

На правах рукописи

Кандаурова Екатерина Олеговна

**Разработка метода интеллектуальной перестройки рабочих частот в  
системах когнитивного радио**

Специальность 2.2.15 –  
Системы, сети и устройства телекоммуникаций

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва, 2024

Работа выполнена в ордена Трудового Красного Знамени федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» (МТУСИ)

<b>Научный руководитель:</b>	<b>Чиров Денис Сергеевич</b> – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Радиотехнические системы» МТУСИ.
<b>Официальные оппоненты:</b>	<b>Гребешков Александр Юрьевич</b> – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры сетей и систем связи Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики» (ФГБОУ ВО ПГУТИ).  <b>Тоискин Василий Евгеньевич</b> – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные системы боевого управления» Филиала федерального государственного казенного военного образовательного учреждения высшего образования «Военная академия Ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого» Министерства обороны Российской Федерации в г. Серпухове.
<b>Ведущая организация:</b>	ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина»

Защита диссертации состоится «24» апреля 2024 года в 13:00 на заседании диссертационного совета по защите докторских и кандидатских диссертаций 55.2.002.01 при ордена Трудового Красного Знамени федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» по адресу: 111024, г. Москва, ул. Авиамоторная, д. 8-а, МТУСИ, ауд. А-211.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте МТУСИ:  
<http://www.srd-mtuci.ru/images/Dis-Kandaurova/dis-Kandaurova.pdf>  
 Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

Учёный секретарь  
 диссертационного совета 55.2.002.01  
 доктор технических наук, доцент \_\_\_\_\_ М.В. Терешонок

## **Общая характеристика работы**

### **Актуальность работы.**

В последние десятилетия активное внедрение новых технологий связи, а также рост объема пользовательского трафика и количества абонентов, привели к высокой степени загруженности радиочастотного спектра (РЧС). Данный факт привел к проблеме дефицита частотного ресурса, повлекшей за собой снижение качества услуг связи.

В результате современные и будущие системы связи не могут продолжать основываться на существующем, стационарном методе использования РЧС, где распределение диапазонов частот между организациями производится путем лицензирования и выдачи разрешения. Из этого следует, что при внедрении новых систем связи необходимо перейти к технологии динамического доступа к спектру (ДДС).

Результаты исследований, направленные на анализ загруженности РЧС, показали, что первичные пользователи (ПП), обладающие разрешением на проведение сеансов связи в предоставленном им диапазоне частот, не всегда обеспечивают в полной мере эффективное использование РЧС. Для некоторых участков спектра ПП были обнаружены длительные временные интервалы, в течение которых частотный ресурс не был задействован. Все это послужило созданию технологии ДДС, основанной на концепции использования вторичными пользователями (ВП), не имеющими разрешения, временно свободных частотных ресурсов ПП, при условии соблюдения прав и сохранения качества связи ПП. Тем самым способствуя повышению эффективности использования частотного ресурса и решению проблемы нехватки РЧС.

Основными системами связи, использующими данную технологию, являются системы когнитивного радио (СКР). СКР в настоящее время активно развиваются и востребованы мировыми производителями систем связи и телекоммуникаций. Согласно рекомендациям МСЭ-R М.2330-0 «Когнитивные системы радиосвязи в наземной подвижной службе» радиоустройства с программно-определяемыми свойствами и характеристиками (Software Defined Radio, SDR) признаны передовой технологией для реализации СКР. SDR способны осуществлять радиомониторинг спектра, автономно и динамически изменять собственные параметры работы и могут адаптироваться к новым технологиям, тем самым реализовывая необходимые для разработки СКР функции: мониторинг, адаптация, реконфигурация.

Для реализации технологии ДДС необходимо решить две задачи: получить информацию об использовании спектра ПП и разработать метод предоставления ВП свободного участка спектра. Таким образом, наиболее перспективным направлением для решения проблемы дефицита РЧС является разработка алгоритмов оценки состояния занятости спектра ПП и

предоставления частотного ресурса ВП, при условии сохранения прав и качества связи ПП.

### **Степень разработанности темы.**

Термин когнитивное радио (Cognitive radio) впервые был предложен Джозефом Митолой в 1998 г., а опубликован в 1999 г. в статье Д. Митолы и Джеральда К. Магуайра. Однако, исследования по измерению спектра для количественной оценки его использования как в лицензионном, так и в нелицензионном диапазоне проводились еще в 1995 г. Поэтому, первые работы, посвященные технологии ДДС, появились в конце 90-х годов прошлого века.

Значительный вклад в решение задач эффективного использования радиочастотного спектра, а также разработки и развития интеллектуальных беспроводных систем связи, сетей следующего поколения, программно-определяемых радиосистем, внесли результаты исследований, полученные отечественными учеными Аджемовым С.С., Бутенко В.В., Богуш Р.П., Шинаковым Ю.С., Бакулиным М.Г., а также зарубежными учеными J. Mitola, A. Wyglinski, M. Nekovee, Y. T. Hou, S. Haykin, E. Hossain.

Интенсивные исследования технологии ДДС, а с ними и публикационная активность по данной теме, начались с 2005 г. и достигли своего максимума в количестве 91 публикации в 2010 г. В период 2007 – 2015 гг. среднее число публикаций составляло примерно 74 статьи в год, и около 41 публикации в год за период 2016 – 2022 гг. На рисунке 1 представлен график распределения публикации статей по теме ДДС по годам. В наиболее цитируемых работах, опубликованных в период 2007 – 2012 гг., описываются основные стратегии реализации ДДС.

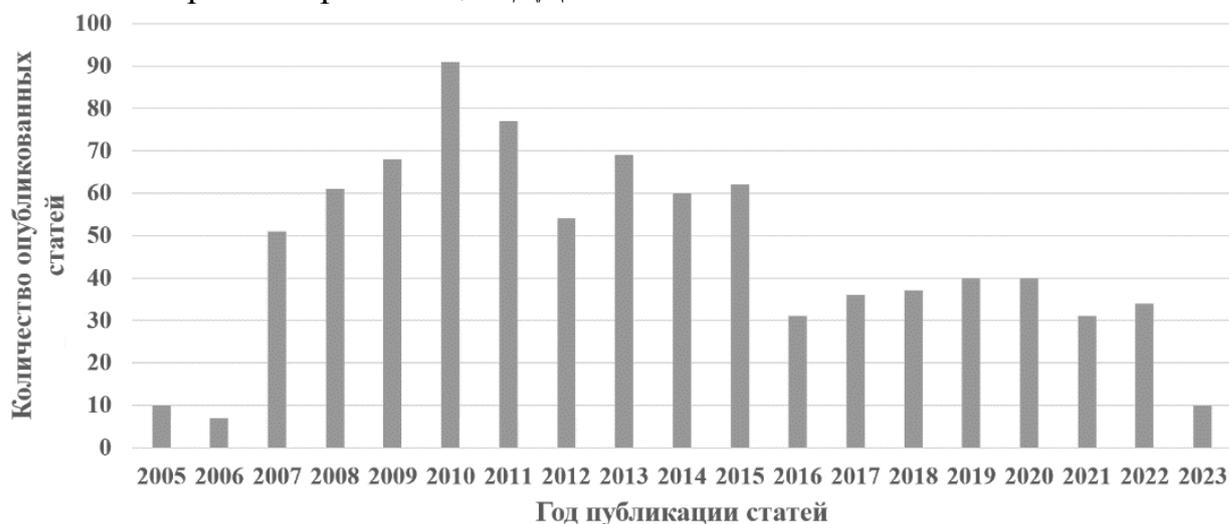


Рисунок 1 – График распределения публикации статей в изданиях IEEE по годам по теме динамического доступа к спектру

В отчетах МСЭ-R М.2330-0 и МСЭ-R М. 2242-0 рассматриваются два подхода по внедрению СКР: на основе геолокационной базы данных и на основе спектрального зондирования. В решении Государственной комиссии по радиочастотам при Минкомсвязи России от 4 июля 2017 г. № 17-42-06 «О Концепции развития системы контроля за излучениями радиоэлектронных

средств и (или) высокочастотных устройств гражданского назначения в Российской Федерации на период до 2025 года», приложение 1, раздел «Когнитивное радио» сказано, что перспективы внедрения любого из данных подходов должны быть обоснованы и требуют дальнейшего изучения с учетом экономической эффективности предлагаемых технических решений. В случае спектрального зондирования устройство ВП анализирует окружающую электромагнитную обстановку, после чего настраивается на несущую частоту радиоканала, где отсутствует ПП. Однако такой подход имеет ряд недостатков и основным из них является необходимость в осуществлении частого мониторинга спектра, что приводит к стремительному росту вычислительных затрат. Поскольку задачу реализации технологии ДДС можно решать как для сети когнитивного радио в целом, так и на различных уровнях ее разработки (физическом или сетевом), то в данной работе принято, что задача решается в рамках радиоканала конкретного ВП в диапазоне частот существующих и перспективных систем связи. Из чего следует, что если ВП мешает работе другого ВП, то данная проблема впоследствии решается на сетевом уровне. Поэтому рассмотрим задачу реализации ДДС как комплекс следующих взаимоувязанных подзадач:

- обнаружение сигналов ПП для формирования статистики занятости спектра;
- разработка метода предоставления доступа к спектру для ВП.

Для решения каждой из поставленных подзадач существует ряд методов. При этом, для достижения большей эффективности использования РЧС различные методы могут использоваться как по отдельности, так и в совокупности. Исходя из наличия требования о безусловном приоритете доступа ПП к РЧС, а также учитывая необходимость предотвращения помех работе ПП со стороны ВП, становится очевидным, что СКР должна обладать развитой системой принятия решений. То есть, для наиболее эффективного решения поставленных задач СКР необходимо использовать технологии интеллектуального анализа данных. Поэтому в данной работе под интеллектуальной перестройкой рабочих частот (ИПРЧ) подразумевается метод передачи информации по радио, особенность которого заключается в смене несущей частоты с использованием процесса интеллектуального анализа данных.

Наиболее близкими к разработанному в диссертации методу являются работы, где для решения поставленной задачи авторы используют различные модели искусственных нейронных сетей (ИНС), методы глубокого обучения с подкреплением, теорию игр, методы многоагентного обучения и другие технологии интеллектуального анализа. Однако, анализ данных работ выявил ряд недостатков: задача решается для когнитивной сети с известной схемой использования частотного ресурса ПП; авторы анализируют только часть РЧС, так как осуществляется узкополосный мониторинг спектра, т.е. теряется информация о других доступных частотных ресурсах; подразумевается использование в инфраструктуре сети центров управления, что ведет к

развертыванию дополнительных систем связи; проводится только моделирование без проведения эксперимента в реальных условиях; задача решается только на сетевом уровне. На основе проведенного анализа сделан вывод, что в современных источниках литературы отсутствует алгоритм ИПРЧ, позволяющий снизить вероятность создания устройством ВП помех для ПП и уменьшить время, необходимое для предоставления доступа ВП к свободному радиоканалу, а также не требующий использования когнитивного пилот-канала или внедрения новых центров управления, одновременно с этим способный подстраиваться под известные системы связи. Вышенаписанное обуславливает актуальность данного исследования.

**Цель работы.** Повышение эффективности использования радиочастотного спектра за счет интеллектуального метода перестройки рабочих частот вторичных пользователей в системах когнитивного радио.

**Научная задача исследования** заключается в разработке метода и алгоритмов интеллектуальной перестройки рабочих частот в системах когнитивного радио, позволяющих сократить вычислительные затраты и повысить оперативность предоставления вторичным пользователям доступа к радиочастотному спектру при заданной вероятности постановки помех первичному пользователю.

Для достижения поставленной цели и решения научной задачи в диссертации были выполнены следующие работы:

1. Формализация задачи научного исследования с целью определения наиболее важных характеристик, формирования хода решения и необходимого набора задач для достижения поставленной цели.
2. Разработка алгоритма оценки состояния занятости спектра, позволяющего снизить вероятность создания помех для ПП.
3. Разработка алгоритма прогнозирования состояния занятости спектра с использованием нейронных сетей.
4. Разработка вычислительно эффективного алгоритма предоставления частотного ресурса.
5. Получение новых экспериментальных результатов с использованием реальных SDR устройств для проверки работоспособности разработанных алгоритмов.

**Объектом исследования** являются системы когнитивного радио.

**Предметом исследования** являются алгоритмы интеллектуальной перестройки рабочих частот в системах когнитивного радио.

**Методология и методы исследования.** При решении поставленных задач исследования используются методы теории вероятностей, интеллектуального анализа данных, имитационно-статистического моделирования и вычислительного эксперимента.

**Научная новизна работы.**

1. Разработан метод интеллектуальной перестройки рабочих частот в системах когнитивного радио, обеспечивающий предоставление вторичному пользователю доступа к радиочастотному спектру при заданной вероятности

постановки помех первичному пользователю.

2. Разработан алгоритм оценки и формирования статистики занятости спектра, учитывающий условие априорной неопределенности при обнаружении сигналов первичного пользователя и динамическое изменение значения отношения сигнал/шум, отличающийся от известных тем, что позволяет повысить вероятность обнаружения сигналов первичного пользователя, тем самым уменьшая вероятность создания вторичным пользователем помех для первичного пользователя.

3. Разработан вычислительно эффективный алгоритм предоставления частотного ресурса вторичному пользователю, отличающийся от известных тем, что позволяет снизить время, затрачиваемое на осуществление предоставления доступа.

4. Разработан алгоритм прогнозирования состояния занятости спектра с использованием нейронных сетей, обеспечивающий повышение точности прогнозирования состояния спектра на 9% и снижение времени обучения при выполнении долгосрочного прогнозирования по сравнению с существующими алгоритмами.

**Достоверность результатов** обеспечивается корректностью применения математических методов и соответствием результатов, полученных путем аналитических расчетов, численного моделирования и натурального эксперимента.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Теоретическая значимость работы состоит в разработке нового метода интеллектуальной перестройки рабочих частот вторичных пользователей в системах когнитивного радио с использованием искусственных нейронных сетей и технологий Big data для снижения вероятности создания устройством вторичного пользователя помех для первичного пользователя и снижения времени, необходимого для предоставления доступа вторичному пользователю к свободному радиоканалу, тем самым увеличив эффективность использования радиочастотного спектра. Практическая значимость работы заключается в возможности использования разработанных алгоритмов, апробированных на натуральных экспериментах с использованием реальных SDR устройств, в устройствах систем когнитивного радио. Результаты диссертационной работы реализованы в НИР «Мыслитель-2015» по ТТЗ Госзаказчика и в учебном процессе МТУСИ в дисциплине «Основы построения и применения программно-определяемых радиосистем».

**Степень достоверности и апробация работы.**

Результаты, изложенные в диссертации, были представлены и обсуждены на следующих конференциях:

1. 2020 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO 2020), г. Светлогорск.

2. 2021 Systems of signals generating and processing in the field of on board communications (SOSG 2021), г. Москва.

3. 2021 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO 2021), г. Светлогорск.

4. 2022 Systems of signals generating and processing in the field of on board communications (SOSG 2022), г. Москва.

5. 2022 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO 2022), г. Архангельск.

6. 2023 Systems of signals generating and processing in the field of on board communications (SOSG 2023), г. Москва.

7. 2023 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO 2023), г. Псков.

**Публикации результатов.** По теме диссертации было опубликовано 9 работ. Из них 2 опубликованы в журналах из списка ВАК, 7 работ проиндексированы в базах данных Web of Science и SCOPUS. Получено 8 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

**Личный вклад автора.**

Все выносимые на защиту научные результаты получены соискателем лично. Из работ, опубликованных в соавторстве, в диссертацию включена только та их часть, которая получена лично соискателем.

**Соответствие паспорту специальности.**

Проведенное автором исследование соответствует п. 2 «Исследование новых технических, технологических и программных решений, позволяющих повысить эффективность развития цифровых сетей, систем и устройств телекоммуникаций» и п. 6 «Развитие и разработка новых методов доступа абонентов к ресурсам сетей, систем и устройств телекоммуникаций» паспорта научной специальности 2.2.15 «Системы, сети и устройства телекоммуникаций».

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Разработанный алгоритм оценки состояния занятости спектра позволяет снизить вероятность создания вторичным пользователем помех для первичного пользователя на 4–11% при заданной вероятности ложной тревоги  $10^{-2}$  по сравнению с известным алгоритмом оценки на основе энергетического обнаружителя.

2. Разработанный алгоритм предоставления частотного ресурса вторичному пользователю, в отличие от алгоритма без учета разреженности исследуемых данных, обеспечивает выигрыш по количеству вычислительных операций до 46 раз и выигрыш по среднему времени выполнения до 60 раз, что позволяет уменьшить время, необходимое для предоставления доступа вторичному пользователю к частотному ресурсу.

3. Разработанный алгоритм прогнозирования состояния спектра с использованием рекуррентной искусственной нейронной сети позволяет снизить среднюю абсолютную ошибку прогнозирования на 9% и обладает меньшим временем обучения нейронной сети (на 5–26%) при прогнозировании на 100 шагов вперед по сравнению с нерекуррентными искусственными нейронными сетями прогнозирования временных рядов.

### Объем и структура работы.

Диссертационная работа состоит из введения, трех разделов, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и двух приложений. Основная часть диссертации изложена на 153 страницах текста с 43 иллюстрациями и 7 таблицами. Список литературы насчитывает 147 наименований. Приложения изложены на 6 страницах машинописного текста.

### Краткое содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность диссертационной работы, проведен анализ современного уровня разработанных научно-технических решений, определены цель, задачи и методы исследований. Конкретизируются научная новизна, личный вклад в работу, практическая и научная ценность работы, сведения об апробации, публикациях автора, а также указаны основные положения, выносимые на защиту.

В **первом** разделе рассмотрены модель реализации СКР, с использованием SDR устройств, и технология ДДС, как основная технология перестроения рабочей частоты в СКР. Для предоставления ВП доступа к спектру ПП, СКР на основе SDR устройств могут использовать концепцию «белых пятен» РЧС, представленную на рисунке 2.

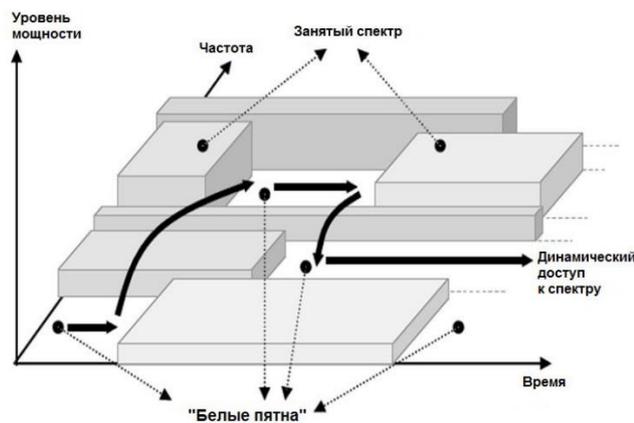


Рисунок 2 – Методика использования «белых пятен»

Исходя из методики использования «белых пятен» и технологии ДДС, ВП предоставляется возможность использовать частоты ПП на время, пока выделенный частотный ресурс не занят ПП, при соблюдении требования о сохранении прав и качества связи ПП.

Реализация технологии ДДС состоит из двух этапов: обнаружение сигналов ПП для формирования статистики занятости спектра и предоставление ВП свободного участка спектра. Одним из основных способов формирования статистики занятости спектра является обнаружение сигналов ПП, в связи с чем проведен анализ существующих методов обнаружения свободных участков РЧС. Результаты анализа показали, что перспективным решением является использование энергетического обнаружителя (ЭО), поскольку такой подход остается работоспособным в условиях априорной неопределенности. Для решения задачи второго этапа реализации ДДС проведен анализ наиболее распространенных методов предоставления

свободного участка РЧС ВП: предоставление информации о доступных РЧС через пилот канал СКР, применение базы данных (БД) с информацией об использовании РЧС, непосредственное автономное зондирование спектра. В результате анализа установлено, что применение БД с информацией о доступных РЧС является наиболее эффективным подходом, так как не требует частого мониторинга спектра для обнаружения новых передатчиков, а также не нуждается в переработке существующих стандартов связи и развертыванию существенно новых систем связи. Стоит учитывать, что любой из ранее перечисленных методов включает в себя проверку частотного канала на отсутствие сигнала ПП, непосредственно перед началом работы ВП. Проверка может осуществляться с помощью мониторинга, обратной связи или прогнозирования состояния выбранного канала. Анализ данных методов показал, что использование долгосрочного прогнозирования состояния занятости канала является наиболее производительным методом, так как позволяет сократить число проверок каналов частот-претендентов, т.е. сократить количество мониторинга спектра, при этом сокращая вычислительные затраты, и не требует создания новых систем связи.

В разделе формализуется задача научного исследования, как разработка метода и алгоритмов ИПРЧ в СКР, позволяющих сократить вычислительные затраты и повысить оперативность предоставления ВП доступа к РЧС при заданной вероятности постановки помех ПП. При решении поставленной задачи требуется: сформировать краткосрочную и долгосрочную БД свободных для работы ВП участков РЧС, предоставить доступ устройству ВП к частотному ресурсу с безусловным приоритетом доступа ПП к РЧС и с учетом предотвращения помех работе ПП со стороны ВП, снизить время время, необходимое для осуществления доступа к частотному ресурсу для ВП РЧС, посредством интеллектуальных методов анализа данных. В соответствии с поставленными задачами на рисунке 3 представлена структурная схема разработанного метода ИПРЧ.

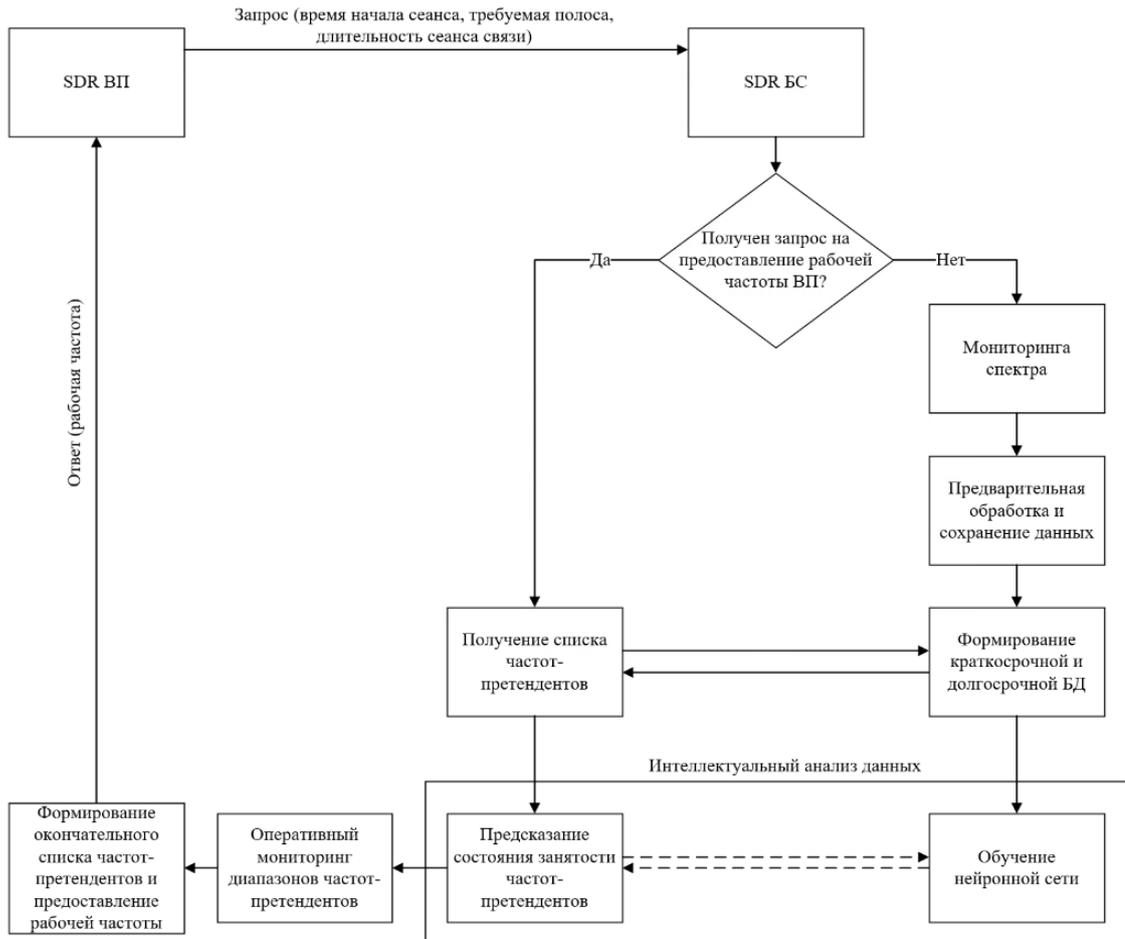


Рисунок 3 – Структурная схема метода интеллектуальной перестройки рабочих частот в системах когнитивного радио

Во **втором** разделе "Разработка алгоритмов интеллектуальной перестройки частоты вторичного пользователя в СКР", в соответствии со схемой разработанного метода, описываются существующие и предлагаются новые алгоритмы оценки (мониторинга) состояния занятости спектра, обработки и хранения данных мониторинга, предоставления частотного ресурса ВП, а также алгоритмы прогнозирования состояния занятости спектра.

В разделе 2.1 приведено описание существующего метода формирования статистики занятости РЧС с использованием энергетического обнаружителя, где порог обнаружения  $T$  рассчитывается исходя из критерия Неймана-Пирсона по формуле (1), и разработанного алгоритма, использующего ЭО с адаптивным выбором порога обнаружения сигналов ПП.

$$T = \sigma_{ш} \sqrt{-2 \ln(P_{лmp})}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{ш}$  – дисперсия шума,  $P_{лmp}$  – вероятность ложной тревоги.

Исходя из предположения, что  $j$  измерение мощности сигнала на определенной частоте  $f$  представляет собой  $P_j(f)$ , то занятость радиоканала для  $j$  измерения на частоте  $f$  можно рассчитать по следующей формуле:

$$B_j(f) = \begin{cases} 1 \text{ (занято)} & : P_j(f) > T \\ 0 \text{ (свободно)} & : P_j(f) \leq T, \end{cases} \quad (2)$$

где  $j=1,2\dots N(f)$ , а  $N(f)$  – общее количество измерений, выполненных на частоте  $f$ , порог  $T$ , рассчитанный по формуле (1).

При этом коэффициент занятости частотного канала, т.е. средняя доля времени, в течение которого основной пользователь занимает данный канал, рассчитывается следующим образом:

$$D(f) = \frac{\sum_{j=1}^{N(f)} B_j(f)}{N(f)} \quad (3)$$

Из формулы (3) следует, что уровень занятости частотных каналов в диапазоне РЧС не может превышать единицу. При этом, если уровень занятости частотных каналов  $\leq 0,55$ , то считается допустимой реализация метода ИПРЧ.

Однако эффективность работы существующего метода мониторинга спектра с использованием ЭО существенно снижается при сильных колебаниях мощности шума в канале, а также при низких значениях отношения сигнала к шуму (ОСШ). И учитывая, что ВП обязан гарантировать, что не мешает работе ПП, то для снижения вероятности создания помех ПП разработан алгоритм оценки состояния занятости спектра на основе ЭО с адаптивным выбором порога обнаружения сигналов ПП. Разработанный алгоритм меняет пороги обнаружения сигналов ПП в зависимости от предыдущего состояния занятости канала  $CS_{last}$ . Если в формуле (2), полученное для канала измерение  $P_j(f)$  сравнивалось с порогом  $T$ , то в разработанном алгоритме, в зависимости от предыдущего значения состояния канала  $CS_{last}$ ,  $P_j(f)$  сравнивается либо с нижней границей порога  $T_{low}$  либо с верхней границей порога  $T_{high}$ . На первом шаге, когда  $CS_{last}$  неизвестно используется среднее значение порогов  $T_{avg}$ . Значение порогов рассчитывается следующим образом:

$$\begin{aligned} T_{low} &= T - a \\ T_{high} &= T + b \\ T_{avg} &= \frac{T_{low} + T_{high}}{2}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $a$  и  $b$  – постоянные величины,  $T$  – порог обнаружения, рассчитанный по формуле (1). Блок-схема разработанного алгоритма представлена на рисунке 4.

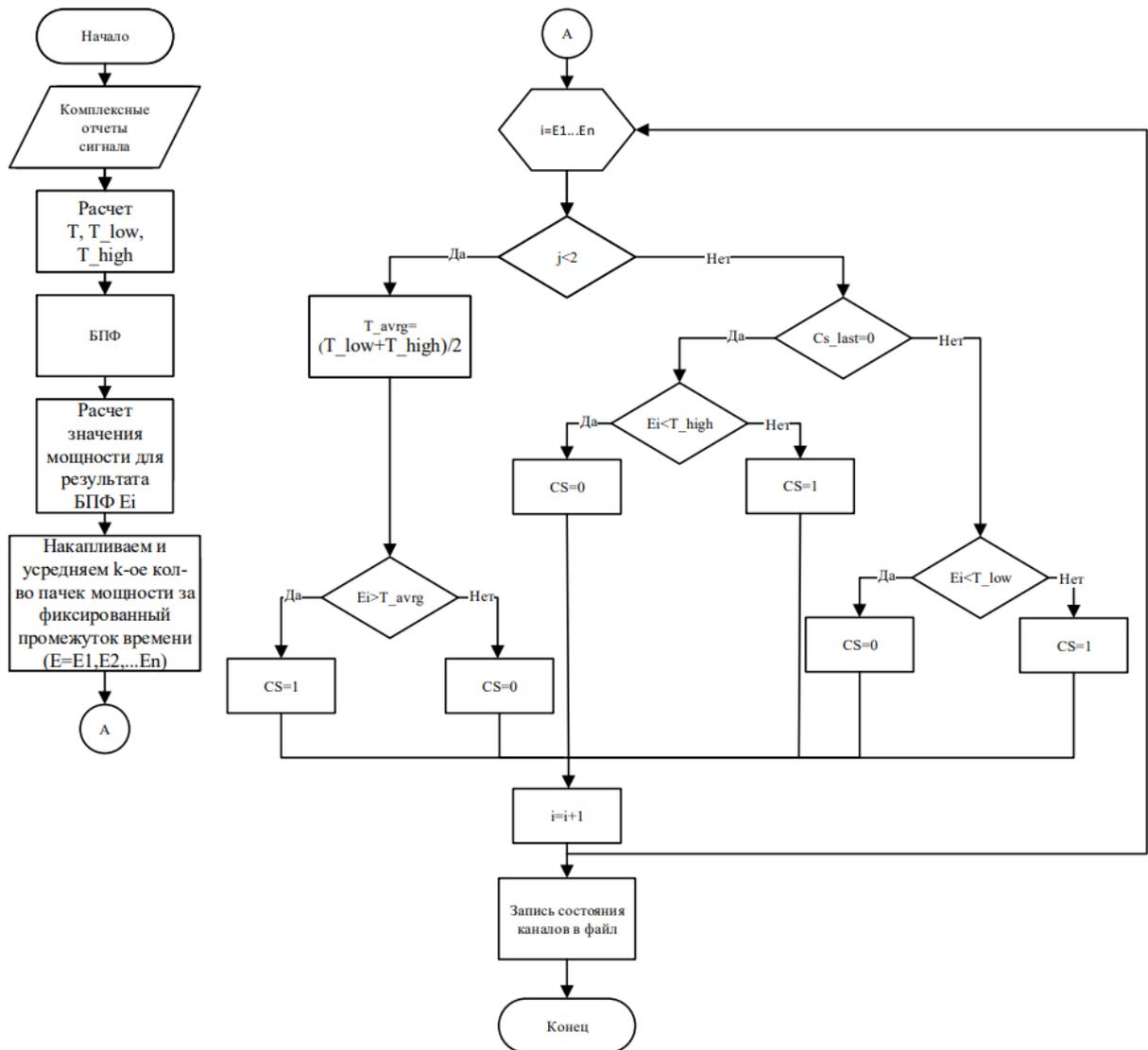


Рисунок 4 – Блок-схема разработанного метода мониторинга спектра, использующего энергетический обнаружитель с адаптивным выбором порога обнаружения

Из представленной блок-схемы видно, что, если  $CS_{last} = 0$ , то состояние занятости канала  $CS$  рассчитывается следующим образом:

$$\begin{cases} CS = 0, P_j(f) < T_{high} \\ CS = 1, P_j(f) > T_{high} \end{cases} \quad (5)$$

Если же  $CS_{last} = 0$ , тогда

$$\begin{cases} CS = 0, P_j(f) < T_{low} \\ CS = 1, P_j(f) > T_{low} \end{cases} \quad (6)$$

Полученные таким образом значения 0 и 1 формируют статистику занятости спектра. При мониторинге спектра в течении суток формируется краткосрочная БД, а накопленные за длительный промежуток времени (месяц, полгода, год) результаты формируют долгосрочную БД. Таким образом, за счет учета предыдущего состояния канала критерии для принятия решения усложняются, но при сильных колебаниях или низком значении ОСШ это

позволяет не пропустить сигнал ПП, а также не фиксировать шумовые выбросы как сигнал ПП.

В разделе 2.2 рассмотрен процесс мониторинга спектра и формирования краткосрочной и долгосрочной БД не только в рамках данной работы, а как один из этапов реализации СКР с учетом перспектив дальнейшего развития. Учитывая данные условия, а также непрерывно растущие объемы данных, принято решение, признать краткосрочную и долгосрочную БД объектами "больших данных" (Big data, BD) и применять для них технологии BD. Анализ полученных БД, с точки зрения объектов BD, показал, что хранящиеся в них данные представляют собой разреженную бинарную матрицу. Таким образом установлено, что для хранения и обработки используемых в работе БД необходимо применять специальные структуры данных и методы взаимодействия с БД.

В разделе 2.3 приведено описание двух разработанных алгоритмов предоставления частотного канала ВП, которые, при поступлении запроса от пользователя, осуществляют поиск свободной полосы частот и обеспечивают устройство ВП рабочей частотой. Основным принцип каждого из алгоритмов следующий: пользователь в качестве исходных данных предоставляет время начала сеанса связи, длительность сеанса и полосу передаваемого сигнала, которые интерпретируются как размеры блока с нулевыми значениями. Таким образом задача поиска свободного частотного ресурса сводится к задаче поиска в исходной матрице (БД состояния занятости каналов) субблока заданного размера, содержащего в себе только нулевые элементы. Результатом работы каждого из алгоритмов является значение центральной частоты свободного радиоканала, которое удовлетворяет запросу устройства ВП.

Разница описанных алгоритмов заключается в подходах хранения и взаимодействия с краткосрочной БД. Первый алгоритм, далее именуемый классическим, напрямую взаимодействует с БД как с классическим двумерным массивом (матрицей), основываясь на решении задачи по памяти и осуществлении перебора значений матрицы. Второй разработанный алгоритм, для хранения разреженной матрицы, исходную БД преобразует в структуру данных в виде списка, как представлено на рисунке 5. При этом поиск блока с нулевыми значениями реализуется исходя из предложенной структуры хранения матрицы.

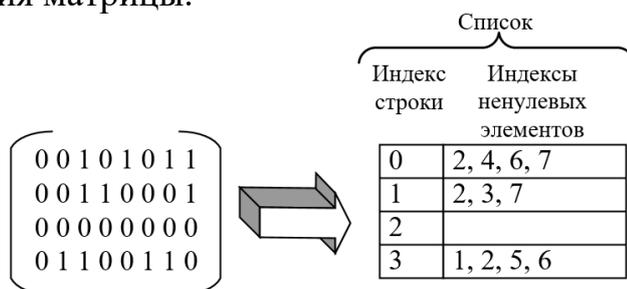


Рисунок 5 – Схема представления разреженной матрицы в виде списка

В разделе 2.4 проведен анализ существующих методов долгосрочного прогнозирования состояния спектра: на основе временных шаблонов и с использованием ИНС. Результаты анализа показали, что использование алгоритма прогнозирования спектра на основе временных шаблонов значительно увеличивает вероятность ошибки предсказания в случае прогнозирования состояния спектра для различных систем связи. Причиной этому является то, что обнаруженные для одной системы связи временные шаблоны применяются к другой системе, тем самым приводя к ошибкам прогнозирования. Учитывая, что данное исследование проводится для транкинговых систем связи, которые используют различные стандарты связи и расписания сеансов связи, то использование данного алгоритма приведет к нарушению основного требования к технологии ДДС о сохранении прав и качества связи для ПП. Поэтому, в результате анализа методов машинного обучения, ИНС глубокого обучения, анализа архитектуры долгой краткосрочной памяти (Long Short-Term Memory, LSTM) разработан алгоритм прогнозирования спектра с использованием ИНС, представленный на рисунке 6, где  $P$  – точность обучения модели, а  $\varepsilon$  – пороговое значение.

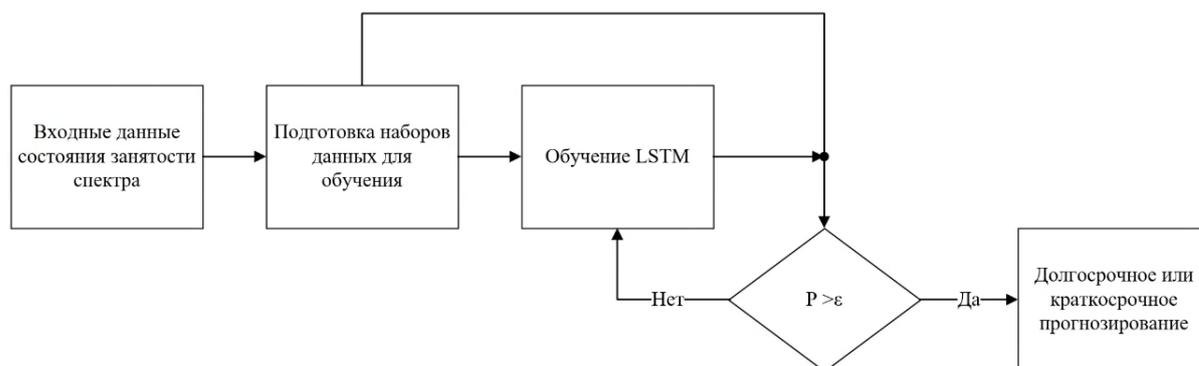


Рисунок 6 – Структурная схема разработанного алгоритма прогнозирования состояния занятости спектра с использованием нейронной сети LSTM

В **третьем** разделе "Оценка эффективности метода интеллектуальной перестройки рабочей частоты для СКР" представлены: разработка модели ИНС для прогнозирования состояния спектра, программная реализации разработанных алгоритмов, экспериментальное исследование реализованного метода.

С целью формирования модели ИНС приведено описание подготовки входных данных и проведено исследование характеристик прогнозирования в зависимости от числа скрытых нейронов в слоях LSTM (50, 100, 300 нейронов), а также в зависимости от типа архитектуры модели (LSTM\_Simple, LSTM\_Drop, 2LSTM\_Drop). Прогнозирование проводилось на 10с и на 100с вперед. Параметры обучения моделей представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры обучения

Гиперпараметры	Значение
Скорость обучения	0,0001
Размер набора данных, матриц	64
Количество эпох	20

Алгоритм оптимизации	Adam
Функция потерь	Mean Squared Error
Длина скользящего окна, временных шагов	10

Точность прогнозирования оценивалась с помощью следующих метрик: MSE, корень из средней квадратичной ошибки (RMSE), средняя абсолютная ошибка (MAE). Оценка оптимизации точности прогнозирования моделей производилась по значениям бинарной точности и длительности обучения. Результаты исследования показали, что при использовании модели ИНС LSTM\_Drop с числом нейронов 300 для прогнозирования на 100с достигается наилучшая оптимизация и точность прогнозирования среди всех рассмотренных вариантов архитектур модели (RMSE=0,0620, MAE=0,0071, бинарная точность составляет порядка 99%), а также данная модель обладает наилучшим быстродействием (длительность обучения составляет 5444,63с).

Проведен сравнительный анализ предложенной модели LSTM\_Drop с числом нейронов 300 с существующими моделями ИНС: Dense и AR LSTM. В таблице 2 представлены результаты сравнительного анализа при прогнозировании на 100с, где LSTM – разработанная модель LSTM\_Drop с числом нейронов 300.

Таблица 2 - Оценка точности моделей для прогнозирования на 100 шагов

Модель	RMSE	MAE	Бинарная точность	Длительность обучения, с
Dense	0,0648	0,0078	0,9936	7388
LSTM	0,0620	0,0071	0,9942	5444
AR LSTM	0,0663	0,0127	0,9934	5780

В результате анализа установлено, что при прогнозировании на 100с модель ИНС LSTM\_Drop с числом нейронов 300 позволяет снизить среднюю абсолютную ошибку прогнозирования на 9% и обладает меньшим временем обучения ИНС (на 5–26%) по сравнению с рекуррентными искусственными нейронными сетями прогнозирования временных рядов. Таким образом позволяя сократить число проверок частот-претендентов, тем самым сокращая вычислительные затраты.

На рисунке 7 представлено сравнение исходных данных (сверху) и соответствующих прогнозных данных (снизу) для временного интервала прогнозирования 100с модели разработанной ИНС LSTM\_Drop с числом нейронов 300.

Эффективность разработанного алгоритма оценки состояния спектра оценивается с использованием сравнительного исследования между разработанным алгоритмом и существующим алгоритмом ЭО с фиксированным порогом. Исходные данные для эксперимента формировались исходя из принципа работы транкинговых систем связи. Для существующего алгоритма ЭО, далее именуемый классическим, значение порога рассчитывалось в соответствии с формулой (1). Значение ложной тревоги было принято равным  $P_{лтр}=10^{-2}$ . Для разработанного алгоритма пороги

рассчитывались по формуле (4), а коэффициенты  $a$  и  $b$  были равны 20% от фиксированного порога  $T$ . Эксперимент проводился для диапазона ОСШ от 0 до 20 дБ с шагом 1дБ. На одну точку значения ОСШ проводилось 100000 экспериментов.

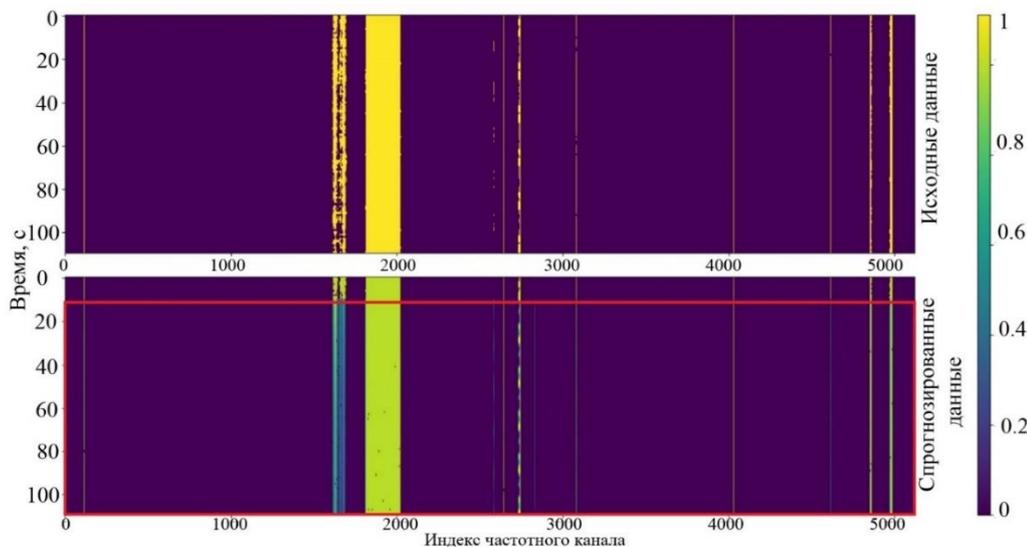


Рисунок 7 – Сравнение исходных данных занятости спектра и соответствующих спрогнозированных данных для временного интервала 100с разработанной модели ИНС LSTM\_Drop с числом нейронов 300

Результаты эксперимента, представленные на рисунке 8, показали, что вероятность пропуска цели для разработанного алгоритма ниже, чем у классического. Из чего сделан вывод, что разработанный алгоритм позволяет снизить вероятность создания помех для ПП, а также позволяет увеличить оперативность предоставления свободного участка спектра за счет повышения вероятности правильного обнаружения сигналов ПП.

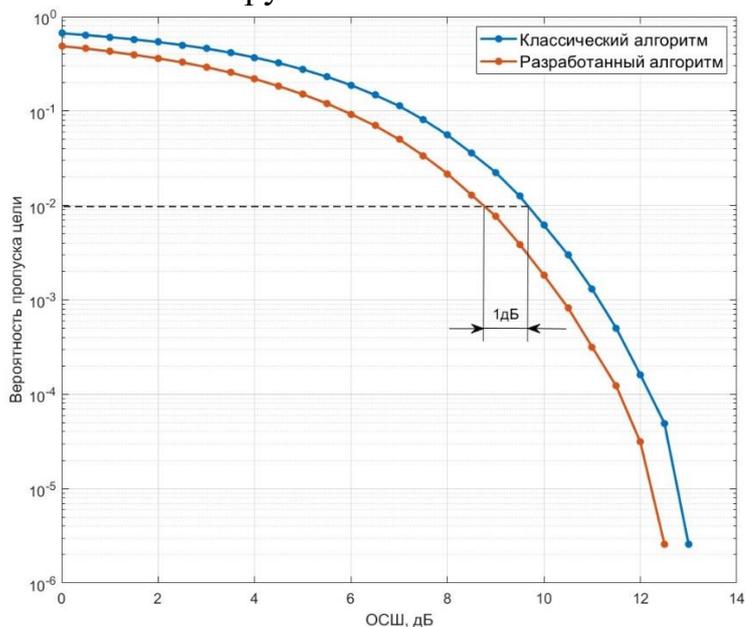


Рисунок 8 – Зависимость вероятности пропуска цели от ОСШ для ЭО с фиксированным порогом (классический) и предложенного ЭО с адаптивным выбором порога

С использованием разработанного алгоритма мониторинга спектра для диапазона частот 390 – 490 МГц сформированы краткосрочная и долгосрочная БД статистики занятости спектра, а также получен коэффициент занятости частотных каналов. Пример долгосрочной БД статистики занятости спектра для диапазона частот 390 – 490 МГц, сформированной за полтора месяца, представлен на рисунке 9.

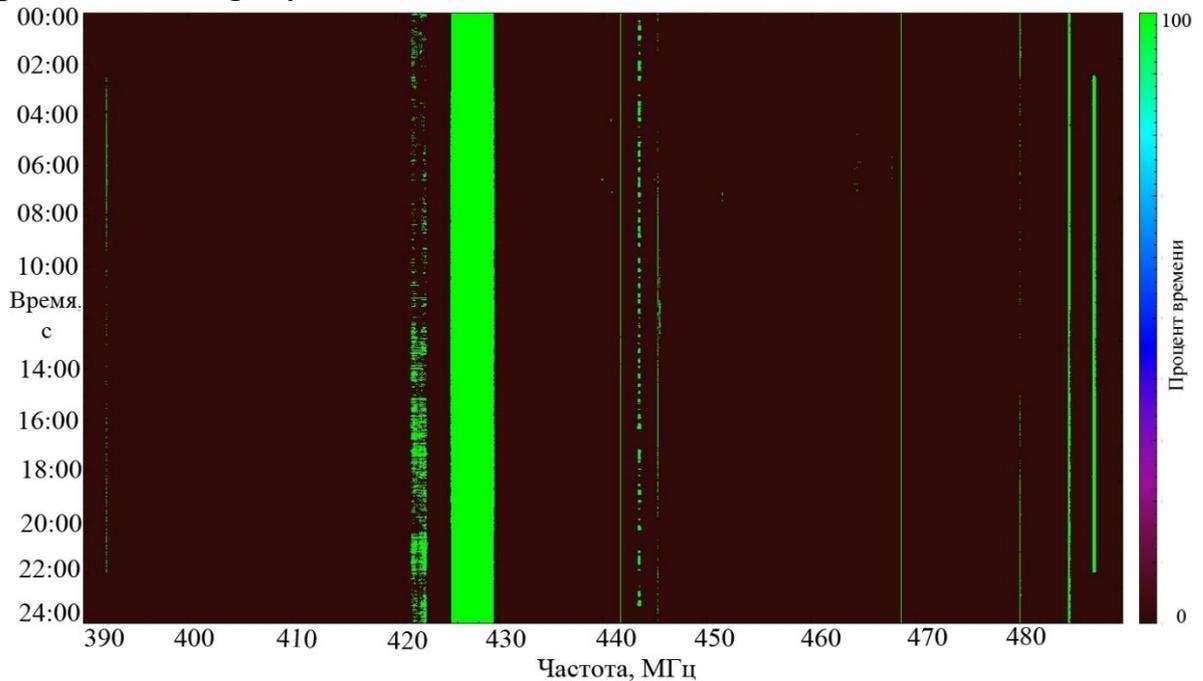


Рисунок 9 – График состояния занятости спектра для диапазона частот 390 – 490 МГц за полтора месяца

С целью сравнения алгоритмов предоставления частотного ресурса ВП проведена оценка асимптотической вычислительной сложности и оценка среднего времени выполнения в зависимости от размеров матрицы. Результаты сравнительного анализа представлены на рисунках 10, 11.

Асимптотическая вычислительная сложность классического алгоритма составила  $O(M*N)$ , а разработанного вычислительно эффективного алгоритма  $O((M+N-I)*\log_2(N-I))$ , где  $M$  – длительность сеанса связи, выраженная через количество строк,  $N$  – число частотных каналов в матрице, что соответствует общему количеству столбцов в матрице,  $I$  – полоса передаваемого сигнала, выраженная через количество столбцов. Для вычисления среднего времени выполнения каждый из алгоритмов повторялся  $10^5$  раз, а итоговое время усреднялось. Для проведения экспериментов формировались матрицы размером  $M \times N$ , где  $N = M$ . Значение параметра  $M$  менялось в диапазоне от 1000 до 25000 с шагом 1000, при этом параметр  $I = 256$ .

Результаты моделирования показали, что разработанный алгоритм предоставления частотного ресурса ВП в отличие от известного обладает выигрышем по количеству вычислительных операций до 46 раз и выигрышем по среднему времени выполнения до 60 раз, и позволяет уменьшить время необходимое для предоставления доступа ВП к частотному ресурсу.

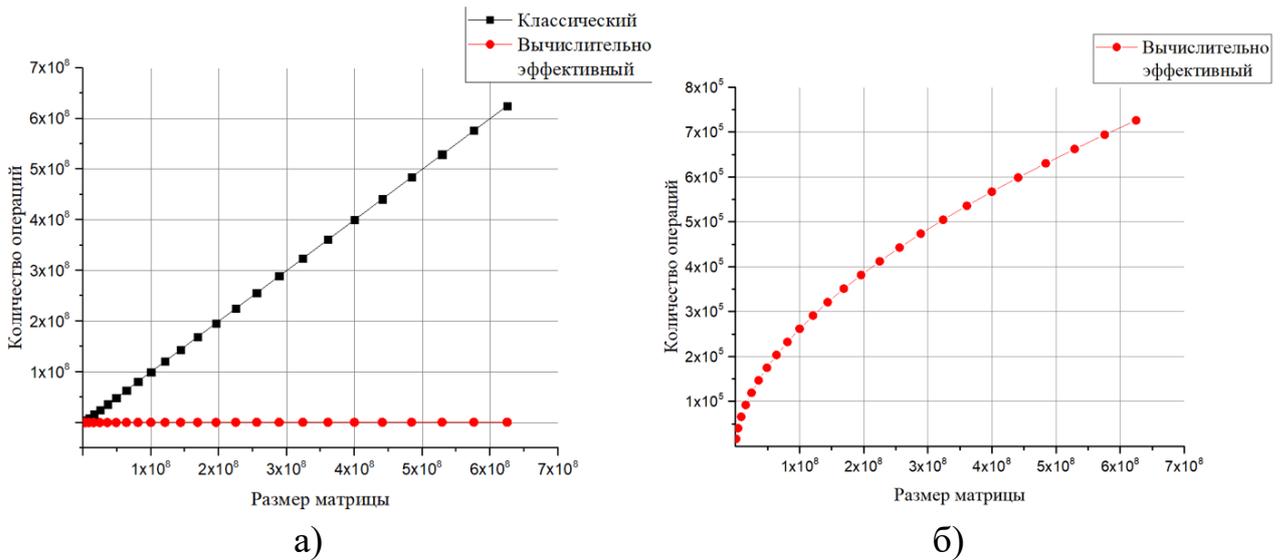


Рисунок 10 – Графики зависимости асимптотической вычислительной сложности классического (а) и вычислительно эффективного (б) алгоритмов от размера матрицы

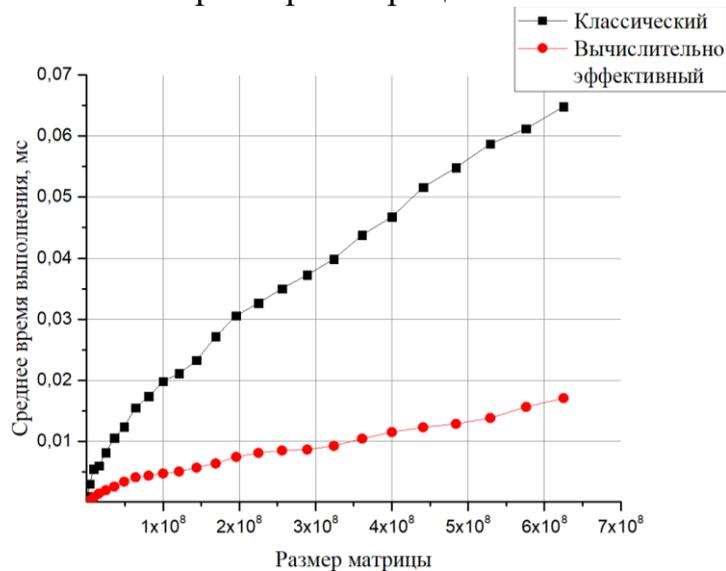


Рисунок 11 – График зависимости среднего времени выполнения классического и вычислительно эффективного алгоритмов от размера матрицы

Для проверки работоспособности предложенного метода ИПРЧ было проведено экспериментальное исследование с использованием разработанных модулей для работы с SDR устройствами. При моделировании СКР использовался сигнал OFDM, а информация о следующей рабочей частоте системы передавалась в кадре сигнала в битовом виде. В процессе эксперимента с использованием ОСШ имитировалась появление сигнала ПП и проверялось выполнение перестроения рабочей частоты в СКР. На рисунке 12 представлена диаграмма перестроения рабочей частоты ВП, где полезный сигнал (зеленый) – сигнал ВП, а помеха (красный) – сигнал ПП. Из рисунка видно, что, при появлении помехи на рабочей частоте ВП, за константное время происходит перестроение на следующую рабочую частоту из списка частот-претендентов. В случае появления помехи, когда текущая рабочая

частота СКР ВП является последней в списке частот-претендентов, перестроение производится на первую частоту из списка кандидатов. Время перестроения рабочей частоты для разработанного метода составляет  $\Delta t \approx 95 \mu\text{с}$ .

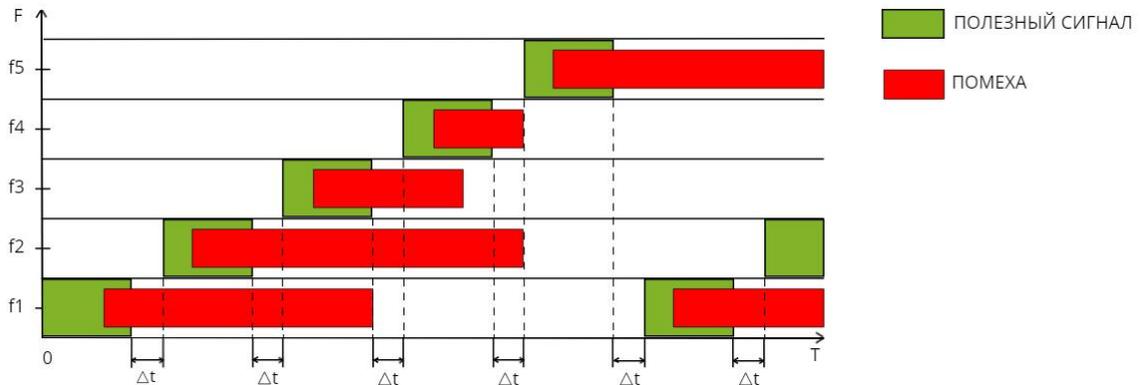


Рисунок 12 – Диаграмма перестроения рабочей частоты ВП

Основываясь на полученных результатах сделаны выводы, что при моделировании появления сигнала ПП, во всех разработанных устройствах производится перестроение рабочей частоты, а корректное декодирование информации подтверждает работоспособность метода интеллектуальной перестройки рабочей частоты при взаимодействии с реальными SDR устройствами.

### Заключение

В диссертационном исследовании получены следующие основные результаты:

1. Показано, что применение систем когнитивного радио с технологией динамического доступа к спектру позволяет увеличить эффективность использования радиочастотного спектра, а перспективным направлением их реализации является использование SDR устройств. Проведен анализ существующих методов динамического доступа к спектру для вторичного пользователя и на основе полученных результатов сформирован необходимый набор задач для решения поставленной цели. В соответствии с сформированным набором задач предлагается структурная схема метода интеллектуальной перестройки рабочей частоты в системах когнитивного радио.

2. Разработан алгоритм оценки состояния занятости спектра с использованием энергетического обнаружителя с адаптивным выбором порога обнаружения, учитывающий условие априорной неопределенности при обнаружении сигналов первичного пользователя и динамическое изменение значения отношения сигнал\шум, и позволяющий снизить вероятность пропуска цели, тем самым уменьшая вероятность создания вторичным пользователем помех для первичного пользователя.

3. Разработан вычислительно эффективный алгоритм предоставления частотного ресурса вторичному пользователю, учитывающий то, что база данных статистики занятости спектра является объектом Big Data,

а хранящиеся в ней данные представляют собой разреженную бинарную матрицу. Разработанный алгоритм включает в себя алгоритмы обработки и хранения данных мониторинга спектра и позволяет значительно увеличить допустимую размерность решаемых задач, а также сократить требования к используемой памяти.

4. Проведен анализ существующих методов прогнозирования состояния спектра, на основе которого сделан вывод, что для эффективной работы технологии динамического доступа к спектру требуется решить задачу долгосрочного прогнозирования. Разработан алгоритм прогнозирования спектра на основе нейронных сетей, который состоит из методики формирования и подготовки набора входных данных, модели рекуррентной нейронной сети с использованием архитектуры долгой краткосрочной памяти.

5. Разработана модель искусственной нейронной сети для прогнозирования состояния занятости спектра и исследованы характеристики прогнозирования в зависимости от числа скрытых нейронов в слоях LSTM, а также в зависимости от типа архитектуры модели. Установлено, что при использовании модели нейронной сети LSTM\_Drop с числом нейронов 300 достигается наилучшая оптимизация и точность прогнозирования среди всех рассмотренных вариантов, кроме того, данная модель обладает наилучшим быстродействием.

6. Произведен сравнительный анализ предложенной модели LSTM\_Drop с существующими моделями искусственных нейронных сетей: Linear, Dense и AR LSTM. Характеристики прогнозирования были исследованы в зависимости от срока прогнозирования: на 10 с и 100 с вперед. Установлено, что при прогнозировании на 100 с вперед наилучшей точностью прогнозирования, а также наименьшим временем обучения модели обладает предложенная модель LSTM\_Drop.

7. Для оценки эффективности разработанного алгоритма оценки состояния занятости спектра проведено сравнительное моделирование с существующим алгоритмом. Показано, что вероятность пропуска цели для разработанного алгоритма ниже, чем у существующего, и сделан вывод, что разработанный алгоритм позволяет снизить вероятность создания помех для первичного пользователя, а также позволяет увеличить скорость предоставления свободного участка спектра за счет повышения вероятности корректного обнаружения сигналов первичного пользователя.

8. С использованием разработанного алгоритма оценки состояния занятости спектра для диапазона частот 390 – 490 МГц сформированы краткосрочная и долгосрочная базы данных. Анализ полученных баз данных показал, что диапазон работы транкинговых систем связи слабо загружен, на основании чего сделан вывод, что в данном диапазоне возможна работа вторичного пользователя системы когнитивного радио.

9. С целью сравнения существующего и разработанного алгоритмов предоставления частотного ресурса вторичному пользователю проведена оценка асимптотической вычислительной сложности и оценка среднего

времени выполнения в зависимости от размеров матрицы. Показано, что разработанный алгоритм по количеству операций более чем в 60 раз лучше по сравнению с существующим, а выигрыш по среднему времени выполнения для него составляет от 3 до 21 раза. Проведен сравнительный анализ алгоритмов, где в качестве исходной матрицы использовалась полученная в работе долгосрочная база данных статистики занятости спектра. Установлено, что выигрыш по количеству операций для разработанного алгоритма составляет  $\approx 46$  раз, а выигрыш по среднему времени выполнения составляет  $\approx 60$  раз. Из чего сделан вывод, что использование разработанного алгоритма является вычислительно эффективным и позволяет уменьшить время необходимое для предоставления доступа вторичному пользователю к частотному ресурсу.

10. Проведено экспериментальное исследование для проверки работоспособности предложенного метода интеллектуальной перестройки рабочих частот с использованием реальных SDR устройств. По результатам эксперимента сделан вывод, что при появлении сигнала первичного пользователя, во всех разработанных устройствах производится перестроение рабочей частоты, а корректное декодирование информации подтверждает работоспособность метода интеллектуальной перестройки рабочей частоты при взаимодействии с реальными SDR.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Публикации в изданиях из списка ВАК

1. **Кандаурова, Е.О.** Разработка программного комплекса интеллектуальной перестройки рабочих частот для систем когнитивного радио / **Кандаурова Е.О.,** Чиров Д.С. // Электросвязь. – 2021. – № 2. – С43-47. – doi: 10.34832/ELSV.2021.15.2.006
2. **Кандаурова, Е.О.** Адаптивный алгоритм обнаружения радиосигналов в системах когнитивного радио / **Кандаурова Е.О.,** Чиров Д.С., Базылев М.В. // Электросвязь. – 2022. – № 10. – С44-51. – doi: 10.34832/ELSV2022.35.10.007

### Публикации в изданиях, индексируемых в Scopus и Web of Science

3. **Kandaurova, E.O.** Algorithm and Software for Intelligent Analysis of the Frequency Spectrum for Cog-nitive Radio Systems / **Kandaurova E.O.,** Chirov D.S. // 2020 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications. – 2020. – 6 p. – doi: 10.1109/SYNCHROINFO49631.2020.9166031
4. **Kandaurova, E.O.** Implementation of an algorithm for intelligent tuning of operating frequencies for cognitive radio systems / **Kandaurova E.O.,** Chirov D.S. // 2021 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board. – 2021. – 5 p. – doi: 10.1109/IEEECONF51389.2021.9415988
5. **Kandaurova, E.O.** Intelligent Algorithms for Dynamic Spectrum Access a Secondary User in Cognitive Radio Systems / **Kandaurova E.O.,** Chirov D.S. // 2021 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in

- Telecommunications. – 2021. – 5 p. – doi: 0.1109/SYNCHROINFO51390.2021.9488377
6. **Kandaurova, E.O.** Adaptive spectrum monitoring algorithm for cognitive radio systems / **Kandaurova E.O.**, Chirov D.S. // 2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. – 2022. – 5 p. – doi: 10.1109/IEEECONF53456.2022.9744283
  7. **Kandaurova, E.O.** Estimating the Efficiency of the Algorithm for Selecting the Adaptive Signal Detection Threshold in Cognitive Radio Systems / **Kandaurova E.O.**, Chirov D.S., Kuchumov A.A. // 2022 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications. – 2022. – 5 p. – doi: 10.1109/SYNCHROINFO55067.2022.9840968
  8. **Kandaurova, E.O.** Spectrum Occupancy Prediction Algorithm Using Artificial Neural Networks / **Kandaurova E.O.**, Chirov D.S. // 2023 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. – 2023. – 5 p. – doi: 10.1109/IEEECONF56737.2023.10092167
  9. **Kandaurova, E.O.** Neural Network Algorithm for Predicting Spectrum Occupancy in Cognitive Radio Systems / **Kandaurova E.O.**, Chirov D.S. // 2023 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications. – 2023. – 5 p. – doi: 10.1109/SYNCHROINFO57872.2023.10178650

#### Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020618018 Российская Федерация. Обработка данных радиомониторинга / **Е.О. Кандаурова**, В.И. Липаткин, Д.С. Чиров, А.Н. Виноградов; заявитель и правообладатель МТУСИ. – № 2020616823; заявл. 30.06.2020; опубли. 15.07.2020. – 1 с.
11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021660573 Российская Федерация. Программа интеллектуальной перестройки рабочих частот для систем когнитивного радио / **Е.О. Кандаурова**, А.В. Николаев, Д.С. Чиров ; заявитель и правообладатель МТУСИ. – № 2021619771; заявл. 23.06.2021; опубли. 29.06.2021. – 1 с.
12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021663369 Российская Федерация. Программа формирования базы данных состояния занятости спектра с использованием SDR Adalm-Pluto / **Е.О. Кандаурова**, Н.А. Кандауров, Д.С. Чиров ; заявитель и правообладатель МТУСИ. – № 2021619773; заявл. 23.06.2021; опубли. 16.08.2021. – 1 с.
13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023611290 Российская Федерация. Программа формирования базы данных состояния занятости спектра с использованием адаптивного порога обнаружения / **Е.О. Кандаурова**, Н.А. Кандауров, Д.С. Чиров ; заявитель и правообладатель МТУСИ. – № 2022686707; заявл. 30.12.2022; опубли. 18.01.2023. – 1 с.
14. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021660574 Российская Федерация. Программа формирования цифровых

- отсчетов адаптивного OFDM сигнала / **Е.О. Кандаурова**, Д.С. Чиров, О.В. Ильина ; заявитель и правообладатель МТУСИ. – № 2021619772; заявл. 23.06.2021; опубл. 29.06.2021. – 1 с.
15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021660809 Российская Федерация. Программа обработки цифровых отсчетов адаптивного OFDM сигнала / **Е.О. Кандаурова**, Д.С. Чиров, О.В. Ильина ; заявитель и правообладатель МТУСИ. – № 202161977; заявл. 23.06.2021; опубл. 01.07.2021. – 1 с.
16. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021663544 Российская Федерация. Программа управления и передачи данных с помощью SDR устройств и библиотеки SoapySDR / **Е.О. Кандаурова**, Н.Ю. Либеровский, Н.Е. Мирошникова ; заявитель и правообладатель МТУСИ. – № 2021662565; заявл. 09.08.2021; опубл. 18.08.2021. – 1 с.
17. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021663566 Российская Федерация. Программа управления и приема данных с помощью SDR устройств и библиотеки SoapySDR / **Е.О. Кандаурова**, Н.Ю. Либеровский, Н.Е. Мирошникова ; заявитель и правообладатель МТУСИ. – № 2021662607; заявл. 09.08.2021; опубл. 18.08.2021. – 1 с.