

На правах рукописи



СТУДЕНИКИН Алексей Геннадьевич

**ОБНАРУЖЕНИЕ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ СИГНАЛОВ
АППАРАТУРОЙ ПАНОРАМНОГО РАДИОКОНТРОЛЯ**

Специальность 2.2.13. Радиотехника, в том числе
системы и устройства телевидения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Воронеж – 2024

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

Научный руководитель: Токарев Антон Борисович,
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: Корчагин Юрий Эдуардович,
доктор физико-математических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
университет»,
заведующий кафедрой радиофизики

Подстригаев Алексей Сергеевич,
кандидат технических наук, доцент,
АО «НИИ «Вектор»,
начальник научно-исследовательской лаборатории

Ведущая организация: ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени
профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»

Защита состоится 27 февраля 2025 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета 24.2.286.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», по адресу: 394026, г. Воронеж, Московский просп., 14, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке и на официальном сайте ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» <https://cchgeu.ru>.

Автореферат разослан 19 декабря 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
канд. техн. наук



Фёдоров Сергей Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Возникновение и развитие технологий беспроводной связи породило потребность в осуществлении радиоконтроля (РК), одной из целей которого является выявление случаев несанкционированного использования радиочастотного спектра и контроль соответствия параметров регистрируемых радиосигналов базе данных лицензированных сигналов регуляторного органа (частотно-территориальному плану). Важнейшими задачами, решаемыми в ходе РК, являются обнаружение сигналов и их идентификация (в частности, определение принадлежности стандарту связи). Для решения этих задач используются системы радиоконтроля (СРК).

В современных условиях контроль радиообстановки приходится осуществлять в диапазонах частот шириной несколько гигагерц, тогда как полосы одновременного обзора (ПОО) современных СРК составляют десятки-сотни мегагерц. Как следствие, РК производится, как правило, в режиме панорамного анализа (РПА), при котором приёмник СРК, настроившись на некоторую частоту, осуществляет сбор данных в пределах ПОО, затем последовательно перестраивается по частотам для контроля смежных полос частот. После сбора данных во всех полосах, составляющих подлежащий контролю анализируемый диапазон частот (АДЧ), цикл контроля повторяется. При этом, как правило, РПА предполагает расчёт спектральных характеристик сигналов в каждой из ПОО с последующим их объединением в панораму спектра (ПС), позволяющую оценивать радиообстановку во всём АДЧ.

Так как в РПА сбор данных в ПОО, входящих в АДЧ, осуществляется последовательно, а время перестроения с частоты одной ПОО на частоту другой оказывается существенным, то доля времени анализа, приходящаяся на сбор данных в каждой ПОО, оказывается довольно низкой, поэтому вероятность совпадения моментов сбора данных в очередной ПОО и выхода в эфир радиосигнала в пределах той же ПОО может оказаться слишком малой для надёжного обнаружения сигнала, а время его идентификации – слишком большим. Поэтому эффективное решение задач обнаружения и идентификации сигналов требует учёта технических характеристик СРК и оптимизации процессов сбора и обработки данных, включая правильный выбор порядка сканирования АДЧ, длительности сбора данных в ПОО, и прочих параметров анализа.

К сожалению, в доступной научной литературе уделяется недостаточно внимания учёту особенностей осуществления РК в РПА, таких как фрагментарность (интервалы поступления данных чередуются с паузами, необходимыми для перестроения по частоте) и цикличность (через определённые интервалы времени поступление данных о какой-либо частоте в пределах АДЧ повторяется). А потому исследования влияния этих факторов и параметров обработки на показатели качества процедур обнаружения и идентификации радиосигналов, такие как вероятность и среднее время обнаружения (идентификации) сигнала, оказываются актуальными.

Аппаратной основой для реализации многих алгоритмов РК являются программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС). При правильном учёте особенностей функционирования ПЛИС их применение позволяет:

- обеспечить высокую скорость обработки данных;
- выполнять обработку в режиме реального времени;
- повысить энергоэффективность обработки.

Однако если в литературе ещё можно найти статьи, посвящённые реализации на ПЛИС алгоритмов обнаружения, то применительно к идентификации, особенно в РПА, найти эффективные технические решения оказывается весьма проблематично. Таким образом,

актуальной задачей оказывается поиск технических решений для реализации на ПЛИС идентификационных процедур, учитывающих специфику функционирования ПЛИС и обеспечивающих экономное использование их ресурсов. Это становится особо важным при использовании в СРК ПЛИС начального класса, отличающихся малой стоимостью, размерами и энергопотреблением, однако характеризующихся весьма ограниченным набором вычислительных ресурсов и блоков памяти.

Таким образом, для создания СРК, успешно осуществляющих обнаружение и идентификацию сигналов в широких диапазонах частот, необходима разработка методик, совершенствующих процессы сбора и обработки данных с учётом специфики РПА, и алгоритмов идентификации, адаптированных для реализации на ПЛИС.

Степень разработанности темы исследования. Задаче обнаружения и идентификации сигналов в широкой полосе частот посвящён ряд работ. В частности, Spooner С. М. предложил итеративный алгоритм поиска сигналов с переменным спектральным разрешением; А. А. Thabit, М. Karpinski разработали алгоритм обнаружения сигналов для когнитивного радио, предназначенный для реализации на ПЛИС; Mariani А. занимался вопросами определения участков спектра, занятых сигналами; Nair S. предложил концепцию идентификации сигналов с использованием ПЛИС; D. Bao, L. De Vito., S. Capuano разработали метод сегментации спектра на основе гистограмм; Spooner С. М., Mody А. N, Gillman А. М. занимались задачей идентификации сигналов путём разделения ПОО на набор каналов и выделения в них циклостационарных признаков. Однако в существующих работах недостаточно исследована специфика РПА, а предлагаемые подходы зачастую не оптимизированы для реализации на ПЛИС. В то же время, описанные выше особенности проведения РК ввиду возрастания потока радиоданных, подлежащих обработке, порождают потребность в оптимизации процессов сбора и обработки данных с учётом особенностей РПА и используемой элементной базы в виде ПЛИС.

Объектом исследования являются осуществляемые в РПА процедуры обнаружения и идентификации радиосигналов.

Предмет исследования составляют:

- зависимости вероятности обнаружения и среднего времени обнаружения пакетных радиосигналов от длительности сеансов связи и статистики распределения интервалов между пакетами;
- режимы сбора данных в АДЧ при осуществлении РПА; зависимость показателя непрерывности сбора данных и вероятности обнаружения радиоимпульса (РИ) от используемого режима сбора данных в АДЧ и параметров задания на РК;
- алгоритмы первичной идентификации радиосигналов по форме спектра, функционирующие при низких отношениях сигнал-шум (ОСШ) и наличии интерференционных искажений, подходящие для реализации на ПЛИС начального класса; зависимость показателей качества идентификации от алгоритма идентификации и аппаратной платформы;
- режимы обработки данных при проведении РК в РПА; зависимость среднего времени идентификации сигнала (СВИ) от ширины спектрального фрагмента (СПФ), накопление которого требуется для старта процесса идентификации;
- алгоритмы выбора активного канала для детальной идентификации; зависимость времени идентификации сигнала от используемого алгоритма выбора канала.

Соответствие паспорту специальности. Диссертационное исследование соответствует пунктам 1, 3, 5, 6, 10 паспорта научной специальности 2.2.13. Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения.

Целью диссертационной работы является повышение эффективности широкополосного РК, осуществляемого с применением ПЛИС, за счёт совершенствования методик выбора: параметров сканирования АДЧ, режимов сбора и обработки идентификационных данных; разработки адаптированных для реализации на ПЛИС алгоритмов идентификации, применимых в условиях существенных интерференционных искажений и низких ОСШ.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Выявить зависимость вероятности обнаружения и среднего времени обнаружения пакетных радиосигналов в РПА от длительности используемых выборок, и на основе полученной зависимости научно обосновать методику установки длительности выборок, позволяющую повысить вероятность обнаружения пакетных радиосигналов в РПА.

2. Разработать и научно обосновать методику выбора режима сбора данных в АДЧ при использовании РПА, учитывающую временные показатели перестроения приёмника СРК по частоте, и позволяющую повысить вероятность обнаружения РИ.

3. Разработать методику выбора ширины спектрального фрагмента при осуществлении первичной идентификации сигналов в РПА, позволяющую осуществлять идентификацию для данных в процессе их накопления в АДЧ, учитывающую последовательность формирования идентификационных решений в процессе обработки данных и позволяющую минимизировать СВИ сигналов.

4. Разработать и научно обосновать алгоритм выбора для идентификации одного из совокупности активных частотных каналов, обеспечивающий равномерную идентификацию сигналов во всём наборе каналов в течение длительного времени, максимизирующий число идентификаций в каналах с наименьшей активностью ИРИ и предназначенный для реализации на ПЛИС.

5. Разработать алгоритм идентификации радиосигналов по форме спектра, позволяющий осуществлять идентификацию в условиях низких ОСШ и воздействия интерференционных искажений, адаптированный для реализации на ПЛИС начального класса.

Научная новизна. В диссертации получены следующие основные результаты, характеризующиеся научной новизной.

1. Методика выбора параметров сканирования АДЧ, учитывающая зависимость вероятности обнаружения и среднего времени обнаружения пакетных радиосигналов в РПА от длительности выборок, позволяющая повысить вероятность обнаружения пакетных радиосигналов и снизить среднее время их обнаружения.

2. Методика выбора режима сбора данных в АДЧ в зависимости от приоритетных требований к вероятности обнаружения сигнала на различных его участках, отличающаяся использованием реверсивного перестроения СРК по частотам, позволяющая повысить вероятность обнаружения кратковременных сигналов в АДЧ небольшой ширины и долю времени, затрачиваемую на накопление выборок.

3. Методика выбора ширины СПФ, накапливаемого для идентификации, отличающаяся от применения только типового режима отложенной обработки данных (при котором ширина СПФ равна АДЧ) использованием режима синхронной обработки (при котором ширина СПФ – меньше АДЧ), и обеспечивающая уменьшение среднего времени извлечения идентификационных сведений из обрабатываемых сигналов и объёма используемой оперативной памяти.

4. Алгоритм отбора активных частотных каналов для детальной идентификации, отличающийся от известных использованием истории предшествующих отборов, ориентированный на реализацию на ПЛИС и в случае функционирования одно-

типных ИРИ в совокупности частотных каналов позволяющий выровнять темп выдачи ИРИ из различных каналов на идентификацию, а также максимизировать число идентифицированных пакетов наиболее редко выходящих в эфир ИРИ.

5. Алгоритм идентификации стандартов радиоизлучений по форме спектра сигналов, отличающийся от известных использованием физической модели спектра сигнала, совокупностью решающих статистик, способом их совместного использования, и адаптацией к ресурсоэффективной реализации на ПЛИС, обеспечивающий существенное снижение требуемого ОСШ при идентификации радиоизлучений по спектрам, изменённым интерференционными искажениями.

Теоретическая значимость работы заключается в создании методик выбора параметров сканирования АДЧ, режимов сбора данных, а также параметра режимов обработки данных – ширины СПФ, при осуществлении РК в РПА, позволяющих повысить вероятность обнаружения и снизить время обнаружения и идентификации радиосигналов; в получении закономерностей изменения доли времени, затрачиваемой на накопление выборок, и вероятности обнаружения сигналов от режима сбора данных, характеристик СРК, задания на РК, и длительности сеанса связи; в выявлении закономерности изменения среднего времени получения идентификационных сведений от ширины СПФ, используемой при обработке данных, характеристик СРК, и задания на РК; в разработке алгоритма отбора частотных каналов для идентификации, позволяющего выровнять темп выдачи ИРИ из различных каналов на идентификацию, и максимизировать число идентифицированных пакетов наиболее редко выходящих в эфир ИРИ; в выявлении закономерности изменения времени идентификации от используемого алгоритма выбора канала; в разработке алгоритма идентификации стандартов радиоизлучений по форме спектра сигналов, обеспечивающего существенное снижение требуемого ОСШ при идентификации радиоизлучений по спектрам, изменённым интерференционными искажениями.

Практическая значимость работы. Внедрение методики выбора параметров сканирования диапазонов частот, методики выбора режима сбора данных в РПА, методики выбора ширины СПФ, используемой при обработке данных в РПА, алгоритма идентификации стандартов радиоизлучений по форме спектра, и алгоритма отбора активных частотных каналов для детальной идентификации позволяет повысить эффективность функционирования СРК, базирующихся на ПЛИС начального класса, при решении задач обнаружения и идентификации радиосигналов. Производителям СРК результаты работы дают возможность совершенствования аппаратно-программного обеспечения и улучшения показателей качества работы СРК.

Методы исследования. При выполнении работы использовался математический аппарат теории вероятностей, математической статистики, и метод модельно-ориентированного проектирования при реализации предложенных алгоритмов на ПЛИС. Проверка работоспособности предложенных методик выбора режима сбора данных, ширины СПФ, а также исследование алгоритмов идентификации и отбора активных каналов выполнялись путём математического моделирования. Проверка работоспособности программной и аппаратной версий предложенного алгоритма идентификации, а также аппаратной версии алгоритма отбора активных каналов выполнялись с использованием макетирования.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Для максимизации вероятности обнаружения сигналов, а также снижения среднего времени их обнаружения в РПА, следует:

– для непрерывных сигналов при сборе данных в ПОО использовать максимально короткие выборки, длительность которых достаточна для надёжного энергетического обнаружения сигналов;

– для пакетных (импульсных) сигналов, излучаемых в режиме временного разделения каналов (TDMA), при наличии априорной информации об их свойствах устанавливать длительность выборок, превышающую наиболее вероятный интервал между пакетами на удвоенный интервал времени, достаточный для надёжного энергетического обнаружения сигнала, а при отсутствии сведений использовать выборки длительностью порядка десятков миллисекунд.

2. Использование методики выбора режима сбора данных, включающей использование режима реверсивного перестроения СРК по частоте, обеспечивает рост доли времени, затрачиваемой на накопление выборок, и повышение вероятности обнаружения коротких радиоимпульсов при использовании СРК, для которых временные затраты на перестроение между отдалёнными по частоте ПОО существенно превышают протяжённость используемых выборок, в диапазонах частот, состоящих менее чем из 10 ПОО. При использовании предложенной методики увеличение доли времени, затрачиваемой на накопление выборок, может достигать 95% в случае обнаружения сигналов, и 20% при их идентификации. В результате уменьшения длительности цикла анализа средняя по АДЧ вероятность пропуска кратковременных радиоимпульсов в аппаратуре снижается. Для СРК производства АО «ИРКОС» подобное снижение может достигать 9%.

3. Применение методики выбора ширины СПФ при обработке данных о действующих в АДЧ радиоизлучениях, включающей применение как типового режима отложенной обработки данных, так и режима их синхронной обработки, обеспечивающего старт процесса идентификации после сбора данных для фрагмента АДЧ, позволяет сократить среднее время идентификации (СВИ), необходимое для получения из обрабатываемых сигналов идентификационных сведений. К примеру, при делении АДЧ шириной 40 ПОО на 5 СПФ сокращение СВИ может составлять 62% в сравнении с использованием только режима отложенной обработки данных.

4. Алгоритм отбора активных каналов, базирующийся на использовании истории предшествующих отборов, обеспечивает максимизацию числа идентифицированных пакетов редко выходящих в эфир источников радиоизлучений (ИРИ). Предлагаемый алгоритм в сравнении с прочими применяемыми на практике позволяет сократить время сбора данных о радиообстановке на величину от 29% до 56%.

5. Алгоритм первичной идентификации радиосигналов на основе физической модели спектра сигнала и комплексированного набора решающих статистик обеспечивает идентификацию сигналов при меньшем на 5 дБ ОСШ при умеренных интерференционных искажениях, и меньшем на 10 дБ ОСШ при существенных искажениях в сравнении с алгоритмами на базе типовых оценок спектрального подобию.

Реализация и внедрение результатов работы. Основные теоретические и практические результаты работы использованы при разработке СРК производства АО «ИРКОС» (г. Москва), а также внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «ВГТУ».

Достоверность и обоснованность полученных в диссертационной работе результатов обусловлена корректным использованием математического аппарата теории вероятностей и математической статистики, методов математического моделирования, согласованием результатов расчётов, моделирования и макетирования. Результаты работы не противоречат полученным и опубликованным ранее в литературе результатам других авторов.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международной конференции Computational Methods in Systems and Software (Czech Republic, 2022), XXV, XXVIII и XXIX Международных научно-технических конференциях «Радиолокация, навигация и связь» (Воронеж, 2019, 2022, 2023); XVI Всероссийской научной конференции «Ежегодная научная сессия аспирантов и молодых ученых» (Вологда, 2022); ежегодных научно-технических конференциях и научно-методических семинарах кафедры радиотехники и кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» (2020–2023).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 14 научных работ, включая 6 статей в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 1 работу в издании, индексируемом в международных цитатно-аналитических базах данных Web of Science и Scopus, и 7 докладов на научно-технических конференциях и семинарах.

Личный вклад автора состоит в разработке математической модели обнаружения сигналов в РПА, в выводе расчётных соотношений для режимов сбора данных, показателя непрерывности сбора данных и вероятности обнаружения сигналов; в выводе расчётных соотношений для режимов обработки идентификационных данных, среднего времени идентификации сигнала; в разработке и исследовании алгоритма отбора активных каналов, реализации его математической модели, а также аппаратной реализации на ПЛИС в составе СРК АРГАМАК-Д11 модели 4 производства АО «ИРКОС»; в соучастии в разработке, а также в исследовании комплексированного алгоритма идентификации сигналов, сопоставлении его с результатами базовых оценок спектрального подобия; в выборе и внедрении технических решений по оптимизации используемых аппаратных ресурсов при реализации комплексированного алгоритма идентификации на ПЛИС в составе СРК АРК-Д19Р производства АО «ИРКОС».

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы, включающего 78 наименований, и 1 приложения. Основная часть работы изложена на 112 страницах, содержит 53 рисунка и 8 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, определены научная новизна и практическая ценность работы, приведены сведения об апробации основных положений диссертации, её структуре, внедрении результатов; сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведены сведения о назначении СРК и предъявляемых к ним требованиям, целях РК, задачах обнаружения и идентификации сигналов.

Одной из задач РК является идентификация радиоизлучений, в частности, определение их принадлежности стандарту связи. При этом поток данных, подлежащих идентификации, непрерывно возрастает в связи с ростом ширины ПОО и скорости перестроения приёмника по частоте в каждом новом поколении СРК. Поэтому для обеспечения высокоскоростной идентификации сигналов необходимо последовательное снижение скорости потока данных, отправляемых на всё более трудоёмкие этапы обработки – например, в ходе выполнения следующей последовательности процедур:

- 1) «обнаружение» (выделение частот, где действуют какие-либо излучения);
- 2) «первичная идентификация» (поиск среди занятых частот тех, для которых вероятность получения сигналов нужного типа больше таковой для соседних интервалов частот);

3) «детальная идентификация», в ходе которой отсеиваются спорные случаи предшествующего этапа и результатом которой является набор целевых радиосигналов с полностью или частично оцененными признаками.

Во второй главе рассмотрены основные факторы, влияющие на вероятность обнаружения в РПА непрерывных, а также импульсных (пакетных) радиосигналов. Рассмотрено применение оконных функций для расчёта вероятности обнаружения пакетных радиосигналов систем радиосвязи с временным разделением каналов (TDMA), и получены выражения, учитывающие кусочно-линейный характер зависимости вероятности обнаружения таких радиосигналов от длительности сеанса связи. Предложена методика выбора параметров сканирования АДЧ, позволяющая повысить вероятность и снизить время обнаружения радиосигналов в РПА.

На основе обширного набора натуральных записей сигналов мобильных станций (МС) стандарта GSM, предполагающего деление оси времени на тайм-слоты длительностью $\tau_{\text{пкт}} = 577$ мкс, выделяемые в пределах TDMA кадров длительностью $\tau_{\text{к-GSM}} = 4,615$ мс, исследована зависимость вероятности обнаружения пакетных радиосигналов от статистических характеристик длительностей пакетов и пауз между ними. Также оценено среднее по разным частотам АДЧ время обнаружения сигналов $T_{\text{обн}}$ как интервал времени, после которого вероятность обнаружения возрастает минимум до 95% (учитывается лишь фрагментарность и цикличность обзора АДЧ, а ОСШ считается достаточным для уверенной регистрации сигнала при захвате хотя бы $\tau_{\text{мин}} = 0,1$ мс длительности пакета). На рисунке 1 показана зависимость $T_{\text{обн}}$ от длительности выборок $\tau_{\text{выб}}$ для непрерывных сигналов (сплошной линией) и пакетных сигналов МС GSM (пунктиром для сигнала «а» со средней скважностью, равной 8, соответствующего режиму разговора, и точками для сигнала «б» со средней скважностью, равной 14, соответствующего режиму вызова абонента). Последовательности пакетов данных сигналов имеют выраженный период в один TDMA кадр, что соответствует интервалу между пакетами $\tau_{\text{инт}} = 4,038$ мс.

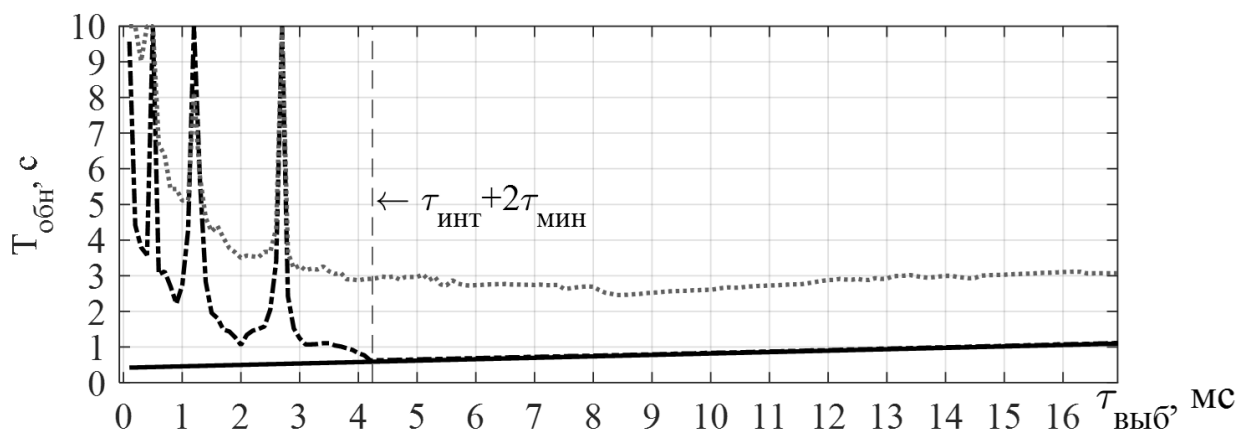


Рисунок 1 – Зависимость времени обнаружения от длительности выборки

Графики на рисунке 1 показывают, что время обнаружения непрерывного сигнала с увеличением длительности выборки, а значит, и цикла панорамного анализа линейно возрастает. Диаграммы для сигналов стандарта GSM показывают, что при $\tau_{\text{выб}} < \tau_{\text{инт}}$ наблюдаются «строб-эффекты», состоящие в пропуске пакетных сигналов даже при их длительном пребывании в эфире. Влияние «строб-эффекта» на время обнаружения значительно снижается при длительности выборок, превышающей интервал между пакетами на $2\tau_{\text{мин}}$, но дальнейшее её увеличение также ведёт к росту времени обнаружения. Характер зависимости, представленной на рисунке 1, является типичным для пакетных сигналов, излучаемых в режиме TDMA.

Проведённые исследования позволяют сформировать методику выбора параметров сканирования АДЧ, позволяющую повысить вероятность и снизить время обнаружения радиосигналов в РПА:

- 1) при работе с непрерывными сигналами следует использовать выборки минимальной длительности, обеспечивающей надёжное энергетическое обнаружение;
- 2) при наличии априорной информации о свойствах искомого пакетного сигнала, излучаемого в режиме TDMA, рекомендуется использовать длительность выборок, превышающую наиболее вероятный интервал между пакетами на удвоенную величину регистрации пакета, достаточную для его надёжного энергетического обнаружения;
- 3) в отсутствии данных о интервалах между пакетами следует использовать выборки длительностью порядка десятков миллисекунд, что несколько увеличивает время панорамного цикла, но значительно снижает вероятность пропуска сигнала из-за «строб-эффектов».

В третьей главе предложена методика выбора режима сбора данных, предполагающая, помимо классического однонаправленного режима, использование реверсивного режима, позволяющего при определённых условиях уменьшить период получения данных на различных частотах АДЧ, благодаря чему повысить показатель непрерывности сбора данных E в виде доли времени, затрачиваемого СРК на сбор данных, и вероятность $P(T_c)$ обнаружения радиоимпульсов (РИ) длительностью T_c .

При реализации РПА традиционно используется однонаправленный режим, при котором сканирование АДЧ выполняется в порядке от начальной его частоты к конечной, по достижении которой снова происходит перестроение на стартовую частоту и сканирование АДЧ циклически повторяется с периодом $T_{\text{цикл_одн}}$. Однако этот режим не является единственно возможным, а подтверждения его оптимальности с позиций максимизации показателей E и $P(T_c)$ в литературе не обнаруживается.

Из-за необходимости обеспечения высокой точности настройки на частоту и низкого уровня побочных спектральных составляющих время перестроения приёмников СРК между частотами оказывается значительным, и нередко существенно возрастает по мере увеличения интервала (шага) перестроения. В частности, для СРК АРГАМАК-Д11 модели 4, производимой компанией «ИРКОС», время $K\tau_{\text{п1}}$ перестроения приёмника между частотами, удалёнными друг от друга на 3 ПОО и более, превышает время перестроения между смежными по частоте ПОО $\tau_{\text{п1}}$ в $K = 3$ раза. Снизить временные затраты на перестроение позволяет реверсивный режим, при котором, после приёма выборки в последней ПОО АДЧ, приёмник СРК меняет направление смены частот: он сначала перестраивается на предпоследнюю ПОО, далее продолжает перестроение вниз по частоте вплоть до первой ПОО, затем прямой порядок перестроения вновь восстанавливается, и сканирование АДЧ циклически повторяется с периодом $T_{\text{цикл_рев}}$. На рисунке 2 приведены диаграммы процессов сбора данных в АДЧ для рассмотренных режимов при числе ПОО в АДЧ $L = 5$, и отмечен интервал сбора данных в средней ПОО №3 как $T_{\text{сб_одн_3}}$ для однонаправленного и $T_{\text{сб_рев_3}}$ для реверсивного режима.

Полученные расчётные соотношения показывают, что за счёт изменения порядка перестроения приёмника СРК по частоте показатель непрерывности сбора данных E увеличивается. Максимальный выигрыш в показателе E реверсивный режим обеспечивает при сканировании небольших по ширине АДЧ, если при этом время перестроения между отдалёнными по частоте ПОО существенно превышает длительность выборок. В частности, для СРК АРГАМАК-Д11 модели 4 при длительности выборок 40 мкс и ширине АДЧ 96 МГц выигрыш может достигать 95%. При решении же задач идентификации сигналов при длительности выборок 640 мкс и ширине АДЧ 240 МГц, выигрыш в непрерывности сбора данных составляет 20%.

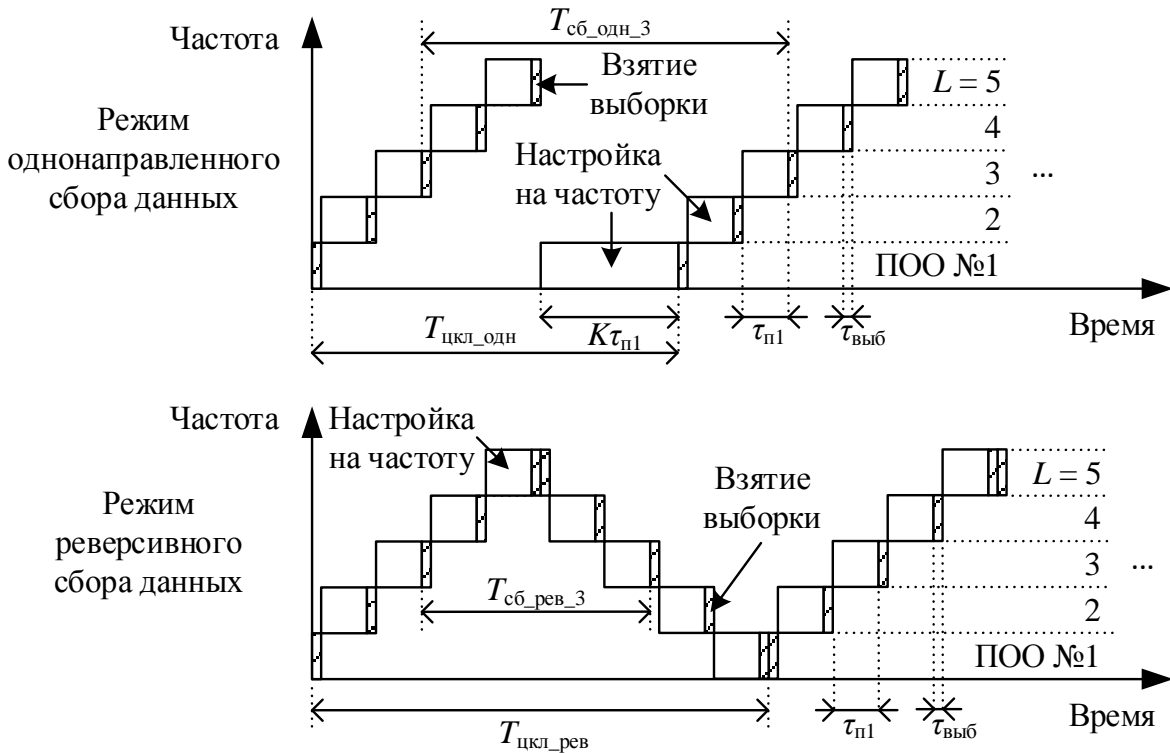


Рисунок 2 – Диаграммы процессов сбора данных в АДЧ

При малой ширине АДЧ реверсивный режим превосходит отложенный в вероятности обнаружения РИ на любых частотах. С ростом длительности выборок и ширины АДЧ выбор режима, обеспечивающего максимальную вероятность обнаружения РИ, начинает зависеть от частоты и длительности излучения, так как при использовании реверсивного режима интервал сбора данных на различных частотах АДЧ отличается. Так, при использовании СРК АРГАМАК-Д11 модели 4 в АДЧ шириной 120 МГц и длительности выборок, равной 40 мкс, максимальный выигрыш в вероятности обнаружения РИ при использовании реверсивного режима соответствует РИ с длительностью $T_c = T_{\text{цкл_рев}} / 2$, и при излучении РИ в середине АДЧ (что обеспечивает минимизацию максимального интервала сбора данных, отмеченного для данного случая на рисунке 2) достигает 42% в абсолютном значении. При излучении РИ на краях АДЧ большую на 8% вероятность обнаружения РИ обеспечивает реверсивный режим. В среднем же в данном случае реверсивный режим обеспечивает повышение вероятности обнаружения РИ на 9%. Полученные расчётные соотношения показывают, что предложенный режим целесообразно использовать при работе в АДЧ небольшой ширины, составляющей единицы ПОО, что обычно соответствует нескольким сотням мегагерц. При работе же в АДЧ шириной несколько гигагерц эффект от применения реверсивного режима оказывается незначительным.

Выражение для длительности радиоимпульса, при которой вероятность его обнаружения в обоих рассмотренных режимах одинакова, имеет вид:

$$T_{c.p}(k) = (P_{\text{рев_мин}} - P_{\text{одн_мин}}) / \left(\frac{1 - P_{\text{одн_мин}}}{T_{\text{цкл_одн_эфф}} + \tau_{\text{мин}}} - \frac{1 - P_{\text{рев_мин}}}{kT_{\text{цкл_рев_эфф}} + \tau_{\text{мин}}} \right) + \tau_{\text{мин}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{одн_мин}} = (\tau_{\text{выб}} - 2\tau_{\text{мин}}) / T_{\text{цкл_одн}}$, $P_{\text{рев_мин}} = 2(\tau_{\text{выб}} - 2\tau_{\text{мин}}) / T_{\text{цкл_рев}}$ – вероятность обнаружения РИ минимальной длительности в однонаправленном и реверсивном режиме соответственно, $T_{\text{цкл_одн_эфф}} = T_{\text{цкл_одн}} - \tau_{\text{выб}}$, $T_{\text{цкл_рев_эфф}} = T_{\text{цкл_рев}} - 2\tau_{\text{выб}}$ – эффективная длительность цикла,

$\tau_{\text{мин}}$ – минимальный интервал перекрытия выборки и РИ для его обнаружения, k – доля эффективной длительности цикла, при которой достигается единичная вероятность обнаружения РИ в реверсивном режиме (при излучении РИ в центральной ПОО (а также в однонаправленном режиме) $k = 1/2$, в крайней ПОО $k = 1$, и в среднем по этим случаям $k = 3/4$).

Исходя из выражения (1), можно сформировать методику выбора режима сбора данных, максимизирующего вероятность обнаружения РИ с длительностью T_c . Выбор режима сбора данных определяется соотношением длительности РИ T_c и точек пересечения графиков вероятности обнаружения РИ, излучаемого в крайней ПОО: $T_{c,p}(1)$, и в среднем по АДЧ: $T_{c,p}(3/4)$, показанных на рисунке 3 для «спорного» между двумя режимами случая использования СРК АРГАМАК-Д11 модели 4 при $L = 5$ и $\tau_{\text{выб}} = 1,28$ мс.

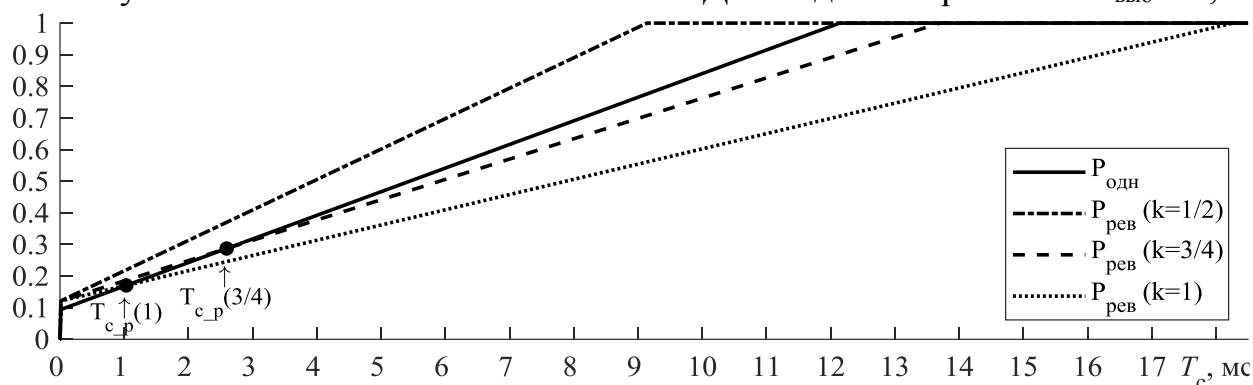


Рисунок 3 – Вероятности обнаружения РИ в двух режимах сбора данных

Предложенная методика представлена также в таблице 1. Буквами «О» и «Р» обозначены однонаправленный и реверсивный режимы соответственно.

Таким образом, использование предложенной методики позволяет выбрать режим, максимизирующий требуемую вероятность обнаружения радиопульсов при различных параметрах СРК, задания на РК, и длительности сеанса связи.

Таблица 1 – Методика выбора режима сбора данных

Выполняемое условие	Максимизируемая вероятность		
	Минимальная (на краю АДЧ)	Средняя по АДЧ	Максимальная (в центре АДЧ)
$T_c < T_{c,p}(1)$	Р	Р	Р
$T_{c,p}(1) < T_c < T_{c,p}(3/4)$, $\tau_{\text{выб}}/\tau_{\text{пл}} > 2K/(L-1)-1$, или $T_{c,p}(1) < T_c$, $\tau_{\text{выб}}/\tau_{\text{пл}} < 2K/(L-1)-1$	О	Р	Р
$T_c > T_{c,p}(3/4)$, $\tau_{\text{выб}}/\tau_{\text{пл}} > 2K/(L-1)-1$	О	О	Р

В четвёртой главе рассмотрена задача первичной идентификации радиосигналов при проведении РК на основе панорамы спектра (ПС), полученной накоплением по максимуму оценок спектральной плотности амплитуд в совокупности ПОО, составляющих АДЧ. Получены оценки качества идентификации для алгоритмов на основе типовых оценок спектрального подобия. Принципом работы данных алгоритмов является сопоставление ПС с образцами спектра сигналов различных стандартов – спектральными масками (СМ). Для проведения идентификации в условиях действия интерференционных искажений, а также низких ОСШ, разработан комплексированный алгоритм идентификации по спектральным маскам (АСМ). Блок-схема алгоритма АСМ приведена на рисунке 4.

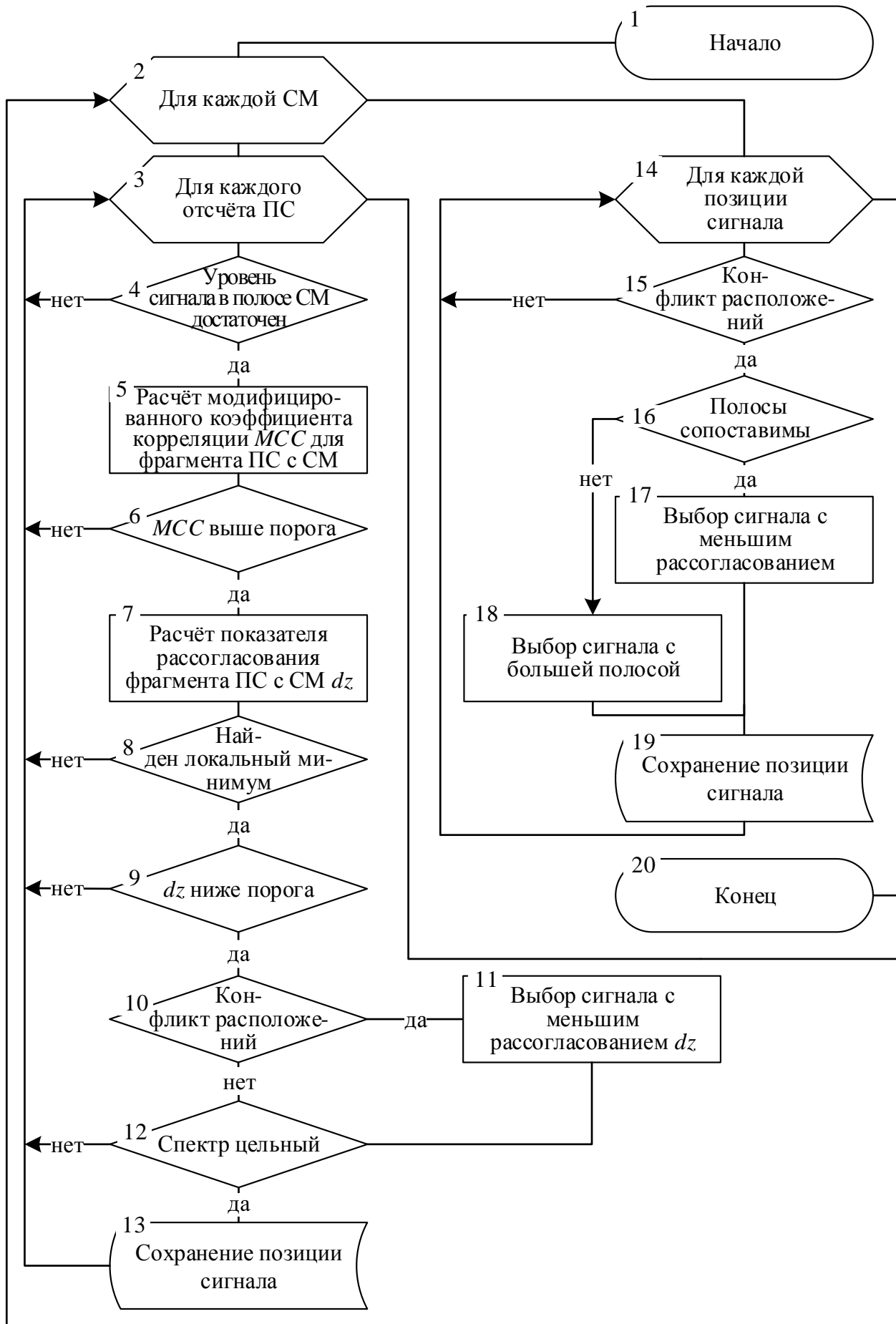


Рисунок 4 – Блок-схема предложенного алгоритма идентификации АСМ

Результаты тестирования различных алгоритмов идентификации на сигналах 4-х стандартов в виде минимальных ОСШ, при которых алгоритм сохраняет работоспособность, приведены в таблице 2. По представленным результатам видно, что АСМ в сравнении с прочими алгоритмами обеспечивает успешную идентификацию при меньшем на 10 дБ ОСШ в условиях существенных интерференционных искажений.

Таблица 2 – Минимальные ОСШ для различных алгоритмов идентификации, дБ

Алгоритм	Стандарт			
	LTE ₂₀	LTE ₁₀	DVB-T2	UMTS
SCC	25	–	–	20
SAM	20	–	–	15
SID	10	30	–	15
АСМ	15	≤ 10	≤ 10	≤ 10

В пятой главе рассмотрены особенности адаптации предложенного алгоритма первичной идентификации сигналов к реализации на ПЛИС.

Процесс первичной идентификации сопровождается обработкой высокоскоростного потока данных, поэтому подходящей аппаратной основой для реализации алгоритмов идентификации являются ПЛИС. Однако при реализации алгоритмов обработки сигналов на ПЛИС необходимо учитывать следующие их особенности.

1. Параллелизм вычислений. При выполнении программы на микропроцессоре при обработке ветвлений исполняется только код, соответствующий условию. При реализации же алгоритма на ПЛИС вычисления проводятся по всем ветвлениям, а используется результат сработавшей ветви.

2. Ограниченный объём аппаратных ресурсов. В силу особенности №1 на ПЛИС должны быть размещены все ветви обработки. Но ресурсы ПЛИС (число логических элементов (LUT), триггеров (FF), блоков умножения-сложения (DSP), блоков памяти (BRAM)) ограничены, а потому их экономное использование является важным принципом при реализации алгоритмов обработки сигналов.

3. Следствием особенности №2 является использование при вычислениях на ПЛИС преимущественно чисел с фиксированной запятой, в отличие от программной реализации алгоритмов, где широко используются числа с плавающей запятой. Данная особенность приводит к определённым отличиям в результатах работы программной и аппаратной реализаций алгоритмов.

С учётом описанных особенностей, реализация алгоритма АСМ на ПЛИС базируется на следующих принципах.

1. Величины, неизменные при поиске сигналов каждого из стандартов, рассчитываются программно и загружаются в ПЛИС в виде набора констант.

2. При реализации алгоритмов обработки сигналов на ПЛИС, как правило, используются потоковые схемы, где над данными в порядке их поступления (в конвейерном режиме) выполняются одновременно все операции. Поэтому расчёты тех или иных показателей для одной позиции СМ в ПС при реализации на ПЛИС преобразуются в последовательный расчёт скользящим окном для всех возможных позиций.

3. Расчёт скользящего максимума (СКМ) ПС, скользящей суммы ПС, и скалярного произведения ПС с СМ при прямой реализации на ПЛИС занимает существенный объём аппаратных ресурсов, поэтому для расчёта СКМ используется алгоритм van Herk/Gil-Werman (HGW), состоящий в расчёте СКМ через накопленный и поэлементный максимумы; для скользящей суммы – рекурсивная реализация; расчёт же скалярного произведения выполняется посредством КИХ-фильтра с коэффициентами СМ, разрядность которых выбирается равной 5 бит для выполнения умножений без использования малочисленных в ПЛИС начального класса блоков DSP, а частота работы схем умножения-сложения поднимается в 4 раза относительно частоты входных данных для экономии ресурсов ПЛИС (LUT).

4. Так как алгоритм АСМ содержит сравнения результатов деления с пороговыми значениями, а операция деления в сравнении с умножением требует много большего числа ресурсов ПЛИС (LUT), эти операции заменяются сравнением делимого и произведения делителя с пороговым значением. Аналогично, сравнения выражений, содержащих ресурсоёмкий в сравнении с умножением расчёт квадратного корня, заменяются сравнением возведённых в квадрат соответствующих выражений.

Процесс идентификации посредством алгоритма АСМ с использованием ПЛИС состоит из следующих этапов:

- 1) перестроение приёмника СРК на центральную частоту очередной ПОО и приём временной выборки;
- 2) расчёт накопленного спектра и сохранение его в память;
- 3) при достаточном объёме данных для формирования ПС – выдача её на обработку;
- 4) обработка ПС при помощи алгоритма идентификации, определение возможных позиций сигнала (ВПС) и передача их на программную обработку;
- 5) формирование решений о расположении в ПС сигналов различных стандартов на основе полученных ВПС.

При этом процессы сбора данных для новой ПС и обработки данных предыдущей ПС могут выполняться одновременно. Этапы 1-4 реализуются на ПЛИС, а этап 5 отбора решений – на универсальном компьютере.

Показателем качества аппаратной реализации АСМ может служить величина d , отражающая степень совпадения результатов работы аппаратной и программной реализаций идентификационного алгоритма, определяемая как

$$d = n_{eq} / n_{all} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где n_{eq} – суммарное число отсчётов спектра, для которых результат идентификации различными реализациями АСМ совпадает, n_{all} – суммарное число спектральных отсчётов по всем используемым в эксперименте спектрам.

Проверка различных реализаций АСМ, проведённая с использованием сигналов стандартов DVB-T2, UMTS, LTE (с полосой 5, 10, 20 МГц), показывает, что степень совпадения их результатов (2) составляет $d = 81\%$.

Предложенные оптимизации и технические решения позволяют реализовать алгоритм АСМ на ПЛИС начального класса, обеспечив при этом высокое быстродействие. Например, при реализации АСМ на ПЛИС Xilinx Zynq 7020 используется около 50% элементов LUT и FF, от 14% до 56% элементов BRAM, и 9% элементов DSP, а скорость обработки ПС составляет 4,6 ГГц/с.

В шестой главе предложена методика выбора ширины обрабатываемого при идентификации сигналов в РПА участка АДЧ – спектрального фрагмента (СПФ), после сбора данных для которого стартует процесс идентификации. Данная методика включает использование, помимо классического режима отложенной обработки данных (при котором они накапливаются для всего АДЧ, а СПФ является единственным и равным ПС шириной $W_{SF} = L$ ПОО), режима синхронной обработки (при котором АДЧ делится на $N_{SF} > 1$ СПФ, состоящих из $W_{SF} < L$ ПОО), отличающегося меньшим средним временем идентификации (СВИ) сигнала (на 62% при работе СРК АРГА-МАК-Д11 модели 4 в АДЧ шириной $L = 40$ ПОО, разбитом на $N_{SF} = 5$ СПФ) и меньшим необходимым объёмом оперативной памяти, однако также обладающего большей сложностью процесса принятия идентификационных решений и необходимостью поддержания определённого состояния обработчика при старте анализа СПФ.

На рисунке 5 приведены диаграммы процесса идентификации, соответствующие рассмотренным режимам обработки данных, при времени обработки t_{SFp} данных в СПФ, большем времени их сбора t_{SFg} , определяемых как:

$$\begin{aligned} t_{SFg} &= W_{SF} \cdot t_{1g}, \\ t_{SFp} &= W_{SF} \cdot t_{1p} + t_l, \end{aligned} \quad (3)$$

где $t_{1g} = \tau_{\text{выб}} + \tau_{\text{пл}}$, t_{1p} – время сбора и обработки данных в ПОО соответственно, t_l – время инициализации обработчика при старте анализа СПФ. Отложенный режим можно рассматривать как синхронный при $W_{SF} = 1$ (СПФ – единственный), и $t_l = 0$.

Элементы с обозначением «G» на рисунке 5 отражают интервалы сбора данных, «P» – их обработки. Индексы элементов для режима отложенной обработки обозначают номер панорамного цикла, для режима синхронной обработки – номер ПОО, которому соответствует накапливаемый (обрабатываемый) СПФ.

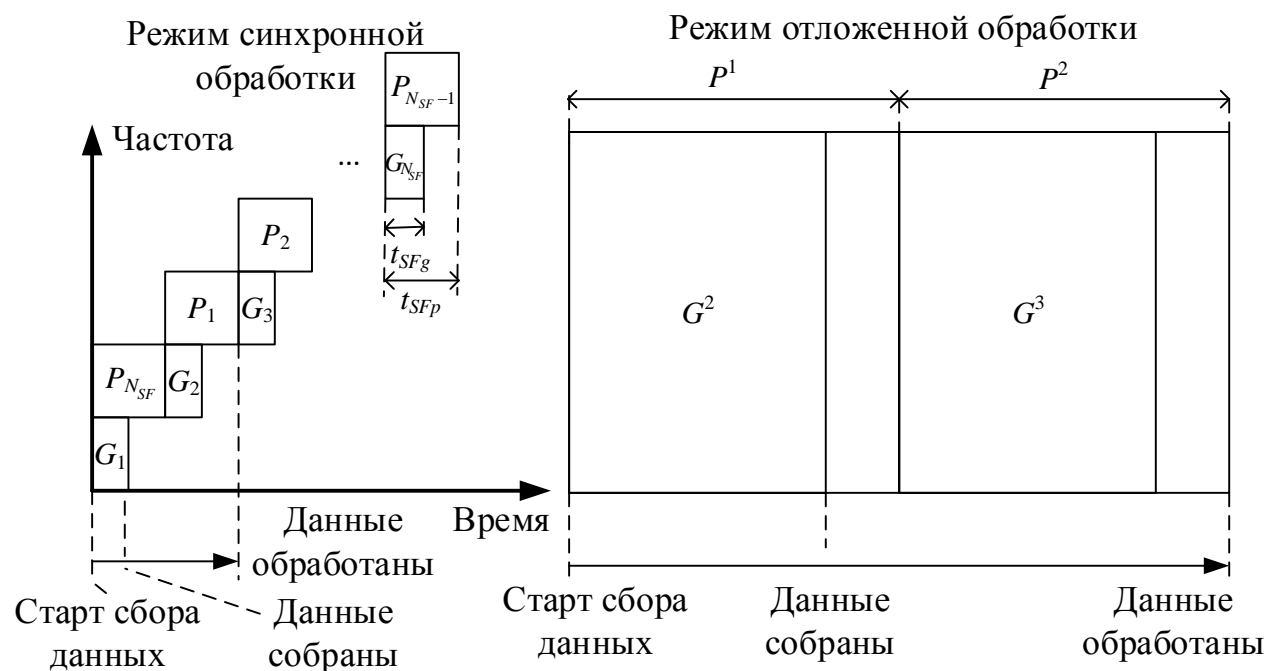


Рисунок 5 – Диаграммы процесса идентификации для рассмотренных режимов

Так как результаты идентификации для сигнала, зарегистрированного в пределах СПФ, могут быть получены только после обработки этого СПФ, то СВИ и объём оперативной памяти, необходимой для хранения отсчётов СПФ, при исполь-

зовании режима синхронной обработки из-за снижения ширины СПФ оказываются меньше, чем для режима отложенной обработки. Однако разбиение АДЧ на СПФ приводит к необходимости «сшивки» результатов идентификации для соседних СПФ, что выражается в усложнении процедуры формирования идентификационных решений, а также, при соответствующей структуре обработчика, дополнительных временных затратах t_l на его инициализацию при старте обработки СПФ.

В случае, когда время сбора данных СПФ t_{SFg} превышает время их обработки t_{SFp} , минимальное значение СВИ обеспечивает СПФ единичной ширины.

В обратном случае, когда время обработки данных СПФ t_{SFp} превышает время их сбора t_{SFg} , выражение для ширины СПФ W_{opt} , минимизирующей СВИ при условии, что АДЧ содержит целое число СПФ (L кратно W_{SF}), имеет следующий вид:

$$W_{opt} = \arg \min_{W_{SF} \in \mathbf{W}_{arr}} \left\{ (1 - W_{SF}) \cdot t_{1g} + (4 + L / W_{SF}) \cdot (W_{SF} \cdot t_{1p} + t_l) \right\}, \quad (4)$$

где \mathbf{W}_{arr} – массив возможных значений W_{SF} (делителей L), при которых $t_{SFp} > t_{SFg}$.

Вещественное решение для оптимальной ширины СПФ, минимизирующей аргумент выражения (4) (СВИ), имеет вид:

$$W_{opt_R} = \sqrt{L t_l / (4 t_{1p} - t_{1g})}. \quad (5)$$

По выражению (5) видно, что с ростом числа ПОО в АДЧ L , времени повторной инициализации обработчика t_l , и времени сбора данных в ПОО t_{1g} , оптимальная ширина СПФ растёт, а с ростом времени обработки ПОО t_{1p} – уменьшается. При нулевом же времени t_l оптимальная ширина СПФ становится единичной.

По результатам проведённого в работе анализа режимов обработки данных была разработана следующая методика выбора ширины СПФ, минимизирующей СВИ, отражённая в таблице 3 в виде ширины СПФ W_{opt} и показателя выигрыша в СВИ $\Delta t_{синх}$ при использовании синхронного режима в сравнении с отложенным.

При наличии возможности реализации синхронного режима (в частности, процедуры отбора решений) следует использовать этот режим, т.к. он обеспечивает меньшее СВИ, чем отложенный. При этом ширина СПФ должна быть единичной, за исключением случая, когда время обработки данных t_{SFp} превышает время их сбора t_{SFg} , а время инициализации обработчика t_l в начале обработки СПФ отлично от нуля. В таком случае следует использовать СПФ с шириной, обеспечивающей минимальное СВИ в окрестности вещественного решения (5) уравнения (4):

$$W_{opt} = \arg \min_W \{ t_{id}(W) \}, W \in \left[\lfloor W_{opt_R} \rfloor, \lceil W_{opt_R} \rceil \right] \cap \mathbf{W}_{arr}, \quad (6)$$

где $\lfloor \cdot \rfloor$ – операция округления вниз, $\lceil \cdot \rceil$ – округления вверх, \cap – пересечение множеств.

Таблица 3 – Предложенная методика выбора ширины СПФ W_{opt}

Соотношение времён сбора t_{SFg} и обработки t_{SFp} данных в СПФ	Выигрыш в СВИ $\Delta t_{синх}$ для синхронного режима	Время инициализации обработчика	
		$t_l = 0$	$t_l > 0$
$t_{SFp} > t_{SFg}$	$(L - W_{opt})(4t_{1p} - t_{1g}) / 2$	$W_{opt} = 1$	W_{opt} задана выражением (6)
$t_{SFp} < t_{SFg}$	$(L - W_{opt})(2t_{1p} + t_{1g}) / 2$	$W_{opt} = 1$	$W_{opt} = 1$

Выигрыш синхронного режима в СВИ увеличивается с ростом числа СПФ (а значит, и ширины АДЧ), и при малом числе СПФ (небольшой ширине АДЧ), а также

достаточно высокой скорости сбора и обработки данных, может оказаться несущественным. Поэтому, хотя минимальное СВИ обеспечивает синхронный режим (ширина СПФ, меньшая АДЧ), в силу большей сложности его реализации следует оценить соответствующий ему выигрыш в СВИ $\Delta t_{\text{синх}}$, и если он достаточно мал, то более рациональным будет выбор отложенного режима (ширины СПФ, равной АДЧ).

В седьмой главе рассматривается проблема организации завершающей стадии идентификации сигналов.

Сосуществование в эфире как сигналов разных стандартов связи, так и однотипных сигналов, использующих несколько частотных каналов, усложняет процесс идентификации ИРИ. Параллельный анализ всех каналов требует высокой вычислительной производительности СРК: применения многоядерных центральных, графических процессоров, или ПЛИС старшего класса. Однако, если задачей РК является не идентификация всех появляющихся в эфире пакетов данных, а составление базы данных ИРИ, то вместо перехвата всех излучаемых в эфир сигналов достаточно обеспечить высокую вероятность перехвата и идентификации сигналов «новых» ИРИ, не внесённых в базу данных РК. И если набор ИРИ вокруг СРК меняется не слишком быстро, то для актуализации базы данных достаточно наличия в СРК модуля обнаружения и первичной идентификации излучений в частотных каналах искомых стандартов, и по одному модулю детальной идентификации для каждого из них. При этом для повышения быстродействия детальная идентификация может выполняться на ПЛИС. В этом случае запись длительной выборки в DRAM-память для анализа сигналов во всех частотных каналах оказывается невозможна, или сопряжена с использованием ресурсов ПЛИС на реализацию DRAM-контроллера. Объём же доступной SRAM-памяти оказывается на порядки меньше, поэтому сразу после обнаружения и первичной идентификации излучений в каналах искомых стандартов выбирается канал для детальной идентификации. В этом случае, при существенной загрузке АДЧ однотипными сигналами, использующими разные каналы, оперативность заполнения (обновления) базы данных ИРИ будет зависеть от алгоритма выбора канала для детальной идентификации. Таким образом, для повышения эффективности работы СРК становится актуальной задача разработки алгоритма отбора для детальной идентификации наиболее релевантного канала из совокупности задействованных в АДЧ.

Структурная схема блока обнаружения и обработки сигналов, реализующего выбор канала для детальной идентификации, показана на рисунке 6.

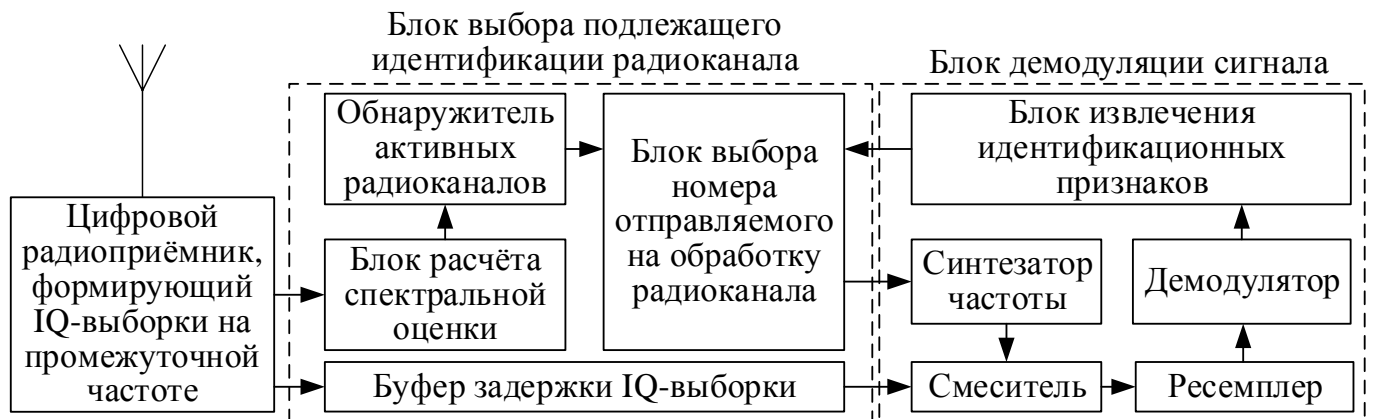


Рисунок 6 – Структурная схема блока обнаружения и обработки сигналов

Кратко предлагаемый алгоритм отбора каналов можно описать так: из активных каналов обработке подлежит тот, для которого число предыдущих случаев контроля минимально. Для описания алгоритма следует ввести следующие переменные:

- 1) Ψ – количество частотных каналов искомого стандарта;
- 2) ν – показатель, хранящий номер канала-кандидата на контроль;
- 3) D – глубина истории контроля (ИК) (число учитываемых случаев контроля);
- 4) h – показатель ИК для канала-кандидата на контроль, исходно равный D ;
- 5) \mathbf{H} – массив ИК объёмом Ψ , хранящий число попыток контроля каждого канала и исходно инициализируемый нулями.

Алгоритм состоит из следующих циклически выполняемых этапов.

1. По временной выборке посредством БПФ рассчитывается оценка спектральной плотности мощности (СПМ) для сигналов, принимаемых в ПОО.

2. По отсчётам оценки СПМ проводится последовательный анализ частотных каналов. При наличии сигнала в i -ом канале значение h сравнивается с числом предыдущих случаев контроля канала $\mathbf{H}(i)$, и выбирается номер θ канала-кандидата на идентификацию с наименьшим числом предыдущих попыток контроля:

$$\theta = \begin{cases} i, & h \geq \mathbf{H}(i), \\ \nu, & h < \mathbf{H}(i). \end{cases} \quad (7)$$

При $h \geq \mathbf{H}(i)$ обновляется номер подлежащего контролю канала и показатели: $\nu = i$, $h = \mathbf{H}(i)$. Таким образом, после завершения анализа всех Ψ каналов θ будет означать номер канала, выданного на обработку наименьшее число раз.

3. Канал с номером θ передаётся на обработку, а анализ новых каналов останавливается на время, необходимое для подтверждения принадлежности сигнала искомому стандарту. При получении такого подтверждения остановка анализа продлевается на время, необходимое для полной обработки пакета.

4. Пока анализ каналов остановлен, ИК обновляется по следующим правилам.

4.1 Если показатель ИК выбранного канала достиг глубины истории D , ИК всех каналов сдвигается:

$$\mathbf{H}(i) = \begin{cases} \mathbf{H}(i) - 1, & \mathbf{H}(\theta) = D, \\ \mathbf{H}(i), & \mathbf{H}(\theta) < D. \end{cases} \quad (8)$$

4.2 Показатели, которые при сдвиге стали отрицательными (вышли за границу окна ИК), обнуляются:

$$\mathbf{H}(i) = \begin{cases} \mathbf{H}(i), & \mathbf{H}(i) > 0, \\ 0, & \mathbf{H}(i) \leq 0. \end{cases} \quad (9)$$

4.3 Факт контроля канала с номером θ фиксируется в ИК: $\mathbf{H}(\theta) = \mathbf{H}(\theta) + 1$.

4.4 Показатель ИК h инициализируется числом D , что при следующей итерации анализа обеспечивает контроль канала с любым показателем ИК, если этот канал – единственный обнаруженный по отсчётам текущей оценки СПМ.

Эффективность данного алгоритма оценивалась путём моделирования. Использовался тестовый сигнал, где в каждом из $\Psi = 5$ частотных каналов действовали разные ИРИ, излучая пакеты длительностью 0,1 мс с интервалом между ними, заданным равномерно распределённой случайной величиной в рамках минимального и максимального интервалов для данного канала, увеличивающихся с ростом номера канала.

В сравнении участвовали следующие алгоритмы отбора каналов:

- 1) выбор канала на основе истории контроля;
- 2) выбор первого канала по списку;
- 3) выбор канала с первым за интервал окна обнаружения пакетом;
- 4) выбор случайного канала.

Тестирование проводилось при прямом порядке нумерации каналов и при обратном её порядке. Усреднённые результаты 10^4 экспериментов в виде времени, затраченного на анализ всех частотных каналов (приём хотя бы одного пакета в каждом канале), и показатели различия времени анализа для каждого из алгоритмов с алгоритмом №1 при обратном порядке нумерации каналов, приведены в таблице 4.

По результатам экспериментов наиболее эффективным оказался предложенный в диссертации алгоритм №1 (выбор канала на основе истории контроля), при отсутствии априорных сведений о скважности излучений обеспечив выигрыш от 29% до 56% во времени анализа каналов в сравнении с прочими алгоритмами.

Таблица 4 – Результаты экспериментов по отбору каналов для обработки

Алгоритм №	Порядок нумерации каналов	Время анализа, мс	Различие с алгоритмом №1 (обратный порядок нумерации)	
			мс	%
1	прямой	86	-4	-5
	обратный	90	0	0
2	прямой	205	115	56
	обратный	88	-2	-2
3	прямой	127	37	29
4	прямой	126	36	29

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанные методики и алгоритмы, позволяющие усовершенствовать процедуры обнаружения и идентификации радиосигналов, представляют собой комплекс научно обоснованных технических и технологических решений, обеспечивающих заметное повышение показателей качества аппаратуры панорамного радио-контроля. К основным полученным в ходе диссертационного исследования результатам можно отнести следующие.

1. Показано, что при использовании РПА для максимизации вероятности и снижения среднего времени, требующегося для обнаружения сигналов, следует:

– для непрерывных сигналов при сборе данных в полосах одновременного обзора (ПОО) использовать максимально короткие выборки, длительность которых достаточна для надёжного энергетического обнаружения сигналов;

– для пакетных (импульсных) сигналов, излучаемых в режиме временного разделения каналов (ТДМА), при наличии априорной информации об их свойствах устанавливать длительность выборок, превышающую наиболее вероятный интервал между пакетами на удвоенную величину длительности регистрации пакета, достаточную для его надёжного энергетического обнаружения, а при отсутствии сведений – использовать выборки длительностью порядка десятков миллисекунд.

2. Предложена методика выбора режима сбора данных в РПА, включающая, помимо традиционно применяемого режима однонаправленного сбора данных, использование режима реверсивного сбора данных, отличающегося порядком смены частот настройки приёмника СРК. В достаточно частых случаях использования аппаратуры, для которой временные затраты на перестроение между отдалёнными по частоте ПОО существенно превышают длительность выборок, а также при необходимости анализировать диапазоны частот, состоящие из менее чем 10 ПОО, использование режима реверсивного сбора данных способствует росту доли времени, затрачиваемой на накопление сведений о радиоизлучениях, и, как следствие, обеспечивает повышение вероятности обнаружения радиоимпульсов (РИ).

Показано, что применительно к СРК АРГАМАК-Д11 модели 4 предложенная методика позволяет при обнаружении сигналов получить выигрыш в непрерывности сбора данных до 95%, а также повысить вероятность обнаружения РИ на величину до 42% за счёт сокращения периодов сбора данных в АДЧ в сравнении с использованием только режима однонаправленного сбора данных. При решении задач первичной идентификации сигналов, предполагающих использование более протяжённых выборок длительностью 640 мкс, в анализируемом диапазоне частот (АДЧ) шириной 240 МГц выигрыш в непрерывности сбора данных составляет 20%.

3. В целях ускорения анализа радиообстановки предложено использовать методику выбора ширины обрабатываемого при идентификации сигналов в РПА участка АДЧ – спектрального фрагмента (СПФ), после сбора данных для которого стартует процесс идентификации. Данная методика включает использование, помимо классического режима отложенной обработки данных (при котором СПФ является единственным с шириной, равной АДЧ), режима синхронной обработки (при котором используется СПФ с шириной, меньшей АДЧ).

Показано, что применительно к СРК АРГАМАК-Д11 модели 4 при использовании предложенной методики и типовых параметрах анализа среднее время, затрачиваемое на получение из обрабатываемых сигналов идентификационных сведений, сокращается на 62% в сравнении с использованием только лишь типового режима отложенной обработки данных (СПФ с шириной АДЧ). При этом также сокращается объём памяти, необходимый для хранения обрабатываемого СПФ, но усложняется процесс принятия идентификационных решений.

4. Предложен алгоритм отбора активных частотных каналов для детальной идентификации, предназначенный для реализации на ПЛИС, базирующийся на использовании истории контроля каналов и позволяющий выровнять темп выдачи на идентификацию ИРИ из различных каналов, и максимизировать число идентифицированных пакетов наиболее редко выходящих в эфир ИРИ.

Показано, что предложенный алгоритм позволяет снизить время сбора данных о радиообстановке на величину от 29% до 56% в сравнении с прочими алгоритмами.

5. Предложен алгоритм первичной идентификации радиоизлучений по форме спектра, базирующийся на физической модели спектра сигнала и комплексировании решающих статистик, а также совокупность оптимизационных решений для ресурсоэффективной реализации данного алгоритма на ПЛИС.

Показано, что предложенный алгоритм по отношению к алгоритмам на основе типовых оценок спектрального подобия обеспечивает успешную идентификацию сигналов при меньшем на 5 дБ ОСШ в условиях умеренных интерференционных искажений, и при меньшем на 10 дБ ОСШ при существенных искажениях.

При продолжении работ по теме диссертационного исследования целесообразно:

1) Проанализировать вариант реверсивного режима сбора данных, при котором перестроение вверх по частоте выполняется по нечётным ПОО, а перестроение вниз – по чётным (или наоборот), что позволяет выровнять период анализа различных ПОО.

2) Объединить предложенные алгоритмы первичной идентификации и отбора каналов для оценки активности канала не только энергетически, но и в результате первичной идентификации.

3) Модифицировать алгоритм первичной идентификации сигналов для учёта изменений их ширины спектра; при реализации на ПЛИС заменить точный расчёт СКМ более быстрой оценкой (например, квазипиковым детектором), и исследовать возможность реализации этапа отбора решений на ПЛИС, например, при ограничении числа идентифицированных сигналов в ПОО.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, индексируемых в WoS и Scopus

1. Studenikin A. Analysis of Data Gathering and Processing Modes during the Primary Identification of Radio Signals through the Panoramic Spectral Analysis / A. Studenikin, A. Tokarev, T. Demina, S. Pergamenshchikov, A. Salnikova // Software Engineering Application in Systems Design: Proc. of 6th Computational Methods in Systems and Software 2022. Czech Republic. Lecture Notes in Networks and Systems. – Cham: Springer, 2023. – Vol. 596. – P. 540–562.

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

2. Поляков А.В. Поиск пакетных радиосигналов системами радиоконтроля в режиме панорамного спектрального анализа / А.В. Поляков, А.Г. Студеникин, А.Б. Токарев // Вестник Воронежского института МВД России. – 2020. – № 1. – С. 125–136.

3. Студеникин А.Г. Алгоритм предварительной идентификации радиосигналов по спектральным маскам / А.Г. Студеникин, И.Б. Крыжко, А.Б. Токарев, А.В. Ашихмин, А.А. Фатеев // Системы управления, связи и безопасности. – 2021. – № 4. – С. 10–39.

4. Студеникин А.Г. Исследование алгоритмов оценочной классификации радиосигналов по спектральным данным / А.Г. Студеникин, А.Б. Токарев // Теория и техника радиосвязи. – 2021. – № 1. – С. 69–77.

5. Студеникин А.Г. Алгоритм выбора подлежащих идентификации радиоканалов на основе истории контроля / А.Г. Студеникин, А.Б. Токарев, И.С. Фаустов // Вестн. Воронежского гос. техн. ун-та. – 2023. – Т. 19, № 6. – С. 85–93.

6. Студеникин А.Г. Повышение парциальной доли времени сбора данных при панорамном радиоконтроле / А.Г. Студеникин, А.Б. Токарев // Радиотехника. – 2023. – Т. 87, № 8. – С. 36–41.

7. Студеникин А.Г. Аппаратная реализация комплексированного алгоритма идентификации радиосигналов по форме спектра / А.Г. Студеникин, В.А. Козьмин, А.Б. Токарев // Вестн. Воронежского гос. техн. ун-та. – 2024. – Т. 20, № 1. – С. 92–105.

Статьи и материалы конференций

8. Студеникин А.Г. Минимизация используемых ресурсов ПЛИС при обнаружении сигналов на фоне мощных помех / А.Г. Студеникин // Радиолокация, навигация, связь : Сб. тр. XXV Междунар. науч.-техн. конф., посвященной 160-летию со дня рождения А.С. Попова. В 6-ти томах, Воронеж, 16–18 апреля 2019 г. – Воронеж: Воронежский гос. ун-т, 2019. – Т. 1. – С. 230–238.

9. Studenikin A.G. Application of Hyperspectral Similarity Scores on Radio Signals Identification / A.G. Studenikin // Антропоцентрические науки: инновационный взгляд на образование и развитие личности : Мат-лы XIV Междунар. науч.-практ. конф., Воронеж, 19–20 апреля 2021 г. – Воронеж: Издательско-полиграфический центр «Научная книга», 2021. – С. 358–361.

10. Студеникин А.Г. Способ автоматической идентификации радиосигналов по форме спектра / А.Г. Студеникин // Научная опора Воронежской области : Сб. тр. победителей конкурса науч.-исследовательских работ студентов и аспирантов ВГТУ по приоритетным направлениям развития науки и технологий. – Воронеж: Воронежский гос. техн. ун-т, 2021. – С. 295–297.

11. Студеникин А.Г. Обеспечение непрерывного панорамного радиоконтроля путем оптимизации коэффициента накопления спектра / А.Г. Студеникин // XVI Ежегодная научная сессия аспирантов и молодых ученых : Материалы Всерос. науч. конф. В 3-х томах, Вологда, 29 ноября 2022 г. / Глав. ред. М.М. Караганова. – Вологда: Вологодский гос. ун-т, 2023. – Т. 1. – С. 78–82.

12. Студеникин А.Г. Обобщённый алгоритм идентификации радиосигналов по форме спектра / А.Г. Студеникин // Научная опора Воронежской области : Сб. тр. победителей конкурса науч.-исследовательских работ студентов и аспирантов ВГТУ по приоритетным направлениям развития науки и технологий, Воронеж, 01–29 июня 2022 г. / Отв. редактор И.Г. Дроздов. – Воронеж: Воронежский гос. техн. ун-т, 2022. – С. 104–107.

13. Студеникин А.Г. Способы организации процесса идентификации сигналов при панорамном радиоконтроле / А.Г. Студеникин, А.Б. Токарев // Радиолокация, навигация, связь : Сб. тр. XXVIII Междунар. науч.-техн. конф., посвященной памяти Б.Я. Осипова. В 6-ти томах, Воронеж, 27–29 сентября 2022 г. – Воронеж: Воронежский гос. ун-т, 2022. – Т. 6. – С. 196–206.

14. Студеникин А.Г. Влияние режима сбора данных на вероятность обнаружения одиночных радиоимпульсов при панорамном радиоконтроле / А.Г. Студеникин, А.Б. Токарев // Радиолокация, навигация, связь : Сб. тр. XXIX Междунар. науч.-техн. конф., посвященной 70-летию каф. радиофизики ВГУ. В 5-ти томах, Воронеж, 18–20 апреля 2023 г. – Воронеж: Воронежский гос. ун-т, 2023. – С. 75–82.

Подписано в печать 12.12.2024.

Формат 60x84/16. Бумага для множительных аппаратов.

Усл. печ. л. 1,3. Тираж 65 экз. Заказ № 246

Отдел оперативной полиграфии издательства ВГТУ

394006 Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84