

В.М. ЧЕРТКОВ, Р.П. БОГУШ, Е.Р. АДАМОВСКИЙ, В.С. РОГУЛЕВ
ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ КОГНИТИВНОГО РАДИО

Чертков В.М., Богуш Р.П., Адамовский Е.Р., Рогулев В.С. **Имитационная модель когнитивного радио.**

Аннотация. Растущий дефицит радиочастотного спектра, вызванный взрывным ростом числа беспроводных устройств и объемов передаваемых данных, делает технологии когнитивного радио (CR) критически важными для будущего телекоммуникаций. Данное исследование направлено на решение задачи динамического управления спектром путем разработки имитационной модели когнитивной радиосистемы связи, построенной на архитектуре сети LTE. В отличие от существующих решений, предлагаемая модель обладает модульной структурой, что позволяет гибко интегрировать и оценивать различные алгоритмы прогнозирования занятости частотных ресурсов. Модель реализована в среде MatLab и включает три ключевых модуля: модуль формирования и обработки сигналов LTE, генерирующий карты радиосреды (REM); модуль обучения прогнозирующей нейросетевой модели; и модуль прогнозирования занятости частотных ресурсов. Основное внимание уделено использованию передовой архитектуры нейронной сети Колмогорова-Арнольда (KAN) для прогнозирования незанятых блоков планирования (SB) в кадре LTE. В результате имитационного моделирования, охватившего 10 000 кадров, была продемонстрирована высокая эффективность предложенного подхода. Модель KAN обеспечила точность прогнозирования свободных частотных ресурсов на уровне 92,23% для кадра длительностью 10 мс. Проведенное сравнительное тестирование показало, что архитектура KAN превосходит традиционную сеть LSTM по точности примерно на 10% при одинаковом количестве обучаемых параметров, а также быстрее достигает сходимости в процессе обучения. Практическая значимость работы заключается в предоставлении инструмента для точной оценки занятости спектра и планирования доступа вторичных пользователей, что ведет к значительному повышению спектральной эффективности и надежности перспективных беспроводных сетей.

Ключевые слова: когнитивное радио, имитационная модель, LTE, прогнозирование спектра, нейронная сеть Колмогорова-Арнольда (KAN), карта радиосреды (REM), динамический доступ к спектру.

1. Введение. Развитие беспроводных технологий и рост числа подключенных устройств приводят к дефициту радиочастотного спектра. В результате традиционные методы статического распределения частот становятся неэффективными, что стимулирует развитие когнитивного радио (cognitive radio, CR) – технологии, позволяющей динамически перераспределять спектральные ресурсы за счет адаптации к изменяющимся условиям среды [1].

Выделяют следующие основные задачи, решаемые с помощью CR [2]: анализ радиоэлектронной обстановки, оптимизация управления частотными ресурсами, выявление свободных ресурсов путем разработки и применения соответствующих алгоритмов. Каждая из этих задач соответствуют крупному направлению научных

исследований. Однако для существующего многообразия методов управления спектральными ресурсами, формирования знаний о радиоэлектронной обстановке и интеллектуальных алгоритмах поиска свободных ресурсов отсутствует общая имитационная модель, позволяющая использовать различные сценарии взаимодействия всех ее объектов и оценивать эффективность применяемых решений. Общая имитационная модель должна обладать следующими ключевыми аспектами [3]: осуществлять мониторинг (зондирование) радиосреды с накоплением знаний об окружающей среде, обнаруживать каналы передачи данных и оценивать их параметры, предсказывать незанятые частотные ресурсы, осуществлять спектральное интеллектуальное управление частотными ресурсами и обеспечивать их динамическое распределение.

При построении модели когнитивной радиосистемы следует учитывать, что карты радиосреды (radio environment map, REM) играют решающую роль в повышении спектральной эффективности и качества обслуживания беспроводных сетей [4]. В работе описаны современные методы построения REM: методы, основанные на моделях распространения радиосигналов; методы, основанные на данных; гибридные методы. Сделан вывод о том, что наиболее перспективными для использования являются гибридные методы, которые интегрируют модели распространения радиосигналов с искусственными нейронными сетями (ИНС), достигая высокой точности даже при ограниченном количестве получаемых данных измерений.

В [5 – 7] определены основные параметры (размер карты, диапазон частот, вид модуляции, мощность излучения), которые согласуются между собой и являются основными для генерации REM. Также представлены оценки эффективности построенных моделей. В качестве основы для имитационной модели CR выбрана гибридная модель, описанная в [7], которая позволяет формировать REM по итерациям с настраиваемым шагом времени.

Задача обнаруживать каналы передачи данных и оценивать их параметры подразумевает подстройку параметров приемников и передатчиков CR для минимизации помех, которые вторичные пользователи (Secondary Users, SU) могут создавать во время передачи своих данных. Для этого решается задача выбора диапазона вещания, выбор протокола и структура передаваемых данных. В [8, 9] используется диапазон частот беспроводной сети передачи данных 4G LTE, как один из самых эффективных для широкополосного беспроводного доступа. Распознавание кадров LTE осуществляется на

основе вида применяемой модуляции, расположения и длительности сигналов синхронизации в кадре. Следует отметить, что большая часть опубликованной литературы по этой теме предполагает системы, основанные на стратегии модуляции OFDM [3, 5, 7, 8, 10].

Отдельной задачей при разработке систем CR является контроль начала и окончания работы первичного пользователя (Primary User, PU) в рабочем диапазоне частот. Для эффективного решения применяются ИНС с целью оценки прогнозирования состояния занятости спектра [10]. Для реализации данного подхода используют архитектуру долгой краткосрочной памяти (Long Short-Term Memory, LSTM) [11], сеть Колмогорова-Арнольда (Kolmogorov-Arnold Network, KAN) [12], сверточные сети (Convolutional Neural Networks, CNN), например, в виде модели U-Net [13]. Выбор архитектуры зависит от специфики входных данных для выявления незанятых частотных ресурсов. Исследования показывают, что точность предсказания свободных частотных ресурсов с использованием нейронных сетей достигает 90%, что делает их эффективным инструментом в данной области [3].

Также не менее важным направлением в CR является разработка и оптимизация алгоритмов поиска незанятых частотных ресурсов с учетом ограниченных вычислительных возможностей и за довольно короткий промежуток времени до 10 мс.

На основе анализа существующих решений можно сделать вывод о необходимости создания имитационной модели CR на модульной архитектуре, обеспечивающей реализацию основных задач, решаемых данной технологией, исследовать поведение всех объектов и их взаимодействия в различных сценариях поведения.

Результаты исследования могут быть использованы для оптимизации алгоритмов динамического спектрального доступа, алгоритмов поиска и обнаружения незанятых частотных ресурсов, повышения спектральной эффективности и надежности беспроводных сетей следующего поколения.

2. Функциональная схема имитационной модели.

Предлагается модульная имитационная модель системы сотовой связи LTE, которая воспроизводит функционирование и взаимодействие ее ключевых объектов: базовых станций (Base Station, BS) и абонентских (пользовательских) устройств (User Equipment, UE). Модель реализована с рядом принятых допущений: радиосигналы распространяются согласно математической модели с параметрами, принятыми для городской застройки; пользовательские данные, передаваемые по каналам связи, формируются генератором псевдослучайных чисел; объем пользовательских данных занимает

весь доступный частотный ресурс; мощности излучения всех устройств постоянны; излучение осуществляется во всех направлениях; базовые станции работают с одной антенной без учета высоты ее подвеса; метод организации дуплексной связи, при котором передача и прием данных производятся на разных частотах (Frequency Division Duplex, FDD); радиосигналы представлены в виде ресурсных сеток (матрица OFDM-символов, являющаяся результатом Фурье-преобразования структуры, сформированной в частотной области).

Имитационная модель реализована в программной среде MatLab и содержит три модуля:

- модуль формирования и обработки сигналов системы сотовой связи LTE, включающий построение REM;
- модуль обучения прогнозирующей нейросетевой модели;
- модуль прогнозирования занятости частотных ресурсов для последующего встраивания данных SU в ресурсную сетку сигнала LTE с использованием информации о незанятых ресурсах системы связи.

Функциональная схема имитационной модели системы сотовой связи LTE с добавлением CR представлена на рисунке 1.

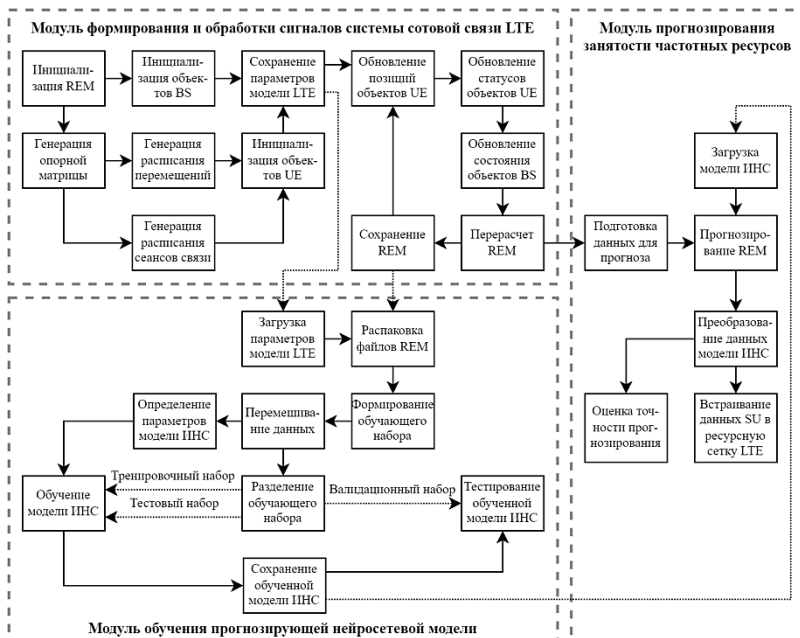


Рис. 1. Функциональная схема имитационной модели когнитивного радио

Первый модуль имитирует работу системы LTE и последовательно формирует выходные данные, содержащие информацию о динамике занятости частотного ресурса в виде карты REM, которая в дальнейшем используется другими модулями.

Задачей модуля обучения прогнозирующей нейросетевой модели является обучение и тестирование ИНС на основе данных карты REM.

Задача последнего модуля состоит в прогнозировании свободных частотных ресурсов с осуществлением оценки точности прогнозирования. При наличии информации о количестве и положении незанятых ресурсов в будущем с помощью технологии когнитивного радио может быть увеличен объем передаваемой информации вторичных пользователей и снижен риск создания помех для РУ.

Отличительной особенностью разработанной имитационной модели CR является использование различных нейросетей и алгоритмов предсказаний незанятых ресурсов с оценкой их точности. Реализация обеспечивается путем использования скриптов на языке программирования Python 3.10, которые непосредственно взаимодействуют с обученными моделями ИНС и возвращают результаты работы через системный интерфейс.

3. Модуль формирования и обработки сигналов системы сотовой связи LTE. Модуль с заданным временным шагом моделирования осуществляет генерацию данных, которые отражают состояние REM в дискретные моменты моделируемого времени на основе обмена данными объектов BS и UE.

Данный модуль состоит из блоков, которые обеспечивают: инициализацию размера и шага REM; инициализацию объектов BS и UE; генерацию расписания сеансов связи UE; генерацию перемещений UE; сохранение параметров модели **сотовой связи** LTE; выполнение основного цикла имитационной модели, в котором производится обновление параметров всех объектов взаимодействия; формирование радиосигналов от всех объектов согласно спецификации LTE [14]; выполнение расчета REM с сохранением результата в отдельный файл.

Рассмотрим основные блоки, входящие в структуру модуля.

1. *Инициализация REM.* Инициализация осуществляется путем считывания константных значений следующих параметров имитационной модели:

- *определение размера и шага карты.* Данные параметры являются настраиваемыми. Значением по умолчанию является размер REM 20×20 ячеек с шагом 250 м. При таких параметрах площадь REM составит $22,5 \text{ км}^2$, что сопоставимо с центральной частью города среднего

размера. Согласно данным карт покрытия 4G LTE [15], расстояние между соседними BS в районах с плотной многоэтажной застройкой составляет 500-800 м, при этом радиус действия базовой станции с несущей частотой 1800 МГц равен 6,8 км на открытой местности [7]. Таким образом, выбранный шаг сетки обеспечивает достаточную точность моделирования перемещения UE.

– *определение временных параметров модели.* Используется частотный диапазон 1800 МГц, который является самым распространенным в сети LTE. Рассматривается только режим радиочастотного доступа FDD. Ширина восходящего канала связи (uplink) и нисходящего канала связи (downlink) настраивается. В модели она составляет 75 МГц, что соответствует 25 ресурсным блокам (Resource Blocks, RB) по 5 МГц. Длина полного кадра LTE в таком случае равна 10 мс. В имитационной модели CR имеется возможность получить любой кадр в рамках заданного временного интервала имитационного моделирования.

2. *Инициализация абонентов и базовых станций.* Этап инициализации объектов UE и BS осуществляется определением их основных параметров и мест расположения на REM. Для инициализации объектов BS используется определенная структура с параметрами: символьное обозначение наименования станции (eNodeBS.name), координаты размещения (eNodeBS.position); идентификационный номер (eNodeBS.NCellID); номер частотного диапазона станции (eNodeBS.freq_band), список устройств, подключенных к данной станции (eNodeBS.UE_RNTI); выделенные и распределенные между UE номера блоков планирования (Scheduling Block, SB) для каждого из канала связи: нисходящего (eNodeBS.UE_DL_RB) и восходящего (eNodeBS.UE_UL_RB).

Наименьшей единицей частотного ресурса для осуществления передачи данных по нисходящей линии является SB, который состоит из двух соседних RB на одинаковых поднесущих. Объем частотного ресурса для осуществления передачи данных по нисходящей линии связи каждой BS представлен на рисунке 2 в виде ресурсной сетки с необходимыми служебными данными [9]: распределение ресурсов (PDCCH), данные для нескольких первичных пользователей (PMCH), формат передаваемых данных (PCFICH), данные обратной связи от первичных пользователей (PHICH), пользовательские (PDSCH), опорных сигналов (RS), первичная синхропоследовательность (PSS), вторичная синхропоследовательность (SSS).

На рисунке 2 зеленым контуром выделен первый и последний подкадры. Синим контуром обозначены соседние RB, которые

в течение одного подкадра объединяются в один блок SB. Нумерация блоков осуществляется снизу вверх и направо, начиная с левого нижнего угла. К примеру, на рисунке 2 указано, что RBN№1 и RBN№26 образуют SB№1. Следует отметить, что у каждой BS количество SB для нисходящей связи в течение одного кадра (10 мс) составляет $N_{DL} = 250$, что соответствует 25 SB в одном подкадре (1 мс).

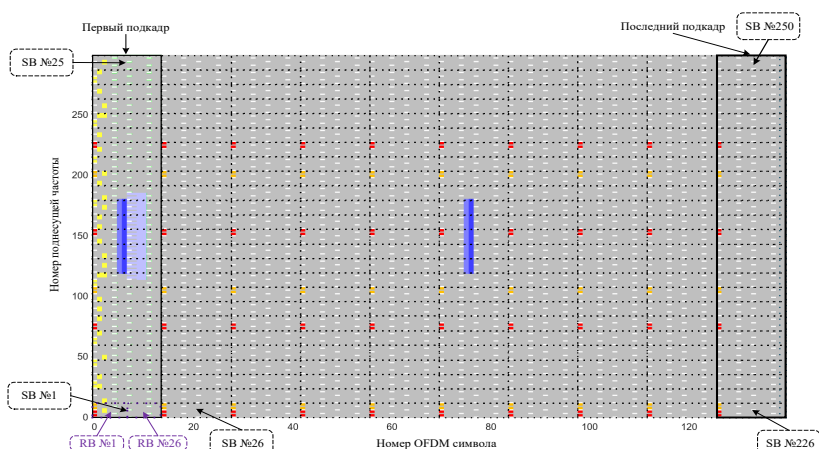


Рис. 2. Объем частотного ресурса базовой станции для осуществления передачи данных по нисходящей линии

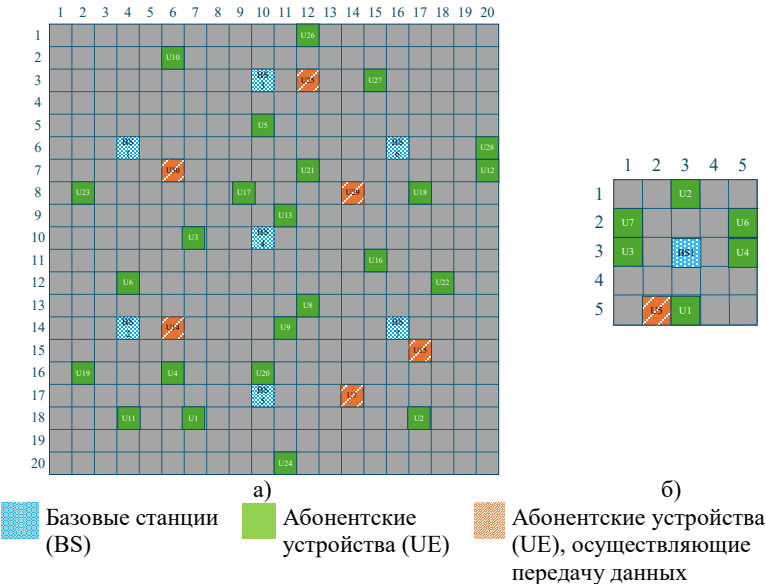
В имитационной модели LTE для базовых станций используется жесткое повторное использование полос частот для нисходящих и восходящих каналов связи. При таком подходе происходит разбиение рабочего диапазона частот на три полосы, которые используются различными BS, причем BS с одинаковыми частотными полосами не граничат друг с другом [16]. Расстояние между BS в имитационной модели LTE выбрано равным 1 км, что согласуется расположением BS при средней и низкой плотности застройки.

Количество UE, подключенных к одной BS, зависит от общего объема ее частотного ресурса, который на протяжении всего кадра в имитационной модели составляет 250 SB. Следовательно, к одной BS может подключиться максимум 250 UE с учетом того, что каждому будет выделен только один SB.

Количество объектов UE в имитационной модели LTE является настраиваемым параметром. Стандартный сценарий имитационного моделирования определяет 30 UE и 7 BS.

Объекты UE инициализируются с помощью набора параметров, определяющих его состояние и конфигурацию. К таким параметрам относятся: идентификатор (UE.RNTI), координаты (UE.position), максимальная мощность передатчика (UE.maxPower), статус активности (UE.status), список доступных базовых станций в радиусе действия (UE.base), идентификатор текущей обслуживающей BS (UE.NCellID), назначенный частотный диапазон (UE.freq_band) и выделенные частотные ресурсы восходящего канала (UE.RB). Ключевым параметром является тип устройства (UE.type), который классифицирует UE как PU или SU. Данная классификация определяет, будут ли ему гарантированно выделены ресурсы BS. Для устройств типа SU реализован механизм прогнозирования свободных ресурсов на момент их активации.

На рисунке 3 представлено первоначальное расположение моделируемых объектов BS и UE на REM различных размеров для двух сценариев.



а) REM 20×20, 30 UE, 7 BS; б) REM 5×5, 7 UE, 1 BS

Рис. 3. Расположение объектов абонентов и базовых станций на карте

Первый сценарий предусматривает расположение 7 BS и 30 устройств UE на карте REM с размерами 20×20 ячеек (рисунок 3(а)). Второй моделируемый сценарий содержит одну BS и 7 UE на карте REM размером 5×5 ячеек (рисунок 3(б)). Координаты объектов BS

на REM не изменяются в процессе моделирования. Объекты UE могут перемещаться и находиться в двух состояниях (пассивном и активном), отражающих их поведение в сети связи. В активном состоянии UE осуществляет передачу данных, которая моделируется путем использования всех выделенных ресурсов для этого UE.

Для представленного расположения объектов по сценарию 2 (рисунок 3(б)) в таблице 1, приведен пример конфигурации объектов UE.

Таблица 1. Инициализированные значения основных параметров объектов UE

Наименование, параметр [тип данных]	UE №1	UE №2	UE №3	UE №4	UE №5	UE №6	UE №7
<i>Наименование устройства, name [char]</i>	#1 PU	#2 PU	#3 PU	#4 PU	#5 PU	#1 SU	#2 SU
<i>Координаты расположения, position [int, int]</i>	[5, 3]	[1, 3]	[3, 1]	[3, 5]	[5, 2]	[2, 5]	[2, 1]
<i>Идентификатор BS, NCellID (int)</i>	1	1	1	1	1	0	0
<i>Номер частотного диапазона BS, freq_band (int)</i>	1	1	1	1	1	0	0
<i>Идентификационный номер UE, RNTI (int)</i>	1	2	3	4	5	6	7
<i>Ограничение на мощность передачи, maxPower (double)</i>	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0
<i>Выделенные ресурсы для восходящей линии, RB [int,]</i>	[2, 3, 4, 5]	[6, 7, 8, 9]	[10, 11, 12, 13]	[14, 15, 16, 17]	[18, 19, 20, 21]	[]	[]
<i>Статус активности, Status (bool)</i>	0	0	0	0	1	0	0
<i>Расписание перемещения по карте REM, trajectory (int, int, int)</i>	455×3	455×3	455×3	455×3	455×3	[0, 2, 5]	[0, 2, 1]
<i>Соседние BS в радиусе видимости, base (cell)</i>	0×0 cell	0×0 cell	0×0 cell	0×0 cell	0×0 cell	0×0 cell	0×0 cell
<i>Расписание передачи данных, dataTransfer (int, int)</i>	5887×2	5875×2	5650×2	5889×2	6512×2	5756×2	5751×2
<i>home_time</i>	47	29	113	232	14	230	48
<i>work_time</i>	393	375	459	578	360	576	394
<i>Тип устройства, type (PU или SU)</i>	PU	PU	PU	PU	PU	SU	SU
<i>Ресурсной сетки для связи по восходящему каналу, remSimp (int8)</i>	1872×140	1872×140	1872× 140	1872×140	1872× 140	1872× 140	1872× 140

В таблице представлены параметры для каждого UE, с учетом того, что они подключены к BS1 с выделением им частотных ресурсов. В данном примере объекты от UE №1 до UE №5 являются устройствами типа PU, а UE №6 до UE №7 устройствами типа SU.

Дополнительно включен параметр UE.remSimp, который хранит значение сформированной ресурсной сетки для связи по восходящему каналу (uplink) для каждой UE. Этот параметр представляет собой матрицу размером 1872×140 , что соответствует 1872 поднесущим частотам и 140 ODFM символам. При инициализации матрица заполняется нулями. При формировании ресурсной сетки отдельно для каждого UE значения, хранимые в каждой ячейке, определяют уровень сигнала на соответствующей поднесущей. Значения матрицы UE.remSimp пересчитываются каждый раз, когда UE меняет свой статус активности.

3. *Формирование расписания перемещений и сеансов связи UE.* Процесс формирования расписания для абонентов подразумевает создание шаблонной структуры. Данный шаблон задает состав и последовательность управляющих параметров, к которым относятся: временная метка (отсчет в пределах суток), классификация дня (рабочий, выходной или праздничный), день недели, а также неделя в рамках текущего месяца [17]. Полученные шаблоны обладают фиксированной длительностью, которая зависит от шага моделирования, на их основе определяются: время инициализации события и его длительность в течение суток. Генерация шаблонов представлена на листинге 1 и содержит перебор всех возможных комбинаций свойств и присвоения каждой из них уникальной бинарной последовательности, сформированной цепью Маркова.

При инициализации модели формируется календарь на устанавливаемое количество дней, который включает регулярную сетку рабочих и выходных дней с добавлением небольшого количества праздничных дней случайным образом. Затем для каждого объекта UE на основе структуры-шаблона формируется посуточное расписание перемещений и сеансов связи. Расписание перемещений представляет собой список, содержащий отсчет времени и целевые координаты. Используются две опорные точки на REM: рабочее место и домашнее место, а также оперирует значениями начала и конца рабочего дня. В рабочие дни и рабочее время объекты UE находятся по координатам своих рабочих точек, в остальное время они перемещаются на домашние точки. Расписание сеансов связи включает список времени начала сеанса и его длительность [7].

```

emitions = [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, emitions);
                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

```

Листинг 1. Генерация шаблонов

В расписание сеансов связи дополнительно накладывается импульсный шум «соль и перец» заданной плотности, который вносит в готовый шаблон уникальную хаотичность. Программный код данной операции представлен на листинге 2. Дополнительно обнуляются начальные и конечные фрагменты шаблонов, что соответствует ночному времени суток, когда объект UE не активен.

Представленный алгоритм осуществляет перебор сформированных шаблонов для каждого объекта UE. При совпадении комбинаций поведения, у одного UE добавляется в шаблон импульсный шум заданной плотности, который имитирует определенный уровень непредсказуемости поведения, характерный для реальных абонентов.

```

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

```

Листинг 2. Генерация с добавлением импульсного шума

4. *Обновление позиций абонентов.* На каждом шаге итерационного процесса модели производится актуализация координат абонентских устройств в соответствии с назначенными траекториями их перемещений. На листинге 3 представлено функция обновления координатных позиций UE.

```

function time_ = MoveUE(time)
    global flag_move;
    global UE;
    kol_ue = size(UE, 2);
    flag = false;
    for num_ue = 1:kol_ue
        k = find(UE{num_ue}.trajectory(:,1) == time); % поиск в расписании
        if (isempty(k) == 0)
            UE{num_ue}.position = UE{num_ue}.trajectory(k, 2:3); % перемещение UE
            flag = true; % установка флага на проверку переподключения
        end
    end
    flag_move = flag_move | (flag); % обновление глобального флага на проверку
    переподключения
end

```

Листинг 3. Функция обновления координатных позиций UE

Алгоритм из листинга 3 осуществляется поиск в расписании каждого абонента временного отсчета, заданного через аргумент

функции. Аргумент, передаваемый в функцию MoveUE(time), хранит временной отсчет моделирования системы. При положительном результате поиска осуществляется перемещение объекта UE в новые координаты. Также устанавливается логический флаг, инициирующий проверку целесообразности подключения к другой BS на основе сравнения уровней мощности сигнала от соседних базовых станций.

Листинг 4 описывает код функции проверки условий переключения объекта UE к новой базовой станции или отключение от текущей BS с перераспределением частотных ресурсов. Условием переключения является превышение уровня сигнала от другой BS над уровнем сигнала текущей станции.

```
function time_ = Reconn_simp()
    global UE; % список всех устройств UE
    global eNodeBS; % список всех станций BS
    global flag_gen_rem; % флаг для регенерации REM
    kol_ue = size(UE, 2); % определение количества UE
    устройств
    for num_ue = 1:kol_ue % перебор по всем устройствам UE
        if (strcmp(UE{num_ue}.type,'PU')) % если устройство имеет тип PU
            out = near_base(num_ue); % оценка условий подключения к каждой
        S
        else
            out = 0; % переключение не требуется
        end
        switch out % выбор действия
            case -1
                disconnect_ue(num_ue, UE{num_ue}.NCellID); % отключение UE
                flag_gen_rem = true; % установка флага для генерации REM
            case 0
                continue
            otherwise
                disconnect_ue(num_ue, UE{num_ue}.NCellID); % отключение UE
                connect_ue(num_ue, eNodeBS{out}.NCellID); % подключение UE к
                новой BS
                flag_gen_rem = true; % установка флага для генерации REM
            end
        end
    end
end
```

Листинг 4. Функция проверки условий переключения объекта UE к новой базовой станции или отключение от текущей BS с перераспределением частотных ресурсов

Операция переподключения осуществляется путем вызова функции `disconnect_ue()` и `connect_ue()`, которые отвечают за отключение от старой и подключение к новой станции с распределением всего частотного ресурса соответствующей BS. Распределению подлежат зарезервированные блоки SB для нисходящей линии (`eNodeBS.UE_DL_RB`) между всеми подключенными объектами UE. Распределение частотного ресурса осуществляется по алгоритму, описанному в работе [7].

Возможна ситуация, когда происходит только отключение при условии, что значение принимаемого от всех станций сигнала меньше порогового уровня помех. В таких случаях происходит только отключение с последующим распределением частотного ресурса между оставшимися объектами UE, подключенными к конкретной BS, как показано в Листинге 5.

```
function err = disconnect_ue(num_ue, NCellID)
global UE; % список всех устройств UE
global eNodeBS; % список всех станций BS
global KOL_RB;
NDLRB = KOL_RB; % количество ресурсных блоков (ширина
канала)
kol_eb = size(eNodeBS,2); % количество станций BS
num_eb = 0;
kol_all_ue = size(UE,2); % количество устройств UE

% Поиск базовой станции, к которой подключено устройство
for i=1:kol_eb
    if (eNodeBS{i}.NCellID == NCellID) % условие совпадения
        num_eb = i; % запоминаем порядковый номер BS
        break;
    end
end

buf = size(eNodeBS{num_eb}.UE_RNTI); % Список всех устройств
подключенных к BS
xx = buf(2); % Количество подключенных устройств UE
num_eb_ue = 0;
RNTI = UE{num_ue}.RNTI; % Идентификатор отключаемого устройства

% Поиск номера устройства среди всех подключенных устройств UE к
найденной BS для ее последующего отключения
for i=1:xx
    if (eNodeBS{num_eb}.UE_RNTI(i) == RNTI)
        num_eb_ue = i;
```

```

        break;
    end
end

% Обнуление выделенного ресурса
eNodeBS{num_eb}.UE_RNTI(num_eb_ue) = [];

% Распределение SB между UE по нисходящей линии связи.
buf = size(eNodeBS{num_eb}.UE_RNTI); % количество подключенных
устройств UE
kol_ue = buf(2);

if (kol_ue == 0)
    k1 = 0;
    p1 = 0;
else
    % высчитываем по равному количеству SB на каждое UE устройство
    k1 = fix(((NDLRB*10)-2)/kol_ue);
    p1 = 1:k1*kol_ue; % номера всех ресурсов подлежащих распределению
    p1 = p1 + 1;
end

% Распределение SB между UE по k1 блоков.
u=1;
p3 = [];
for i=1:kol_ue
    p3(i,1) = eNodeBS{num_eb}.UE_RNTI(i);
    for j=1:k1
        p1(2,u) = eNodeBS{num_eb}.UE_RNTI(i);
        p3(i,j+1) = p1(1,u);
        u=u+1;
    end
end

eNodeBS{num_eb}.UE_DL_RB = p3; % запись итогового распределения
ресурсов

% Обнуление информации о подключении к BS для обрабатываемого UE
UE{num_ue}.NCellID = 0;
UE{num_ue}.freq_band = 0;
UE{num_ue}.maxPower = 0;
UE{num_ue}.RB = [];
err = 0;
end

```

Листинг 5. Функция отключения UE от BS

Алгоритм работы функции отключения `disconnect_ue()` осуществляет поиск станции, к которой было подключено рассматриваемое устройство с получением информации о распределении ресурсов между всеми подключенными к ней объектами UE. Далее проверяется соответствие порядкового номера отключаемого абонента с номером RNTI, который используется для распределения ресурсов. На следующем этапе осуществляется обнуление распределенных ресурсов и определение количества блоков SB для оставшихся устройств. Распределение осуществляется, последовательно закрепляя за каждым объектом UE равное количество блоков SB, фиксируя для каждого из них идентификатор RNTI устройства, которое занимает этот блок. Окончательным этапом производится обнуление информации в структуре отключаемого UE о базовой станции, к которой осуществлялось подключение.

Рассмотрим пример из рисунка 3(б) и таблицы 1. Представим, что устройство UE (U2) вышло из радиуса видимости BS. Тогда данное устройство будет отключено с перераспределением частотного ресурса базовой станции. На рисунке 4 представлено распределение ресурсов до отключения UE (U2), а на рисунке 5 после отключения с перераспределением.

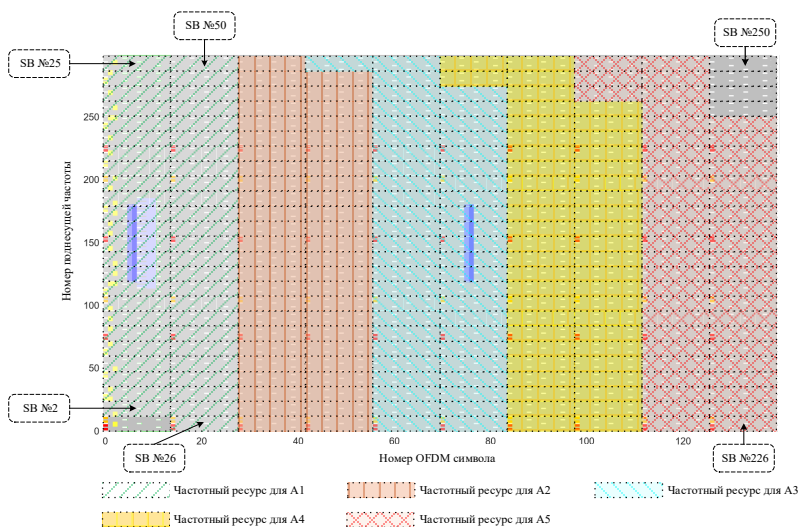


Рис. 4. Распределение ресурсов BS до отключения UE (U2)

Из рисунка 4 видно, что каждому подключенному UE к BS выделено равное количество блоков SB, а именно 49 единиц. Так,

например, для UE(U1) выделены блоки SB под номерами от 2 до 50. Для более наглядного представления выделение SB для каждого UE осуществлялось последовательно группами соседних блоков.

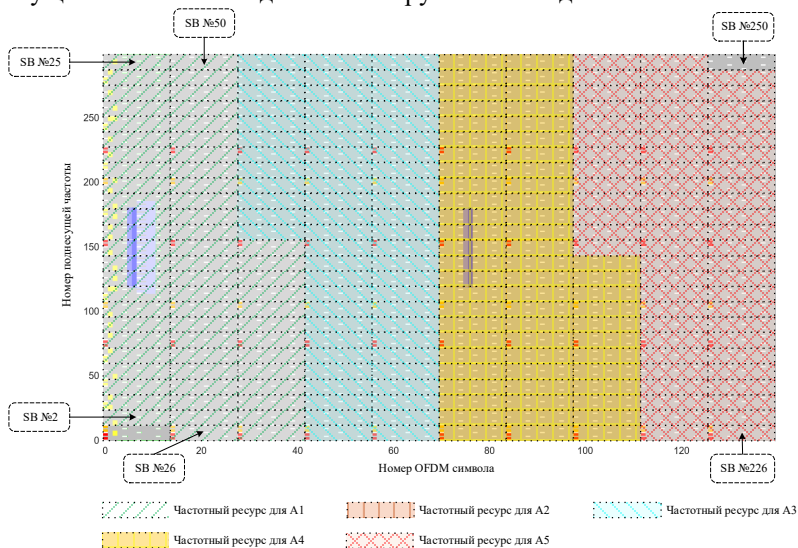


Рис. 5. Распределение ресурсов BS после отключения UE (A2)

Из рисунка 5 видно, что количество выделенных блоков SB для каждого объекта UE увеличился до 62, а для UE (U2) ресурсов выделено не было.

5. *Обновление статусов абонентов.* Изменение статусов активности абонентских устройств для передачи данных в соответствии с их индивидуальным расписанием. В модели реализован перебор объектов UE с поиском записи в расписании о начале сеанса в данный момент времени. При обнаружении подходящей записи соответствующий объект UE изменяет состояние на активное. На следующей итерации устройство связывается со своей рабочей станцией и начинает передачу данных. Для передачи используются все выделенные данному устройству блоки SB. Если объект UE не активен, то для связи по каналам вверх и вниз используется только по одному блоку SB из списка выделенных, которые имитируют различные сервисные данные.

Если время сеанса связи превысило длительность, указанную в расписании, абонент завершает передачу данных и переходит в неактивное состояние. На любое изменение изменения статуса

передачи устанавливается логический флаг в истинное значение, отвечающий за запрос на перерасчет REM.

6. *Обновления состояний объектов BS.* С целью формирования имитационного радиосигнала от BS согласно спецификации LTE, в MatLab применяется функция `lteRMCDLTool()` с параметрами, которая запускает приложение «LTE Waveform Generator» с заданной конфигурацией. Параметрами функции выступают: конфигурация BS в виде структуры данных и вектор информационных битов для реализации псевдослучайного распределения частотных ресурсов в генерируемом кадре.

Начальной конфигурацией для всех объектов BS является эталонная модель канала R.6 [14], которая дополняется параметрами в зависимости от временного шага моделирования, подключенных объектов UE к ней, а также статуса активности последних. Статус активности показывает, осуществляется ли передача данных в текущий момент моделируемого времени.

Информационные биты, представляющие полезную нагрузку, передаются в виде массива ячеек, содержащего один или два вектора битовых значений. В дальнейшем они циклически заполняют весь выделенный объем частотного ресурса. Пример формирования имитационного радиосигнала BS описан в листинге 6.

```
rmc = lteRMCDL('R.6');           % используемая эталонная модель
% задание статических параметров
rmc.TotSubframes = 10;           % количество моделируемых
подкадров
rmc.NSubframe = 0;               % начальный подкадр
моделирования
rmc.CellRefP = 1;               % количество антенн
rmc.OCNGPDSCH.Modulation = '16QAM'; % тип применимой модуляции
rmc.NDLRB = NDLRB;             % ширина полосы, количество RB (25)
% динамические параметры
rmc.NCellID = NCellID;          % идентификатор соты
rmc.PDSCH.RNTI = RNTI;
rmc.NFrame = NFrame;           % номер кадра для которого
осуществляется генерация данных
rmc.PDSCH.PRBS = RB_DL;        % набор ресурсов для распределения между
подключёнными UE
% формирование радиосигнала и ресурсной сетки станции BS
[signal, txGrid, rmc_out] = lteRMCDLTool(rmc, [1; 0; 0; 1]);
```

Листинг 6. Формирование имитационного радиосигнала BS

Помимо эталонных значений по умолчанию, для каждой станции прописываются собственные параметры, которые были заданы при инициализации в отдельности и имеют отличные от эталонных значения. Такие параметры разделяются на статические и динамические. Первые едины для всех объектов BS, а вторые зависят от конкретной BS, и процессе ее работы меняют свои значения. Следует отметить, что генерируется как радиосигнал, так и ресурсная сетка, которую можно восстановить по этому радиосигналу.

На рисунке 6 представлен результат работы приложения Wireless Waveform Generator в MatLab, использовавший функцию lteRMCDLTool(), в виде сформированной ресурсной сетки для эталонного канала R.6 с заполненными статическими параметрами. Данное приложение используется для наглядного представления передаваемых данных по нисходящему каналу в зависимости от заполняемых статических параметров BS. Генерируются все служебные и пользовательские данные, которые выделены различным цветом на рисунке 6.

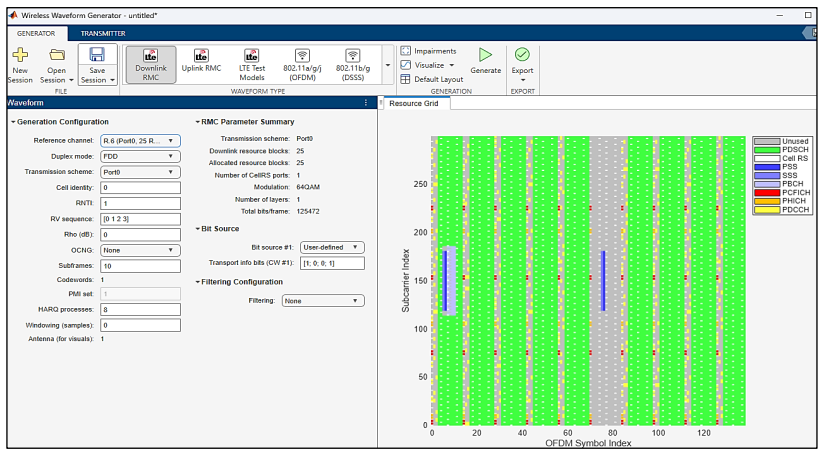


Рис. 6. Ресурсная сетка эталонного канала R.6

В приведенном на рисунке 6 случае, для передачи данных используются все блоки SB, за исключением подкадра №5, где в эталонной модели R.6 предусмотрена передача блоков данных системной информации (System Information Blocks, SIB). Представленная ресурсная сетка содержит все служебные и пользовательские данные, которые передаются объектам UE [9]. Поскольку используется ширина в 25 RB, то на рисунке 6 мы видим

300 поднесущих ($25 \cdot 12 = 300$), где каждый RB занимает 12 поднесущих. Длительность соответствует 140 OFDM символа, что равно одному кадру LTE длительностью 10 мс.

На рисунке 7 представлена ресурсная сетка BS с заполненными статическими и динамическими параметрами эталонной модели R.6 согласно листингу 4. Ресурсная сетка BS использует для передачи некоторые блоки SB, часть из которых пронумерована. Данные блоки содержат информацию, которая предназначена для подключенных к этой станции абонентов. Если устройство не активно, то заполняется данными только один из выделенных блоков SB.

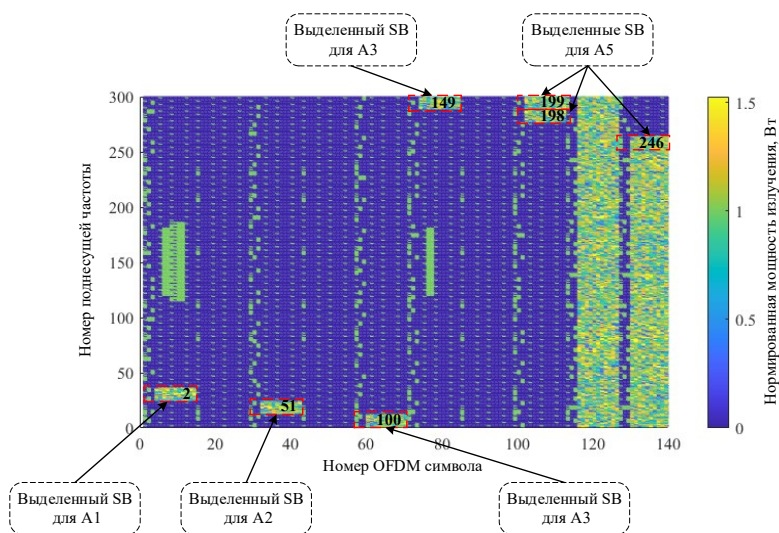


Рис. 7. Ресурсная сетка BS с заданными дополненными параметрами

Рисунок 7 описывает ресурсную сетку BS в момент времени, в который активно только одно UE (U5) и соответствует рисунку 3(б). Для него передаются данные от базовой станции, причем задействуются все выделенные RB для UE(U5). Блок SB, в котором осуществляется передача данных, содержит ресурсные элементы (RE), имитируют информационные биты, уровень мощности которых выше 0. Для рассматриваемого случая из рисунка 7 представлена таблица 2, которая содержит информацию о распределении ресурсных блоков BS для подключенных к ней объектов UE.

Поскольку активно только одно устройство U5, то информационными битами будут заполнены все ему выделенные блоки

SB (от SB198 до SB246). Также окажутся заполненными информацией SB под номерами SB2, SB51, SB100, SB149 потому как они являются первыми выделенными блоками и подлежат обязательному заполнению.

Таблица 2. Выделенные ресурсные блоки для каждого подключенного UE устройства к BS

Номер UE устройства	Номера SB выделенных UE для осуществления передачи данных по нисходящей линии	Статус активности
A1	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50	0
A2	51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99	0
A3	100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 133, 134, 135, 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148	0
A4	149, 150, 151, 152, 153, 154, 155, 156, 157, 158, 159, 160, 161, 162, 163, 164, 165, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 173, 174, 175, 176, 177, 178, 179, 180, 181, 182, 183, 184, 185, 186, 187, 188, 189, 190, 191, 192, 193, 194, 195, 196, 197	0
A5	198, 199, 200, 201, 202, 203, 204, 205, 206, 207, 208, 209, 210, 211, 212, 213, 214, 215, 216, 217, 218, 219, 220, 221, 222, 223, 224, 225, 226, 227, 228, 229, 230, 231, 232, 233, 234, 235, 236, 237, 238, 239, 240, 241, 242, 243, 244, 245, 246	1

7. *Пересчет карты радиосреды.* Пересчет REM запускается при изменении координат объектов UE либо после смены статуса их активности.

На первом этапе производится обновление ресурсных сеток каждой станции путем параллельного перебора всех объектов BS с обновлением их ресурсных сеток с помощью функции `lteRMCDDLTool()`. После обновления ресурсные сетки размещаются в соответствии с координатами расположения станций. Перед размещением обновленная ресурсная сетка помещается в рабочий частотный диапазон текущей базовой станции.

Для каждого объекта UE также осуществляется параллельный перебор с обновлением ресурсных сеток с помощью функции `lteRMCULTool()`, отвечающую за генерацию сигнала и ресурсной сетки по восходящему каналу связи. На каждую сформированную сетку накладывается шумовое воздействие с заданным коэффициентом

воздействия, измеряемым в дБ. После завершения процедуры обновления ресурсных сеток и их размещения на карте REM выполняется этап объединения сеток в каждой ячейке REM.

На второй этапе распространение излучающего сигнала (ресурсной сетки) вычисляется отдельно для каждого объекта по упрощенной модели его затухания, которая описывает три уровня сигнала при его распространении: «нормальный», «слабый» и «потеря сигнала». Каждый уровень устанавливается в зависимости от расстояния от точки излучения на карте REM, поэтому высчитываются и суммируются все промежуточные REM от каждого объекта модели. Таким образом, в каждой ячейке карты REM хранятся объединенные значения ресурсных сеток по частотным диапазонам.

На рисунке 8 представлен пример этапа размещения ресурсных сеток от всех объектов на REM. Данный этап подразумевает перебор всех объектов и заполнение ячеек REM сигналами передачи данных (ресурсными сетками) в местах их расположения с учетом занимаемых выделенных частотных диапазонов.

В примере на рисунке 8 в ячейке (3, 3), где расположена базовая станция B1, ее ресурсная сетка располагается в первом частотном диапазоне, который занимает от 900 до 1200 поднесущих. Следует отметить, что весь моделируемый диапазон поднесущих частот разбит на 6 частотных полос, по 3 частотных диапазона на нисходящий и восходящий каналы:

- первый частотный диапазон занимает для нисходящий от 900 до 1200 поднесущих, а для восходящей от 0 до 300;
- второй частотный диапазон занимает для нисходящий от 1200 до 1500 поднесущих, а для восходящей от 300 до 600;
- третий частотный диапазон занимает для нисходящий от 1500 до 1800 поднесущих, а для восходящей от 600 до 900.

Ресурсная сетка от активного объекта UE (U5) в ячейке REM (5,2) по восходящей линии связи занимает весь выделенный ей ресурс и располагается в первом частотном диапазоне для восходящей линии связи. Так как пример на рисунке 8 содержит только один объект BS (B1), то все сигналы будут располагаться в первом частотном диапазоне. Разные частотные диапазоны, как правило, используются соседними станциями. Остальные объекты UE (U1, U2, U3, U4), каждый в своей ячейке, занимают по одной выделенной линии, которая была назначена при распределении частотных ресурсов во время подключения к BS, для осуществления связи по восходящему каналу в первом частотном диапазоне.

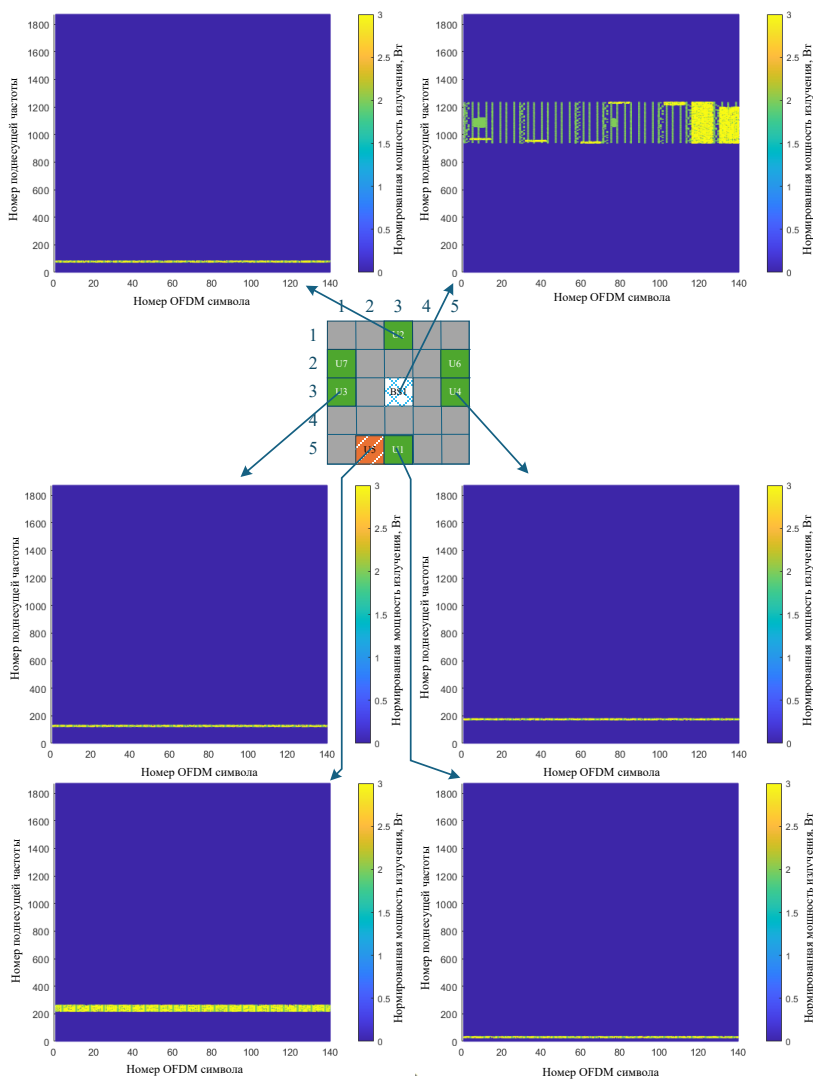


Рис. 8. Размещение ресурсных сеток на REM

На рисунке 8 стрелки указывают на ресурсные сетки (радиосигналы), которые хранятся в ячейке, где располагается соответствующий объект на REM. Отметим, что объекты U6 и U7 не излучают сигналов, т.к. являются устройствами типа SU, т.е. они

не подключаются к базовым станциям. Следовательно, для них не выделяются ресурсы.

На рисунке 9 представлен результат объединения ресурсных сеток всех объектов на REM в ячейке (3,3), где расположена станция B1, с учетом затуханий от мест расположения каждого объекта до представленной ячейки. Объединение (суммирование) всех ресурсных сеток от каждого объекта на REM осуществляется для всех ячеек.

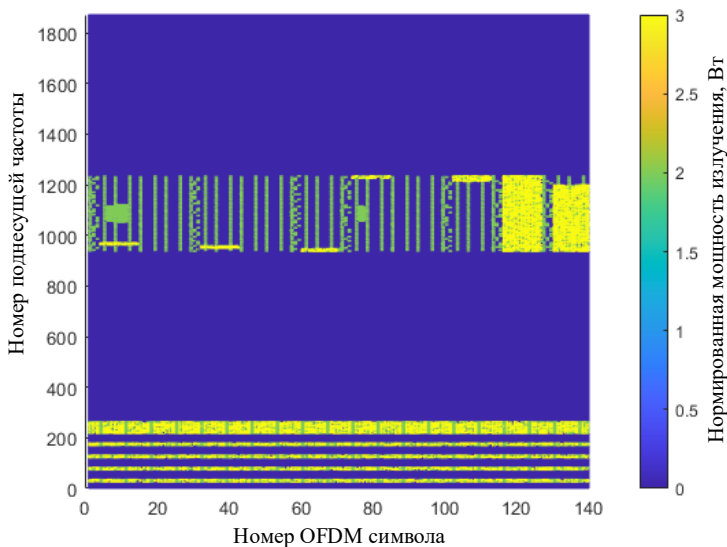


Рис. 9. Объединенный частотный диапазон в точке расположения базовой станции (B1)

8. *Сохранение карты радиосреды в файл.* Сохранение данных REM на внешний носитель информации. В качестве способа представления используется формат HDF5 по ряду причин: наличие в MatLab инструментов для работы с этим форматом, высокая скорость записи и чтения данных, универсальность формата. Таким образом, выходными данными моделями является набор HDF5 файлов с расширением «.h5», каждый из которых содержит полную карту радиосреды в заданный момент моделируемого времени. С целью экономии памяти дополнительно производится архивация полученного файла в формат «zip», что позволяет уменьшить размер до 50 раз за счет разреженности матрицы REM. Отдельно сохраняются

параметры модели для возможности генерации обучающих данных по сохраненным снимкам REM.

4. Модуль обучения прогнозирующей нейросетевой модели.
Модуль построен на нейронной сети KAN, которая демонстрирует превосходную точность по сравнению с другими ИНС при аналогичном числе параметров для задачи прогнозирования незанятых частотных ресурсов в системе сотовой связи LTE [12].

Рассматриваемый модуль состоит из следующих основных блоков (рисунок 1): загрузка параметров модели LTE, распаковка сжатой карты REM, формирование набора для обучения ИНС, перемешивание данных, разделение обучающегося набора на тренировочную, тестовую и валидационную часть, определение параметров модули ИНС, обучение модули ИНС, тестирование обученной модели ИНС, сохранение обученной модели ИНС.

- Рассмотрим основные блоки модуля.
1. Загрузка параметров модели осуществляется путем чтения файла конфигурации параметров модели LTE (файлов расписания перемещений и сеансов связи пользователей, первоначальная расстановка всех объектов BS и UE, и их параметры).
 2. Загрузка и распаковка файлов REM в предварительную структуру данных, которая позволяет рассчитать статусы занятости слотов в анализируемом кадре LTE.
 3. Формирование обучающего набора включает расчет статусов занятости блоков SB для каждой линии RB. Блок SB считается занятым, если его уровень превышает общий уровень шума на заданное значение.

Ключевым этапом в генерации обучающего набора данных является формирование соответствия между входной и выходной информацией модуля обучения прогнозирующей ИНС, которая отражена в таблице 3.

Таблица 3. Структура данных для обучения прогнозирующей модели

Входные данные					Выходные данные
Номер отсчета в сутках	Номер дня недели	Тип дня	Номер недели месяца	Номер линии RB	Статус 10 блоков SB кадра LTE

Таким образом, входные данные поступают от модуля формирования и обработки сигналов системы сотовой связи LTE. Выходные данные содержат статус 10 блоков SB в каждом анализируемом кадре LTE для выбранной линии RB (рисунок 2).

Следует отметить, что прогнозирование осуществляется для отдельной линии RB, а не для всей ресурсной сетки в целом.

4. Блок комбинирования и разделения подготовленных данных на отдельные выборки: обучающую (60%), тестовую (20%) и валидационную (20%).

5. Блок инициализации модели ИНС, загрузка данных, обучение и тестирование.

6. Сохранение в файл весов обученной модели ИНС для последующего использования модулем прогнозирования занятости частотных ресурсов. Веса модели KAN после обучения сохраняются в бинарный файл и в дальнейшем могут быть использованы для выполнения прогнозирования с помощью специального скрипта на языке Python.

5. Модуль прогнозирования занятости частотных ресурсов.

Модуль выполняет прогнозирование занятости частотных ресурсов в виде содержимого заданной ячейки REM имитационной модели LTE, и включает основные блоки: загрузка обученной модели ИНС, подготовка исходных данных текущей REM для подачи на вход ИНС, процедура прогнозирования, оценка точности прогнозирования.

Модуль прогнозирования занятости частотных ресурсов был реализован в виде скрипта на языке Python 3.11. Функционал данного скрипта включает загрузку весовых коэффициентов предварительно обученной искусственной нейронной сети (ИНС) и значения, соответствующие входным данным (таблица 3). Скрипт возвращает результаты прогнозирования в текстовом виде. Вызов скрипта осуществляется путем системного вызова с набором параметров, как показано в листинге 7.

```
function predict = PredictKAN(inp)    % объявление функции
    [~, ans] = system(inp);          % системный вызов Py-скрипта
    ans(1) = "; ans(length(ans)) = "; % удаление лишних символов
    ans(length(ans)) = "; ans = strsplit(ans, ' '); % разделение строки на 10
символов
    predict = ones(1, 10);           % инициализация результирующего
массива
    for i = 1 : 10                   % цикл по каждому элементу
        predict(i) = str2num(ans{i}); % преобразование каждого символа в
число
    end                             % завершение цикла и возврат в
основную программу результата
end
```

Листинг 7. Системный вызов Python скрипта

Полученный результат преобразуется в массив логических значений, производится сравнение прогноза и текущего состояния модели.

6. Результаты имитационного моделирования.

Имитационной моделью были сформированы данные в виде файлов, содержащих матрицы REM. Набор смоделированных данных для обучения и тестирования нейросетевой модели составил 10 000 кадров LTE за 12 месяцев моделируемого периода: 6 000 кадров для обучения и по 2 000 кадров для тестирования и валидации. Для оценки результата предсказаний также было смоделировано 10 000 кадров LTE, но уже с другими параметрами при инициализации всех объектов карты REM. Размеры карты REM были установлены 5×5 ячеек, 7 объектов UE, одна базовая станция.

Точность прогнозирования занятости частотных ресурсов измерялась путем подсчета отношения корректно предсказанных отсчетов ко всем анализируемым отсчетам согласно выражению:

$$P = 100\% \cdot \left(1 - \frac{Y}{S}\right), \quad (1)$$

где P – точность прогноза;
 Y – количество корректно подсчитанных предсказаний;
 S – общее количество предсказаний.

Модель ИНС возвращает предсказания в виде вероятности занятости частотного ресурса в диапазоне от 0 до 1, где 0 – не занят, 1 – занят. Для приведения прогноза модели к логическому типу данных вводился коэффициент бинаризации, представляющий пороговое значение ($th = 0,5$) относительно которого определялось состояние занятости ресурса.

На рисунке 10 представлен результат оценки точности прогнозирования свободных частотных ресурсов.

Оценка выполнялась по каждому кадру с вычислением среднего значения предсказаний для всего кадра LTE. На рис. 10 представлены результаты для 100 усредненных кадров, что соответствует 10000 сгенерированных кадров LTE. Штрихпунктирной линией показано среднее значение точности предсказания для всех кадров, которое составило 92,23%.

Таким образом, прогнозирование состояния ресурсной сетки линии RB выполняется с высокой точностью. Информация о вероятности наличия и положения свободных блоков SB может быть

использована вторичными пользователями для эффективного встраивания их данных в ресурсную сетку сигнала LTE.

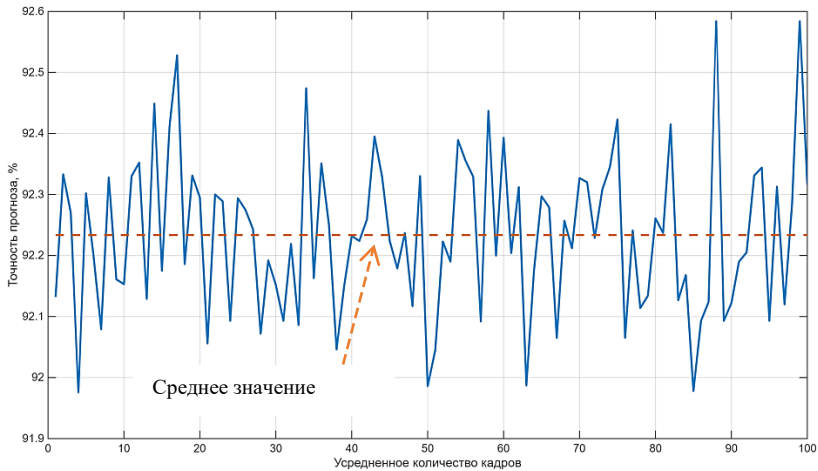


Рис. 10. Оценка точности прогнозирования на основе 100 измерений

Было произведено сравнение точности предсказания моделей KAN и LSTM. Модель KAN обучена со следующими параметрами: количество узлов сетки $G = 60$, порядок сплайна $k = 3$, оптимизатор LBFGS (с ограниченной памятью Бройдена-Флетчера-Гольдфарба-Шанно), среднеквадратичная ошибка для оценки потерь, продолжительность обучения 300 эпох. Корректное сравнение моделей обеспечивалось тем, что число обучаемых параметров для обеих моделей было подобрано одинаковым. Конфигурация слоев модели KAN: {5, 10, 20}; конфигурация слоев LSTM: {5, 57, 20}. В качестве дополнительного эксперимента, после обучения модели KAN выполнена операция обрезки (pruning) с целью удаления узлов, слабо влияющих на результат работы, для повышения быстродействия.

Результаты сравнения показали, что архитектура KAN продемонстрировала точность на 10% выше, чем LSTM, а в процессе обучения значительно быстрее достигла сходимости. Вариант KAN после обрезки увеличил вычислительную эффективность модели на 60% за счет потери точности всего на 2,7%.

Таким образом, была подтверждена эффективность применения архитектуры KAN для прогнозирования занятости частотных ресурсов системы сотовой связи.

7. Заключение. В ходе проведенного исследования была разработана в программной среде MatLab имитационная модель когнитивного радио, которая построена по модульной архитектуре и состоит из трех модулей. Приведено описание основных элементов модулей, особенности их интеграции и применяемые алгоритмы обработки данных.

Модель позволяет генерировать данные REM заданного размера за определенный промежуток времени, задавать количество модулируемых объектов и конфигурировать сценарии их поведения. Используются алгоритмы выявления и предсказания свободных ресурсов на основе искусственной нейронной сети Колмогорова-Арнольда, при этом, за счет гибкой архитектуры, модель позволяет оценивать эффективность других нейросетевых моделей или разрабатываемых алгоритмов определения свободных частотных ресурсов.

Достигнутая точность прогнозирования моделью KAN занятости частотных ресурсов на основе выходных данных имитационной модели системы сотовой связи LTE составила 92,23%. Архитектура KAN показала на 10% более высокую точность в сравнении с LSTM. Полученные результаты открывают перспективы для дальнейших исследований в области когнитивного радио. В частности, возможны разработки более сложных алгоритмов машинного обучения, способных адаптироваться к динамическим изменениям спектра. Также важно изучить возможность интеграции предложенной модели с сетями 5G и IoT, что позволит расширить ее применение.

Литература

1. Зуев А.В. Распределение канальных ресурсов в когнитивной радиосети на основе аукционного метода управления доступом к среде передачи // Системы управления связи и безопасности. 2019. № 3. С. 14–32.
2. Головской В.А. Математическая модель функционирования когнитивной радиосистемы // Журнал Радиоэлектроники. 2024. № 3. С. 1–20. DOI: 10.30898/1684-1719.2024.3.4.
3. Hilal W., Gadsden S.A., Yawney J. Cognitive Dynamic Systems: A Review of Theory, Applications, and Recent Advances // Proc. IEEE. 2023. vol. 111. no. 6. pp. 575–622.
4. Feng B., Zheng M., Liang W., Zhang L. A Recent Survey on Radio Map Estimation Methods for Wireless Networks // Electronics. 2025. vol. 14. no. 8. DOI: 10.3390/electronics14081564.
5. Koutlia K., Bojović B., Lagén S., Giupponi L. Novel radio environment map for the ns-3 NR simulator // Proceedings of the Workshop on ns-3. 2023. pp. 41–48. DOI: 10.1145/3460797.3460803.

6. Gao Y., Niu L., Wang X., Wang T., Chen B. A REM Based Localization Method of Emitter Outside the Sensing Boundary // *Advances in Computer and Materials Science Research*. 2025. № 2. pp. 209–214.
7. Адамовский Е.Р., Чертков В.М., Богущ Р.П. Модель формирования карты радиосреды для когнитивной системы связи на базе сотовой сети LTE // *Компьютерные исследования и моделирование*. 2022. Т. 14. № 1. С. 127–146.
8. Арёфьев А.С., Варыгин А.А., Фокин Г.А. Анализ структуры целевого сигнала NR и LTE на основе нейросетевого подхода и методов глубокого обучения // *Информационные технологии и телекоммуникации*. 2024. Т. 12. № 1. С. 16–28. DOI: 10.31854/2307-1303-2024-12-1-16-28.
9. Чертков В.М., Богущ Р.П., Адамовский Е.Р. Модель разделения данных пользователей в когнитивной системе связи на базе LTE // *Информационно-управляющие системы*. 2023. № 5(126). С. 43–54.
10. Kandaurova E.O. Chirov D.S. Neural Network Algorithm for Predicting Spectrum Occupancy in Cognitive Radio Systems // *2023 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*. 2023. pp. 1–5.
11. Fischer T., Sterling M., Lessmann S. Fx-spot predictions with state-of-the-art transformer and time embeddings // *Expert Syst. Appl.* 2024. no. 249. pp. 1–11.
12. Адамовский Е.Р., Богущ Р.П., Наумович Н.М. Прогнозирование занятости частотного ресурса в системе когнитивного радио с использованием нейронной сети Колмогорова – Арнольда // *Компьютерные исследования и моделирование*. 2025. Т. 17. № 1. С. 109–123.
13. Chaves-Villota A., Viteri-Mera C.A. DeepREM: Deep-Learning-Based Radio Environment Map Estimation from Sparse Measurements // *IEEE Access*. 2023. vol. 11. pp. 48697–48714.
14. Specification TS 36.101. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception. URL: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=2411> (дата обращения: 12.05.2025).
15. Official web site of crowd-sourced cellular tower and coverage mapping service. URL: https://www.cellmapper.net/First_Time_Startup (дата обращения: 12.05.2025).
16. Богущ Р.П., Адамовский Е.Р., Чертков В.М. Состав и представление данных для модели когнитивной системы связи на базе LTE // *Вестник Полоцкого Государственного Университета Серия С Фундаментальные Науки*. 2021. № 12. С. 13–20.
17. Адамовский Е.Р., Богущ Р.П., Чертков В.М., Наумович Н.М., Стежко И.К. Моделирование поведения абонентов с использованием цепи Маркова при формировании карты радиосреды для когнитивной системы связи // *Вестник Полоцкого Государственного Университета Серия С Фундаментальные Науки*. 2022. № 11. С. 8–15.
- 18.

Чертков Валерий Михайлович — канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, кафедра технологий программирования, Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой. Область научных интересов: цифровая обработка сигналов, прикладная теория кодирования, защита информации, встраиваемые микропроцессорные системы, искусственный интеллект. Число научных публикаций — 110. v.chertkov@psu.by; улица Василевцы, 14, 211501, Новополоцк, Беларусь; р.т.: +375(214)599-588.

Богущ Рихард Петрович — д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, кафедра вычислительных систем и сетей, Полоцкий государственный университет имени

Евфросинии Полоцкой. Область научных интересов: интеллектуальные и когнитивные системы, машинное обучение, обработка и анализ видеоданных, информационная безопасность. Число научных публикаций — 220. r.bogush@psu.by; улица Якуба Колоса, 6, 211440, Новополоцк, Беларусь; р.т.: +375(214)599-587.

Адамовский Егор Русланович — старший преподаватель, кафедра вычислительных систем и сетей, Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой. Область научных интересов: цифровая обработка сигналов, техническая защита информации, компьютерное зрение. Число научных публикаций — 45. e.adamovsky@psu.by; улица Хруцкого, 20, 211416, Полоцк, Беларусь; р.т.: +375(333)874-689.

Рогулев Владимир Сергеевич — аспирант, старший преподаватель, кафедра технологий программирования, Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой. Область научных интересов: разработка программного обеспечения. Число научных публикаций — 5. v.rogulev@psu.by; улица Молодежная, 105, 211448, Новополоцк, Беларусь; р.т.: +375(214)599-588.

V. CHERTKOV, R. BOHUSH, Y. ADAMOVSKIY, V. ROGULEV
SIMULATION MODEL OF COGNITIVE RADIO

Chertkov V., Bohush R., Adamovskiy Y., Rogulev V. Simulation Model of Cognitive Radio.

Abstract. The growing shortage of radio frequency spectrum, driven by the explosive increase in the number of wireless devices and data traffic volumes, makes Cognitive Radio (CR) technologies critically important for the future of telecommunications. This research addresses the challenge of dynamic spectrum management by developing a simulation model of a cognitive radio communication system based on the LTE network architecture. In contrast to existing solutions, the proposed model features a modular structure, allowing for the flexible integration and evaluation of various frequency resource occupancy prediction algorithms. The model is implemented in the MatLab environment and comprises three key modules: an LTE signal generation and processing module, which creates Radio Environment Maps (REM); a predictive neural network model training module; and a frequency resource occupancy prediction module. Particular focus is placed on utilizing the advanced Kolmogorov-Arnold Network (KAN) architecture for predicting unused Scheduling Blocks (SBs) within an LTE frame. Simulation results, encompassing 10,000 frames, demonstrated the high efficiency of the proposed approach. The KAN model achieved a prediction accuracy of 92.23% for identifying free frequency resources in a 10 ms frame. Comparative testing revealed that the KAN architecture outperforms the traditional LSTM network in accuracy by approximately 10% given an equal number of trainable parameters, and also converges faster during training. The practical significance of this work lies in providing a tool for accurate spectrum occupancy assessment and secondary user access planning, leading to a significant increase in the spectral efficiency and reliability of next-generation wireless networks.

Keywords: cognitive radio, simulation model, LTE, spectrum prediction, Kolmogorov-Arnold Network (KAN), Radio Environment Map (REM), dynamic spectrum access.

References

1. Zuev A.V. [Channel resources distribution based on the auction method of controlling access to the transmission medium in a cognitive radio network]. *Sistemy upravleniya svyazi i bezopasnosti – Systems of Control, Communication and Security*. 2019. no. 3. pp. 14–32. (In Russ.).
2. Golovskoy V.A. [Mathematical model of functioning cognitive radio system]. *Zhurnal Radioelektroniki – Journal of Radio Electronics*. 2024. no. 3. pp. 1–20. DOI: 10.30898/1684-1719.2024.3.4. (In Russ.).
3. Hilal W., Gadsden S.A., Yawney J. Cognitive Dynamic Systems: A Review of Theory, Applications, and Recent Advances. *Proc. IEEE*. 2023. vol. 111. no. 6. pp. 575–622.
4. Feng B., Zheng M., Liang W., Zhang L. A Recent Survey on Radio Map Estimation Methods for Wireless Networks. *Electronics*. 2025. vol. 14. no. 8. DOI: 10.3390/electronics14081564.
5. Koutlia K., Bojović B., Lagén S., Giupponi L. Novel radio environment map for the ns-3 NR simulator. *Proceedings of the Workshop on ns-3*. 2023. pp. 41–48. DOI: 10.1145/3460797.3460803.
6. Gao Y., Niu L., Wang X., Wang T., Chen B. A REM Based Localization Method of Emitter Outside the Sensing Boundary. *Advances in Computer and Materials Science Research*. 2025. № 2. pp. 209–214.

7. Adamovskiy Y.R., Chertkov V.M., Bohush R.P. [Model for building of the radio environment map for cognitive communication system based on LTE]. *Komp'yuternye issledovaniya i modelirovanie – Computer Research and Modeling*. 2022. vol. 14. no. 1. pp. 127–146. (In Russ.).
8. Arefev A., Varygin A., Fokin G. Analysis of NR and LTE Target Signal Structure Based on Neural Network Approach and Deep Learning Methods. *Telecom IT*. 2024. vol. 12. no. 1. C. 16–28. DOI: 10.31854/2307-1303-2024-12-1-16-28. (In Russ.).
9. Chertkov V.M., Bohush R.P., Adamovskiy Y.R. User data separation model in an LTE-based cognitive communication system. *Informatsionno-upravliaushchie sistemy – Information and Control Systems*. 2023. no. 5(126). pp. 43–54. (In Russ.).
10. Kandaurova E.O., Chirov D.S. Neural Network Algorithm for Predicting Spectrum Occupancy in Cognitive Radio Systems. 2023 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO). 2023. pp. 1–5.
11. Fischer T., Sterling M., Lessmann S. Fx-spot predictions with state-of-the-art transformer and time embeddings. *Expert Syst. Appl.* 2024. no. 249. pp. 1–11.
12. Adamovskiy Y.R., Bohush R.P., Naumovich N.M. Prediction of frequency resource occupancy in a cognitive radio system using the Kolmogorov – Arnold neural network. *Komp'yuternye issledovaniya i modelirovanie – Computer Research and Modeling*. 2025. vol. 17. no. 1. pp. 109–123. (In Russ.).
13. Chaves-Villota A., Viteri-Mera C.A. DeepREM: Deep-Learning-Based Radio Environment Map Estimation from Sparse Measurements. *IEEE Access*. 2023. vol. 11. pp. 48697–48714.
14. Specification TS 36.101. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception. Available at: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=2411> (accessed: 12.05.2025).
15. Official web site of crowd-sourced cellular tower and coverage mapping service. Available at: https://www.cellmapper.net/First_Time_Startup (accessed: 12.05.2025).
16. Bohush R.P., Adamovskiy Y.R., Chertkov V.M. [Data Composition and Representation for Cognitive Communication System Model Based on LTE]. *Vestnik Polockogo Gosudarstvennogo Universiteta Serija C Fundamental'nye Nauki – Vestnik of Polotsk State University. Part C. Fundamental Sciences*. 2021. no. 12. pp. 13–20. (In Russ.).
17. Adamovskiy Y., Bohush R., Chertkov V., Naumovich N., Stegko I. [User Activity Modeling Based on Markov Chain for Radio Environment Map in Cognitive Radio Networks]. *Vestnik Polockogo Gosudarstvennogo Universiteta Serija C Fundamental'nye Nauki – Vestnik of Polotsk State University. Part C. Fundamental Sciences*. 2022. no. 11. pp. 8–15. (In Russ.).

Chertkov Valery — Ph.D., Associate Professor, Head of the department, Department of software engineering, Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk. Research interests: digital signal processing, applied coding theory, information security, embedded microprocessor systems, artificial intelligence. The number of publications — 110. v.chertkov@psu.by; 14, Vasilevtsy St., 211501, Novopolotsk, Belarus; office phone: +375(214)599-588.

Bohush Rykhard — Ph.D., Dr.Sci., Associate Professor, Head of the department, Department of computing systems and networks, Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk. Research interests: intelligent and cognitive systems, machine learning, video data processing and analysis, information security. The number of publications — 220. r.bogush@psu.by; 6, Yakuba Kolosa St., 211440, Novopolotsk, Belarus; office phone: +375(214)599-587.

Adamovskiy Yahor — Senior Lecturer, Department of computing systems and networks, Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk. Research interests: digital signal processing, technical information security, computer vision. The number of publications — 45. e.adamovsky@psu.by; 20, Khrutskogo St., 211416, Polotsk, Belarus; office phone: +375(333)874-689.

Rogulev Vladimir — Postgraduate Student, Senior Lecturer, Department of software engineering, Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk. Research interests: software development. The number of publications — 5. v.rogulev@psu.by; 105, Molodezhnaya St., 211448, Novopolotsk, Belarus; office phone: +375(214)599-588.