

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
ЮЖНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
Институт компьютерных технологий и информационной безопасности
Кафедра Интеллектуальных и многопроцессорных систем

На правах рукописи

Буряков Дмитрий Сергеевич

**Методы и программные средства обеспечения изохронной передачи
данных в комплексах цифровой обработки сигналов**

*Специальность 2.3.5 – Математическое и программное обеспечение
вычислительных систем, комплексов и компьютерных
сетей, технические науки*

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Таганрог – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южный федеральный университет» (ЮФУ) на кафедре Интеллектуальных и многопроцессорных систем (ИМС) Института компьютерных технологий и информационной безопасности (ИКТИБ) Инженерно-технологической академии (ИТА).

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ: доктор технических наук, профессор,
Левин Илья Израилевич

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ: Атакищев Олег Игоревич,
доктор технических наук, профессор,
Автономная некоммерческая организация
«Институт инженерной физики»,
г. Серпухов, заместитель генерального ди-
ректора по специальным проектам

Титенко Евгений Анатольевич,
кандидат технических наук, доцент,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Юго-Западный государ-
ственный университет», г. Курск,
доцент кафедры программной инженерии

Защита диссертации состоится «25» сентября 2025 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета ЮФУ 801.02.06 при Южном федеральном университете по адресу: г. Таганрог, ул. Чехова, 2, корп. «И», комн. 347.

С диссертацией можно ознакомиться в зональной научной библиотеке ЮФУ по адресу: г. Ростов-на-Дону, ул. Рихарда Зорге, 21Ж и на сайте Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет» по адресу: <https://hub.lib.sfedu.ru/diss>

Автореферат разослан «__» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук,
доцент

А.П. Кухаренко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Когерентная обработка цифровых сигналов используется в телекоммуникации, радиосвязи, радиолокации, радиоастрономии и предполагает согласованное преобразование массивов операндов от множества источников со скоростью не меньшей, чем темп поступления информации. Одно из ключевых применений когерентной обработки – системы с фазированными антенными решетками (ФАР). Одновременное формирование сотен независимо управляемых диаграмм направленности антенны значительно повышает точность локализации объектов в пространстве и позволяет автоматически сопровождать десятки воздушных и космических объектов, ведомых группой лучей. Адаптивное формирование диаграмм направленности помогает снизить влияние помех, включая интерференцию от других источников излучения. Фазированная антенная решётка сохраняет работоспособность при выходе из строя отдельных антенных элементов и/или каналов связи, в этом случае система продолжает функционировать при незначительно сниженных характеристиках. Формирование диаграмм направленности производится путем когерентного (синфазного) суммирования сигналов от всех без исключения антенных элементов ФАР. Рассинхронизация информационных потоков приведёт к обработке операндов, полученных в разное время. В таком случае возникнут фазовые ошибки, способные ухудшить диаграмму направленности или даже сделать её формирование невозможным. В этой связи когерентная обработка выдвигает жесткие требования к системе передачи данных комплекса цифровой обработки сигналов (ЦОС): в пределах одного такта должно быть гарантировано поступление всех операндов, относящихся к одному моменту физического времени, от множества антенных элементов в модули цифровой обработки. Таковую передачу данных в дальнейшем будем называть изохронной.

Изохронная передача данных требует скоростных и помехозащищенных каналов передачи информации, а также программных средств, обеспечивающих синхронизацию процессов оцифровки, обработки и передачи данных. В небольших комплексах ЦОС с компактными ФАР, состоящих из сотен антенных элементов, обеспечение изохронной передачи данных не представляет особой сложности. Современные радиолокационные станции (РЛС), осуществляющие мониторинг обширного воздушного и космического пространства, имеют в своем составе фазированную антенную решетку, состоящую из десятков тысяч антенных элементов, при этом протяженность линий связи для передачи данных от блоков оцифровки в блоки ЦОС может достигать сотен метров. Для подобных систем традиционные методы синхронизации недостаточно эффективны: они или требуют значительных аппаратных/временных затрат, или не обеспечивают надлежащего уровня работоспособности передачи множества информационных потоков. Работоспособность - свойство системы (программного комплекса) предоставлять требуемые услуги, которым можно оправданно доверять.

Для больших радиолокационных комплексов с ФАР появляются новые задачи, в частности, связанные с необходимостью отслеживания космического мусора на низкой околоземной орбите, количество которого растет с каждым годом. Для решения подобной проблемы требуются более совершенные РЛС с еще большим количеством антенных элементов для увеличения разрешающей способности станции. С ростом числа каналов передачи данных и увеличения протяженности линий связи в комплексах ЦОС значительно возрастает вероятность возникновения ошибок в каналах передачи данных, включая нарушения целостности данных и значительные временные рассогласования. В современных РЛС невозможно реализовать троирование информационных каналов, также невозможно кратно увеличить временной интервал передачи и обработки информационных массивов, поскольку ограничения по латентности сигнала делают такой подход недопустимо расточительным.

В связи с этим актуальной задачей становится обеспечение безошибочной передачи данных на имеющихся информационных каналах РЛС, что можно реализовать с помощью специальных инструментальных программных средств, повышающих гарантированность комплексов ЦОС. Таким образом, разработка новых методов повышения гарантированности и инструментальных программных средств для изохронной передачи данных в системах с большим числом информационных каналов представляет собой значимую и актуальную задачу.

Степень разработанности темы исследования. В рамках диссертации был проведен анализ существующих методов и средств обеспечения гарантированной передачи данных в комплексах ЦОС. Задачами когерентной обработки данных в радиолокационных системах занимались такие ученые, как В.К. Слока, П.А. Созинов, С.А. Топчиев и другие. Вычислительные комплексы ЦОС с множеством информационных каналов разрабатывали такие ученые, как Е.А. Семерников, О.В. Катаев, И.И. Левин и другие. Однако число каналов в созданных системах было относительно невелико (до 20000), и частота дискретизации не превышала 100 МГц. Проведенный анализ показал, что известные методы и средства не обеспечивают должным образом совокупность необходимых параметров в комплексах ЦОС, содержащих десятки тысяч информационных каналов и передающих данные на высоких частотах: минимальную латентность и минимальные аппаратно-временные затраты на синхронизацию.

Анализ показал, что данные характеристики не могут быть достигнуты на универсальных и сигнальных процессорах, а применение специализированных интегральных схем экономически нецелесообразно. Показано, что реконфигурируемые вычислительные системы (РВС) на основе ПЛИС могут служить перспективным направлением для построения комплексов когерентной цифровой обработки сигналов. РВС обладают значительным аппаратным ресурсом для эффективной реализации алгоритмов цифровой обработки сигналов и поддерживают множество внешних интерфейсов, что позволяет организовать многопоточную когерентную обработку данных. Анализ источников показал, что в настоящее время отсутствуют методы и средства, обеспечивающие гарантированную передачу данных по множеству каналов с высокой частотой дискретизации в комплексах ЦОС, в том числе для РЛС с ФАР.

Объект исследования: программное обеспечение реконфигурируемых вычислительных систем.

Предмет исследования: методы создания программных инструментальных средств для обеспечения изохронной передачи данных в системах параллельной и распределенной обработки данных.

Целью работы является повышение гарантированности программных комплексов с изохронной передачей данных.

Научная задача, решаемая в диссертации, - разработка методов создания программных инструментальных средств для реконфигурируемых вычислительных систем, повышающих гарантированность программных комплексов с изохронной передачей данных при большом числе каналов и высоких частотах дискретизации.

Для достижения поставленной цели и решения научной задачи необходимо:

- провести анализ существующих методов и средств для обеспечения гарантированной изохронной передачи данных при большом числе каналов;
- разработать принципы обеспечения изохронной передачи данных в комплексах ЦОС;
- разработать метод изохронной передачи данных по каналам связи, обеспечивающий выравнивание потоков данных, а также анализ и парирование аварийных ситуаций;

- реализовать метод в виде инструментальных программных средств для реконфигурируемых вычислительных систем;
- модернизировать метод изохронной передачи данных комплекса когерентной цифровой обработки сигналов для обеспечения заданного уровня гарантоспособности при значительном увеличении количества каналов данных;
- реализовать модернизированный метод в виде инструментальных программных средств для реконфигурируемых вычислительных систем.

Методы исследований. В ходе исследований были использованы методы теории графов; статистический анализ; методы структурной организации вычислений; методы цифровой обработки сигналов.

Экспериментальные исследования были проведены на ряде проблемно-ориентированных реконфигурируемых вычислительных систем для формирования диаграмм направленности фазированных антенных решеток и цифровой обработки сигналов.

Достоверность и обоснованность результатов, полученных соискателем, подтверждены корректностью и непротиворечивостью математических выкладок, результатами численного моделирования и экспериментами на комплексах ЦОС, а также внедрениями, подтвержденными соответствующими актами. Результаты диссертации докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях, где соискатель выступал с докладами по данной проблематике и получил положительный отзыв научной общественности.

Научная новизна диссертационной работы заключается в том, что в ней разработаны:

- комбинированный метод изохронной передачи данных, сочетающий использование единого машинного времени и опорной тактовой частоты, **отличающийся** от известных введением служебных промежутков при передаче массивов операндов;
- алгоритм выбора опорного канала и формирования диапазона допустимого рассогласования задержек данных, **отличающийся** от известных процедурой назначения опорного канала, у которого задержка данных наиболее близка к математическому ожиданию задержек данных всех каналов;
- модернизированный метод изохронной передачи данных, **отличающийся** от известных процедурами переключения опорных каналов, предварительной проверкой контрольных сумм и нумерацией массивов операндов;
- алгоритм переключения опорного канала без прерывания передачи данных, **отличающийся** процедурой автоматического назначения нового опорного канала с задержкой данных в канале, максимально приближенной к задержке данных текущего опорного канала в случае его аварийного отключения.

Положения, выдвигаемые для защиты:

1) при увеличении числа информационных каналов в комплексе ЦОС, функционирующих на высокой частоте дискретизации, для традиционных методов и существующих средств значительно снижается (ниже допустимого уровня) гарантоспособность программных средств обеспечения изохронной передачи данных;

2) введение служебных промежутков при передаче массивов операндов для комбинированного метода изохронной передачи данных, сочетающего использование единого машинного времени и опорной тактовой частоты, позволяет повысить гарантоспособность программных средств обеспечения изохронной передачи данных;

3) введение процедур переключения опорных каналов, предварительной проверки контрольных сумм и нумерации массивов операндов для модернизированного метода изохронной передачи данных позволяет дополнительно повысить гарантоспособность программных средств обеспечения изохронной передачи данных для систем ЦОС, содержащих до 106 тысяч информационных каналов.

Результаты, выдвигаемые для защиты:

1) комбинированный метод изохронной передачи данных, сочетающий использование единого машинного времени и опорной тактовой частоты, **отличающийся** от известных введением служебных промежутков при передаче массивов операндов;

2) алгоритм выбора опорного канала и формирования диапазона допустимого рассогласования задержек данных, **отличающийся** от известных процедурой назначения опорного канала, у которого задержка данных наиболее близка к математическому ожиданию задержек данных всех каналов;

3) модернизированный метод изохронной передачи данных, **отличающийся** от известных процедурами переключения опорных каналов, предварительной проверкой контрольных сумм и нумерацией массивов операндов;

4) алгоритм переключения опорного канала без прерывания передачи данных, **отличающийся** процедурой автоматического назначения нового опорного канала с задержкой данных в канале, максимально приближенной к задержке данных текущего опорного канала в случае его аварийного отключения.

Научная значимость заключается в развитии методов программирования реконфигурируемых вычислительных систем.

Автором **показано**, что комбинирование методов синхронизации с использованием единого машинного времени и опорной тактовой частоты обеспечивает необходимую точность для обеспечения когерентной обработки данных в комплексах ЦОС.

Автором **показано**, что при увеличении числа каналов в комплексе ЦОС для традиционных средств обеспечения изохронной передачи данных значительно снижается гарантоспособность.

Автором **доказано**, что совокупность разработанных методов обнаружения и парирования аварийных ситуаций обеспечивает заданный уровень гарантоспособности программных инструментальных средств для РВС при когерентной обработке информации от множества антенных элементов фазированной антенной решетки при высокой частоте дискретизации.

Полученные результаты могут быть использованы для дальнейшего совершенствования методов программирования реконфигурируемых вычислительных систем, ориентированных на многоканальную обработку потоков данных в режиме реального времени.

Практическая ценность работы:

- разработанный автором комбинированный метод изохронной передачи данных позволяет в 3,8 раза повысить гарантоспособность прикладных программ РВС при низких аппаратных и временных затратах, по сравнению с традиционными методами;

- разработанный автором модернизированный метод изохронной передачи данных позволяет в 2,5 раза повысить гарантоспособность прикладных программ РВС для комплексов ЦОС, по сравнению с комбинированным методом;

- разработанный алгоритм переключения опорных каналов позволяет сохранить корректное функционирование программы для обеспечения изохронной передачи данных при аварийном отключении текущего опорного канала без прерывания процесса передачи данных;

- созданная инструментальная программа, реализующая комбинированный метод для ПЛИС Xilinx XC7VX485T (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2025660549, РФ), показала повышение гарантоспособности в 3,85 раза по сравнению с известными решениями и обеспечивала заданный уровень гарантоспособности 0,95 на доверительном интервале шесть часов при 42100 антенных элементах (информационных каналах).

Реализация и внедрение результатов работы. Результаты диссертационного исследования использованы:

- при выполнении НИОКР в Научно-исследовательском центре супер-ЭВМ и нейрокомпьютеров; г. Таганрог, акт о внедрении от 29 мая 2025 г., утвержден техническим директором;

- в учебном процессе кафедры Интеллектуальных и многопроцессорных систем Института компьютерных технологий и информационной безопасности (ИКТИБ) Южного федерального университета (ЮФУ); акт об использовании результатов диссертации от 30 мая 2025 г., утвержден директором ИКТИБ ЮФУ.

Апробация работы. Основные результаты, представленные в диссертации, докладывались и обсуждались на всероссийских и международных научно-технических конференциях: Всероссийской научно-технической конференции «Многопроцессорные вычислительные и управляющие системы», г. Таганрог, 2022 г.; XIX, XX, XXI Ежегодной молодежной научной конференции «Достижения и перспективы научных исследований молодых ученых Юга России», г. Ростов-на-Дону, 2023 - 2025 гг.; I Всероссийской школе-семинаре Национального центра физики и математики для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов «Центр исследования архитектур суперкомпьютеров», г. Саров, 2023 г.; XVI Всероссийской мультikonференции по проблемам управления, г. Волгоград, 2023 г.; XIX Международной конференции «Супервычисления и математическое моделирование», г. Саров, 2024 г.; XIV Всероссийском совещании по проблемам управления, г. Москва, 2024 г. География апробации и обсуждения работы позволяют сделать вывод о широкой информированности научной общественности о результатах диссертационных исследований.

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 11 научных печатных работах: из них 2 статьи – в ведущих рецензируемых научных журналах из перечня ВАК РФ. Получено свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ, а также опубликованы тезисы и материалы 8 докладов на международных и всероссийских научно-технических конференциях.

Специальность, которой соответствует диссертация. Диссертация соответствует п. 8 («Модели и методы создания программ и программных систем для параллельной и распределенной обработки данных, языки и инструментальные средства параллельного программирования») паспорта научной специальности 2.3.5 «Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей».

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованных источников из 133 наименований. Основная часть работы изложена на 160 страницах и включает 46 рисунков.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертации, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выдвигаемые для защиты научные положения, а также приведено краткое содержание каждой из глав.

В первой главе проведен анализ существующих методов и средств обеспечения когерентной обработки данных в комплексах цифровой обработки сигналов.

Проведенный анализ сетевых технологий показал, что традиционные протоколы TCP, UDP, Real-Time Ethernet, Real-Time Transport Protocol не обеспечивают изохронную передачу данных в комплексах ЦОС вследствие наличия механизмов повторных запросов,

приводящих к недетерминированным задержкам, нарушения последовательности доставки пакетов данных, а также повышения уровня джиттера.

Анализ методов и средств синхронизации информационных потоков в архитектуре dataflow показал, что существующие решения для систем потока данных для обеспечения изохронной передачи данных требуют значительных аппаратных и временных затрат, что приводит к снижению эффективности комплексов ЦОС.

Рассмотрено применение универсальных и сигнальных процессоров, заказных микросхем и программируемых логических интегральных схем в качестве элементной базы для построения систем когерентной обработки данных в комплексах ЦОС. Недостатками универсальных процессоров являются: низкая вычислительная мощность; ограниченная возможность параллельной обработки; сложность интеграции с аппаратными компонентами комплексов ЦОС. Цифровые сигнальные процессоры не ориентированы на многоканальную обработку. Интегральные схемы специального назначения (ASIC) проектируются под конкретные алгоритмы обработки данных, что позволяет достичь максимальной производительности при выполнении целевой задачи, однако высокая трудоемкость разработки и производства кристаллов, а также невозможность изменения функциональности ограничивают возможности применения ASIC. Показано, что для построения комплексов когерентной цифровой обработки сигналов перспективными решениями могут служить реконфигурируемые вычислительные системы на основе ПЛИС. Однако в настоящее время отсутствуют методы и средства для PBC, обеспечивающие гарантоспособную изохронную передачу данных для множества каналов, что *доказывает первое положение, выдвигаемое для защиты*. Это обуславливает необходимость разработки и исследования новых методов и средств, способных гарантировать синхронизацию данных для множества каналов при минимальных аппаратных/временных затратах.

Сформулированы принципы создания инструментальных программных средств обеспечения когерентной обработки данных в комплексах ЦОС: когерентная обработка данных на PBC должна быть построена на основе структурно-процедурной организации вычислений; необходимая точность синхронизации для когерентной обработки данных в комплексах ЦОС может быть обеспечена только совмещением систем единого машинного времени и опорной тактовой частоты; для гарантоспособной передачи данных необходимо разбить поток данных на массивы операндов и обеспечить их синхронизацию с помощью буферной памяти; для идентификации ошибок передачи данных в реальном времени необходима специальная разметка массивов операндов, размещенная в информационном потоке.

Во второй главе показано, что для формирования диаграммы направленности в системах ЦОС с ФАР критически важно обеспечить одновременное поступление данных в узлы обработки, соответствующих одному такту оцифровки, от всех без исключения антенных элементов. Для этого необходимо реализовать изохронную передачу данных, гарантирующую поступление операндов, соответствующих одному моменту физического времени, от множества передающих узлов в узел когерентной цифровой обработки сигналов. Для обеспечения изохронной передачи данных необходимо синхронизировать все узлы, осуществляющие прием и передачу информации. Исходя из типовой частоты оцифровки данных от антенных элементов ФАР - 100 МГц, была определена необходимая точность синхронизации с учетом времен установки (setup) и удержания (hold) - 8 нс.

Рассмотрены актуальные методы обеспечения единого времени, такие как: GPS, 1PPS, NTP, IRIG-B, SNTP, RTP. Установлено, что лучшую точность синхронизации обеспечивает протокол RTP (IEEE 1588). С помощью данного протокола удается достигать точности синхронизации около 100 нс, что недостаточно для обеспечения синхронизации современных систем когерентной обработки информации от ФАР. Кроме того, различные устройства имеют собственные тактовые генераторы, которые не обладают одинаковыми

характеристиками, имеет место дрейф частоты тактовых генераторов в различных ведомых устройствах. В результате в периоде между обновлениями времени от ведущего устройства локальное время в различных ведомых устройствах может различаться.

Для устранения указанных недостатков и обеспечения требуемой точности предложено применить локальную систему единого времени, распространяющую сигналы единого машинного времени и опорной тактовой частоты из единого центра во все узлы по линиям с одинаковой задержкой. У всех узлов имеется свой счетчик текущего времени, который работает от опорной тактовой частоты и периодически обновляется значениями времени от источника единого машинного времени. С помощью каналов управления в узлы предварительно записывается желаемое время начала того или иного события. В тот момент, когда текущее время достигнуто, все узлы параллельно начинают выполнение своих задач. Аналогично запускаются все остальные процессы и генерируются управляющие сигналы, необходимые для согласованной обработки информации в каждом узле комплекса ЦОС.

Однако даже точная установка времени во всех узлах комплекса, обеспечивающих передачу данных, не обеспечивает синхронное поступление данных в узлы приема. Несмотря на то что для каналов передачи данных используются оптические линии связи (наиболее стабильные и с минимальным дрейфом характеристик), избежать рассогласования потоков данных невозможно. Неизбежно возникают задержки, так как канал включает не только линию связи, но и преобразование сигнала из оптического в электрический и обратно, которые могут различаться от устройства к устройству. Выравнивание этих задержек является еще одним важным условием для обеспечения гарантированной изохронной передачи данных.

Тривиальным решением для передачи данных, привязанных ко времени, является сопровождение каждого операнда временной меткой, что неизбежно снижает реальную пропускную способность канала и усложняет процедуру выравнивания операндов. На стороне приемника требуется реализовать ресурсоемкие алгоритмы анализа временных меток и буферизации операндов.

Показано, что эти недостатки можно устранить, сформировав плотный синхронный поток операндов без разрывов и передавая временную метку непосредственно в потоке операндов только для первого операнда. Поскольку операнды передаются синхронно, можно определить временную метку любого операнда в потоке. Такой способ передачи данных избавляет от сложных алгоритмов выравнивания потоков данных в различных каналах. Для выравнивания задержек между каналами используется следующий *базовый метод*: во время инициализации подсистемы передачи данных производится измерение задержек для каждого канала; полученные данные поступают в буферные элементы, которые настраиваются таким образом, чтобы на выходе задержки между каналами были устранены.

У базового метода имеются следующие недостатки:

- не учитывается динамическое изменение задержек в различных каналах. Например, при потере соединения и его последующем восстановлении задержка может отличаться от рассчитанной ранее, что нарушит изохронную передачу данных. Для корректной работы комплекса ЦОС потребуется повторить процедуру вычисления новых значений задержек с прерыванием процесса передачи;

- невозможно своевременно обнаружить ошибки в потоке операндов, поскольку отсутствуют механизмы контроля и парирования ошибок.

Для устранения вышеописанных недостатков был разработан новый *комбинированный метод*, отличающийся от базового, созданием служебных промежутков при передаче

массивов операндов (рисунок 1). Для введения служебных промежутков в информационный поток протокол комбинированного метода предполагает передачу данных на несколько большей частоте относительно частоты поступления (оцифровки).

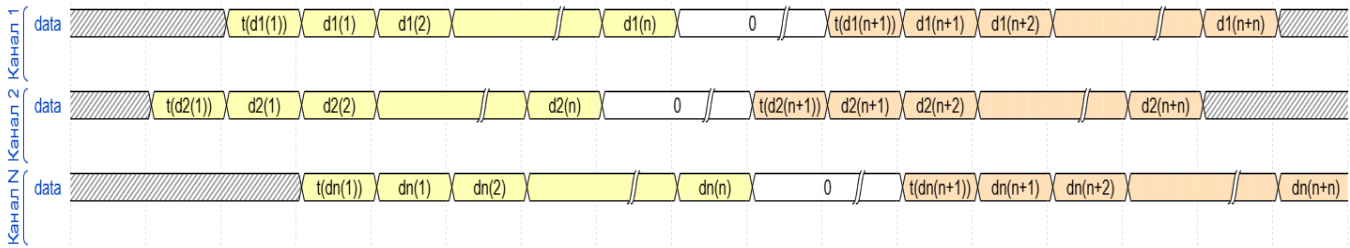


Рисунок 1 – Временная диаграмма передачи массивов операндов, разделенных служебными промежутками

Для повышения гарантированности комплекса ЦОС было предложено разделить входной массив операндов на группы одинаковой длины, которые дополняются сервисной информацией и передаются на более высокой частоте со служебными промежутками. В служебном промежутке перед началом массива операндов размещается заголовок с временной меткой, соответствующей времени получения первого операнда массива. Кроме того, выполняется подсчет контрольной суммы заголовка и массива, которая размещается в служебном промежутке после массива операндов. Выравнивание задержек данных между разными каналами осуществляется с помощью буферной памяти, запись в которую происходит асинхронно по мере поступления массивов операндов от каждого канала, а чтение выполняется синхронно, обеспечивая выравнивание задержек (рисунок 2).

Важным отличием комбинированного метода передачи операндов со служебными промежутками от базового является возможность динамического выравнивания задержек на стороне приемника данных, а также наличие средств контроля целостности данных, для чего был применен циклический избыточный код CRC.

Для повышения гарантированности комплексов ЦОС с изохронной передачей данных были выделены наиболее вероятные аварийные ситуации: аварийное отключение канала; нарушение целостности передаваемой информации; превышение допустимого порога рассогласования задержек поступления массивов операндов. Были разработаны алгоритмы их обнаружения и парирования: процедура назначения опорного канала и формирования диапазона допустимого рассогласования; процедура проверки целостности данных с использованием контрольных сумм; процедура зануления данных в сбойных каналах.

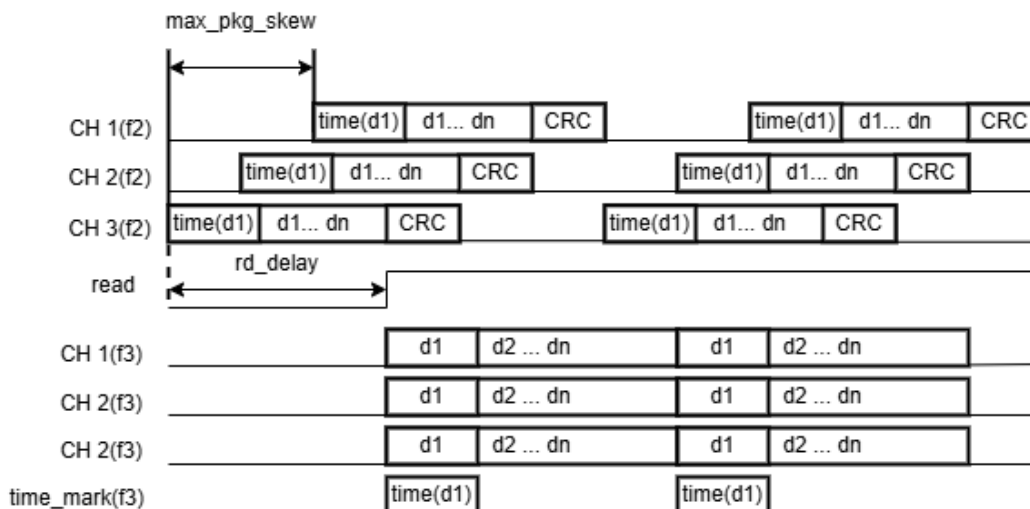


Рисунок 2 – Временная диаграмма выравнивания задержек

Была создана инструментальная программа, реализующая комбинированный метод на базе ПЛИС Xilinx XC7VX485T. Показано, что занимаемый аппаратный ресурс для разработанного программного комплекса обеспечения изохронной передачи данных не превысил 5% от общего ресурса.

Программа содержит программные блоки, реализованные независимо для каждого канала и блока А, управляющего работой всех каналов. Общий для всех каналов блок А включает в себя: блок управления (БУПР) и блок синхронизации времени (БСВ). БУПР выполняет несколько функций, которые определяют работу всех остальных программных блоков, среди которых: поиск и задание опорного канала, установка допустимого диапазона рассогласования, запуск процесса одновременного считывания данных из памяти.

Структура программного блока, обеспечивающего работу одного канала, представлена на рисунке 3.

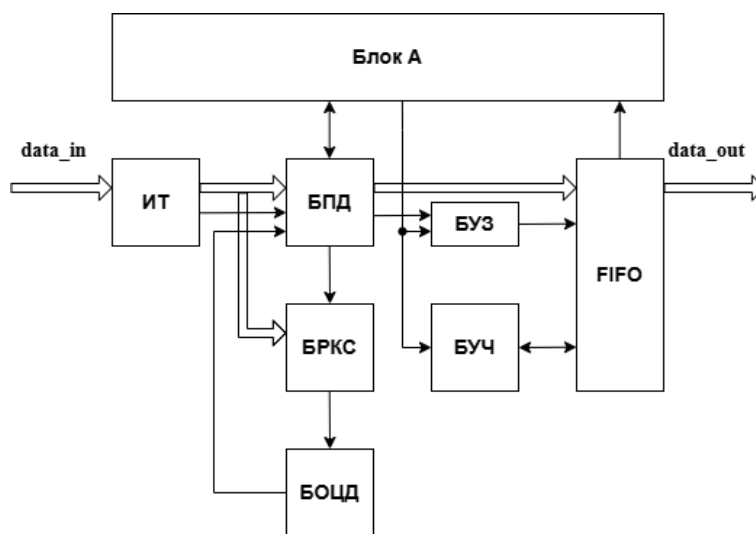


Рисунок 3 – Структура программного блока одного канала

В состав блока обработки потока данных одного канала входят следующие блоки: интерфейс трансивера (ИТ), блок приема данных (БПД), блок расчета контрольных сумм (БРС), блок обработки ошибок целостности данных (БОУД), буферная память FIFO, блок управления записью (БУЗ), блок управления чтением (БУЧ).

ИТ обеспечивает настройку параметров трансивера и проведение тренировки канала.

БПД получает данные со стробом от интерфейса трансивера, выделяет из заголовка временную метку и формирует флаги, необходимые для работы других блоков.

БРС подсчитывает контрольную сумму для принятых данных с помощью алгоритма CRC-16 Modbus. Устанавливает флаг успешной проверки контрольной суммы и флаг несовпадения контрольных сумм, которые используются в блоке обработки ошибок целостности данных.

БОУД формирует признак необходимости отключения канала, в котором число ошибок целостности данных превышает заданное параметром значение.

БУЗ управляет записью данных в память FIFO. Получает флаги начала массива данных и конца массива от блока приема данных, а также флаг разрешения записи от блока управления. Если флаг начала массива данных поступает, пока активен флаг разрешения записи, то формируется флаг записи в FIFO. Флаг записи снимается, когда поступает флаг признака конца массива, и блок ожидает поступления флага от следующего массива данных. Блок позволяет записывать в память только те массивы данных, начала которых попадают в допустимый интервал рассогласования. Массивы данных, начала которых не попадают в допустимый интервал рассогласования, не будут записаны в FIFO.

БУЧ управляет чтением данных из памяти FIFO. Блок получает флаг запуска процесса одновременного чтения и значение счетчика вычитанных данных от блока управления, флаг признака опустошения FIFO от буферной памяти и флаг признака попадания начала массива данных в допустимый интервал рассогласования от блока приема данных. Формирует флаг разрешения чтения из FIFO и сигнал сброса выходного регистра. Блок обеспечивает считывания данных из всех FIFO в один момент времени при условии, что массивы данных прошли проверку в блоке приема данных на попадание в допустимый интервал рассогласования. Если канал отключится по разным причинам, данные из FIFO отключенного канала будут считаны до его полного опустошения. При восстановлении работоспособности канала данные из FIFO начнут считываться строго в определенный момент, соответствующий интервалу следования массивов, чтобы не нарушить согласованный поток данных.

Проведен количественный анализ гарантоспособности комплекса ЦОС на основе разработанной инструментальной программы с помощью атрибутивной модели.

Для программного комплекса с изохронной передачей данных выделены наиболее важные атрибуты гарантоспособности:

- целостность передаваемых данных, которая может быть нарушена из-за возникновения битовых ошибок или из-за нарушения формата передаваемых данных, поэтому в качестве метрик для атрибута «целостность» приняты вероятность битовых ошибок данных в канале и вероятность нарушения целостности формата данных;

- готовность (доступность) каналов передачи данных, которая может быть нарушена из-за аварийного отключения канала по причине неисправности или из-за неверной коммутации вследствие ошибок оператора (обслуживающего персонала); в качестве метрик приняты вероятность отключения канала и вероятность ошибки оператора;

- живучесть - сохранение работоспособности в приемлемых пределах при превышении допустимого количества ошибок; в качестве метрик приняты вероятность превышения допустимого значения рассогласования задержки канала и вероятность совпадения задержки с периодом следования массивов данных.

Весовые коэффициенты атрибутов и их метрик определены на основе экспертных оценок и полученных экспериментальных данных.

Гарантоспособность программного комплекса изохронной передачи данных в значительной степени определяется требуемой длительностью безошибочной работы и числом информационных каналов. На практике для сложных программных комплексов ЦОС принимают уровень гарантоспособности 0,95, а минимальное время доверительной работы системы составляет не менее шести часов.

Общий уровень гарантоспособности G оценивается по формуле

$$G = (1 - P_{a1}) \cdot (1 - P_{a2}) \cdot (1 - P_{a3}), \quad (1)$$

где P_{ai} - вероятность отказа для i -го атрибута, ($i = 1, 2, 3$).

В свою очередь вероятность отказа для атрибута P_{ai} определяется по формуле

$$P_{ai} = (1 - (1 - P_{m1i}^*) \cdot (1 - P_{m2i}^*)) \cdot W_{ai}, \quad (2)$$

где P_{mji}^* - вероятность отказа системы для j -й метрики ($j = 1, 2$) i -го атрибута;
 W_{ai} - весовой коэффициент i -го атрибута.

Вероятность отказа для каждой метрики, для системы, содержащей N каналов P_{mj}^* комплекса, рассчитывается по формуле

$$P_{mj}^* = \left(1 - (1 - P_{mj})^N\right) \cdot W_{mj}, \quad (3)$$

где P_{mj} - вероятность отказа для j -й метрики одного канала;
 W_{mj} - весовой коэффициент j -й метрики.

Расчет показал, что требуемый уровень гарантоспособности комплекса ЦОС 0,95 достигается для базового метода при количестве каналов данных в системе до 10900.

В программе, использующей комбинированный метод, предусмотрены механизмы для обработки наиболее вероятных ошибок, таких как аварийное отключение канала, повреждение данных и выход задержек за допустимые пределы рассогласования, что требует дополнительных корректировок в расчетах. Для расчета гарантоспособности программной реализации комбинированного метода изохронной передачи данных необходимо учесть коэффициенты парирования ошибок K_{pj} . Применяемые коэффициенты парирования, определенные исследованиями на объектах ЦОС и экспертными оценками, лежат в диапазоне от 0,4 до 0,85.

Тогда формула (3) примет вид:

$$P_{mj}^* = \left(1 - (1 - P_{mj})^N\right) \cdot W_{mj} \cdot K_{pj}. \quad (4)$$

Для корректного сравнения реализаций базового и комбинированного методов вычислена гарантоспособность программного комплекса при фиксированном числе каналов 10900, при котором базовый метод обеспечивал гарантоспособность $G_1 = 0,95$. Для этого числа каналов гарантоспособность комбинированного метода составляет $G_2 = 0,987$.

Для оценки улучшения гарантоспособности программного комплекса, реализующего комбинированный метод, применен стандартный коэффициент эффективности улучшения гарантоспособности IEF

$$IEF \approx \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{1 - G_1}{1 - G_2}, \quad (5)$$

где Q_1 - вероятность отказа программного комплекса, реализующего базовый метод;
 Q_2 - вероятность отказа программного комплекса, реализующего комбинированный метод.

IEF для комбинированного метода достиг значения 3,85, что доказывает второе положение, выдвигаемое для защиты. Комбинированный метод обеспечивает требуемый уровень гарантоспособности 0,95 для 42500 информационных каналов в комплексе ЦОС.

В третьей главе доказана необходимость повышения разрешающей способности радиолокационных станций с фазированными антенными решетками для решения перспективных задач, таких как мониторинг космического пространства на низкой околоземной орбите, в частности, отслеживание космического мусора. Для того чтобы РЛС могла обнаруживать объекты меньших размеров, требуется повысить её разрешающую способность по угловым координатам. Для этого необходимо уменьшить ширину основного лепестка диаграммы направленности, являющегося областью излучения или приема антенны, в которой концентрируется основная мощность сигнала.

Была проведена оценка рационального количества антенных элементов, при которых достигается значительное увеличение разрешающей способности ФАР. Для определения разрешающей способности применена формула расчета ширины луча половинной мощности (HPBW - Half Power Beam Width). Согласно расчетам, наращивание количества антенных элементов целесообразно лишь до определенного уровня, поскольку дальнейшее

увеличение не приводит к значимому повышению разрешающей способности. Доказано, что рациональным вариантом можно считать 90000 элементов, при котором прирост разрешающей способности еще остается ощутимым. Показано, что для сохранения заданного уровня гарантоспособности при увеличении числа каналов до 90000 необходима модернизация комбинированного метода.

Ключевым направлением модернизации комбинированного метода было повышение эффективности процедур парирования ошибок. Кроме того, были разработаны новые процедуры исправления ошибок, которые ранее не обрабатывались. Это особенно актуально в условиях масштабирования системы – при значительном увеличении числа каналов незначительные ошибки могут оказывать существенное влияние на общую гарантоспособность комплексов ЦОС.

В системе изохронной передачи данных одной из наиболее серьезных проблем являются ошибки, возникающие при аварийном отключении каналов передачи. В большинстве случаев такие ошибки успешно обнаруживаются и устраняются с помощью предусмотренных процедур парирования, которые были рассмотрены во второй главе диссертации. Однако существует особый случай, представляющий наибольшую опасность для корректной работы системы - аварийное отключение канала, назначенного в качестве опорного.

Опорный канал играет критически важную роль в функционировании всей системы изохронной передачи данных. Он служит в качестве базы для генерации управляющих сигналов, координирующих работу всех обслуживаемых каналов. Для того чтобы избежать негативных последствий аварийного отключения опорного канала, было предложено реализовать процедуру переназначения опорного канала в случае отказа текущего. В качестве нового опорного канала целесообразно назначать тот канал, чья задержка наиболее близка к задержке опорного канала. Для этого было предложено, после инициализации изохронной передачи и назначения опорного канала продолжать непрерывно мониторить значения задержек всех обслуживаемых каналов и фиксировать их в массиве переменных C . Номер канала совпадает с индексом элемента массива. Такой подход позволил постоянно проверять задержки каналов относительно опорного и обеспечил возможность оперативно переключиться на ближайший по задержке канал в случае аварийного отключения текущего опорного канала.

Для определения задержки между каналами было предложено использовать счетчик a , определяющий допустимый интервал рассогласования относительно опорного канала. Определение задержки выполняется исключительно для каналов, у которых она находится в пределах заданного интервала. Это исключит возможность выбора в качестве опорного канала того, чья задержка выходит за допустимые границы.

При аварийном отключении опорного канала инициируется процедура назначения нового опорного канала. Первым шагом в этой процедуре является поиск канала с задержкой, максимально приближенной к задержке текущего опорного канала. Для этого выполняется сравнение задержки $C[n]$ ($n = 1, 2, \dots, N$) каждого из N каналов с задержкой опорного канала $C[r]$, где r - номер опорного канала. Если задержка канала n превышает задержку опорного, то устанавливается специальный флаг. Затем вычисляется разница между задержками и сохраняется в массиве C^* по следующим правилам:

$$C^*[n] = |C[n] - C[r]|. \quad (6)$$

Выбирается в качестве нового опорного канала тот, у которого значение задержки $\min_{n=1, M} C_n^*$, где M – размер подмассива, равный числу каналов, потенциально рассматриваемых в качестве опорных. Далее корректируется счетчик допустимого диапазона рассогласования a^* относительно нового опорного канала r^*

$$a^* = a + k \cdot C^*[r^*]. \quad (7)$$

Здесь

$$k = \begin{cases} 1, & \text{если } C[n] \geq C[r], \\ -1, & \text{если } C[n] < C[r]. \end{cases}$$

Заключительным этапом процедуры переключения опорного канала является активация входа мультимплексора временных меток, соответствующего новому опорному каналу.

Благодаря процедуре переназначения опорного канала, система изохронной передачи данных останется работоспособной, даже если произойдет аварийное отключение опорного канала.

В процессе передачи данных может возникнуть критическая ситуация, когда расхождение между массивами операндов, которые соответствуют одному временному интервалу, достигает величины, равной периоду их следования. Такая ситуация возникает, если обрабатываемый массив существенно отстает или, наоборот, опережает остальные массивы на один или даже несколько периодов их следования. Базовая процедура проверки задержек в каналах данных, описанная во второй главе диссертации, не может выявить подобные критические ошибки, поскольку формально условие проверки на допустимое рассогласование выполняется. В такой ситуации передача данных из отстающего (опережающего) канала на вход блоков обработки данных категорически недопустима, поскольку это не только нарушает принципы изохронной передачи данных, но и может нарушить формирование диаграммы направленности ФАР. Для того чтобы избежать подобных ситуаций, разработана новая процедура проверки допустимого расхождения между массивами.

Для различения массивов операндов, относящихся к разным моментам времени, модернизированный передающий узел должен использовать специальный счетчик, присваивающий каждому массиву уникальный порядковый номер перед отправкой. Этот номер записывается в служебный интервал перед массивом данных. На принимающей стороне процедурно реализована проверка: сравнивается полученный номер массива с номером, переданным по опорному каналу. Если обнаруживается несоответствие номеров, то у сбойного канала формируется признак превышения рассогласования задержки, а на его выходе формируются нейтральные данные. Нейтральными данными для задач цифровой обработки сигналов, как правило, являются нулевые данные.

Разработанная процедура позволила выявить ранее не обнаруживаемые ошибки рассогласования, которые могли бы привести к существенному снижению работоспособности системы изохронной передачи данных.

Еще одним типом наиболее вероятных ошибок для системы изохронной передачи данных являются ошибки, связанные с нарушением целостности данных. Применение комбинированного метода позволило эффективно выявить такие ошибки посредством проверки контрольных сумм, однако их парирование (замена сбойных массивов на массив с нулевыми данными) осуществляется лишь после достижения определённого порога количества ошибок. При масштабировании системы ЦОС (с увеличением числа каналов) данный подход не обеспечивает требуемого уровня работоспособности, что обусловлено ростом общей вероятности возникновения ошибок целостности данных, способных негативно повлиять на итоговый результат обработки. В этой связи была разработана новая процедура проверки целостности данных, суть которой заключается в предварительной проверке контрольных сумм фрагментов массивов операндов перед их отправкой в блоки обработки. Основное отличие от предыдущего подхода заключается в том, что команда на чтение данных из памяти подаётся только после успешной проверки контрольных сумм

всех массивов операндов, прошедших контроль задержек. Если контрольные суммы не совпадают, вместо отключения канала формируется признак, указывающий на необходимость обнуления выходных данных.

Разработанный алгоритм обработки ошибок целостности данных обеспечил их обнаружение до вывода массивов операндов, что увеличило процент успешного исправления ошибок и в целом повысило гарантоспособность системы.

Была создана инструментальная программа, реализующая комбинированный метод на базе ПЛИС Xilinx XC7VX485T. Показано, что занимаемый аппаратный ресурс для системы изохронной передачи данных не превысил 7% от общего ресурса.

Была проведена оценка гарантоспособности реализации *модернизированного метода*. Для корректного сравнения с реализациями базового и комбинированного методами тестирование проводилось в идентичных условиях: при равном объёме передаваемых данных, одинаковом времени работы и на одном и том же оборудовании. Для оценки гарантоспособности методом экспертных оценок по результатам экспериментов были определены новые коэффициенты парирования, которые лежат в диапазоне от 0,85 до 0,98.

Благодаря модернизации процедуры проверки целостности данных, удалось значительно повысить коэффициент парирования ошибок, связанных с нарушением целостности и формата данных. Внедрение разработанной процедуры переключения опорного канала в случае его аварийного отключения позволило повысить коэффициенты парирования ошибок, связанных с аварийным отключением канала. Благодаря новой процедуре проверки номера массива, успешно обнаруживается и парируется не учитываемая ранее в реализации комбинированного метода ошибка, связанная с совпадением задержки с периодом следования массивов данных

Была выполнена оценка гарантоспособности реализации модернизированного метода, которая составила $G_3 = 0,99488$ в тех же условиях (10900 каналов и 6 часов работы).

Коэффициент эффективности улучшения гарантоспособности (IEF) для модернизированного метода, по сравнению с комбинированным, достиг значения 2,54, *что доказывает третье положение, выдвигаемое для защиты*. Показано, что программа, реализующая модернизированный метод, обеспечивает заданный уровень гарантоспособности - 0,95 при числе каналов 106500, что удовлетворяет ранее выдвинутым требованиям в 90000 каналов для систем ЦОС с ФАР.

На рисунке 4 показана зависимость гарантоспособности от количества каналов.

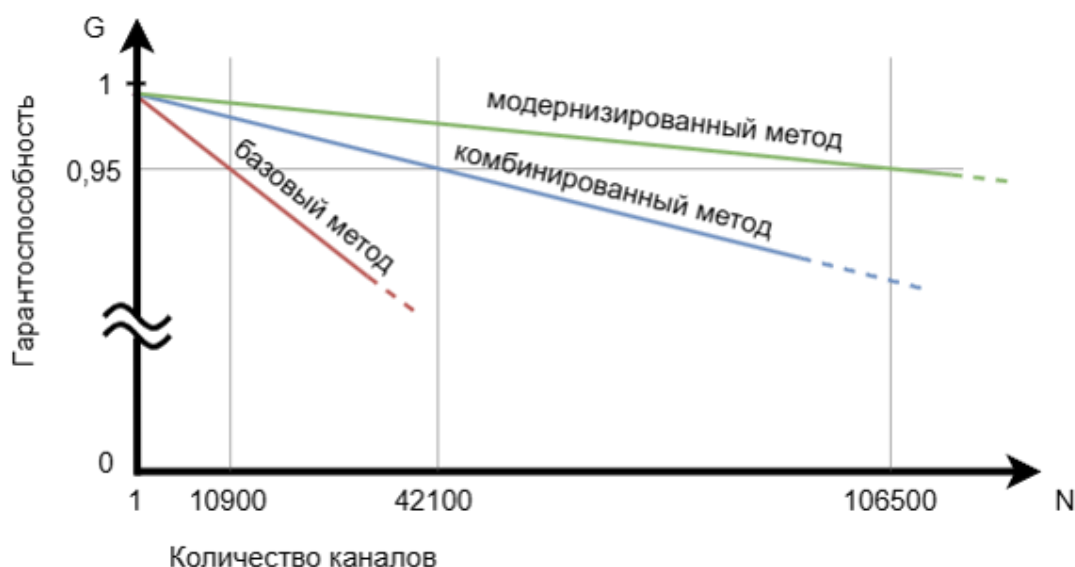


Рисунок 4 - Зависимость гарантоспособности от количества каналов

Благодаря разработанным и модернизированным процедурам, удалось значительно повысить коэффициенты парирования различных типов ошибок, что привело к увеличению гарантоспособности программного комплекса, реализующего модернизированный метод.

В заключении изложены основные научные результаты и сформулированы теоретические и прикладные результаты, полученные в диссертационной работе.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Основной научный результат диссертации заключается в решении **актуальной научной задачи**: *разработке методов создания программных инструментальных средств для реконфигурируемых вычислительных систем, повышающих гарантоспособность программного комплекса изохронной передачи данных при большом числе каналов и высоких частотах дискретизации.*, имеющей существенное научно-практическое значение.

При проведении исследований и разработок в диссертации получены следующие теоретические и прикладные результаты.

1. Комбинированный метод изохронной передачи данных, сочетающий использование единого машинного времени и опорной тактовой частоты, **отличающийся** от известных введением служебных промежутков при передаче массивов операндов.

2. Алгоритм выбора опорного канала и формирования диапазона допустимого рассогласования задержек массивов операндов, **позволяющий** обнаружить недопустимые задержки.

3. Инструментальная программа, реализующая комбинированный метод для ПЛИС XC7VX485T. (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2025660549, РФ). Оценка гарантоспособности программы изохронной передачи данных показала повышение гарантоспособности в 3,85 раза по сравнению с реализацией базового метода.

4. Модернизированный метод изохронной передачи данных, **отличающийся** от известных процедурами переключения опорных каналов, предварительной проверкой контрольных сумм и нумерацией массивов операндов.

5. Алгоритм переключения опорного канала без прерывания передачи данных, **позволяющий** сохранить корректное функционирование программы в случае аварийного отключения текущего опорного канала.

6. Инструментальная программа, реализующая модернизированный метод для ПЛИС XC7VX485T. Оценка гарантоспособности программы изохронной передачи данных показала повышение гарантоспособности в 2,54 раза по сравнению с реализацией комбинированного метода.

Разработанные при решении научной задачи методы и средства позволили достигнуть поставленной цели, заключающейся в повышении гарантоспособности инструментальных программных средств обеспечения изохронной передачи данных в комплексах ЦОС, что подтверждено как теоретическими выкладками, так и экспериментальными исследованиями.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Левин, И.И. Система передачи данных на основе программируемых логических интегральных схем в устройствах цифровой обработки сигналов с фазированными антенными решетками / И.И. Левин, Е.А. Семерников, Д.С. Буряков // Вестник компьютерных

и информационных технологий. – 2022. – Т. 19, № 3(213). – С. 42-50. – DOI 10.14489/vkit.2022.03.pp.042-050. (ведущий рецензируемый журнал, входит в перечень ВАК категории К2).

2. Левин, И.И. Некоторые методы синхронизации информационных потоков в системах цифровой обработки сигналов / И.И. Левин, Д.С. Буряков // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2024. – № 5(241). – С. 243-254. – DOI 10.18522/2311-3103-2024-5-243-254. (ведущий рецензируемый журнал, входит в перечень ВАК категории К2).

3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025660549 Российская Федерация. Программа обработки изохронных потоков данных : № 2025618684 : заявл. 16.04.2025 : опублик. 24.04.2025, Бюл. № 5 / И.И. Левин, Д.С. Буряков, М. Д. Чекина ; правообладатель Общество с ограниченной ответственностью «НИЦ супер-ЭВМ и нейрокомпьютеров».

4. Буряков, Д.С. Система передачи данных на основе ПЛИС в устройствах цифровой обработки сигналов с фазированными антенными решетками / Д.С. Буряков, И.И. Левин // Многопроцессорные вычислительные и управляющие системы : материалы Всероссийской научно-технической конференции, Таганрог, Ростовская область, 27–30 июня 2022 г. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2022. – С. 138-142.

5. Буряков, Д.С. Подход к повышению пропускной способности линий связи в комплексах когерентной цифровой обработки сигналов / Д.С. Буряков // Материалы научных мероприятий Всероссийской конференции с международным участием «Угрозы и риски на юге России в условиях геополитического кризиса», г. Ростов-на-Дону, 15-18 марта, 26-29 апреля 2023 г. : материалы докладов ; XIX Ежегодной молодежной научной конференции «Достижения и перспективы научных исследований молодых ученых Юга России», г. Ростов-на-Дону, 17–28 апреля 2023 г. : тезисы докладов / Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук, Российский центр научной информации. – Ростов-на-Дону: ЮНЦ РАН, 2023. – С. 276.

6. Буряков, Д.С. Организация когерентной обработки сигналов в комплексах ЦОС / Д. С. Буряков // I Всероссийская школа-семинар Национального центра физики и математики для студентов старших курсов, аспирантов, молодых учёных и специалистов "Центр исследования архитектур суперкомпьютеров", Саров, 21–25 августа 2023 года : тезисы / Госкорпорация по атомной энергии "Росатом", Национальный центр физики и математики (НЦФМ), Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский НИИ экспериментальной физики. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2023 – С. 22-23.

7. Буряков, Д. С. Методы повышения пропускной способности линий связи в комплексах когерентной цифровой обработки сигналов / Д. С. Буряков // XVI Всероссийская мультиконференция по проблемам управления (МКПУ-2023) : материалы мультиконференции, г. Волгоград, Россия, 11-15 сентября 2023 г. : в 4 т. Т. 2 : Управление в распределенных и сетевых системах (УРСС-2023) / Российская академия наук [и др.] ; / редакционная коллегия.: И. А. Каляев (ответственный редактор), В. Г. Пешехонов, С. Ю. Желтов [и др.]. – Волгоград: ВолГТУ, 2023. – С. 133-136.

8. Буряков, Д. С. Методы повышения гарантированности систем передачи данных в комплексах ЦОС / Д. С. Буряков // XIV Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ - 2024, 17-20 июня 2024 г., Москва : сборник научных трудов / Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук ; под общей редакцией академика РАН Д. А. Новикова. – Москва: ИПУ РАН, 2024. – С. 2513-2517.

9. Буряков, Д. С. Методы согласованной цифровой обработки сигналов / Д. С. Буряков // Наука Юга России: достижения и перспективы : XX Всероссийская ежегодная

молодежная научная конференция с международным участием, г. Ростов-на-Дону, 15–26 апреля 2024 г. : тезисы докладов. – Ростов-на-Дону: ЮНЦ РАН, 2024. – С. 90.

10. Буряков, Д. С. Обнаружение и устранение аварийных ситуаций в каналах передачи данных систем ЦОС / Д. С. Буряков // Супервычисления и математическое моделирование : XIX международная конференция, 20-24 мая 2024 : тезисы / Российский федеральный ядерный центр-Всероссийский НИИ экспериментальной физики, Госкорпорация по атомной энергии "Росатом". – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2024. – С. 38-39.

11. Буряков, Д. С. Реализация комбинированного метода изохронной передачи данных на РВС / Д. С. Буряков // Наука Юга России: достижения и перспективы : XXI Всероссийская ежегодная молодежная научная конференция с международным участием, г. Ростов-на-Дону, 14–25 апреля 2025 г. : тезисы докладов. – Ростов-на-Дону: ЮНЦ РАН, 2025. – С. 104. – Режим доступа: <https://clck.ru/3Mj925> (дата обращения 22.06.2025)

12. Буряков, Д. С. Подсистема межблочной синхронной передачи данных на основе ПЛИС в комплексах цифровой обработки сигналов / Д. С. Буряков, И. И. Левин // Молодой ученый. – 2022. – № 15 (410). – С. 14-20. – URL: <https://moluch.ru/archive/410/90408/> (дата обращения: 22.06.2025).

Личный вклад автора.

В работах, написанных в соавторстве, автору принадлежат:

- [1] – предложенные методы и принципы организации гарантоспособной изохронной передачи данных в системах радиолокации и связи с фазированными антенными решетками, вычислительные узлы которых построены на основе реконфигурируемых вычислительных систем с ПЛИС, а также разработанный алгоритм переключения опорного канала без прерывания передачи данных в случае аварийного отключения текущего опорного канала;
- [2] – разработанные алгоритмы синхронизации различных блоков комплекса ЦОС и процедура динамической компенсации задержек в каналах системы единого машинного времени, а также предложенный комбинированный метод изохронной передачи, сочетающий использование единого машинного времени и опорной тактовой частоты;
- [3] – разработанные алгоритмы: синхронизации информационных потоков от множества каналов; выбора опорного канала и формирования диапазона допустимого рассогласования задержек данных; проверки целостности данных в массивах операндов;
- [4] – разработанные алгоритмы: выравнивания задержек в информационных каналах; обнаружения и парирования наиболее вероятных аварийных ситуаций для программного комплекса с изохронной передачей данных;
- [12] – разработанные методы и средства обеспечения гарантоспособной изохронной передачи данных между вычислительными блоками, реализованными на ПЛИС.

Подписано к печати _____.2025 г.
 Формат 60x84^{1/16}. Бумага офсетная. Печать ризография.
 Усл. п.л. - 1,25. Уч.-изд.л. - 1,15.
 Заказ № _____. Тираж 120 экз.