



## Модель разделения данных пользователей в когнитивной системе связи на базе LTE

В. М. Чертков<sup>а</sup>, канд. техн. наук, доцент, [orcid.org/0000-0002-2603-9873](https://orcid.org/0000-0002-2603-9873), [v.chertkov@psu.by](mailto:v.chertkov@psu.by)

Р. П. Богуш<sup>а</sup>, доктор техн. наук, доцент, [orcid.org/0000-0002-6609-5810](https://orcid.org/0000-0002-6609-5810)

Е. Р. Адамовский<sup>а</sup>, аспирант, [orcid.org/0000-0003-1044-8741](https://orcid.org/0000-0003-1044-8741)

<sup>а</sup>Полоцкий государственный университет им. Евфросинии Полоцкой, Блохина ул., 29, Новополоцк, 211440, Республика Беларусь

**Введение:** развитие беспроводных систем связи порождает проблему нехватки частотных ресурсов, для решения которой перспективно применение когнитивного радио. Одной из ключевых особенностей данной технологии является использование динамического доступа к радиочастотным каналам. При этом выявление не занятых первичными пользователями частотных ресурсов в необходимые моменты времени осуществляется с применением специализированных алгоритмов анализа сигналов и разделением передаваемых и накопленных данных с учетом помех. Эффективность таких алгоритмов в значительной мере определяет скорость и точность передачи информации между вторичными пользователями. **Цель:** разработать модель и алгоритм разделения данных первичных и вторичных пользователей в когнитивной системе связи на базе LTE для обеспечения возможности планировать режим совместного доступа, выполнить их программную реализацию. **Результаты:** разработана классификационная модель и предложены признаки для разделения сигналов первичных и вторичных пользователей, представлен алгоритм разделения данных в кадре сигнала сети LTE. Программная часть реализована в качестве компонента имитационной модели с использованием программной среды MatLab. Проведен анализ результатов моделирования, который показал, что данные первичных и вторичных пользователей при значении отношения сигнал/шум не менее 1 дБ корректно декодируются с вероятностью 0,98 при заданной вероятности ложного обнаружения 0,01 в диапазоне частот от 1720 до 1835 МГц со временем анализа 1 мс. **Практическая значимость:** применение полученных результатов предоставляет возможность точно оценить занятость частотных ресурсов с учетом данных первичных и вторичных пользователей, а также планировать доступ вторичных пользователей, что позволит улучшить характеристики когнитивных систем связи.

**Ключевые слова** — классификация данных, когнитивное радио, первичные и вторичные пользователи, динамический доступ к спектру.

**Для цитирования:** Чертков В. М., Богуш Р. П., Адамовский Е. Р. Модель разделения данных пользователей в когнитивной системе связи на базе LTE. *Информационно-управляющие системы*, 2023, № 5, с. 43–54. doi:10.31799/1684-8853-2023-5-43-54, EDN: GUFVYP

**For citation:** Chertkov V. M., Bohush R. P., Adamovskiy Y. R. User data separation model in an LTE-based cognitive communication system. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2023, no. 5, pp. 43–54 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2023-5-43-54, EDN: GUFVYP

### Введение

Непрерывное развитие телекоммуникационных систем формирует задачу рационального использования частотных ресурсов, которая является особенно актуальной на протяжении последнего десятилетия [1, 2]. Применение когнитивной связи позволяет в значительной мере решать указанную проблему [2]. Основной идеей при этом является использование незанятого первичными пользователями (Primary Users, PU) канала связи в текущий момент времени для организации передачи данных между вторичными пользователями (Secondary Users, SU) путем применения технологии динамического доступа к спектру (Dynamic Spectrum Access, DSA) [3] и адаптации передатчика SU к линиям радиосвязи.

Данный подход базируется на обнаружении временно свободных лицензированных частотных ресурсов («белых пятен») и их использо-

вании устройствами SU с учетом ограничений, включая допустимый уровень помех [4]. Технология DSA предполагает мониторинг радиочастотного спектра [5], обнаружение радиосигналов [6, 7], их анализ и разделение данных пользователей [8].

Для анализа классификации информации при реализации DSA предлагаются специализированные алгоритмы с различной результативностью [1, 5, 8–11]. Это связано с необходимостью обеспечить высокую точность решения задачи, принимая во внимание, что практически в каждый момент времени для выявления «белых пятен» требуется разделять сигналы от PU и SU с учетом шумовых воздействий и ослабления радиосигналов при распространении радиоволн [12]. Все SU должны избегать коллизий между всеми устройствами когнитивной сети и согласовывать доступ к спектру с другими SU [3]. Время, за которое SU может определить свободные ре-

суды для последующей передачи данных, является одним из ключевых показателей производительности в условиях минимизации задержек передачи информации в телекоммуникационных сетях [13]. Необходимость аутентификации и защиты передаваемых данных в системе когнитивного радио требует их формирования в виде определенного фрагмента структуры кадра во многих системах, в том числе стандарта LTE [14, 15].

В работе [8] представлен алгоритм разделения сигналов PU (устройств DVB-T) и радиосигналов со структурой, описанной спецификацией LTE, в диапазоне частот от 70 до 790 МГц с шириной полосы 8 МГц. Алгоритм основан на анализе неравномерностей на границах частотных поддиапазонов спектра. Классификация данных PU и SU осуществляется с использованием метрик, которые формируются на основе коэффициентов корреляции, что позволяет обеспечить достаточно высокую точность при длительном анализе: для значения отношения сигнал/шум (Signal-to-Noise Ratio, SNR)  $-21$  дБ вероятность правильного обнаружения соответствует 0,5 при заданной вероятности ложного обнаружения 1 % и времени анализа 250 мс. Однако на временном интервале, сравнимом с длительностью подкадра LTE (1 мс), значение вероятности правильного обнаружения 0,5 будет достигаться при SNR =  $-5$  дБ. Следовательно, требуется более сложная модель разделения сигналов.

Классификация данных зондирования частотного спектра с применением метода опорных векторов и взвешенного метода  $k$ -ближайших соседей проведена в работе [9]. В качестве набора признаков используются уровни принимаемого сигнала SU. При этом основной задачей является определение присутствия приемника PU в области видимости SU с учетом того, что связь осуществляется только между парой устройств PU в частотной полосе 10 МГц, а SU выступает в качестве анализатора спектра, т. е. не генерирует сигналы. Однако для практической реализации данного классификатора крайне важно получить правильно сформированный обучающий набор сигналов, что является сложной задачей.

Разделение легитимных SU и мешающих пользователей, которые предоставляют информацию в центр координации о наличии PU в зоне видимости, рассмотрено в работе [1]. Для этого применяется метод опорных векторов, а в качестве набора входных признаков используются типы и энергетические спектры сигналов PU, данные центра координации о наличии и активности всех SU и PU. Моделирование сигналов осуществляется на основе стандарта IEEE 802.22, который перекрывает телевизи-

онный спектр частот с шириной полосы 6 МГц. Особенностью модели является использование центра координации, который объединяет разнообразные сведения зондирования на основе теории доказательств Демпстера – Шейфера, чтобы принять решение о существовании PU в сети. Вероятность правильного обнаружения соответствует 0,5 при заданной вероятности ложного обнаружения 3 %.

В работе [10] отмечена важность проектирования структуры кадра для передающих SU в системе когнитивной связи, что обеспечит адаптацию передатчика SU к линии радиосвязи и снижение вероятности возникновения коллизий между PU и SU. Авторы приводят обобщенную структуру кадра для SU и предлагают совместно осуществлять анализ и передачу данных. При таком подходе увеличение времени анализа позволит повысить точность определения присутствия PU. Однако для фиксированного размера кадра, например LTE (10 мс), длительный анализ сокращает время, доступное для передачи данных, а это приводит к проблеме компромисса времени анализа и пропускной способности организуемого канала.

Распознавание вида и позиционности модуляции для анализируемого фрагмента радиосигнала с определением сигнально-кодовой конструкции при разделении сигналов в системе когнитивной связи рассмотрено в работе [11]. Предложенная авторами модель на основе нейронной сети, реализованная с использованием программируемой логической интегральной схемы, распознает тип модуляции с достоверностью не менее 0,7 при SNR около 2 дБ без предварительного установления синхронизации.

Таким образом, в настоящее время отсутствует в общем виде решение задачи разделения данных PU и SU по причине многообразия вариантов их реализаций и высокой сложности построения когнитивных систем как таковых. Поэтому разработка модели и алгоритма классификации передаваемых данных в современных системах связи является актуальной.

### Типы данных в когнитивной связи на базе сети LTE

Для когнитивной системы связи на базе сети LTE предлагается классификация передаваемых данных по трем основным группам [3] (рис. 1).

Служебные данные включают информацию: о соте (Physical Broadcast Channel, PBCH); о формате данных (Physical Control Format Indicator Channel, PCFICH); о распределении ресурсов (Physical Downlink Control Channel, PDCCH);

по обратной связи от PU (Physical Hybrid ARQ Indicator Channel, PHICH).

Вспомогательные данные включают: опорные сигналы (Reference Signal, RS); первичную (Primary Synchronization Signal, PSS) и вторичную (Secondary Synchronization Signal, SSS) синхропоследовательности.

Пользовательские данные содержат передаваемую через канал пользовательских данных (Physical Downlink Shared Channel, PDSCH) от базовой станции (Base Station, BS) к PU информацию, по которой анализируется нисходящая линия связи. Также пользовательские данные включают информацию, полученную с устройств SU.

**Признаки разделения данных пользователей**

Разделение типов данных предлагается осуществлять по виду применяемой модуляции и расположению на ресурсной сетке кадра LTE. Согласно спецификации для LTE служебные данные при передаче по нисходящей линии используют различные виды модуляции, что необходимо учитывать при классификации. В табл. 1 представлены виды модуляции передаваемых данных в LTE.

■ **Таблица 1.** Виды модуляции передаваемых данных в LTE

■ **Table 1.** Types of modulation for transmitted data in LTE

| Данные   | Тип применяемой модуляции                                   |
|--|---|
| Информация о соте (PBCH)                                 | QPSK  |
| Распределение ресурсов (PDCCH)                           | QPSK  |
| Данные для нескольких первичных пользователей (PMCH)     | QPSK, 16-QAM, 64-QAM  |
| Формат передаваемых данных (PCFICH)                      | QPSK  |
| Данные обратной связи от первичных пользователей (PHICH) | BPSK-модуляция каждой из квадратур с наложением кодов Уолша |
| Пользовательские данные (PDSCH)                          | QPSK, 16-QAM, 64-QAM  |
| Опорные сигналы (RS)                                     | Псевдослучайные последовательности (коды Голда)             |
| Первичная синхропоследовательность (PSS)                 | Последовательности Задова – Чу                              |
| Вторичная синхропоследовательность (SSS)                 | Псевдослучайные последовательности (m-последовательности)   |



■ **Рис. 1.** Классификация типов данных в когнитивной системе связи на базе LTE

■ **Fig. 1.** Data types classification in a cognitive communication LTE-based system

Позиции вспомогательных данных (RS, PSS и SSS) определены в структуре подкадра LTE спецификацией TS 36.211.

**Синхропоследовательности**

В частотной области PSS и SSS занимают центральных шесть ресурсных блоков (Resource Block, RB), каждый из которых состоит из 12 поднесущих и семи OFDM-символов, вне зависимости от ширины используемой полосы частот. Их расположение в структуре кадра LTE представлено на рис. 2.

**Опорные сигналы**

Опорные сигналы используются приемником для оценки искажений амплитуды и фазы принятого радиосигнала, что позволяет демодулировать сигналы с QAM-модуляцией. Для этого каждой соте (сектору) присваивается уникальный RS, который охватывает всю полосу частот и является псевдослучайной последовательностью.

Опорные сигналы генерируются на основе одного из 504 уникальных идентификаторов сотовой ячейки, поэтому при приеме PSS и SSS можно определить расположение всех RS. В нисходящем канале связи RS передаются в 1-м и 7-м ресурсных элементах (Resource Element, RE) 1-го OFDM-символа, 4-м и 10-м RE 5-го OFDM-символа. Расположение RS представлено на рис. 2.

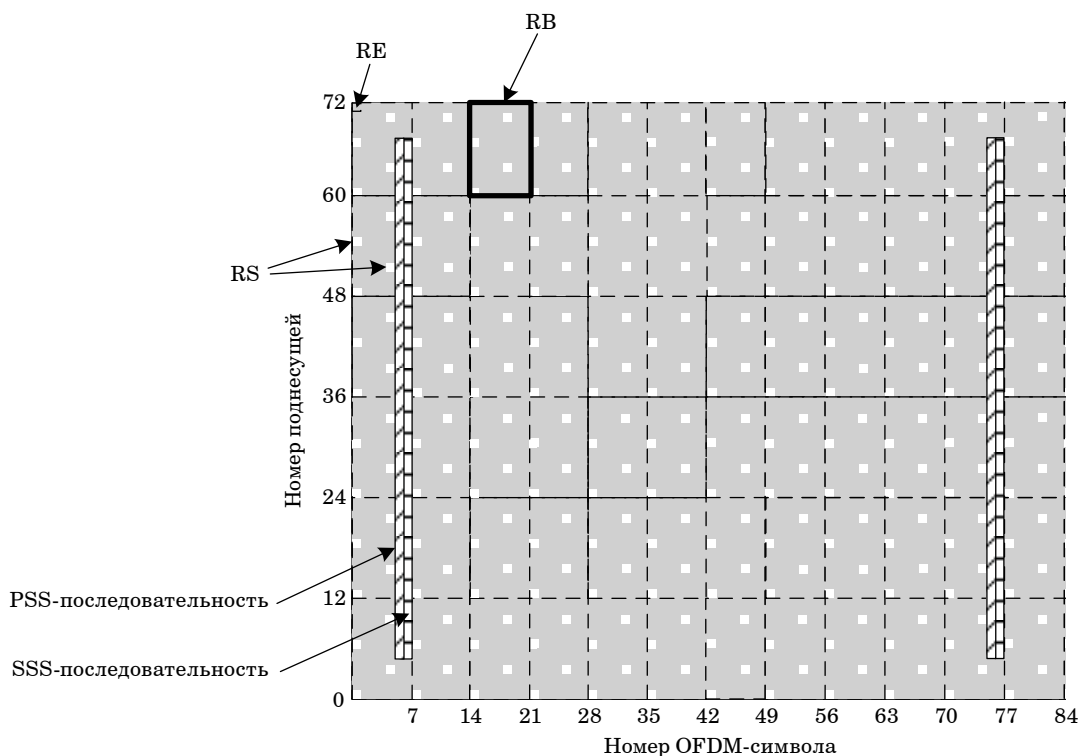
Расположение служебных данных в структуре подкадра LTE также определено спецификацией TS 36.211 системы связи LTE [3].

**Информация о соте**

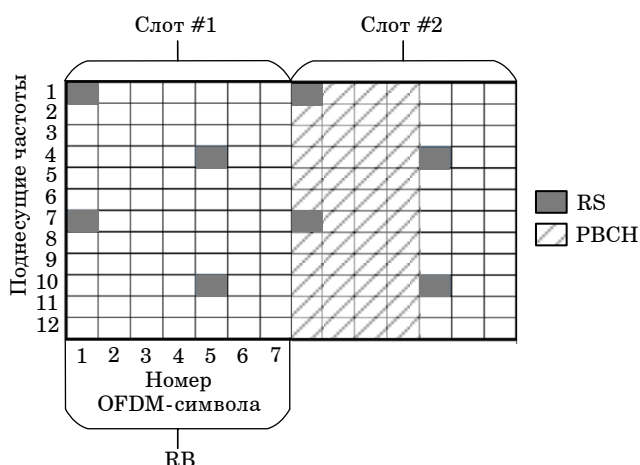
Данные PBCH предназначены для широковещательной трансляции основного блока служебной информации (Master Information Block, MIB), который состоит из 14 бит. В них содержится информация о ширине используемой полосы частот, размере канала PHICH, системном номере кадра. Расположение данных о соте показано на рис. 3.

**Информация о распределении ресурсов**

Данные PDCCH представляют основную служебную информацию для передачи сигналов управления, могут занимать до трех OFDM-символов и располагаются в кадре, начиная с первого OFDM-символа. Данные PDCCH содержат: управляющую информацию для декодирования канала пользовательских данных (Physical Downlink Shared Channel, PDSCH); индикацию физических блоков, с помощью которых абоненты передают данные в канале PDSCH; вид и позицию модуляции; управляющую информацию для восходящей передачи данных; основные и дополнительные команды управления мощностью передаваемых абонентами сигналов.



■ **Рис. 2.** Расположение синхропоследовательностей в структуре кадра LTE  
 ■ **Fig. 2.** Arrangement of sync sequences in the structure of one LTE frame



■ **Рис. 3.** Расположение данных PBCH  
 ■ **Fig. 3.** PBCH location

**Формат передаваемых данных**

Данные PCFICH необходимы для передачи информации о количестве выделенных RE для контрольного региона, которое может изменяться. Информация передается в первом OFDM-символе во всей используемой полосе частот. Основное назначение служебных данных и занимаемое ими количество RE приведено в [16, 17].

**Данные пользователей PU**

Передача данных PU по нисходящему каналу PDSCH осуществляется транспортными блоками в каждом подкадре LTE. До двух транспортных блоков передается одному абоненту (User Equipment, UE) в подкадре [18]. Транспортный блок содержит информационные биты для помехоустойчивого кодирования. PDSCH передаются с помощью различных режимов, «содержат блок системной информации (System Information Block, SIB) и данные сигналов вызова абонентов» [3]. Режимы передачи реализуются в схемах пространственной обработки с используемыми RS для демодуляции PDSCH и получения информации о качестве принятого сигнала с данными.

**Данные пользователей SU**

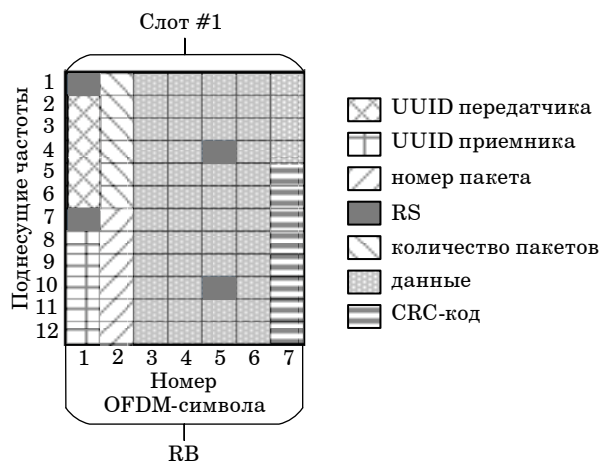
Для организации передачи данных между устройствами SU в сети LTE отсутствует в открытых источниках соответствующая спецификация. Авторы данной статьи предлагают для организации связи между SU использовать пакетный протокол передачи данных с определенной структурой и форматом кадра, длительностью один RB в ресурсной сетке подкадра LTE. Структура его включает: идентификационный номер посылки; идентификационный номер

пакета; уникальный идентификационный номер (Universally Unique Identifier, UUID) передатчика; UUID приемника, которому предназначен пакет; количество передаваемых пакетов; сами данные; биты проверки целостности данных, сформированные по алгоритму (Cyclic redundancy check, CRC) [3].

Resource Block состоит из 12 поднесущих продолжительностью семь OFDM-символов, что соответствует 84 RE, каждый из которых представляет комплексное число, полученное при модуляции 16-QAM. Также принято, что каждые семь OFDM-символов составляют один слот, а два подряд идущих слота образуют один подкадр. Следовательно, каждый RE содержит 4 бита переносимой информации. Итого, RB способен включить  $84 \times 4 = 336$  бит. Учитывая, что в нем содержится четыре опорных символа, для передачи доступно всего 320 бит. В табл. 2 переведена структура кадра с побитовым представлением передаваемых полей. Структура одного отдельного кадра сигнала SU из пакета передаваемых данных изображена на рис. 4.

■ **Таблица 2.** Битовая структура кадра данных SU  
 ■ **Table 2.** Bit structure of the SU data frame

| Параметр           | Количество бит | Номера занимаемых RE в блоке |
|--------------------|----------------|------------------------------|
| Количество пакетов | 20             | 2, 3, 4, 5, 6                |
| Номер пакета       | 20             | 8, 9, 10, 11, 12             |
| UUID передатчика   | 24             | 13, 14, 15, 16, 17, 18       |
| UUID приемника     | 24             | 19, 20, 21, 22, 23, 24       |
| Данные             | 200            | 25–79                        |
| CRC-код            | 32             | 80, 81, 82, 83, 84           |
| RS                 | 16             | 1, 7, 52, 58                 |



■ **Рис. 4.** Структура кадра передаваемого сигнала SU  
 ■ **Fig. 4.** The frame structure of the SU transmitted signal

**Модель разделения данных**

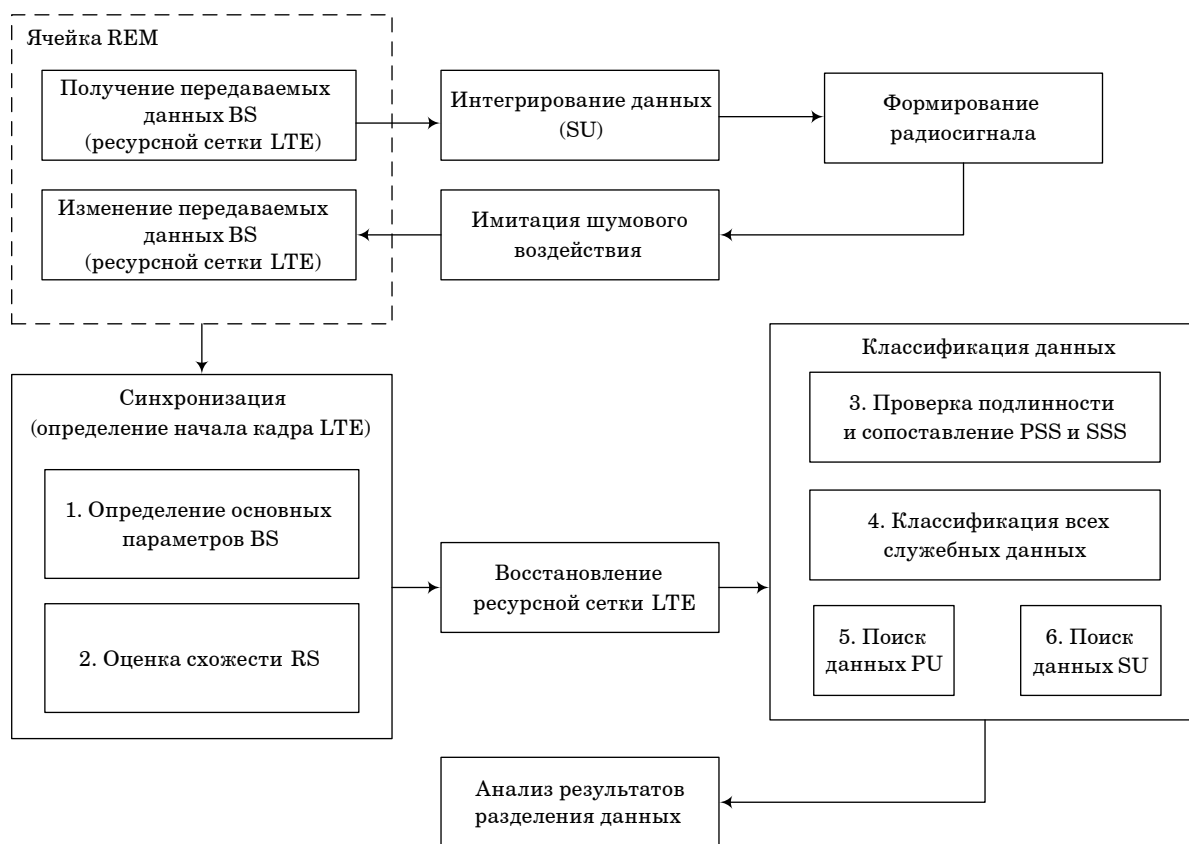
Разделение данных в когнитивной системе связи на базе сотовой сети LTE следует рассматривать с учетом особенностей формирования карты радиосреды (Radio Environment Map, REM) [19]. Составление REM осуществляется на основе моделирования радиосигналов в частотном диапазоне от 1720 до 1835 МГц, их распространения на местности с учетом сценариев перемещения и активности PU. Карта представляет матрицу заданного размера, каждая ячейка которой имитирует приемник радиосигнала с соответствующими пространственными координатами. В ячейках хранится информация о спектральном составе принятого радиосигнала LTE. Входными данными модели разделения являются хранящиеся в ячейке REM значения и данные SU в период его активности согласно сценарию связи. Общая структура модели разделения данных PU и SU представлена на рис. 5.

В качестве PU в модели использованы UE и BS, которые обмениваются данными в сети LTE по восходящей и нисходящей линии связи. Следует отметить, что при перемещении в пространстве UE способен переключаться на дру-

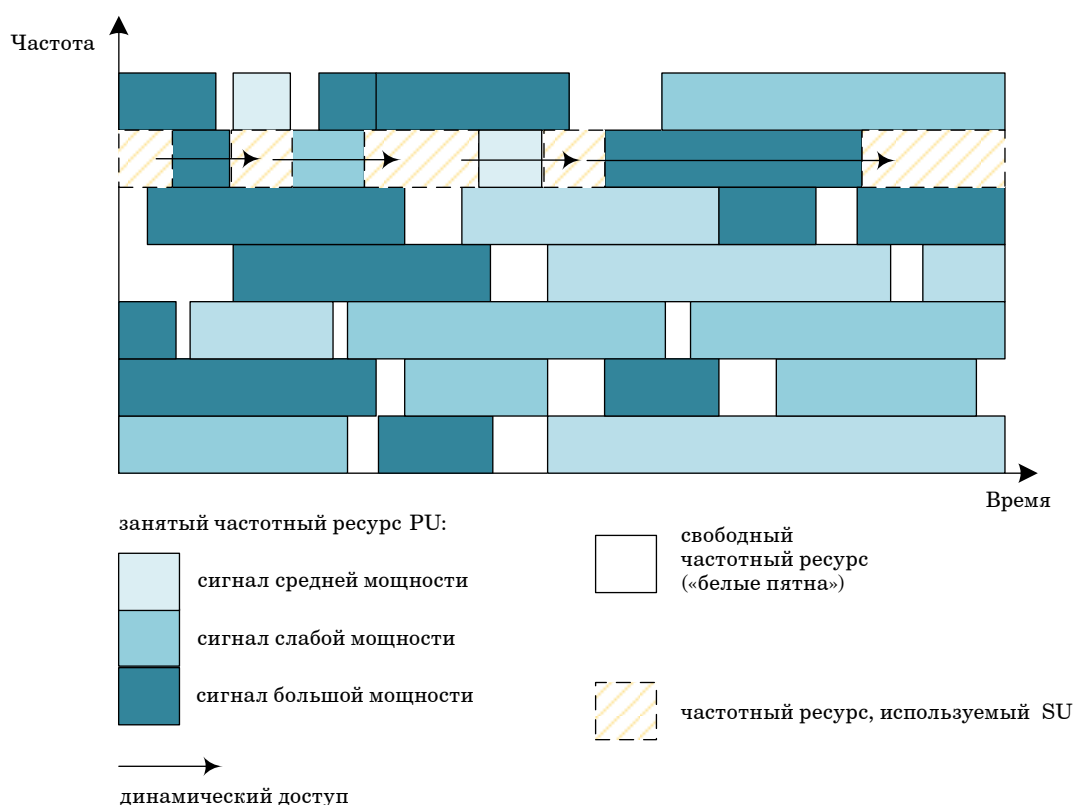
гую BS согласно критериям хендвера (handover) из модели [16] и тем самым перераспределять занятые ресурсы в частотном диапазоне.

В качестве SU выступают когнитивные устройства, использующие DSA для осуществления передачи данных между собой по рабочим каналам LTE-сети. Такие SU располагаются в отдельных ячейках REM и передают данные согласно сценарию их активности, но с рядом ограничений, которые связаны с возможностью использовать только свободные частотные ресурсы и уровнем сигналов, вносимых в канал передачи данных [3].

Первоначальным этапом является получение данных, хранимых в ячейке REM для одной BS, с последующим их изменением. Интеграция данных SU в каждый следующий кадр LTE осуществляется путем использования «белых пятен» лишь в ограниченной частотной полосе. На рис. 6 показан принцип внедрения данных SU во второй сверху частотный диапазон с условным размером 12 поднесущих (один RB). Это ограничение введено для оценки точности разделения сигналов PU и SU и прогнозирования свободных RB за ограниченный промежуток времени 1 мс. Данные SU передаются пакетами, где каждый



■ **Рис. 5.** Модель разделения данных PU и SU  
 ■ **Fig. 5.** The structure of the PU and SU data separation model



■ **Рис. 6.** Динамическое использование «белых пятен» SU в модели  
 ■ **Fig. 6.** Dynamic use of SU users frequency resource for model

пакет занимает один RB и может располагаться через несколько таких блоков. В качестве передаваемых данных (сообщения) будет использоваться случайный набор битов, который займет весь объем найденного свободного ресурса (см. рис. 4).

На следующем этапе формируется передаваемый радиосигнал, который подвергается шумовому воздействию, и в виде радиочастотного спектра заменяет выбранный в ячейке REM сигнал от BS.

Имитация приема включает синхронизацию и восстановление переданного кадра LTE (ресурсной сетки) на основе методики, описанной в спецификации TS 36.211. На заключительном шаге выполняется классификация принятых данных PU и SU, а также оценка точности их разделения.

### Алгоритм разделения данных

Классификация данных по типу пользователя в кадре LTE осуществляется на основе анализа ресурсной сетки и вида применяемой модуляции. Алгоритм разделения данных состоит из следующих этапов.

1. Определение основных параметров BS. Для выполнения последующих этапов классификации данных необходимо иметь информацию об основных статических параметрах BS, которые определяются в ходе анализа принятого радиосигнала.

2. Поиск и локализация RS на ресурсной сетке, оценка их схожести согласно спецификации LTE. На данном этапе после поиска сравниваются индексы обнаруженных сигналов и RS исходя из параметров BS, которые должны быть расположены в заданных позициях на сетке.

3. Проверка подлинности и сопоставление PSS и SSS согласно статическим параметрам BS. В случае успеха эти данные относятся к соответствующему типу разработанной модели разделения данных PU и SU.

4. Классификация и выделение служебных данных по их расположению и виду модуляции, а именно определение PBCH, PCFICH, PDCCH и PDSCH.

5. Поиск данных PU, который основывается на декодированной информации из блоков MIB и SIB, занятых для передачи данных пользователей, сопоставление с реальными данными, а также проверка вида модуляции в местах их расположения. Если индексы не соответствуют по-



зиции данных, RE присваивается неопределенный тип. При отсутствии данных на позициях, в которых они должны быть согласно системной информации, RE относятся к типу неиспользуемые (незаняты).

6. Поиск данных SU. Выполняется по всей ресурсной сетке перебором всех RB. Каждый такой блок анализируется, и определяется вид используемой в нем модуляции. Если в RB применяется несколько ее видов, то он не может быть занят данными SU. Если модуляция соответствует 16-QAM, то декодированный поток бит из этого блока проходит оценку корреляции с данными передатчика и приемника. В когнитивной системе связи все устройства SU известны, а их UUID определены. При правильном обнаружении UUID передатчика или приемника SU весь RB относится к типу пользовательских данных SU.

### Программная реализация модели

Модель разделения данных PU и SU разработана с использованием программной среды MatLab для исследований по оценке точности разделения и возможности планирования режима совместного доступа PU и SU.

### Получение передаваемых данных BS

В ходе выполнения данного этапа обеспечивается возможность импортировать необходимую информацию из REM либо генерировать данные PU с псевдослучайным распределением частотных ресурсов для последующей их передачи. В случае генерации для формирования всей структуры кадра LTE необходимо задать основные параметры BS: идентификационный номер BS; число подкадров; количество используемых RB; номер кадра и подкадра; количество используемых антенн; тип и длину циклического префикса; режим доступа к ресурсам (TDMA или FDMA).

Формирование имитационного радиосигнала LTE по нисходящей линии связи осуществляется функцией *lteRMCDLTool()* с заданными конфигурацией и массивом ячеек, содержащими информационные биты. В дальнейшем они циклически заполняют весь выделенный объем частотного ресурса. Пример формирования имитационного радиосигнала описан в листинге 1.

```

Листинг 1
% Параметры базовой станции
rmc = lteRMCDL('R.6'); % Генерация параметров базовой станции из модели R.6
rmc.NCellID = 1; % Идентификационный номер базовой станции
rmc.TotSubframes = 10; % Число сгенерированных подкадров (10 подкадров = 1 кадр)
    
```

```

rmc.NSubframe = 0;
rmc.PDSCH.RNTI = 61; % Идентификатор ресурсного блока данных
rmc.NFrame = 0; % Номер кадра
rmc.PDSCH.PRBSSet = RB_DL;
rmc.NDLRB = NDLRB;
rmc.CellRefP = 1;
rmc.PDSCH.RVSeq = [0 1 2 3];
rmc.OCNGPDSCH.Modulation = '16QAM';
% Генерация выходного сигнала
[signal, txGrid, rmc_out] = lteRMCDLTool(rmc,[1; 1; 0; 1]);
    
```

Сформированная ресурсная сетка для указанного примера в листинге 1 показана на рис. 7, а.

### Интегрирование данных вторичного пользователя

Данные SU встраиваются в свободный RB. Поиск такого блока осуществляется с 13-й по 24-ю поднесущую перебором всего кадра с выявлением всех незанятых RE. Первый найденный свободный RB будет использован для передачи данных SU. Эти ограничения связаны прежде всего с дальнейшими исследованиями по прогнозированию свободных ресурсов для передачи данных вторичными пользователями. На рис. 7, б представлена ресурсная сетка с встроенными данными SU, которые выделены белым прямоугольником.

### Имитация шумового воздействия

Шумовое воздействие имитируется путем наложения белого шума на радиосигнал LTE с заданным коэффициентом SNR. Для этого сформированная ресурсная сетка с интегрированными данными SU преобразуется в радиосигнал LTE. В модели уровень подмешиваемого шума задается параметром SNR в пределах от -15 до 30 дБ для исследований разделения данных PU и SU при шумовом воздействии. На рис. 8, а-г показана сгенерированная ресурсная сетка сигнала LTE после данного шага с разными значениями SNR. Пример наложения белого шума на радиосигнал LTE представлен в листинге 2.

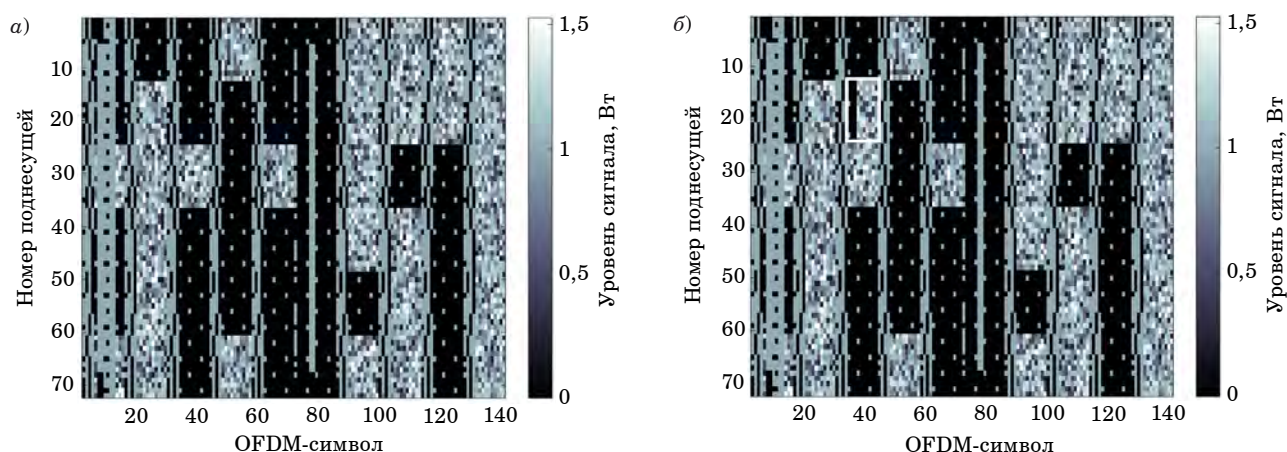
```

Листинг 2
% Наложение белого шума
[waveform,info] = lteOFDMModulate(rmc, txGrid);
eNodeBOutput = awgn(waveform, 5, 'measured');
recive = eNodeBOutput;
[rmc_out, rxgrid_out1] = module_awg(recive, rmc);
    
```

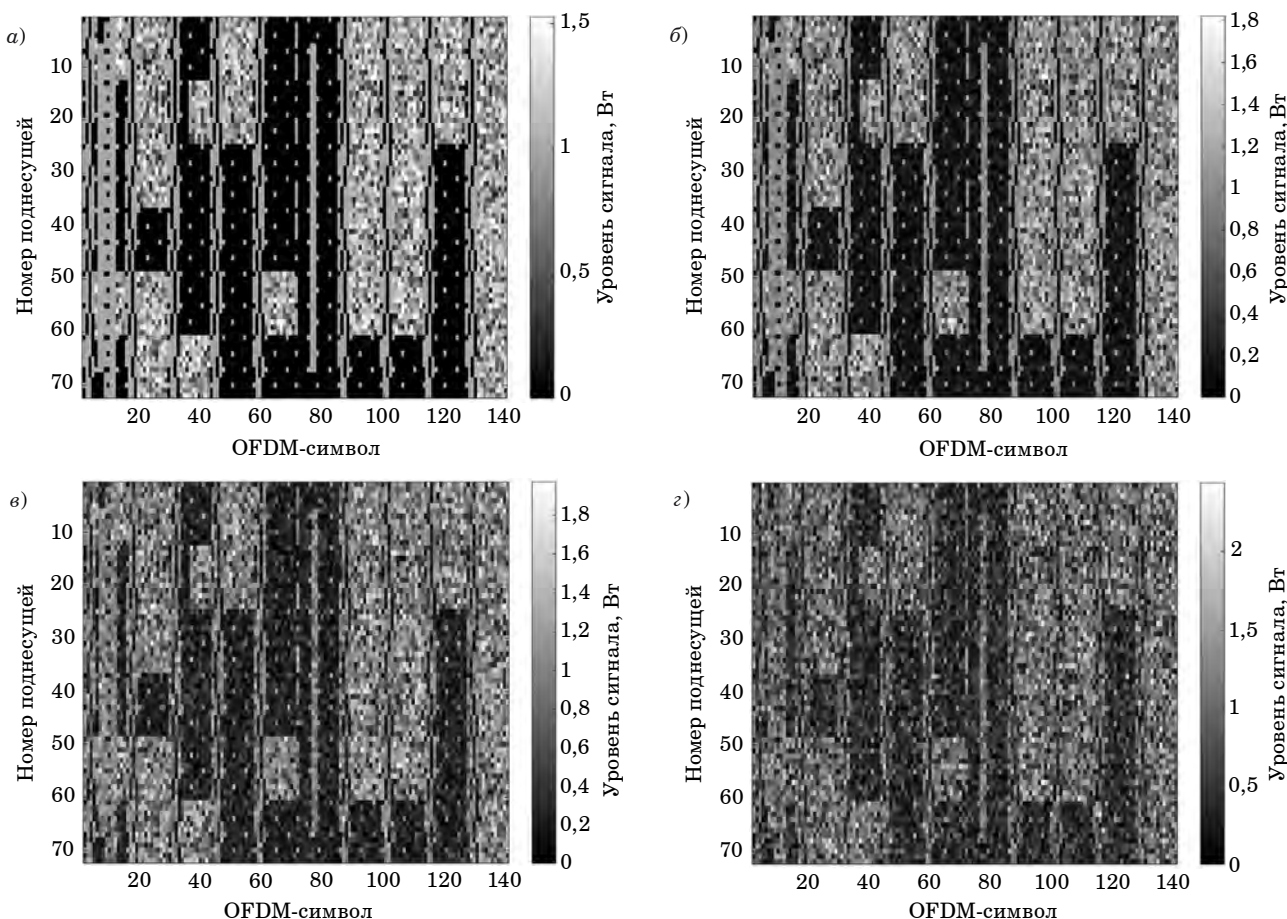
### Синхронизация по началу кадра

Для обеспечения приема переданных данных определяется начало кадра LTE путем выполнения синхронизации по PSS- и SSS-последовательностям [3]. Синхронизация по





■ **Рис. 7.** Сгенерированная ресурсная сетка LTE-сигнала от BS: *a* – содержит только данные PU; *b* – содержит данные PU и SU  
 ■ **Fig. 7.** Generated LTE signal resource grid from the BS: *a* – PU data only; *b* – PU and SU data



■ **Рис. 8.** Сгенерированная ресурсная сетка радиосигнала LTE после обработки шумом: *a* – без наложения шума; *b* – SNR = 10 дБ; *в* – SNR = 5 дБ; *г* – SNR = 1 дБ  
 ■ **Fig. 8.** Generated resource grid of the LTE signal after noise processing: *a* – without noise overlay; *b* – SNR = 10 dB; *в* – SNR = 5 dB; *г* – SNR = 1 dB

слотам и OFDM-символам выполняется на основе PSS. Следует отметить, что по ее значениям определяется физический идентификатор соты

(Physical layer Cell Identity, PCI). Передача всех битов PSS локализована в двух подкадрах (0-м и 5-м) каждого кадра, которые расположены

в 62 центральных поднесущих в последнем OFDM-символе. Биты SSS передаются в предпоследних OFDM-символах тех же подкадров и тоже занимают 62 центральных поднесущие. Значения битов SSS устанавливают группу для идентификатора соты в диапазоне от 0 до 167, по этой группе вычисляется номер соты.

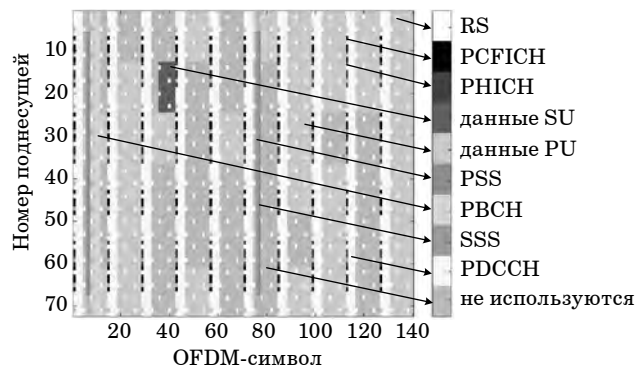
**Восстановление ресурсной сетки**

Полное восстановление ресурсной сетки можно выполнить путем декодирования блоков MIB и SIB. Расположение блока MIB в кадре LTE фиксированно, он содержит информацию о статических системных параметрах: количестве RB; числе антенн для нисходящей линии связи; текущем номере кадра LTE; данных подтверждения приема пакетов, передаваемых от UE к BS. Блоки SIB (1–16) содержат набор системных параметров и данные PU, с определенной периодичностью они могут занимать различные RB в кадре LTE.

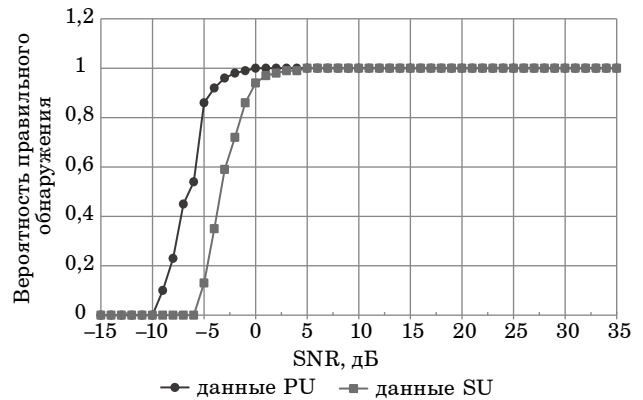
Результат выполнения классификации представлен на рис. 9.

**Анализ полученных результатов разделения данных**

С использованием разработанной модели сформировано 1000 кадров LTE с данными PU, в которые включена информация SU. Каждый кадр подвергался наложению шума в диапазоне значений SNR от -15 до 30 дБ с шагом 1 дБ. Затем выполнялось разделение данных PU и SU согласно описанной выше модели с оценкой вероятности успешного декодирования данных при заданной вероятности ложного декодирования 1 % и временем анализа 1 мс. «Оценка рассчитывалась как отношение числа корректных считываний данных в MIB и SIB записях (поскольку они содержат информацию о местопо-



■ **Рис. 9.** Структура кадра LTE с классификацией по типу данных  
 ■ **Fig. 9.** LTE frame structure classified by data type



■ **Рис. 10.** Вероятности корректного декодирования данных PU и SU  
 ■ **Fig. 10.** Probabilities of correct PU and SU data decoding

жения пользовательских данных PU) к общему количеству экспериментальных исследований при заданном SNR» [3]. Аналогичным образом производилась оценка корректного декодирования данных SU. Результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 10.

Анализ рис. 10 свидетельствует о корректном определении PU при значениях SNR менее 5 дБ, что обусловлено заданными параметрами BS, шестью RB, а также особенностью формируемого в модели радиосигнала LTE без смещения по частоте и времени. Значение вероятности правильного обнаружения данных PU 0,5 достигается при SNR = -6,5 дБ. Данные SU с вероятностью 0,5 определяются при SNR = -3,5 дБ. Это обусловлено отсутствием обработки помехоустойчивым кодом при формировании кадра данных SU. Полученные значения согласуются с результатами, представленными в работе [8], но обеспечивают вероятность правильного обнаружения с пороговым значением 0,5 при более низком значении SNR с заданной вероятностью ложного обнаружения 1 % и временем анализа 1 мс.

**Заключение**

Предложена классификация передаваемых данных по типам в когнитивной системе связи на базе LTE. С учетом этого определены признаки разделения данных пользователей в когнитивной системе связи на базе LTE-сети. Для этого используется вид применяемой модуляции и местоположение на ресурсной сетке кадра LTE. Разработан алгоритм разделения, состоящий из шести этапов, который лег в основу программной реализации модели, реализованной в пакете MatLab. Выполнено имитационное моделирование с шумовым воздействием на формируе-

мый радиосигнал. Разработанная модель разделения данных в частотном диапазоне от 1720 до 1835 МГц обеспечивает более высокую точность при сравнимом времени анализа. Представленные результаты могут быть использо-

ваны при проектировании систем когнитивной связи для прогнозирования занятости частотных ресурсов и планирования совместного доступа к ним вторичных пользователей.

## Литература

1. Khan M., Khan L., Gul N., Amir M., Kim J., Kim S. Support vector machine-based classification of malicious users in cognitive radio networks. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2020, pp. 1–11. doi:10.1155/2020/8846948
2. Косичкина Т. П., Сперанский В. С., Спириин А. П., Фролов А. А. Когнитивные сверхширокополосные радиосистемы как метод повышения эффективности использования радиочастотного спектра. *Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт*, 2015, т. 9, № 12, с. 37–43.
3. Чертков В. М., Богущ Р. П., Адамовский Е. Р., Наумович Н. М., Стежко И. К. Имитационное моделирование разделения данных первичных и вторичных пользователей в когнитивной системе связи. *Информатика: проблемы, методы, технологии: материалы XXIII Междунар. науч.-практ. конф. им. Э. К. Алгазинова*, Воронеж, 15–17 февраля 2023 г., 2023, с. 471–477.
4. Veibei W., Ray Liu K. J. Advances in cognitive radio networks: A survey. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2011, vol. 5, no. 1, pp. 5–23. doi:10.1109/JSTSP.2010.2093210
5. Головской В. А. О моделях в исследованиях когнитивных радиосистем. *Тр. Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи и информатики*, 2022, № 2, с. 8–11.
6. Гринин Е. Е., Антиликаторов А. Б., Четкин О. В., Новикова И. А. Исследование алгоритмов обнаружения сигналов в когнитивных радиосетях. *Вестник Воронежского государственного технического университета*, 2021, т. 17, № 2, с. 101–106. doi:10.36622/VSTU.2021.17.2.016
7. Кандаурова Е. О., Чиров Д. С., Базылев М. В. Адаптивный алгоритм обнаружения радиосигналов в системах когнитивного радио. *Электросвязь*, 2022, № 10, с. 44–51. doi:10.34832/ELSV2022.35.10.007
8. Guibène W., Slock D. Signal separation and classification algorithm for cognitive radio networks. *2012 Intern. Symp. on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, Paris, France, 2012, pp. 301–305. doi:10.1109/ISWCS.2012.6328378
9. Thilina K. M., Choi K. W., Saquib N., Hossain E. Pattern classification techniques for cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks: SVM and W-KNN approaches. *2012 IEEE Global Communica-tions Conf. (GLOBECOM)*, Anaheim, CA, USA, 2012, pp. 1260–1265. doi:10.1109/GLOCOM.2012.6503286
10. Pandit S., Singh G. An overview of spectrum sharing techniques in cognitive radio communication system. *Wireless Networks*, 2017, no. 23, pp. 497–518. doi:10.1007/s11276-015-1171-1
11. Бахтин А. А., Волков А. С., Солодков А. В., Свиридов И. А. Система распознавания модуляции сигналов на основе нейронной сети с использованием ПЛИС. *Тр. МАИ*, 2021, № 121, с. 15. doi:10.34759/trd-2021-121-13
12. Головской В. А. Об идентификации модели ослабления при распространении радиоволн. *Научно-технические технологии в космических исследованиях Земли*, 2022, т. 14, № 5, с. 38–44. doi:10.36724/2409-5419-2022-14-5-38-44
13. Гребешков А. Ю., Зарипова Э. Р., Зуев А. В. Исследование времени переключения абонентского устройства между сетью LTE и когнитивной радиосетью. *Инфокоммуникационные технологии*, 2018, т. 16, № 1, с. 108–116. doi:10.18469/ikt.2018.16.1.12
14. Головской В. А., Филинов В. С. Предложения по созданию когнитивных систем передачи данных для робототехнических комплексов. *Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт*, 2019, т. 13, № 9, с. 22–29. doi:10.24411/2072-8735-2018-10306
15. Жук А. П., Студеникин А. В., Кузин А. В., Лебедев Д. А. Алгоритм повышения структурной скрытности систем передачи информации с кодовым разделением каналов. *Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий (РЭУС-2022): докл. Всерос. конф.*, Москва, 08–10 июня 2022 г., вып. LXXVII, М., 2022, с. 175–180.
16. Sesia S., Toufik I., Baker M. *LTE – the UMTS long term evolution: from theory to practice*. 2nd ed. Wiley, 2011. 752 p. doi:10.1002/9780470978504
17. Дроздова В. Г., Белов М. А. Оценка пропускной способности сетей LTE. *Мобильные телекоммуникации*, 2012, № 5, с. 20–22.
18. Скрынников В. Г. *Радиосистемы UMTS/LTE. Теория и практика*. Спорт и культура, 2012. 864 с.
19. 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. doi:10.20537/2076-7633-2022-14-1-127-146

UDC 621.396.218:004.94

doi:10.31799/1684-8853-2023-5-43-54

EDN: GUFVYP

**User data separation model in an LTE-based cognitive communication system**V. M. Chertkov<sup>a</sup>, PhD, Tech., Associate Professor, orcid.org/ 0000-0002-2603-9873, v.chertkov@psu.byR. P. Bohush<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Associate Professor, orcid.org/ 0000-0002-6609-5810Y. R. Adamovskiy<sup>a</sup>, Post-Graduate Student, orcid.org/ 0000-0003-1044-8741<sup>a</sup>Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk, 29, Blokhin St., 211440, Novopolotsk, Republic of Belarus

**Introduction:** The development of wireless communication systems gives rise to the problem of spectrum shortage, for the solution of which the cognitive radio use proves to be promising. One of the key features of this technology is the dynamic allocation and access to radio frequency channels. The identification of frequency resources that are not occupied by primary users at the necessary time points is carried out with the use of specialized algorithms for signal analysis and with the separation of transmitted and accumulated data, interference being taken into account. The efficiency of these algorithms largely determines the speed and accuracy of information transfer between secondary users. **Purpose:** To develop a data classification model based on the modulation type for an LTE-based cognitive communication system. To create a model for separating primary and secondary user data to ensure sharing mode planning. **Results:** We develop a classification model and propose some features that can be used to separate primary and secondary user signals. We present an algorithm for classifying data in a frame of an LTE network signal. We implement the MatLab software as a simulation model component. The analysis of the simulation results shows that the primary and secondary user data with a signal-to-noise ratio of at least 1 dB are correctly decoded with a probability of 0.98 with a given false detection probability of 0.01 in the frequency range from 1720 to 1835 MHz with the analysis time of 1 ms. **Practical relevance:** The application of the results obtained makes it possible to accurately estimate the spectrum occupancy taking into account the primary and secondary user data, as well as to plan the access of secondary users, which will improve the performance of cognitive communication systems.

**Keywords** – data classification, cognitive radio, primary and secondary users, dynamic spectrum access.

**For citation:** Chertkov V. M., Bohush R. P., Adamovskiy Y. R. User data separation model in an LTE-based cognitive communication system. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2023, no. 5, pp. 43–54 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2023-5-43-54, EDN: GUFVYP

**References**

- Khan M., Khan L., Gul N., Amir M., Kim J., Kim S. Support vector machine-based classification of malicious users in cognitive radio networks. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2020, pp. 1–11. doi:10.1155/2020/8846948
- Kosichkina T. P., Speransky V. S., Spirin A. P., Frolov A. A. Cognitive uwb radio systems as a method of improving the efficiency of radio spectrum use. *T-Comm*, 2015, vol. 9, no. 12, pp. 37–43 (In Russian).
- Chertkov V. M., Bohush R. P., Adamovskiy Y. R., Naumovich N. M., Stezhko I. K. Simulation modeling of data separation of primary and secondary users in a cognitive communication system. *Materialy XXIII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii im. E. K. Algazinova "Informatika: problemy, metody, tekhnologii"* [Materials of the XXIII Intern. Scient. and Pract. Conf. named after E. K. Algazinova "Informatics: problems, methods, technologies"]. Voronezh, 2023, pp. 471–477 (In Russian).
- Beibei W., Ray Liu K. J. Advances in cognitive radio networks: A survey. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2011, vol. 5, no. 1, pp. 5–23. doi:10.1109/JSTSP.2010.2093210
- Golovskoy V. A. About models in research of cognitive radio systems. *Trudy Severo-Kavkazskogo filiala Moskovskogo tekhnicheskogo universiteta svyazi i informatiki*, 2022, no. 2, pp. 8–11 (In Russian).
- Grinin E. E., Antilikatorov A. B., Chetkin O. V., Novikova I. A. Research of signal detection algorithms in cognitive radio networks. *Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2021, vol. 17, no. 2, pp. 101–106 (In Russian). doi:10.36622/VSTU.2021.17.2.016
- Kandaurova E. O., Chirov D. S., Bazylev M. V. An adaptive algorithm for detecting radio signals in cognitive radio systems. *Elektrosvyaz*, 2022, no. 10, pp. 44–51 (In Russian). doi:10.34832/ELSV2022.35.10.007
- Guibène W., Slock D. Signal separation and classification algorithm for cognitive radio networks. *2012 Intern. Symp. on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, Paris, France, 2012, pp. 301–305. doi:10.1109/ISWCS.2012.6328378
- Thilina K. M., Choi K. W., Saquib N., Hossain E. Pattern classification techniques for cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks: SVM and W-KNN approaches. *2012 IEEE Global Communications Conf. (GLOBECOM)*, Anaheim, CA, USA, 2012, pp. 1260–1265. doi:10.1109/GLOCOM.2012.6503286
- Pandit S., Singh G. An overview of spectrum sharing techniques in cognitive radio communication system. *Wireless Networks*, 2017, no. 23, pp. 497–518. doi:10.1007/s11276-015-1171-1
- Bakhtin A. A., Volkov A. S., Solodkov A. V., Sviridov I. A. A neural network-based signal modulation recognition system implemented on a FPGA. *Trudy MAI*, 2021, no. 121, pp. 1–5 (In Russian). doi:10.34759/trd-2021-121-13
- Golovskoy V. A. On the identification of the attenuation model in the propagation of radio waves. *H & ES Reserch*, 2022, vol. 14, no. 5, pp. 38–44 (In Russian). doi:10.36724/2409-5419-2022-14-5-38-44
- Grebeshkov A. Y., Zaripova E. R., Zuev A. V. Estimation of user equipment handover time from LTE network to cognitive radio network. *Infokommunikacionnye tekhnologii*, 2018, vol. 16, no. 1, pp. 108–116 (In Russian). doi:10.18469/ikt.2018.16.1.12
- Golovskoy V. A., Filinov V. S. Proposals for the creation of cognitive data transmission systems for robotic complex. *T-Comm*, 2019, vol. 13, no. 9, pp. 22–29 (In Russian). doi:10.24411/2072-8735-2018-10306
- Zhuk A. P., Studenikin A. V., Kuzin A. V., Lebedev D. A. An algorithm for increasing the structural secrecy of information transmission systems with code separation of channels. *Doklady Vserossiyskoy konferencii "Radioelektronnye ustrojstva i sistemy dlya infokommunikacionnyh tekhnologij" (REUS-2022)* [Reports of the All-Russian Conf. "Radio-electronic devices and systems for information and communication technologies" (REDS-2022)]. Moscow, 2022, pp. 175–180 (In Russian).
- Sesia S., Toufik I., Baker M. *LTE – the UMTS long term evolution: from theory to practice*. 2nd ed. Wiley, 2011. 752 p. doi:10.1002/9780470978504
- Drozhdova V. G., Belov M. A. LTE network throughput estimation. *Mobile Telecommunications*, 2012, no. 5, pp. 20–22 (In Russian).
- Skrynnikov V. G. *Radiopodsistemy UMTS/LTE. Teoriya i praktika* [UMTS/LTE radio subsystems. Theory and practice]. Sport i kul'tura Publ., 2012. 864 p. (In Russian).
- Adamovskiy Y. R., Chertkov V. M., Bohush R. P. Model for building of the radio environment map for cognitive communication system based on LTE. *Computer Research and Modeling*, 2022, vol. 14, no. 1, pp. 127–146 (In Russian). doi:10.20537/2076-7633-2022-14-1-127-146