

УДК 004.94, 621.39

DOI 10.52928/2070-1624-2022-39-11-8-15

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ АБОНЕНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦЕПИ МАРКОВА ПРИ ФОРМИРОВАНИИ КАРТЫ РАДИОСРЕДЫ ДЛЯ КОГНИТИВНОЙ СИСТЕМЫ СВЯЗИ

Е. Р. АДАМОВСКИЙ, д-р техн. наук, доц. **Р. П. БОГУШ**, канд. техн. наук, доц. **В. М. ЧЕРТКОВ**
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)
канд. техн. наук **Н. М. НАУМОВИЧ**, канд. техн. наук, доц. **И. К. СТЕЖКО**
(Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск)

Представлена методика формирования расписаний перемещения и сеансов передачи данных абонентских устройств имитационной модели построения карты радиосреды для когнитивной системы сотовой связи. Методика определяет поведение абонентов как псевдослучайное на малых масштабах времени, но периодически повторяющееся в течение больших интервалов. Учитывается влияние на поведение абонентов некоторых временных параметров: типы дня, такие как рабочий, выходной, праздничный; номер дня недели; номер недели месяца. Формирование сценариев осуществляется с использованием бинарных последовательностей, получаемых с помощью цепи Маркова, и генератора импульсного шума для изменения состояния абонентов. Программная реализация модели выполнена в программной среде MatLab, представлены результаты исследований, которые подтверждают корректность работы модели и возможность использования предложенного подхода для формирования карты радиосреды.

Ключевые слова: когнитивное радио, сценарии связи абонентов, имитационное моделирование.

Введение. Телекоммуникационные системы в процессе функционирования, как правило, не используют весь выделенный для них спектральный диапазон одновременно, при этом свободные частоты не могут быть использованы вторичными пользователями, поскольку вносимые ими помехи способны нарушить работу первичных пользователей. С увеличением числа систем связи и их абонентов, невозможность использования на вторичной основе лицензированных частот усугубляет дефицит частотного ресурса по причине его нерационального использования. Возможным решением проблемы является технология динамического доступа к спектру, в качестве практической реализации которой выступают системы когнитивного радио (*cognitive radio, CR*). Задача CR заключается в определении доступных временно свободных частот целевой системы связи, их использование и своевременное освобождение канала в случае появления первичных пользователей. При разработке таких систем первым этапом является моделирование системы связи, а значительную сложность представляет имитация поведения пользователей системы связи, которыми являются устройства под управлением человека, по причине большого числа факторов, влияющих на особенности поведения. Анализ источников свидетельствует об отсутствии общепринятой модели для описания поведения пользователей систем связи, поэтому существует ряд подходов, которые зависят от поставленных задач [1–3].

В работе [4] представлена имитационная модель системы сотовой связи для формирования карты радиосреды (*radio environment map, REM*) CR [5], объектами которой являются базовые станции (*base station, BS*) и абонентские устройства (*user equipment, UE*). Модель рассчитывает актуальное состояние REM в каждой ячейке координатной сетки с учетом потерь при распространении радиосигналов от излучающих устройств и сохраняет информацию для дальнейшей обработки на внешние файлы целевого устройства. Выходные данные модели могут быть использованы для прогнозирования конфигурации радиосреды вторичными пользователями, в качестве которых выступают системы когнитивного радио.

Следует отметить, что в реальности использование каналов связи абонентами не абсолютно случайно, так как их перемещения, входящие и исходящие сеансы передачи содержат в себе явные или скрытые периодичности и подчиняются сложным законам, которые, тем не менее, можно попытаться аппроксимировать более простыми функциями при моделировании. Например, анализ реальных наборов данных, полученных для различных систем связи [6; 7], подтверждает устойчивый общий характер изменения трафика в рамках суток: спад активности ночью, пики активности в обеденное время и вечером.

В работе [8] при моделировании поведения абонентов учитывались время суток, день недели, определенные даты, периоды месяца и года. Для формирования последовательностей, отражающих динамику трафика и активность пользователей, использовались процессы с распределением Пуассона [9], Парето [10], экспоненциальным распределением [11], а также цепи Маркова [12]. Таким образом, задача имитации абонентов системы связи сводится к генерации управляющих последовательностей, которые отражали бы закономерности в поведении, характерные для реальных пользователей.

Цель работы заключается в создании методики формирования сценариев поведения абонентов имитационной модели построения карты радиосреды для когнитивной системы сотовой связи и ее апробации на базе LTE.

Методика генерации сценариев поведения абонентов. Предлагается подход к имитации поведения абонентов системы сотовой связи, который рассматривает характер их поведения на масштабах времени в пределах суток как псевдослучайный и зависящий от значительного числа факторов, однако характеризующийся наличием достаточно устойчивых паттернов на больших временных интервалах. Решение основывается на предположении, что поведение реального пользователя является индивидуальным, т. е. практически невозможно с высокой вероятностью достоверности установить, когда абонент может кому-то позвонить и каково его местоположение. При этом с увеличением объема информации для каждого абонента возможно удовлетворительное выявление некоторых закономерностей, которые определяются его рабочим графиком, характерными точками местонахождения на карте, поведением в выходные и праздничные дни.

Алгоритм генерации сценариев сеансов связи включает следующие шаги: инициализация общего календаря – последовательности дней различных типов; формирование шаблонов для каждого абонента и возможного типа дня, которые определяют время и длительность событий; вычисление окончательного расписания на заданный интервал времени для всех объектов *UE* на основе календаря и шаблонов.

В описанной методике применяются цепи Маркова, поскольку этот инструмент позволяет настраивать вероятности переходов, что необходимо для системы с неравнозначными состояниями. Например, вероятность того, что во время телефонного разговора через минуту сеанс связи будет завершен, значительно выше, чем вероятность того, что в любой момент режима ожидания спустя аналогичный промежуток времени звонок будет начат (рисунок 1).

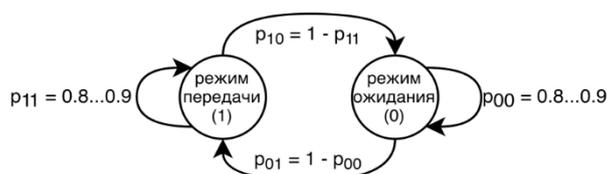


Рисунок 1. – Схема цепи Маркова для генерации расписания сеансов связи

При инициализации модели формируется календарь на заданный период (*N* дней), который каждому суточному отсчету назначает комбинацию свойств согласно определенному правилу: номер, тип дня и его номер в неделе, а также номер соответствующей недели в рамках месяца (таблица 1). Количество свойств может быть увеличено при необходимости формирования более сложных зависимостей.

Таблица 1. – Свойства суточных отсчетов

Свойство	Значения	Правила назначения
Номер	1, 2, ... <i>N</i>	Последовательно с единичным шагом
Тип дня	рабочий	Первые 5 отсчетов каждого фрагмента по 7 дней
	выходной	Последние 2 отсчета каждого фрагмента по 7 дней
	праздник	Вероятность 5% замены рабочего или выходного дня
День недели	понедельник, вторник, ..., воскресенье	Номер отсчета в каждом фрагменте по 7 дней
Номер недели месяца	1 – 4	Номер 7-дневного фрагмента в рамках периода 28 дней (1 месяц)

Для каждой комбинации свойств, за исключением порядкового номера, и объекта *UE* при помощи цепи Маркова с двумя состояниями («0» – режим ожидания, «1» – режим передачи) создается набор шаблонов. Вероятности переходов между состояниями каждый раз варьируются с помощью генератора псевдослучайных чисел в небольшом диапазоне.

При построении конечного расписания на *N* дней во встраиваемые в конечный массив копии выбранных шаблонов добавляются случайные искажения, которые носят характер импульсного шума, изменяя состояние отдельного отсчета на противоположное. Таким способом обеспечивается уникальность поведения абонента относительно случаев, когда рассматриваемый период моделирования достаточно большой (в данном случае – больше одного месяца) и шаблоны начинают повторяться.

Методика учитывает специфику системы сотовой связи *LTE*, которая определяется спецификацией *LTE TS 36.101*. В нисходящем канале связи применяется технология *Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*, в восходящем – *Single-Carrier FDMA*. Режим передачи – с частотным или временным разделением. Каналы разбиваются на несущие шириной от 1,4 до 20 МГц, что соответствует от 6 до 100 ресурсным

блокам (*resource block, RB*) – единицам частотного ресурса. Каждый *RB* состоит из 12 поднесущих и 6–7 символов, его длительность равна 0,5 мс. Во временной области пара *RB* (2 слота) образует подкадр, а 10 подкадров формируют кадр *LTE* ($t_{\text{кадр}} = 10$ мс). Основываясь на характерных значениях времени обнаружения сигналов и установления передачи, а также объема передаваемых данных для существующих систем связи, в качестве единицы времени *REM* выбран 1 кадр *LTE*, единица в частотной области *REM* – диапазон одного *RB* (180 кГц). Для каждой частотно-временной единицы модель вычисляет состояние, соответствующее ситуации «занято» или «свободно» на основе пороговой обработки суммарной мощности сигнала. Таким образом, выходные данные за каждый отсчет содержат матрицу состояний диапазонов всех ячеек с шагом 180 кГц в течение 10 мс.

Реализация. Имитационная модель на основе предложенной методики реализована в программной среде *MatLab* и включает инициализацию пространственной сетки координат, контейнера *REM* и заданных объектов (*BS* и *UE*) на ней, а также рабочий цикл, в котором реализуется их поведение, на основе чего генерируется результирующая *REM* и выходные данные (рисунок 2).

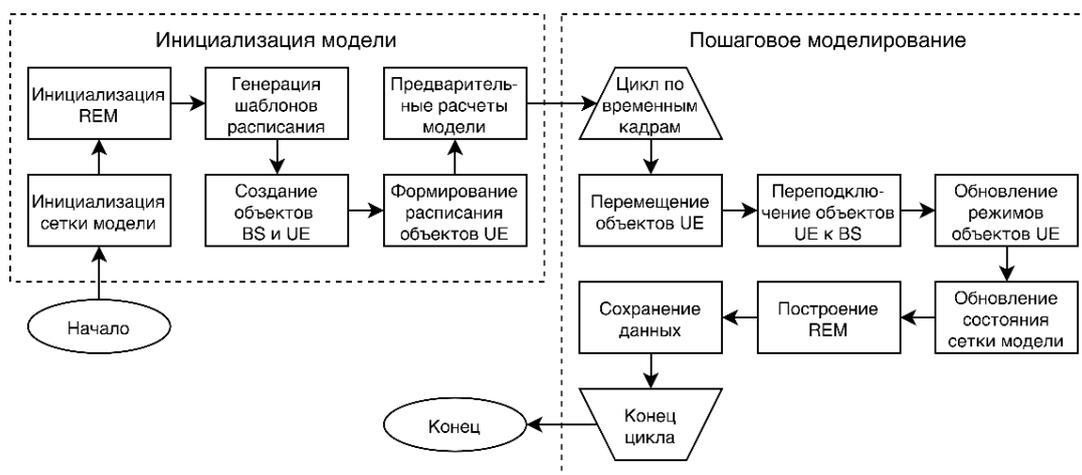


Рисунок 2. – Алгоритм формирования *REM*

Правила функционирования и взаимодействия объектов *BS* и *UE* сети *LTE* определяются спецификациями системы. Абонентские устройства всегда находятся в одном из двух состояний: режим ожидания или передача данных. Периодически они осуществляют поиск канала связи с наилучшим приемом, а после его обнаружения подключаются к соответствующей рабочей станции, которая поддерживает связь с устройствами даже тогда, когда передача пользовательских данных не происходит. При запросе от *UE* *BS* выделяет частотный ресурс для сеанса связи, а по его завершении – освобождает для других абонентов.

Представленная модель имитирует целевую систему связи с рядом упрощений: не учитывается высота антенны над поверхностью, фазы сигналов, доплеровский эффект, быстрые замирания и затенение; мощность излучения устройств фиксирована, а направленность излучения антенн равномерна; передается только пользовательская информация.

Одним из важных этапов является моделирование выделения и перераспределения частотного ресурса *BS* в виде зарезервированных *RB* всем подключенным *UE*. Каждая станция имеет по $N_{DL} = 250$ *RB* для организации нисходящей линии связи в течение $t_{\text{кадр}}$, по 25 *RB* в одном подкадре, равном 1 мс.

Каждому подключенному устройству выделяется равное количество *RB*, которое зависит от общего числа подключенных к станции абонентов следующим образом:

$$UE_DL_RB(i) = RB_{DL}(j), i = \overline{(N_{DL_UE} \times (i-1) + 1), (N_{DL_UE} \times i)}, i = \overline{1, CNT_{UE}}, \quad (1)$$

где i – порядковый номер *UE*;

CNT_{UE} – общее количество *UE*;

N_{DL_UE} – количество выделяемых *RB* для каждого *UE*, определяется как

$$N_{DL_UE} = \left[\frac{N_{DL} - 1}{CNT_{UE}} \right], \quad (2)$$

где $[*]$ – целая часть числа;

RB_{DL} – частотный ресурс станции для нисходящей линии связи, представляет собой вектор из порядковых номеров RB одного кадра, расположенных по возрастанию:

$$RB_{DL}(j) = j, j = \overline{1, N_{DL_UE} \times CNT_{UE}}. \quad (3)$$

В таблице 2 представлен пример распределенного частотного ресурса для нисходящей линии связи между 4 подключенными устройствами.

Таблица 2. – Распределенные RB среди подключенных к станции UE

Номер UE	Статус передачи данных	Номера выделенных RB для каждого UE (выделено по 62 RB)														
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	...	61	62	63	
4	False	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	...	61	62	63	
7	True	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	...	123	124	125	
10	False	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	...	185	186	187	
11	False	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	...	247	248	249	

После выделения частного ресурса выполняется генерация ресурсной сетки BS , которая зависит от текущих статусов передачи данных подключенных UE . Если устройство не осуществляет передачу, то станция займет только первый выделенный RB этого устройства, а остальные зарезервированные для него блоки будут считаться в данном кадре незанятыми.

Через некоторый интервал времени каждый абонент изменяет свое местоположение на указанные в соответствующей записи пространственные координаты согласно своему расписанию. Вместе с этим происходит его повторное подключение или отключение от рабочей BS при возникновении ситуации, когда уровень принимаемого сигнала другой BS стал выше.

Отключение абонента происходит, когда уровень принимаемого сигнала становится меньше порогового уровня помех, при этом выделенный ему частотный ресурс повторно распределяется согласно (1). В таблице 3 представлен пример перераспределения частотного ресурса (таблица 2) для нисходящей линии связи между 3 устройствами при отключении UE под номером 10.

Таблица 3. – Распределенные RB среди подключенных к станции UE

Номер UE	Статус передачи данных	Номера выделенных RB для каждого UE (выделено по 83 RB)														
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	...	82	83	84	
4	False	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	...	82	83	84	
7	True	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	...	164	165	166	
11	False	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	...	248	249	250	

Сформированные шаблоны (рисунок 3) обладают заданной длительностью, которая зависит от шага моделирования $t_{шаг}$, на их основе определяются: время инициализации сеанса связи и его длительность в течение суток. Генерация шаблонов (листинг 1) включает в себя перебор всех возможных комбинаций свойств и присвоение каждой из них уникальной бинарной последовательности, сформированной цепью Маркова.

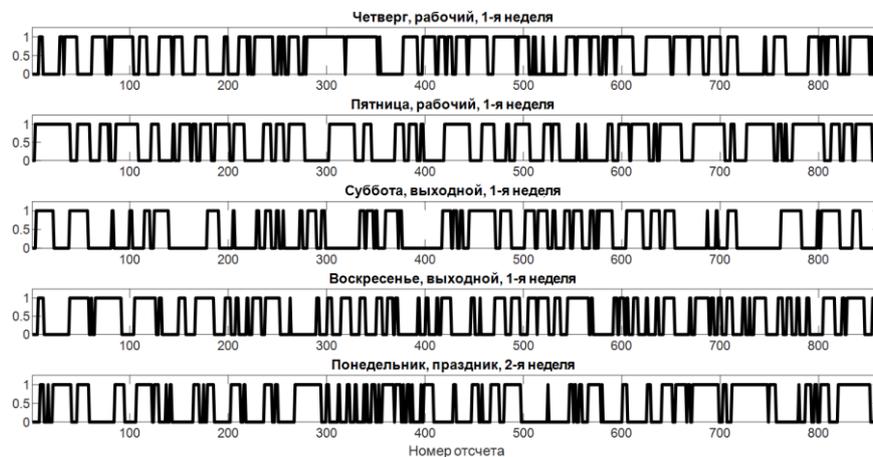


Рисунок 3. – Фрагмент сформированного набора шаблонов

Листинг 1. – Генерация шаблонов

```

emissions = [0.5 0.5; 0.5 0.5]; % матрица выбросов
result_data = {}; % инициализация таблицы расписания
for l = 1:number_UE % цикл по каждому абоненту
    n = 1; % инициализация счетчика нумерации записей
    data = table; % инициализация новой записи
    for i = 1:days_in_week % цикл по количеству дней недели
        for j = 1:days_in_type % цикл по количеству типов дней
            for k = 1:week_in_month % цикл по количеству недель в месяце
                data.Combination(n, :) = % запись комбинации нормированных признаков
                [i / days_in_week j / days_in_type k / week_in_month];
                state_1 = 0.85 + (0.1 * rand()); % вероятность перехода в другое состояние
                state_2 = 1 - state_1; % вероятность перехода в то же состояние
                transitions = [state_1 state_2 % матрица переходов
                    state_2 state_1];
                [~, state] = % генерация последовательности
                hmmgenerate(samples_in_day, transitions, emissions);
                data.Base(n, :) = state - 1; % запись нормированной последовательности
                n = n + 1; % увеличение счетчика
            end
        end
    end
    result_data{l} = data; % добавление записи в таблицу
end

```

На основе календаря объектам *UE* задается расписание сеансов с влиянием двухуровневого импульсного шума заданной плотности (листинг 2). Дополнительно обнуляются начальные и конечные фрагменты шаблонов, что соответствует условному состоянию сна пользователя *UE*, т. е. периоду, когда он не активен.

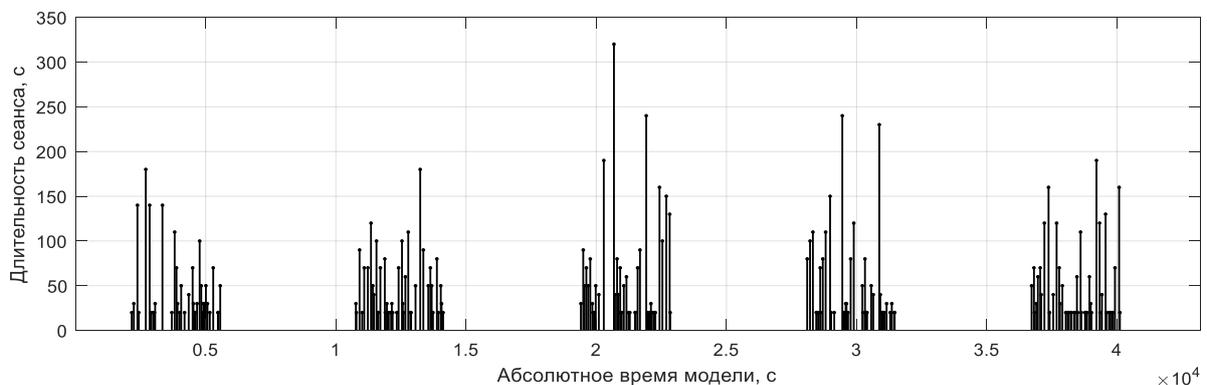
Листинг 2. – Генерация поведения абонентов на весь период

```

for m = 1:number_UE % цикл по каждому абоненту
    prepared = []; % инициализация массива поведения
    for i = 1:years * days_in_year % цикл по количеству лет
        for j = 1:height(ref{m}) % цикл по готовым шаблонам
            if (week(:, i) == ref{m}.Combination(j, :)) % для подходящей комбинации
                temp = imnoise( % добавление в шаблон импульсного шума
                    ref{m}.Base(j, :), 'salt & pepper', noise_p);
                temp(1:UE{m}.home_time) = 0; % обнуление данных в утреннее время
                temp(UE{m}.work_time:samples_in_day) = 0; % обнуление данных в вечернее время
                prepared = [prepared temp]; % добавление фрагмента поведения
            end
        end
    end
end

```

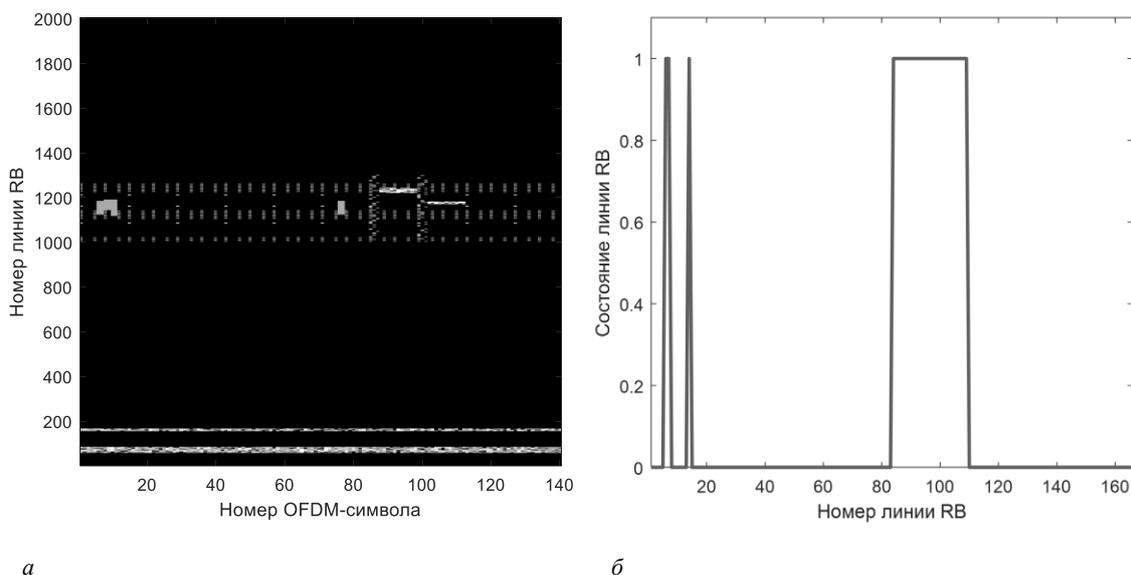
На рисунке 4 показан фрагмент сформированной для пяти дней последовательности, на основе которой объект *UE* принимает решение о начале и окончании сеанса связи.

Рисунок 4. – Фрагмент расписания сеансов связи объекта *UE*

Расписание перемещений задается путем определения времени начала и окончания рабочего дня, а также двух координат, которые символизируют рабочее место абонента и его место жительства. В рабочие дни объект *UE* находится в «рабочей» ячейке, а все остальное время – в «домашней» [3].

На рисунке 5, *а* демонстрируется ресурсная сетка в одной из ячеек карты после запуска моделирования, элементы с большей яркостью соответствуют сигналам большей мощности, принятым в точке наблюдения. В нижней части сетки располагается восходящий канал связи, в верхней части – нисходящий. Показано, что в текущей пространственно-временной точке действуют узкополосные сигналы двух объектов *UE* и широкополосный сигнал одного объекта *BS*.

На рисунке 5, *б* показан результат обработки ресурсной сетки *REM*. Значением «1» отмечены линии *RB*, которые заняты сигналами, формируемыми объектами; значение «0» соответствует свободным линиям, они могут быть использованы на вторичной основе. Каждая линия *RB* соответствует частотному диапазону из 12 поднесущих в течение $t_{\text{кадр}}$. Анализ рисунка 5, *б* демонстрирует соответствие статусов линий *RB* и занятости поднесущих на рисунке 5, *а*.



а – ресурсная сетка в ячейке *REM*; *б* – вычисленное состояние линий *RB*

Рисунок 5. – Преобразование выходных данных имитационной модели

Последовательность, представленная на рисунке 5, *б*, объединяется с данными других ячеек в текущем кадре и сохраняется в файл для последующего использования.

Обработка выходных данных имитационной модели позволяет проследить динамику занятости отдельных линий *RB* за моделируемый период. На рисунке 6 показано состояние линии *RB* в одной из ячеек и частотной области, соответствующей диапазону восходящего канала связи за период моделирования, равный неделе, в модели, которая содержит один объект *BS* и 5 объектов *UE*.

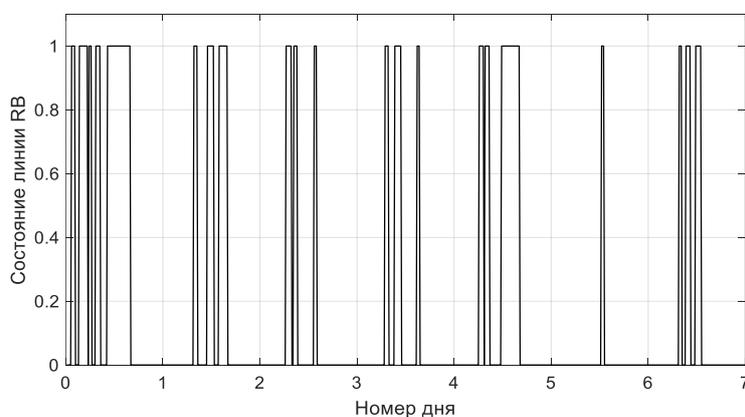


Рисунок 6. – Динамика занятости линии *RB*

Анализ рисунка 6 подтверждает корректность реализации методики формирования сценариев, поскольку демонстрирует всплески активности абонентов в течение каждого дня, что соответствует правильному назначению временных меток расписания. При этом сопоставление последовательности с исходными расписаниями абонентов не позволяет идентифицировать их, что является следствием корректного учета совместного влияния сигналов объектов *UE* алгоритмом построения *REM*.

Заключение. Представлена методика формирования расписаний перемещения и сеансов передачи данных абонентских устройств имитационной модели построения карты радиосреды для когнитивной системы сотовой связи, которая использует массив шаблонов последовательностей цепи Маркова для комбинаций входных временных параметров. При этом алгоритм генерации сценариев сеансов связи состоит из инициализации общего календаря, формирования шаблонов для каждого абонента и возможного типа дня, вычисления расписания на заданный интервал времени для всех объектов модели на основе календаря и шаблонов. В описанной методике применяются цепи Маркова. Представлены промежуточные и конечные результаты работы программной реализации модели в среде *MatLab* на примере системы сотовой связи *LTE*. Данная модель может быть использована на этапе разработки когнитивных систем радиосвязи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Efficient Prediction of Network Traffic for Real-Time Applications / M. Iqbal [et al.] // *J. of Computer Networks and Communications*. – 2019. – P. 1–11. – DOI: [10.1155/2019/4067135](https://doi.org/10.1155/2019/4067135).
2. Prediction-Based Spectrum Management in Cognitive Radio Networks / Y. Zhao [et al.] // *IEEE Systems J.* – 2018. – Vol. 12, iss. 4. – P. 1–12. – DOI: [10.1109/JSYST.2017.2741448](https://doi.org/10.1109/JSYST.2017.2741448).
3. Богуш, Р. П. Состав и представление данных для модели когнитивной системы связи на базе LTE / Р. П. Богуш, Е. Р. Адамовский, В. М. Чертков // *Вестн. Полоцк. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки*. – 2021. – № 12. – С. 13–20.
4. Адамовский, Е. Р. Модель формирования карты радиосреды для когнитивной системы связи на базе сотовой сети LTE / Е. Р. Адамовский, В. М. Чертков, Р. П. Богуш // *Компьютерные исследования и моделирование*. – 2022. – Т. 14, № 1. – С. 127–146. – DOI: [10.20537/2076-7633-2022-14-1-127-146](https://doi.org/10.20537/2076-7633-2022-14-1-127-146).
5. Fette, B. *Cognitive radio technology* / B. Fette. – Amsterdam : Elsevier Inc, 2006. – 649 p. – DOI: [10.1016/B978-0-7506-7952-7.X5000-4](https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-7952-7.X5000-4).
6. Jihong, Z. NTAM-LSTM models of network traffic prediction / Z. Jihong, H. Xiaoyuan // *2021 Intern. Conf. on Physics, Computing and Mathematical (ICPCM2021)* – 2022. – Vol. 355. – P. 1–10. – DOI: [10.1051/mateconf/202235502007](https://doi.org/10.1051/mateconf/202235502007).
7. Trinh, H. Mobile Traffic Prediction from Raw Data Using LSTM Networks / H. Trinh, L. Giupponi, P. Dini // *IEEE PIMRC 2018, 9–12 September 2018*. – Bologna, 2018. – DOI: [10.1109/PIMRC.2018.8581000](https://doi.org/10.1109/PIMRC.2018.8581000).
8. Spectrum hole prediction and white space ranking using artificial neural network for cognitive radio application / I. Sunday [et al.] // *International J. of Scientific & Technology Research*. – 2015. – № 4(8). – P. 319–325.
9. Tumuluru, V. A neural network based spectrum prediction scheme for cognitive radio / V. Tumuluru, P. Wang, D. Niyato // *IEEE International Conference on Communications*. Cape Town, 23–27 May 2010. – DOI: [10.1109/ICC.2010.5502348](https://doi.org/10.1109/ICC.2010.5502348).
10. Learning based primary user activity prediction in cognitive radio networks for efficient dynamic spectrum access / A. Agarwal [et al.] // *Intern. Conf. on Signal Processing and Communications (SPCOM)*. 12–15 June 2016 / Indian Institute of Science. – Bangalore, 2016. – DOI: [10.1109/SPCOM.2016.7746632](https://doi.org/10.1109/SPCOM.2016.7746632).
11. A Energy Prediction Based Spectrum Sensing Approach for Cognitive Radio Networks / Z. Lin [et al.] // *5th Intern Conf. on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, 24–26 Sept. 2009. – Beijing. – 2009. – DOI: [10.1109/WICOM.2009.5302514](https://doi.org/10.1109/WICOM.2009.5302514).
12. Binary Inference for Primary User Separation in Cognitive Radio Networks / H. Nguyen [et al.] // *IEEE Transactions on Wireless Communications*. – 2013. – Vol. 12, iss. 4. – 1532–1542. – DOI: [10.1109/TWC.2013.022213.112260](https://doi.org/10.1109/TWC.2013.022213.112260).

REFERENCES

1. Iqbal, M., Zahid, M., Habib, D., & John, L. K. (2019). Efficient Prediction of Network Traffic for Real-Time Applications. *Journal of Computer Networks and Communications*, 1–11. DOI: [10.1155/2019/4067135](https://doi.org/10.1155/2019/4067135).
2. Zhao, Y., Hong, Z., Luo, Y., Wang, G., & Pu, L. (2018) Prediction-Based Spectrum Management in Cognitive Radio Networks. *IEEE Systems Journal*, 12(4), 3303–3314. DOI: [10.1109/JSYST.2017.2741448](https://doi.org/10.1109/JSYST.2017.2741448).
3. Adamovskiy, Y., Chertkov, V., & Bohush, R. (2021). Sostav i predstavlenie dannykh dlya modeli kognitivnoi sistemy svyazi na baze LTE. [Data composition and representation for cognitive communication system model based on LTE]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya C, Fundamental'nye nauki [Herald of Polotsk State University. Series C. Fundamental sciences]*, (12), 13–20. (In Russ., abstr. in Engl.).
4. Adamovskiy, Y., Chertkov, V., & Bohush, R. (2022). Model' formirovaniya karty radiosredy dlya kognitivnoy sistemy svyazi na baze sotovoy seti LTE [Model for building of the radio environment map for cognitive communication system based on LTE]. *Komp'yuternyye issledovaniya i modelirovaniye [Computer Research and Modeling]*, 1(14), 127–146. DOI: [10.20537/2076-7633-2022-14-1-127-146](https://doi.org/10.20537/2076-7633-2022-14-1-127-146). (In Russ., abstr. in Engl.).
5. Fette, B. (2006). *Cognitive radio technology*. Amsterdam: Elsevier Inc. DOI: [10.1016/B978-0-7506-7952-7.X5000-4](https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-7952-7.X5000-4).
6. Jihong, Z., & Xiaoyuan, H. (2022). NTAM-LSTM models of network traffic prediction. In *International Conference on Physics, Computing and Mathematical (ICPCM2021)*: Vol. 355 (1–10). DOI: [10.1051/mateconf/202235502007](https://doi.org/10.1051/mateconf/202235502007).
7. Trinh, H. D., Giupponi, L. & Dini, P. (2018). Mobile Traffic Prediction from Raw Data Using LSTM Networks. In *2018 IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)* (1827–1832). DOI: [10.1109/PIMRC.2018.8581000](https://doi.org/10.1109/PIMRC.2018.8581000).

8. Sunday, I., Goodyer, E., Gow, J., Gongora, M., & Shell, J. (2015). Spectrum hole prediction and white space ranking using artificial neural network for cognitive radio application. *International Journal of Scientific & Technology Research*. 4(8). 319–325.
9. Tumuluru, V., Wang, P., Niyato, D. (2010). A neural network based spectrum prediction scheme for cognitive radio. In *IEEE International Conference on Communications*. DOI: [10.1109/ICC.2010.5502348](https://doi.org/10.1109/ICC.2010.5502348).
10. Agarwal, A., Dubey, S., Asif, K., Gangopadhyay, R., & Debnath, S. (2016). Learning based primary user activity prediction in cognitive radio networks for efficient dynamic spectrum access. In *International Conference on Signal Processing and Communications (SPCOM)*. DOI: [10.1109/SPCOM.2016.7746632](https://doi.org/10.1109/SPCOM.2016.7746632).
11. Lin, Z., Jiang, X., Huang, L., & Yao, Y. (2009). A Energy Prediction Based Spectrum Sensing Approach for Cognitive Radio Networks. In *5th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*. DOI: [10.1109/WICOM.2009.5302514](https://doi.org/10.1109/WICOM.2009.5302514).
12. Nguyen, H., Zheng, G., Zheng, R., & Han, Z. (2013). Binary Inference for Primary User Separation in Cognitive Radio Networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 12(4), 1532–1542. DOI: [10.1109/TWC.2013.022213.112260](https://doi.org/10.1109/TWC.2013.022213.112260).

Поступила 07.09.2022

USER ACTIVITY MODELING BASED ON MARKOV CHAIN FOR RADIO ENVIRONMENT MAP IN COGNITIVE RADIO NETWORKS

Y. ADAMOVSKIY, R. BOHUSH, V. CHERTKOV,
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*);

N. NAUMOVICH, I. STEGKO
(*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk*)

A technique for generating schedules of movement and data transmission sessions for subscriber devices of a simulation model for constructing a radio environment map for a cognitive cellular communication system is presented. The technique defines the subscriber's behaviour as pseudo-random on small time scales, but periodically repeating over large intervals. The impact on the behaviour of several time parameters is taken into account: day types, such as working, weekend, holiday; weekday number; the week number of the month. Scenarios are generated using binary sequences obtained using a Markov chain and an impulse noise generator to change the subscribers state. The software model implementation is made in MatLab package, the results of studies are presented that confirm the correctness of the model and the possibility of using the proposed approach to form a radio environment map.

Keywords: *cognitive radio, user communication scenarios, simulation modeling.*