrier FDMA, OFDM на базе одной несущей).

Полосы разбиваются на несущие (carriers) — максимум 5 штук, каждая с шириной полосы от 1,4 до 20 МГц. В зависимости от выбранной ширины полосы определяется количество ресурсных блоков (РБ, Resource Block) от 6 до 100 единиц соответственно, используемых для передачи данных.

РБ является информационной единицей частотного ресурса при его распределении между абонентами и представляет собой полосу частот 180 кГц, где разнос между соседними частотами в 15 кГц образует 12 поднесущих [Гельгор, Попов, 2011]. Каждый блок состоит из ресурсных элементов (РЭ, Resource Element), представляющих набор OFDM-символов. Группа из 6 или 7 OFDM-символов на 12 поднесущих (subcarriers) в полосе 180 кГц образует РБ — в сумме 72 или 84 РЭ.

В упрощенной модели частотный ресурс разбит на $freq_num$ поднесущих, начиная с частоты $freq_start$ и с шагом $freq_step$, представленных в векторе $freq_band$ (в кГц).

Известно, что ослабление сигнала является функцией от его частоты f (МГц) и расстояния до источника d (км), для чего используется уравнение потерь L в свободном пространстве, которое также зависит от коэффициента α и константы l_0 затухания сигнала [Free space path loss calculator, 2021], их возможные значения приведены в табл. 1:

$$L(\text{Дб}) = l_0 + 20 \log_{10}(f) + \alpha \log_{10}(d). \quad (1)$$

Таблица 1. Возможные значения параметров в уравнении потерь сигнала в свободном пространстве (1)

Параметр		Пояснение
Коэффициент α	Константа l_0	
20,0	20,0	Свободное пространство [Free space path loss calculator, 2021]
40,2	27,7	Пригородная зона (suburban) [Alfattani, Yongacoglu, 2018]
35,0	38,4	Городская зона (urban) [Alfattani, Yongacoglu, 2018]

Сигнал с более высокой частотой при распространении затухает быстрее, однако уровни ослабления на нижней и верхней частоте одной полосы отличаются незначительно, поэтому в упрощенной модели используется единый коэффициент ослабления $freq_att$, вычисленный для средней частоты моделируемого диапазона,

$$freq_att = 20 \log_{10} \left(1000 \times \frac{\sum_{f=1}^{freq_num} freq_band_f}{freq_num} \right). \quad (2)$$

На основе (1) формируется матрица коэффициентов затухания *attenuation* (*att*) в формате двумерной сетки, размер которой составляет $[(2 \times N_x - 1); (2 \times N_y - 1)]$ элементов, где значения N_x и N_y — их количество по горизонтали и вертикали на карте REM, отраженное в *grid_size* с шагом *grid_step* (3),

$$att_{xy} = 10^{l_0 + freq_att + \alpha \log_{10}(\sqrt{|N_x+1-x|^2 + |N_y+1-y|^2})}. \quad (3)$$

Графически матрица представляется как поверхность, образованная величинами падения уровня сигнала (в дБ) в зависимости от пройденного расстояния во всех направлениях, что продемонстрировано на рис. 1.

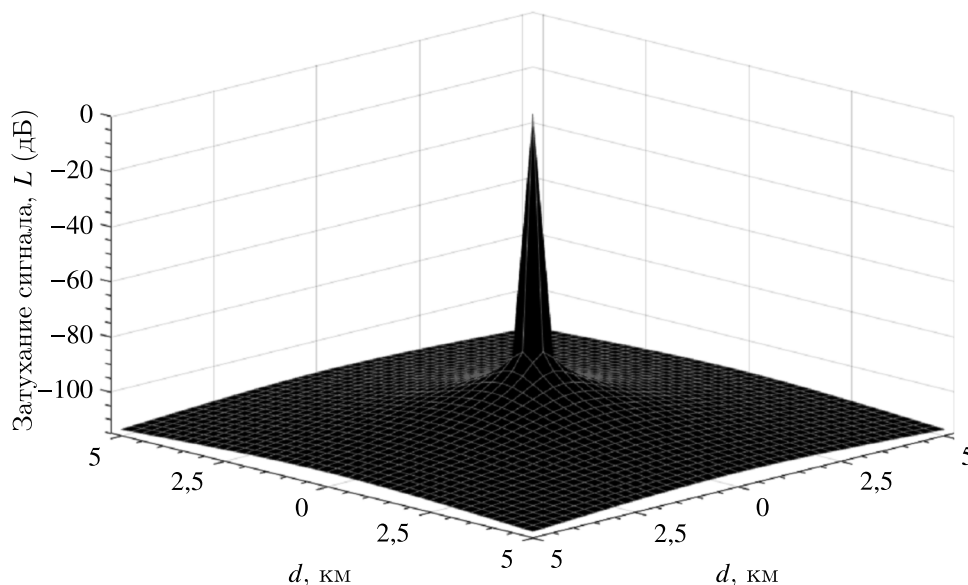


Рис. 1. Графическое представление коэффициентов затухания для вычисления конечного уровня сигнала, принятого на расстоянии d от источника излучения

Из рис. 1 следует, что мощность сигнала падает очень быстро, но не обращается в ноль даже на большом расстоянии от источника. В действительности приемники обладают ограниченной чувствительностью и не могут принимать сигналы, чья амплитуда ниже определенного значения. В [Dwarakanath et al., 2013] рассмотрена зона отчуждения с пороговым уровнем помех $pow_thres = -85$ дБм, то есть сигнал ниже данного уровня не учитывался, что также реализовано в модели.

Таким образом, глобальный уровень содержит исходные данные для модели, включая параметры среды распространения и опорные значения для внутренних объектов. Описанные параметры глобального уровня более подробно представлены в табл. 2.

Базовая станция в процессе функционирования формирует сотовую ячейку (соту), которая имеет собственный номер, являющийся ее локальным идентификатором. В упрощенной модели каждой станции eNodeBS назначаются уникальный номер eNodeBS.NCellID и строковое наименование eNodeBS.name. Объект eNodeBS также характеризуется положением в пространстве, выражаемым с помощью двух координат eNodeBS.position, определяющих ячейку сетки REM, которой принадлежит объект.

В модели базовая станция может работать в одном из трех частотных диапазонов, который определяется параметром eNodeBS.freq_band, указывающим соответствующий набор частот из набора freq_band. На практике диапазоны между станциями распределяются так, чтобы станции не создавали помех друг другу, что учтено при распределении частот для БС в модели.

Таблица 2. Параметры глобального уровня в модели

Параметр	Тип данных	Единица измерения	Пример данных	Описание
freq_num	UInt	—	2002	Количество поднесущих частот
freq_start		кГц	1 720 000	Начальное значение полного частотного диапазона
freq_step			15	Шаг поднесущих частот
freq_band	uint [freq_num]		$10^4 \times [172 \dots 183,5]$	Список поднесущих частот LTE
freq_att	Float	—	$9,6 \times 10^{-11}$	Коэффициент ослабления сигнала моделируемого диапазона
grid_size	uint [2]		[20 20]	Размер сетки карты радиосреды
grid_step	Float	м	250,0	Шаг сетки карты радиосреды
pow_thres	Float	дБм	–85,0	Пороговый уровень помех
attenuation	float [2×grid_size(1)–1] [2×grid_size(2)–1]	—	$[9,6 \times 10^{-11} \dots 1,9 \times 10^{-10}]$	Коэффициент ослабления сигнала в зависимости от расстояния

Во время работы станции к ней подключаются АУ, с которыми она поддерживает связь даже тогда, когда передача пользовательских данных не осуществляется. Каждый абонент при подключении регистрируется и в дальнейшем может быть идентифицирован как по временным присвоенным данным (M-TMSI, S-TMSI, GUTI), так и по постоянному глобальному идентификатору (IMSI). В упрощенной модели каждой БС достаточно хранить идентификаторы подключенных АУ eNodeBS.UE_RNTI (динамический массив векторов, размер N_{UE}) и выделенный им частотный ресурс в виде зарезервированных ресурсных блоков для передачи вниз eNodeBS.UE_DL_RB и вверх eNodeBS.UE_UL_RB.

Излучение базовых станций ограничено требованиями норм излучения. В качестве типовых значений максимальной выходной мощности приводятся значения 31–43 дБм (1,26–19,95 Вт). Диапазон регулировки мощности в пользовательском канале — от –28 дБ (и менее) до –3 дБ (и более). В упрощенной модели базовая станция излучает с одной определенной мощностью eNodeBS.powerBS.

Описанные параметры объекта eNodeBS более подробно представлены в табл. 3.

АУ обладает уникальным номером IMSI, который закреплен за его SIM-картой. У упрощенной модели абонентским устройствам назначаются порядковые номера UE.RNTI и имена UE.name по аналогии с базовыми станциями.

В процессе работы АУ осуществляет поиск канала связи с наилучшим приемом, а после его обнаружения подключается к соответствующей станции, предварительно синхронизировавшись с ней при помощи сигналов PSS (Primary Synchronization Signal, первичный сигнал синхронизации) и SSS (Secondary Synchronization Signal, вторичный сигнал синхронизации). В восходящем направлении общий канал PUSCH используется для передачи данных пользователя. Канал управления PUCCH (один РБ в каждом слоте одного субкадра) передается независимо от пользовательских данных и используется для передачи индикатора качества канала CQI, запроса на получение расписания доступных ресурсов и обратной связи. Канал произвольного доступа PRACH используется для запроса инициализации связи, при переходе в активный режим. Для его передачи устройству назначается интервал в ресурсной сетке шириной 6 РБ.

В упрощенной модели абонентскому устройству необходимо знать номер собственной рабочей станции UE.NCellID, а также ее несущую частоту UE.freq_band. Информация о других

Таблица 3. Параметры базовой станции в модели, объект eNodeBS (локальный уровень)

Параметр	Тип данных	Единица измерения	Пример данных	Описание
eNodeBS.name	string	—	Station#1	Наименование станции
eNodeBS.NCellID	Uint		1	Идентификатор станции
eNodeBS.position	uint [2]		[9 12]	Координаты ячейки станции
eNodeBS.freq_band	Uint		2	Номер диапазона станции
eNodeBS.powerBS	Float	дБм	43	Мощность излучения станции
eNodeBS.UE_RNTI	uint [N_{UE}]	—	[3 ... 2]	Подключенные устройства
eNodeBS.UE_UL_RB	uint [N_{UE}] []		[3 ... 16] [2 ... 11]	Блоки в восходящем канале для подключенных устройств
eNodeBS.UE_DL_RB	uint [N_{UE}] []		[3 ... 166] [2 ... 241]	Блоки в нисходящем канале для подключенных устройств

соседних станциях содержится в списке UE.base. Устройство получает и хранит информацию о выделенных ему частотных ресурсах в виде набора ресурсных блоков UE.RB. АУ находится в одном из двух состояний: режим ожидания (idle mode) и передача данных, что отражается в его параметре UE.status.

Абоненты могут быть как стационарными, так и мобильными, следовательно, в модели некоторые устройства должны с течением времени изменять свое текущее положение UE.position в пространстве. Расписание передвижения задается с помощью массива координат с привязкой к временным отсчетам UE.trajectory. Список сеансов передачи данных UE.dataTransfer формируется с указанием начала времени и длительности сеанса.

Мощность передачи абонентских устройств ограничена нормами излучения и соображениями экономии энергии, поэтому, в зависимости от условий, может варьироваться. В упрощенной модели мощность излучения устройства зафиксирована параметром UE.maxPower.

Описанные параметры устройства UE более подробно представлены в табл. 4.

Выходные данные представляются в виде массива ячеек, каждая из которых содержит суммарную матрицу сигналов, принятых в соответствующей точке с учетом их ослабления от расстояния. Таким образом, на основе информации о координатах излучающих объектов (БС и АУ) и сформированных ими сигналов математическими методами происходит заполнение всех ячеек карты.

3. Программная реализация

Модель реализована в программной среде MatLab (версия R2020b) согласно алгоритму, представленному на рис. 2, который включает в себя инициализацию объектов, генерацию сценариев поведения абонентских устройств. Выделяется память под матрицу, которая является основой для формирования карты REM размером grid_size ячеек с шагом сетки grid_step. Каждая ячейка представляет вложенную матрицу freq_num \times 140 OFDM-символов и в конце обработки на каждой итерации будет содержать смесь сигналов, сформированных в течение LTE кадра (10 мс) всеми объектами модели с учетом их ослабления при распространении до этой ячейки. На каждой итерации основного цикла происходит реконфигурация состояния модели: перемещение и повторное подключение АУ к БС с наилучшими условиями приема, перерасчет карты REM с последующим ее сохранением во внешний файл.

Таблица 4. Параметры абонентского устройства в модели, объект UE (локальный уровень)

Атрибут	Тип данных	Единица измерения	Пример данных	Описание
UE.name	String	—	UE#1	Наименование устройства
UE.RNTI	Uint		1	Идентификатор устройства
UE.position	uint [2]		[7 1]	Текущие координаты ячейки устройства
UE.NCellID	Uint		1	Идентификатор рабочей станции
UE.freq_band			1	Частотный диапазон рабочей станции
UE.RB	uint []		[3 ... 13]	Номера ресурсных блоков для связи со станцией
UE.maxPower	Float	дБм	26	Мощность излучения устройства
UE.status	Bool	—	true	Статус передачи данных устройства
UE.base	int []		[1 3 4]	Список номеров ближайших станций
UE.trajectory	(int [3]) []	time-cell	[0 9 2; ...]	Расписание перемещения устройства
UE.dataTransfer	(int [2]) []	time-time	[9 69; ...]	Расписание сеансов связи устройства

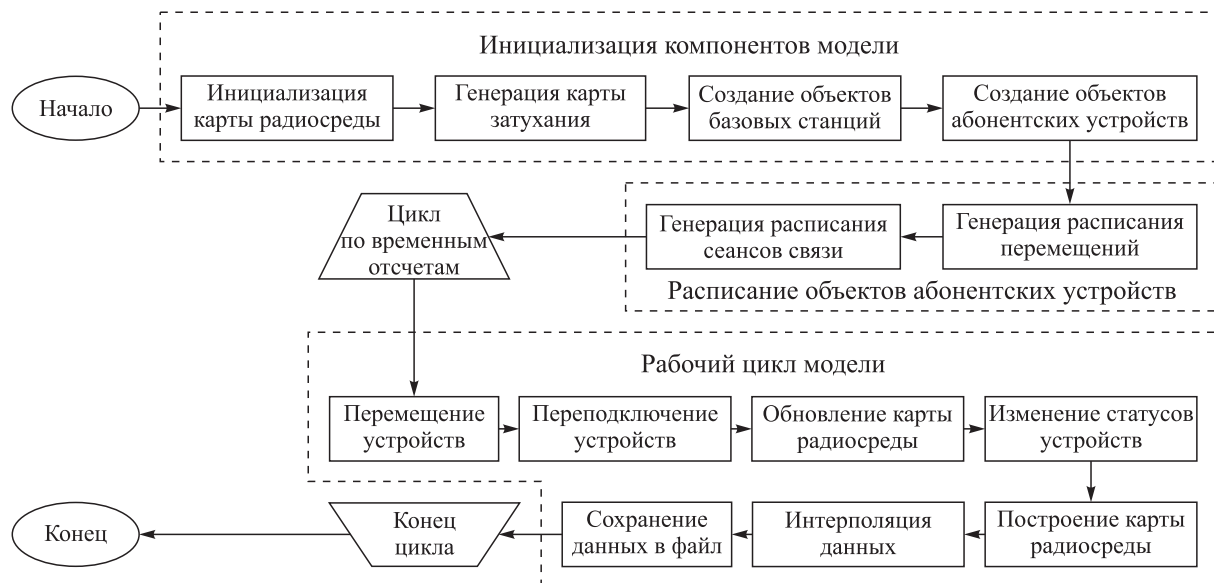


Рис. 2. Алгоритм формирования карты радиосреды

Параметры модели выбраны исходя из соображений экономии вычислительных ресурсов, а также на основе значений параметров, используемых действующими системами связи. Линейное увеличение размеров сетки и числа объектов модели приводит к степенному росту временных затрат и объема требуемой памяти для построения карты REM. С учетом того, что за 1 час реального времени формируется 360 тыс. кадров LTE, на модель накладываются ограничения по времени просчета одного кадра. Также актуальна минимизация объема выходных данных, поэтому файлы формируются лишь тогда, когда в модели происходит какое-либо изменение: смена местоположения одним из АУ или его переключение на другую БС.

Используется частотный диапазон 1800 Гц, поскольку он является самым распространенным для сетей 4G. Режим передачи в этой полосе определен спецификацией LTE как FDD, ширина восходящего и нисходящего каналов составляет 75 МГц. Для снижения вычислительной сложности алгоритма диапазон используется частично, задействуется по 25 РБ (5 МГц) для восходящего и нисходящего канала связи, что соответствует $\text{freq_num} = 2002$ поднесущим в трех непересекающихся частотных диапазонах.

Выбранный размер карты REM grid_size составляет 20×20 ячеек с шагом $\text{grid_step} = 250$ м. Результирующая площадь покрытия 5 км^2 соответствует фрагменту местности, занимаемому центральной частью города среднего размера (городской тип местности, см. табл. 1). Радиус действия базовой станции 1800 Гц равен 6,8 км (при условии 1 Мбит/с по downlink-каналу). По данным карт покрытия 4G, расстояние между вышками составляет: в районах с плотной многоэтажной застройкой — 500–800 м, в частном секторе — 1–1,5 км, в сельских поселениях — до 5 км. Следовательно, шаг сетки 250 м позволяет моделировать с достаточной точностью перемещения АУ на карте даже при самом плотном возможном расположении станций.

Число моделируемых объектов в значительной степени влияет на скорость построения карты REM, так как распространение излучающего сигнала вычисляется отдельно для каждого объекта модели, а затем все промежуточные карты суммируются. Расстояние между станциями выбрано равным 1 км, что соответствует их распределению в районе низкой плотности застройки, одна БС на 1 км^2 . Число моделируемых АУ может изменяться в широких пределах, в зависимости от рассматриваемого сценария. Значение числа абонентов на одну станцию может быть получено как отношение ширины полосы БС к средней ширине выделяемого одному абоненту канала связи. АУ назначаются различные сценарии поведения, включающие расписание их перемещения по карте (время – координаты) и сеансов связи (время – длительность). Моделью предусмотрено несколько настраиваемых сценариев, которые представлены в табл. 5.

Каждый сценарий рассчитан на моделирование расписания произвольного количества суток. Различные управляющие параметры выбраны исходя из повседневного опыта, аналогично [Dwarakanath et al., 2013], где период ожидания АУ был равномерно распределен между 0 и 30 секундами.

Пример реализованных расписаний в графическом представлении показан на рис. 3. Рис. 3, а демонстрирует ключевые точки перемещения одного из абонентов в течение суток по обеим осям. На рис. 3, б видна последовательность сеансов связи устройства: номер кадра от начала моделирования, в котором инициализируется передача данных; длительность каждого сеанса, выбранная таким образом, чтобы два соседних события не накладывались друг на друга.

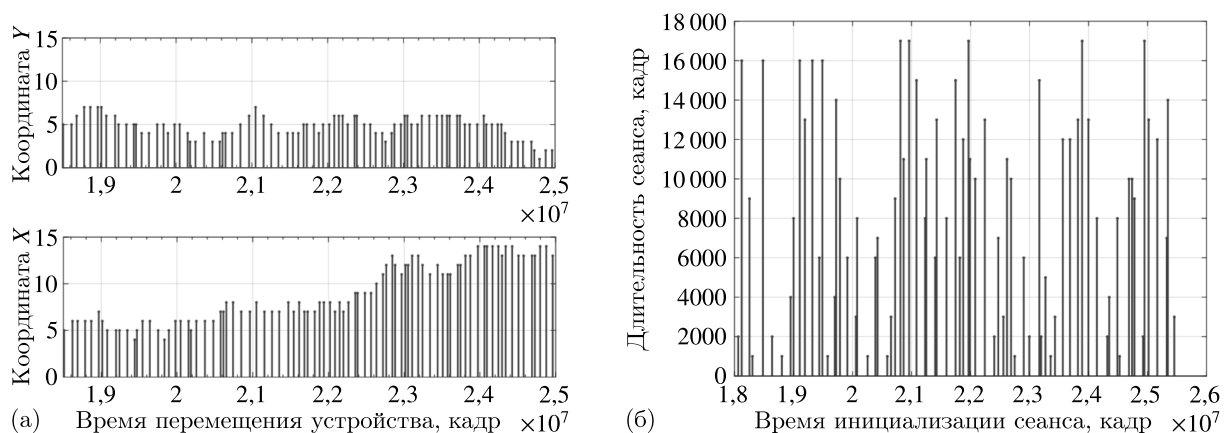


Рис. 3. Сценарии абонентских устройств: изменение положения объекта по сценарию «курьер» (а), последовательность сеансов связи устройства по сценарию «пользователь» (б)

Таблица 5. Реализованные в модели сценарии перемещения и сеансов АУ

Сценарий		Описание	Управляющие параметры	Значения параметров
Перемещения	«модем»	Стационарное устройство	—	—
	«работник»	Мобильное устройство человека, который два раза в день совершает перемещение между двумя точками — «дом» и «работа» — в рабочие дни. На выходные дни устройство остается в ячейке «дом». График работы 5/2	ta — начало активности	0...20 ч
			tb — конец активности	ta...24 ч
			[xh, yh] — координаты «домашней» ячейки [xw, yw] — координаты «рабочей» ячейки	[1...grid_size(1), 1...grid_size(2)]
	«курьер»	Мобильное устройство человека, который постоянно перемещается по карте в рабочие дни во время рабочих часов («курьер»). На выходные дни устройство остается в ячейке «дом». График работы 2/2	ta — начало активности	0...20 ч
			tb — конец активности	ta...24 ч
			td — время между перемещениями	100...1000 с
Сеансы связи	«узел»	Устройство непрерывно передает данные в течение заданного промежутка времени в течение суток	ta — начало активности	0...20 ч
			tb — конец активности	ta...24 ч
	«пользователь»	Устройство осуществляет сеансы с непостоянными значениями интервалов и длительности. Имитация использования гаджета человеком для подключения к сети	ta — начало активности	0...20 ч
			tb — конец активности	ta...24 ч
			td — интервалы времени между сеансами	3...30 мин
			tl — длительность сеанса связи	6...600 с

На каждой итерации цикла осуществляются проверка и, при необходимости, переподключение АУ к БС с наилучшими условиями приема — по максимальному уровню принимаемого сигнала, который оценивается вычислением среднего значения опорных OFDM-символов [Pesko et al., 2014]:

$$P_{eNodeBS} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{RSRP}} P_{RSRP_i}}{N_{RSRP}}, \quad (4)$$

где P_{RSRP_i} — уровень каждого опорного OFDM-символа, N_{RSRP} — количество опорных OFDM-символов в принимаемом сигнале от БС.

Подключение осуществляется распределением частотного ресурса БС в виде зарезервированных РБ для нисходящей передачи (eNodeBS.UE_DL_RB) между всеми подключенными АУ, при этом все РЭ станции перераспределяются. У станции в распоряжении находится $N_{DL} = 250$ РБ для связи вниз в течение одного кадра, по 25 РБ в одном подкадре. Моделируемый кадр содержит 10 подкадров. Частотный ресурс базовой станции для нисходящей передачи представляет собой вектор из порядковых номеров РБ одного кадра и вычисляется путем случайной перестановки номеров без повторения с помощью функции *randperm()*, которая в качестве аргументов принимает общее число номеров и количество генерируемых значений:

$$RB_{DL} = randperm(N_{DL}, N_{DL_UE} \cdot CNT_{UE}), \quad (5)$$

где N_{DL} — общее количество ресурсных блоков (250 РБ) для каждой БС, CNT_{UE} — общее количество АУ; N_{DL_UE} — количество РБ, выделяемых для каждого АУ, определяется как

$$N_{DL_UE} = \left\lfloor \frac{N_{DL} - 1}{CNT_{UE}} \right\rfloor, \quad (6)$$

где $\lfloor \cdot \rfloor$ — целая часть числа.

Каждому устройству случайным образом выделяется равное количество РБ, которое зависит от общего числа подключенных АУ следующим образом:

$$eNodeBS_UE_DL_RB(i) = \begin{cases} RB_{DL}(j), j = N_{DL_UE} \cdot (i - 1) + 1 \text{ при } UE.status = false, \\ RB_{DL}(j), j = \overline{(N_{DL_UE} \cdot (i - 1) + 1), (N_{DL_UE} \cdot i)} \text{ при } UE.status = true, \\ i = \overline{1, CNT_{UE}}, \end{cases} \quad (7)$$

где i — порядковый номер абонентского устройства.

В табл. 6 представлен пример распределенного частотного ресурса для нисходящей связи между 4 подключенными АУ по 62 РБ.

Таблица 6. Распределенные блоки среди подключенных абонентских устройств для нисходящего канала

Номер устройства	Статус передачи данных	Номера выделенных ресурсных блоков для каждого устройства (выделено по 62 ресурсных блока)														
2	False	2	5	16	17	19	26	36	44	49	53	...	239	242	245	
3	True	9	18	20	24	27	31	37	39	43	46	...	235	246	247	
5	False	4	6	8	11	15	21	22	28	29	30	...	237	241	248	
14	False	3	7	10	12	13	14	23	25	33	35	...	243	244	249	

Распределение частотного ресурса для восходящей связи ($eNodeBS_UE_UL_RB$) между подключенными АУ осуществляется иначе, поскольку в этом случае используется схема мультиплексирования с частотным разнесением с передачей на одной несущей SC-FDMA [Гельгор, Попов, 2011].

Выделенный в первом подкадре РБ действует на протяжении всего кадра, поэтому распределению подлежат первые 25 блоков, которые находятся в первом подкадре. Выделение частотного ресурса для восходящей передачи осуществляется как

$$eNodeBS_UE_UL_RB(i) = \begin{cases} RB_{UL}(j), j = N_{UL_UE} \cdot (i - 1) + 1 \text{ при } UE.status = false, \\ RB_{UL}(j), j = \overline{(N_{UL_UE} \cdot (i - 1) + 1), (N_{UL_UE} \cdot i)} \text{ при } UE.status = true, \\ i = \overline{1, CNT_{UE}}, \end{cases} \quad (8)$$

где RB_{UL} — вектор из порядковых номеров ресурсных блоков одного подкадра восходящей передачи, который также образуется путем случайной перестановки номеров без повторения с помощью функции $randperm()$.

В предложенной модели минимальной единицей информационного ресурса является РБ, следовательно, максимальное количество подключаемых устройств к одной БС составляет 25 объектов.

В табл. 7 представлен пример распределения частотного ресурса для восходящей связи среди четырех подключенных устройств.

Таблица 7. Распределенные блоки среди подключенных абонентских устройств для восходящего канала

Номер устройства	Статус передачи данных	Номера выделенных ресурсных блоков					
2	False	2	14	21	24	4	17
3	True	3	16	18	1	6	11
5	False	5	23	20	3	10	12
14	False	22	9	8	15	19	13

После выделения частного ресурса выполняется генерация ресурсных сеток для всех объектов. Сигналы помещаются на карту REM в ячейки с соответствующими координатами расположения сформировавших их объектов.

Для генерации ресурсных сеток БС используется функция пакета LTE Waveform Generator — `lteRMCDLTool()`. В качестве аргументов передаются конфигурация БС (табл. 3) и информационные биты, учитывается статус передачи данных каждого АУ. Если устройство не осуществляет передачу, то все выделенные ему РБ, кроме одного, считаются свободными, иначе эти ресурсы занимают полностью. На рис. 4 представлен пример сформированной ресурсной сетки для нисходящей передачи, которая соответствует распределенному частотному ресурсу в табл. 6; показаны соответствующие ресурсные блоки и область, занимаемая подкадром в кадре сигнала.

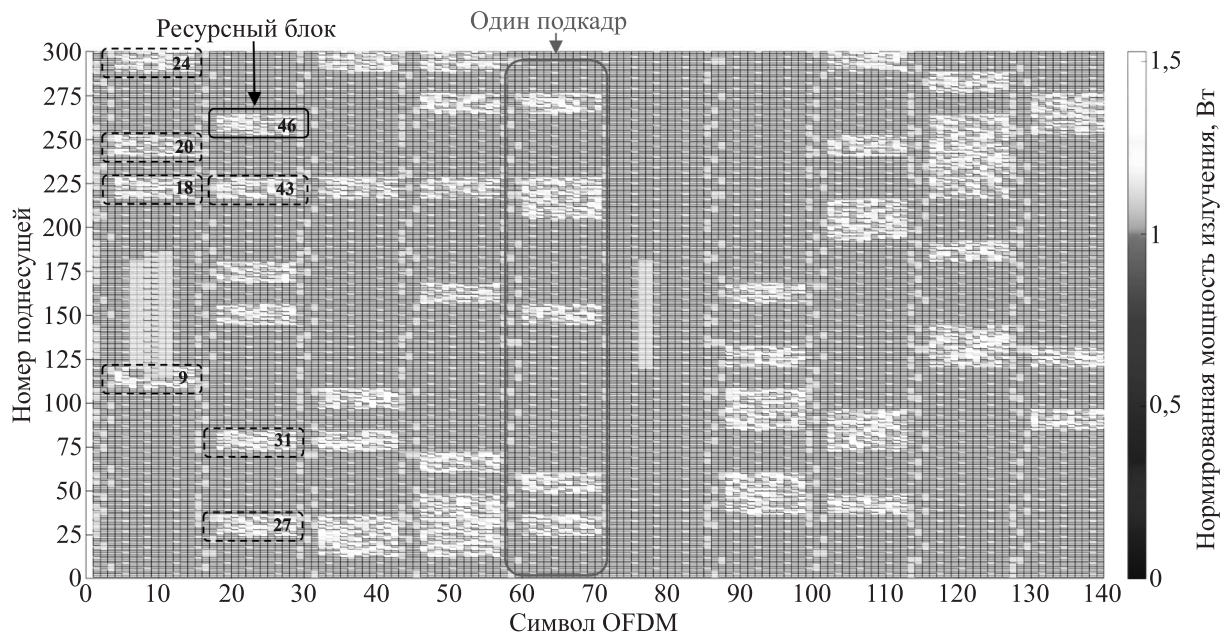


Рис. 4. Ресурсная сетка базовой станции для передачи данных по нисходящему каналу

Генерация ресурсных сеток для АУ осуществляется с помощью функции `lteRMCDLTool()`, параметры конфигурации приведены в табл. 4. Если устройство не передает данные в текущем кадре, то занятым из выделенных блоков считается только один. Пример сформированной ресурсной сетки для восходящей передачи данных показан на рис. 5, которая соответствует абонентскому устройству с идентификационным номером 3 (UE.RNTI) из табл. 7.

Запускается цикл с шагом в 1 кадр, на каждом из них выполняются следующие операции.

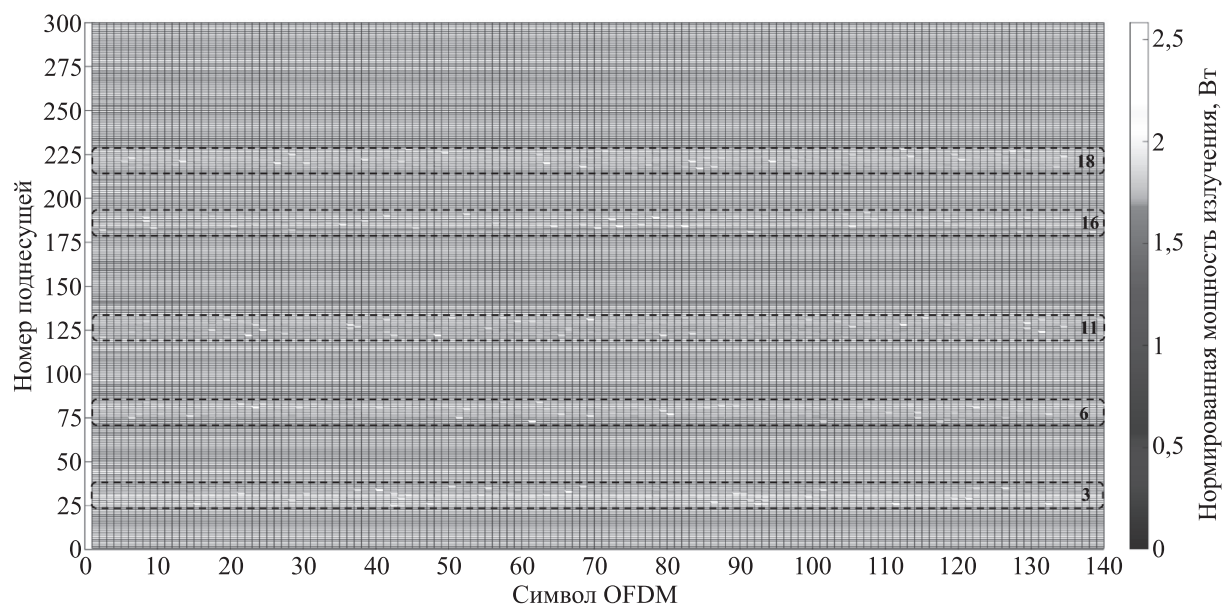


Рис. 5. Ресурсная сетка абонентского устройства для передачи данных по восходящему каналу

1. Перемещение устройств. Если номер текущего кадра отмечен в расписании, то объект изменяет свое местоположение на указанные в соответствующей записи пространственные координаты.

2. Повторное подключение или отключение АУ при возникновении в этом необходимости, например в результате перемещения, вследствие чего уровень принимаемого сигнала другой БС, согласно (4), стал выше, чем текущей. В модели это эквивалентно удалению устройства от рабочей БС на большее, чем заданное, расстояние.

Отключение АУ происходит, когда уровень принимаемого сигнала от базовой станции (4) становится меньше порогового уровня помех:

$$P_{eNodeBS} < pow_thres. \quad (9)$$

В обоих случаях происходит вызов функции перераспределения частотного ресурса для всех станций, задействованных в данной операции.

3. Обновление промежуточной карты REM. Повторная генерация исходных ресурсных сеток для всех объектов модели. Сформированные в течение одного кадра сигналы заново записываются в соответствующие ячейки карты REM.

4. Изменение статусов передачи данных АУ в соответствии с расписанием сгенерированного профиля. Если существует запись о начале сеанса в данный момент времени, то объект изменяет состояние на активное. На следующей итерации устройство связывается со своей рабочей станцией и начинает передачу данных. Если время сеанса связи превысило длительность, указанную в расписании, абонент производит завершение передачи и переходит в неактивное состояние.

5. Построение карты *fullREM* с учетом потерь при распространении сигнала состоит из следующих шагов: определяются координаты очередного объекта k (общее число объектов K); формируется отдельный пустой слой карты $newREM_k$; кадр сигнала (ресурсная сетка) объекта REM_{kxy} умножается на все его ячейки; слой накладывается на матрицу затуханий сигнала att таким образом, что ее центр совмещается с текущими координатами объекта (att_k); осуществляется поэлементное перемножение матрицы затуханий и слоя, имитируя распространение сигнала

объектом на карте REM; после завершения обхода всех объектов все полученные слои суммируются:

$$fullREM = \sum_{k=1}^K \sum_{x=1}^{N_x} \sum_{y=1}^{N_y} newREM_{kxy} \times att_{kxy}. \quad (10)$$

6. Интерполяция полученных результатов выполняется в том случае, если есть необходимость в формировании карты REM с большим разрешением, что позволяет ускорить работу ее программной реализации. Точность получения данных с большим разрешением зависит от выбранного метода интерполяции и размера сетки (*grid_size*) сформированной REM.

Карта REM с большим разрешением может быть построена с помощью различных методов, которые обычно классифицируются как прямые, косвенные и гибридные. Вне зависимости от конкретного типа эти методы связаны с оценкой уровней сигнала в географических точках, где измерения распределенного сигнала недоступны. Из анализа источников [Pesko et al., 2014; Kaniewski et al., 2021] установлено, что применение метода кригинга (Kriging) при формировании карты REM с большим разрешением является эффективным, так как он имеет умеренную вычислительную сложность, на его работу оказывают влияние выбросы при измерении сигнала в узлах сетки, и он сопоставимо оценивает уровень сигнала в любом месте.

7. Сохранение карты REM на внешний носитель. В качестве формата хранения данных используется HDF5 по ряду причин: наличие в MatLab соответствующих инструментов, высокая скорость записи данных, универсальность формата. Таким образом, выходными данными моделями является набор HDF5 файлов с расширением .h5, каждый из которых содержит построенную карту REM, а также некоторые метаданные объектов, представленные в табл. 2–4. С целью экономии памяти носителя осуществляется автоматизированная архивация полученного файла в формат zip, что позволяет уменьшить размер данных до 50 раз за счет разреженности матрицы REM.

4. Результаты

Сформированная модель включает 7 БС и 30 АУ. Станции образуют равномерную гексагональную структуру, что отображено на рис. 6.

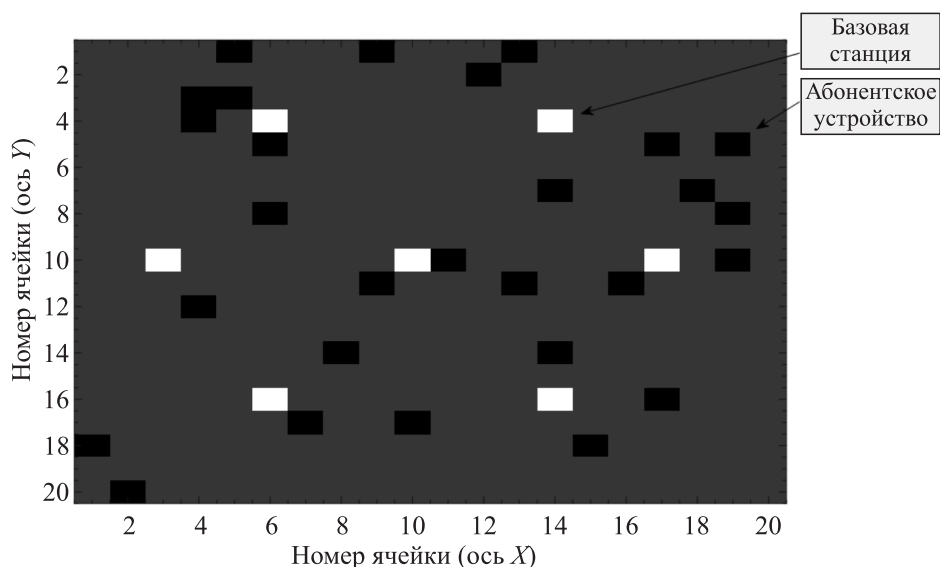


Рис. 6. Пример начального расположения объектов базовых станций и абонентских устройств на карте в реализованной модели

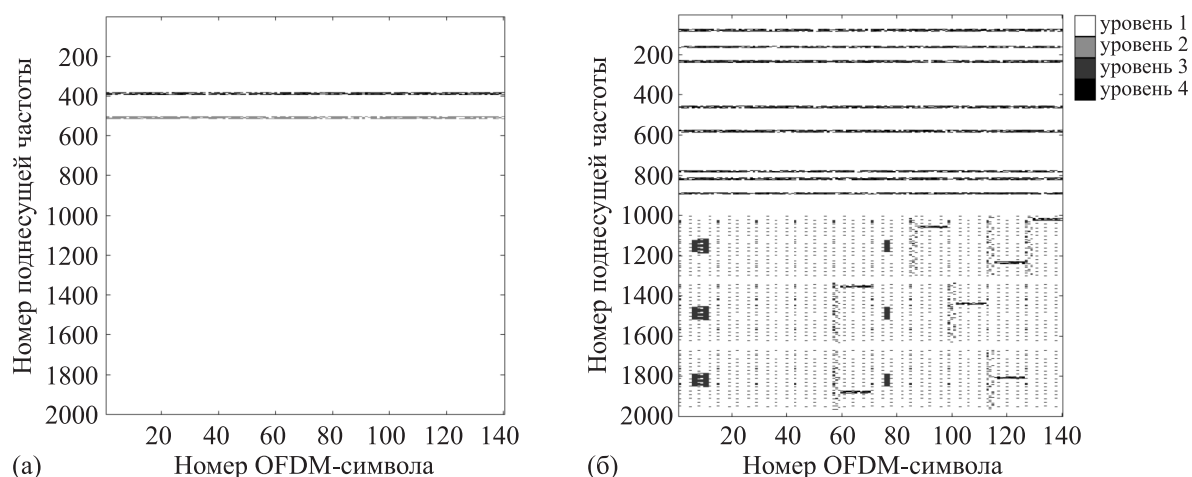


Рис. 7. Кадры ресурсной сетки карты REM, отражающие проходящий трафик сети в соответствующей точке пространства в течение 10 мс на краю карты (а); возле базовой станции (б): уровень 1 — сигнал отсутствует (-120 дБм и ниже); уровень 2 — слабый уровень сигнала, при котором происходит отключение абонентского устройства (от -120 дБм до -83 дБм); уровень 3 — удовлетворительный уровень сигнала (от -82 дБм до -20 дБм); уровень 4 — сильный уровень сигнала (-20 дБм и выше)

В конце итераций рабочего цикла модели формируется REM, каждый элемент которой отражает степень занятости частотного ресурса в соответствующей точке пространства. В качестве примера структуры ячейки результирующей карты на рис. 7, а показан состав элемента REM, удаленного от базовых станций, а на рис. 7, б — возле базовой станции. Для большей информативности представления элементов REM вместо отображения уровня мощности сигналов разделены на отдельные уровни, отражающие мощность сигнала.

Анализ рис. 7 показывает, что вблизи базовых станций, обслуживающих множество абонентов, частотный ресурс в значительной степени ограничен, что выражается меньшим количеством свободных в течение 1 кадра поднесущих. По мере удаления от станций спектр становится свободнее, и количество свободных частот повышается, что можно количественно выразить через соотношение свободных и занятых поднесущих частот.

Для подтверждения корректности работы модели выполнено аналитическое сопоставление формируемых взаимосвязанных данных в отдельные моменты работы алгоритма работы модели. В качестве примера представлен анализ сформированного образа REM во временном кадре с номером 100 524 000, схематическое расположение базовых станций и абонентских устройств показано на рис. 8.

В область видимости на рис. 8 входят три базовые станции (Б1, Б2, Б4). Станция Б1 занимает вторую частотную полосу в частотном диапазоне для нисходящей связи и вторую частотную полосу для восходящей связи, Б2 — третью, а Б4 — первую. Все АУ в рассмотренном временном кадре не осуществляют передачу данных и занимают в каждом из направлений передачи по одному выделенному для них РБ. Результаты тестирования представлены в табл. 8 и на рис. 9.

На рис. 9 представлено состояние ячейки REM, располагающейся внутри выделенной области на рис. 8 (координаты (6, 10) — в месте расположения А22) в момент времени 100 524 000, в которой содержится сумма сигналов соседних станций и устройств.

Анализ рис. 9 и табл. 8 показал, что частотные ресурсы БС распределяются равномерно среди подключенных устройств, что подтверждает корректность работы модели. Количество подключенных устройств к станциям в описанной области видимости можно проследить по используемым для передачи данных блокам. Так, на рис. 9 во второй полосе для нисходящей связи используется всего один РБ под номером 190, который выделен для устройства А23. Количество

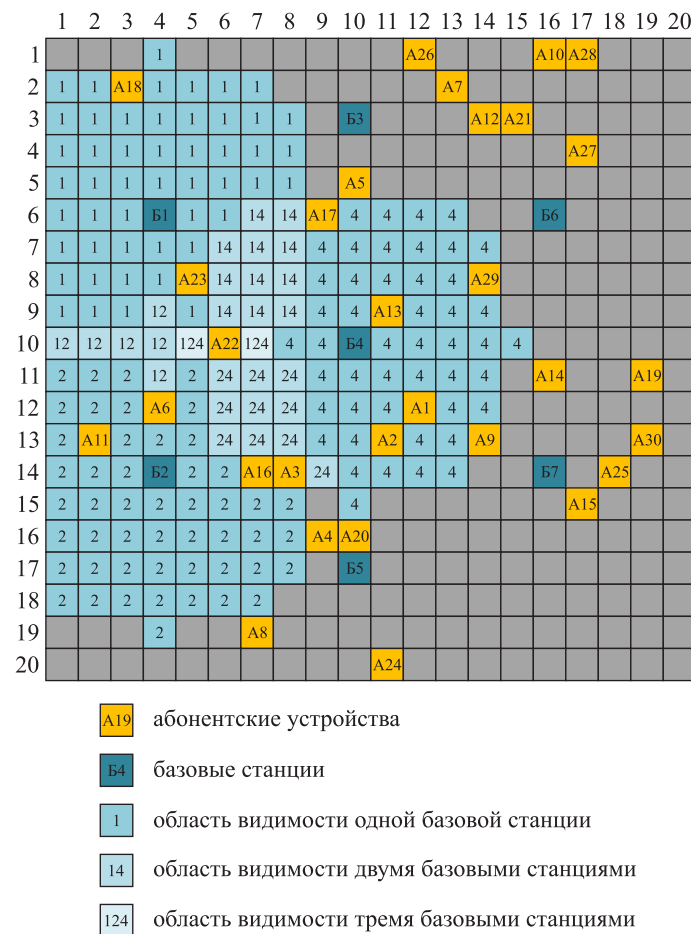


Рис. 8. Схематическое расположение базовых станций и абонентских устройств на карте REM и область радиовидимости в точке с координатами (6, 10)

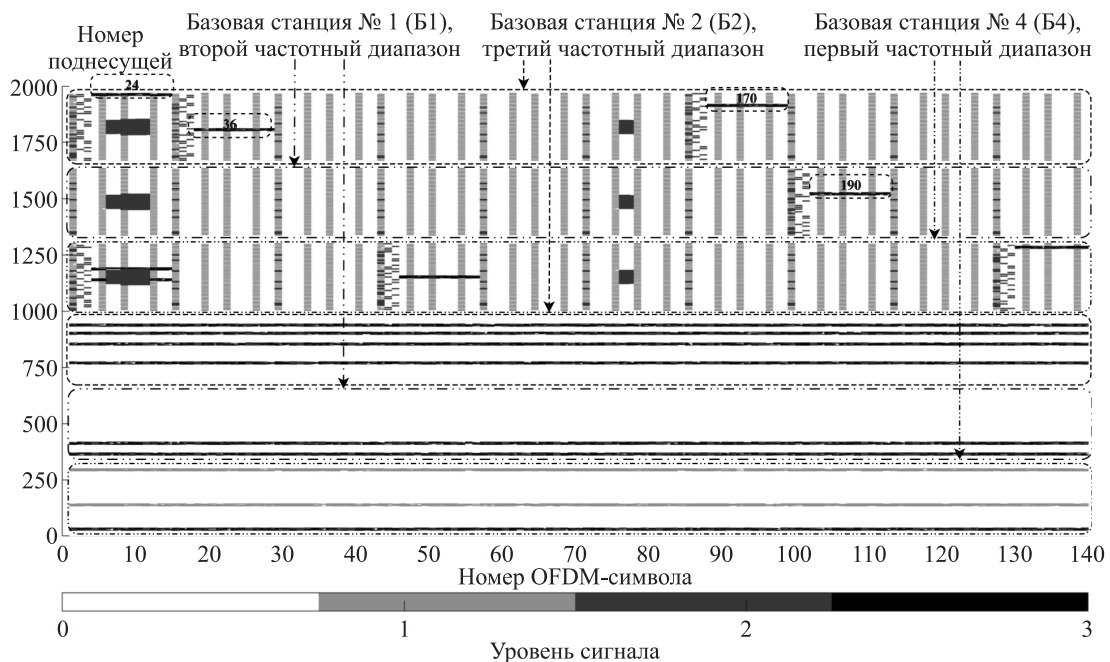


Рис. 9. Состояние радиосреды между абонентским устройством и рабочей базовой станцией (см. табл. 8) в координатах (6, 10)

Таблица 8. Занятость частотных ресурсов абонентскими устройствами и базовыми станциями для нисходящей и восходящей связи

Параметры	Значения							
Номер кадра	100 524 000							
Устройство	A3	A6	A11	A13	A16	A17	A22	A23
Позиция устройства, (x, y)	(8, 14)	(4, 12)	(2, 13)	(11, 9)	(7, 14)	(9, 6)	(6, 10)	(5, 8)
Рабочая станция устройства	B5	B2	B2	B4	B2	B3	B4	B1
Подключенные к станции устройства	A3-4, A8, A20, A24	A11, A6, A16	A11, A6, A16	A13, A22, A1-2	A11, A6, A16	A5, A17, A26	A13, A22, A1-2	A23
Диапазон станций	2	3	3	1	3	3	1	2
Выделенные блоки для восходящей связи устройствам	2, 4, 17, 19	18-20, 10, 6-7, 22	14-16, 11-12, 2, 4	24, 8, 3, 5, 12	8-9, 13, 17, 3, 21, 24	22, 8, 16-18, 6, 11	2, 6, 13, 7, 19	2-24
Выделенные блоки для нисходящей связи всем подключенным устройствам	4, 17, 34, 37, 39, 42, 51, 58, 61, 72, 79, 89, 91, 102, 104, 106, 109, 117, 120, 126, 130, 134, 143-144, 154, 157-158, 161, 166, 171, 176, 180, 184-185, 188-189, 202, 207, 214, 216, 218-219, 231, 233, 238-239, 242, 244, 248	3, 5, 12-13, 15-16, 20-21, 28-29, 31, 33, 47, 50-52, 57-58, 60, 72-74, 81-83, 86, 89, 91-92, 94, 99, 104-105, 107-108, 110, 115, 118, 120-122, 126, 128-129, 133, 135, 140, 142-143, 145, 148, 153, 155-157, 161, 164, 168, 170, 172-173, 178, 180, 186, 188, 191, 198, 205, 207, 210-212, 215, 219-220, 226, 230-231, 233, 235, 247-248	6, 8, 11, 14, 18-19, 22, 24-27, 34-35, 39, 45-46, 49, 53, 56, 62, 64-66, 68, 75, 77, 79, 84, 87-88, 93, 95, 97-98, 100, 103, 106, 109, 114, 117, 124-125, 130-131, 137-138, 144, 147, 150-151, 154, 160, 167, 169, 171, 175-176, 183-184, 187, 189-190, 192, 194, 199, 200, 202, 204, 208, 213-214, 222, 228, 234, 236-238, 242, 244-246, 249	5, 7, 10, 22-23, 31, 36, 40, 44, 55, 57, 61, 64-65, 67, 70, 79, 87, 90, 92-93, 95, 100, 109, 116-117, 121, 125-128, 130, 135, 137, 145-146, 151, 161, 163, 166, 168-169, 173, 180, 183, 185, 190, 194, 197, 200-201, 207, 219-220, 223, 231, 236-237, 240-242, 244	2, 4, 7, 9-10, 17, 23, 30, 32, 36-38, 40-44, 48, 54-55, 59, 61, 63, 67, 69, 70-71, 76, 78, 80, 85, 90, 96, 101-102, 111-113, 116, 119, 123, 127, 132, 134, 136, 139, 141, 146, 149, 152, 158-159, 162-163, 165, 166, 174, 177, 179, 182, 185, 193, 196-197, 201, 203, 206, 209, 216-218, 221, 223-225, 227, 229, 232, 239, 240-241, 243	3-4, 6, 8, 10, 23, 28, 30, 33, 34-36, 38, 40, 41, 43, 46, 56, 59-64, 67, 71, 73, 76-77, 81, 83, 85, 87, 89, 90, 95, 97, 100, 102, 104, 112-113, 115, 122-123, 130, 135, 137, 139, 140-141, 149, 156, 162-163, 166-167, 170, 172, 182-183, 186-188, 192, 195, 199, 202, 205-208, 218, 222-223, 225, 234, 240-241, 246, 248-249	12, 15-16, 18, 21, 26, 33, 35, 38, 41-43, 46, 50, 53-54, 59, 66, 71, 76, 81, 84-85, 99, 101-102, 107-108, 111, 114-115, 118, 131, 134, 136, 138, 147-148, 154, 157-158, 165, 170, 174, 177, 179, 181, 184, 188, 195, 199, 203, 206, 209, 212, 215, 225, 227, 232-234, 247	2-249

подключенных АУ к Б2, которая занимает третий частотный диапазон, равняется трем: А6, А11, А16. Для этих устройств выделено равное количество блоков, но используются только первые: 170, 24, 36 соответственно. Используемые на рис. 9 РБ для передачи данных по восходящей линии связи также согласуются с выделенными блоками в табл. 8.

Таким образом, подтверждается корректность взаимосвязи текущих параметров объектов и состояния активности радиосреды, которое формируется этими объектам. Для оценки качества генерируемой REM использованы два показателя: разность между предполагаемым и фактическим местоположением БС (в метрах), разность между фактическим и предполагаемым уровнем сигнала, излучаемого одним АУ (в дБм) [Alfattani, Yongacoglu, 2018]. Для этих показателей рассчитывается среднеквадратичная ошибка (RMSE). Для расчета первого показателя были об-

нулены ячейки сформированной REM в тех местах, где находились БС. Далее выполнялась интерполяция методом кригинга (Kriging) с увеличением пространственного разрешения в 3 раза. Среднее расчетное значение RMSE определения координат БС составило 15,11 м. Второй показатель рассчитывался путем обнуления ячеек REM в местах АУ и соседних с ними. После восстановления уровней сигнала в этих ячейках интерполяцией кригинга рассчитывался показатель RMSE, который составил 7,83 дБм. Полученные значения RMSE соответствуют достаточно точной REM для дальнейшего ее применения и согласуются с результатами, которые представлены в [Suchański et al., 2019; Alfattani, Yongacoglu, 2018], что подтверждает адекватность разработанной модели.

С помощью предложенной модели сформирована карта радиосреды для 30 суток работы системы связи, что соответствует $259,2 \times 10^6$ кадрам LTE. В результате работы программы было создано 54 246 файлов объемом 145 ГБ, общее время работы модели для получения указанного объема данных составило 72 часа на персональном компьютере с основными параметрами CPU Intel Core i9-10900/2,80 ГГц, RAM 64 ГБ. Средний объем одного файла в архивированном виде составил 3 МБ, обработка каждого кадра заняла в среднем 1 мс. Использование альтернативных методов сжатия, таких как Deflate, позволяет уменьшить размер хранимой карты REM (без учета метаданных), которая занимает $\sim 99,4\%$ общего объема, до 1 МБ.

К статье приложены файлы программного кода, реализующие имитационную модель LTE, которая генерирует файлы, содержащие информацию о динамике состояния моделируемой радиосреды. Код написан на языке MatLab, включает 1 скрипт и 37 функций под лицензией Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0), подробные сведения приведены в лицензионном файле license.txt.

5. Заключение

В работе представлена разработанная имитационная модель для формирования карты радиосреды системы сотовой связи LTE. Обоснованы и представлены основной список параметров модели и сценарии поведения абонентских устройств, необходимые для имитации работы сотовой сети LTE. Программная реализация функционирования разработанной модели выполнена с использованием прикладного пакета MatLab. Приведены результаты формирования карты радиоактивностей с оценкой ее качества по двум показателям: RMSE определения координат базовых станций (15,11 м) и RMSE определения уровня сигнала, излучаемого одним абонентским устройством (7,83 дБм). Полученные данные подтверждают корректность функционирования разработанной модели. Выходные данные модели содержат необходимую информацию для восстановления состояния радиосреды в заданные моменты времени, их генерация оптимизирована по времени и по занимаемому объему памяти, что очень важно при формировании карты радиосреды за большой временной интервал. Полученные с применением разработанной модели данные предназначены для дальнейшего использования на этапах проектирования и комплексного моделирования когнитивных систем связи на базе LTE.

Список литературы (References)

- Гельгор А. Л., Попов Е. А. Технология LTE мобильной передачи данных. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. — 204 с.
Gel'gor A. L., Popov E. A. Tekhnologiya LTE mobil'noi peredachi dannykh [LTE mobile data technology]. — SPb.: Izd-vo Politekh. un-ta, 2011. — 204 p. (in Russian).
- Каретников И. С. Построение карты радиосреды с применением алгоритма кригинга // Цифровая обработка сигналов и ее применение DSPA. — М., 2020. — С. 223–227.
Karetnikov I. S. Postroenie karty radiosredy s primeneniem algoritma kriginga [Building a map of the radio environment using the kriging algorithm] // Tsifrovaya obrabotka signalov i ee primenenie DSPA [Digital signal processing and its application DSPA]. — Moscow, 2020. — P. 223–227 (in Russian).

- Косичкина Т. П. и др.* Когнитивные сверхширокополосные радиосистемы как метод повышения эффективности использования радиочастотного спектра // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. — 2015. — Т. 9, № 12. — С. 37–43.
- Kosichkina T. P. et al.* Kognitivnye sverkhshirokopolosnye radiosistemy kak metod povysheniya effektivnosti ispol'zovaniya radiochastotnogo spektra [Cognitive ultra-wideband radio systems as a method for improving the efficiency of using the radio frequency spectrum] // T-Comm. — 2015. — Vol. 9, No. 12. — P. 37–43 (in Russian).
- Косичкина Т. П., Иванов Г. Н., Евдокимов В. О.* Исследование моделей помех в системах когнитивного радио // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. — 2018. — Т. 18, № 4. — С. 965–970.
- Kosichkina T. P., Ivanov G. N., Evdokimov V. O.* Issledovanie modelei pomekh v sistemakh kognitivnogo radio [Study of interference models in cognitive radio systems] // Fundamental'nye problemy radioelektronnogo priborostroeniya [Fundamental problems of radio-electronic instrumentation]. — 2018. — Vol. 18, No. 4. — P. 965–970 (in Russian).
- Мирошникова Н. Е.* Обзор систем когнитивного радио // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. — 2013. — Т. 7, № 9. — С. 108–111.
- Miroshnikova N. E.* Obzor sistem kognitivnogo radio [Overview of cognitive radio systems] // T-Comm. — 2013. — Vol. 7, No. 9. — P. 108–111 (in Russian).
- Alfattani S., Yongacoglu A.* Indirect Methods for Constructing Radio Environment Map // IEEE Canadian Conference on Electrical & Computer Engineering (CCECE). — Quebec, 2018.
- Bednarek P., Bicki D., Lopatka J.* Radio Environment Map for the Cognitive Radio Network Simulator // International Journal of Electronics and Telecommunications. — 2018. — No. 64 (1). — P. 45–49.
- Beibei W., Ray Liu K. J.* Advances in Cognitive Radio Networks: A Survey // IEEE Journal of selected topics in signal processing. — 2011. — Vol. 5, No. 1. — P. 5–23.
- Dwarakanath R., Naranjo J., Ravanshid A.* Modeling of Interference Maps for Licensed Shared Access in LTE-Advanced Networks Supporting Carrier Aggregation // IEEE IFIP Wireless Days. — Valencia, 2013.
- Feng X. et al.* Enabling co-channel coexistence of 802.22 and 802.11af systems in TV White Spaces // 2013 IEEE International Conference on Communications (ICC). — P. 6040–6044.
- Fette B.* Cognitive radio technology. — Elsevier Inc, 2006. — 649 p.
- Free Space Path Loss: details & calculator. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.electronics-notes.com/articles/antennas-propagation/propagation-overview/free-space-path-loss.php>, свободный (дата обращения: 29.09.2021).
- Adame T. et al.* IEEE 802.11AH: the WiFi approach for M2M communications // IEEE Wireless Communications Magazine. — 2014.
- IEEE 802.22 Working Group on Wireless Regional Area Networks. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.ieee802.org/22/>, свободный (дата обращения: 18.11.2021).
- Kaniewski P. et al.* Spectrum Awareness for Cognitive Radios Supported by Radio Environment Maps: Zonal Approach // Applied Sciences. — 2021. — Vol. 11, No. 7:2910. — P. 1–23.
- Pesko M. et al.* Radio Environment Maps: The Survey of Construction Method // KSII Transactions on Internet and Information Systems. — 2014. — No. 8 (11). — P. 3789–3809.
- Suchański M. et al.* Radio environment maps for military cognitive networks: density of small-scale sensor network vs. map quality // Cognitive Radio-Oriented Wireless Networks. — 2019. — P. 195–207.
- Yilmaz H. B. et al.* Radio environment map as enabler for practical cognitive radio network // IEEE Communications Magazine. — 2013. — Vol. 51, No. 12. — P. 162–169.
- Yilmaz H. B., Tugcu T.* Location estimation-based radio environment map construction in fading channels // Wireless Communications and Mobile Computing. — 2015. — Vol. 15. — P. 561–570.