

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук профессора, почетного работника науки и высоких технологий РФ Атакищева Олега Игоревича на диссертацию Бурякова Д.С. на тему «Методы и программные средства обеспечения изохронной передачи данных в комплексах цифровой обработки сигналов», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.5 – «Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей»

Актуальность темы выполненного исследования

В настоящее время мониторинг пространства осуществляется с помощью современных радиолокационных станций (РЛС), играющих ключевую роль в системах противовоздушной обороны, контроля воздушного движения и космического наблюдения. В таких системах применяются фазированные антенные решётки (ФАР), обладающие возможностью электронного управления лучом без механического перемещения антенны. Современные ФАР, функционирующие совместно с высокопроизводительными комплексами цифровой обработки сигналов (ЦОС), обеспечивают высокую точность локализации множества объектов в пространстве.

Диаграммы направленности формируются путем синфазного сложения сигналов от всех антенных элементов ФАР. Для корректной работы критически важно синхронизировать информационные потоки, поступающие от антенных элементов к блокам цифровой обработки сигналов. Даже незначительные временные рассогласования могут привести к фазовым ошибкам, которые искажают диаграмму направленности антенны. Для исключения фазовых ошибок необходимо организовать изохронную передачу данных, подразумевающую синхронное поступление операндов в блоки ЦОС от всех антенных элементов ФАР. С увеличением числа каналов, которое в современных фазированных антенных решётках может достигать десятков тысяч, задача обеспечения гарантированной изохронной передачи данных значительно усложняется. Увеличение масштаба системы повышает вероятность возникновения ошибок и сбоев при передаче оцифрованных данных от антенных элементов к блокам цифровой обработки сигналов.

В этой связи, работа Бурякова Д.С., в которой рассматриваются новые методы и средства обеспечения гарантированной передачи данных в комплексах ЦОС является актуальной и может вызвать интерес специалистов из различных прикладных областей, занимающихся разработкой параллельного программного обеспечения для цифровых радиолокационных комплексов с фазированными антенными решетками.

Научная новизна полученных результатов

Автором получен ряд значимых результатов, которые имеют существенное значение для повышения гарантоспособности прикладных программ РВС. К наиболее существенным результатам следует отнести:

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.

Теоретическая и практическая ценность результатов работы

Теоретическая значимость исследования заключается в развитии методов программирования реконфигурируемых вычислительных систем, ориентированных на многоканальную обработку потоков данных в режиме реального времени. Сформулированы принципы создания инструментальных программных средств обеспечения когерентной обработки данных в комплексах ЦОС. На основе предложенных принципов автором были разработаны методы обеспечения изохронной передачи данных.

Применение разработанных автором методов при создании прикладных программ для комплексов ЦОС с изохронной передачей данных позволило достичь значимых результатов:

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

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

Степень обоснованности научных положений, выводов, рекомендаций и их достоверность

Научные положения, выводы и рекомендации, представленные автором, базируются на корректном применении методов статистического анализа, структурной-процедурной организации вычислений, цифровой обработки сигналов. Достоверность полученных автором практических результатов подтверждается экспериментальными исследованиями на ряде проблемно-ориентированных реконфигурируемых вычислительных систем для формирования диаграмм направленности фазированных антенных решеток и цифровой обработки сигналов.

Результаты диссертационного исследования использованы при выполнении НИОКР в Научно-исследовательском центре супер-ЭВМ и нейрокомпьютеров (НИЦ СЭ и НК), а также в учебном процессе кафедры Интеллектуальных и многопроцессорных систем Института компьютерных технологий и информационной безопасности (ИКТИБ) Южного федерального университета (ЮФУ), что подтверждается соответствующими актами внедрения.

Основные положения диссертации опубликованы в 11 научных печатных работах: из них 2 статьи – в ведущих рецензируемых научных журналах из перечня ВАК РФ. Результаты диссертации также докладывались и обсуждались на международных и всероссийских научно-технических конференциях, где автор выступал с докладами по теме исследования и получил положительный отзыв научной общественности. Автором получено свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ.

Оценка содержания диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованных источников и двух приложений. В автореферате диссертации приведена информация о выполненных исследованиях, отражены основные полученные результаты, а также представлен список основных научных работ автора по теме исследования. В качестве иллюстративного материала в диссертации присутствует достаточно много рисунков и таблиц.

Во введении автор обосновал актуальность темы, сформулировал цель и задачи исследования, научную новизну и практическую ценность, основные научные положения, выносимые на защиту, а также привел краткое содержание каждой из глав.

В первой главе автор проводит анализ существующих методов и средств обеспечения когерентной обработки данных в комплексах цифровой обработки сигналов. Показано, что традиционные протоколы сетевых технологий не обеспечивают изохронную передачу данных в таких

комплексах вследствие ряда ограничений, такие как недетерминированные задержки, высокий уровень джиттера и нарушение последовательности пакетов.

Автор анализирует применение различной элементной базы для построения систем когерентной обработки данных в комплексах ЦОС. Показано, что универсальные процессоры имеют недостатки: низкую вычислительную мощность, ограниченный параллелизм и сложности интеграции с аппаратурой. Цифровые сигнальные процессоры неэффективны для многоканальной обработки. Интегральные схемы специального назначения обеспечивают максимальную производительность при выполнении целевой задачи, но их применение ограничено из-за высокой трудоемкости разработки и производства.

Преодолеть описанные недостатки автор предлагает с помощью реконфигурируемых вычислительных систем на основе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). Их ключевые преимущества заключаются в возможности внесения изменений функциональности в любое время, высокой эффективности при выполнении сложных вычислений, а также возможности минимизировать задержки обработки данных благодаря оптимизации логики и прямому доступу к аппаратным ресурсам.

Автором сформулированы принципы создания инструментальных программных средств обеспечения когерентной обработки данных в комплексах ЦОС.

Во второй главе автором доказано, что для изохронной передачи данных прежде всего необходимо обеспечить согласованную во времени работу всех источников и приемников данных в комплексе ЦОС. Автор предлагает использовать систему единого времени и приводит анализ современных протоколов единого времени. Из чего делает вывод что существующие протоколы не обеспечивают необходимую точность привязки оцифрованных данных ко времени, которая в современных РЛС составляет единицы наносекунд. Для обеспечения необходимой точности времени автор предлагает 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.

Автором рассмотрены известные методы изохронной передачи данных в системах цифровой обработки сигналов и выявлены их недостатки. Одной из ключевых проблем является снижение пропускной способности из-за необходимости использования части ширины канала для передачи временных меток. Помимо этого, возрастают аппаратные и временные затраты, поскольку требуются сложные алгоритмы для синхронизации данных между различными каналами. Еще одной существенной проблемой является отсутствие возможности динамически компенсировать задержки между каналами в процессе передачи данных.

Для устранения вышеописанных недостатков, Буряковым Д.С. разработан новый метод, названный автором комбинированным. 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 автор предлагает поместить заголовок с временной меткой, а в конце массива контрольную сумму для контроля целостности данных. Автор приводит формулы для определения основных параметров протокола передачи массивов операндов со служебными промежутками, таких как коэффициент заполнения данных, размер служебного интервала. Кроме того, автором приведена формула расчета частоты передачи относительно частоты оцифровки данных.

Далее во второй главе автор приводит описание алгоритма динамического выравнивания задержек на стороне приемника данных. Автор обращает внимание на необходимость ограничения предельного значения задержек и предлагает назначать опорный канал, относительно которого будет формироваться диапазон допустимого рассогласования. Далее автор описывает процедуру назначения опорного канала, задержка которого наиболее близка к математическому ожиданию задержек данных всех каналов. Автором так же описана процедура проверки целостности данных, позволяющая установить предельное количество ошибок за определенный период времени, при достижении которого канал будет отключен, а также определить временной интервал, в течение которого отсутствие ошибок позволит восстановить функционирование канала.

На основе разработанного метода и предложенных процедур автором была разработана программа, реализующая комбинированный метод на ПЛИС Xilinx Virtex-7 XC7VX485T. В работе детально описаны алгоритмы функционирования программных блоков. Показано, что созданная программа эффективно использует ресурсы ПЛИС, занимая лишь небольшую их часть, что позволяет сохранить свободные критические ресурсы для реализации алгоритмов цифровой обработки сигналов.

Далее во второй главе автором проведена оценка гарантоспособности программы, реализующей базовый метод, и разработанной программы, основанной на комбинированном методе. Для оценки использовалась атрибутивная модель, в рамках которой были выделены ключевые атрибуты гарантоспособности для программных комплексов изохронной передачи данных, а также определены их метрики. Весовые коэффициенты атрибутов и метрик установлены на основе экспертных оценок с учетом экспериментальных данных.

Автором показано, что реализация базового метода обеспечивает требуемый уровень гарантоспособности 0,95 при количестве каналов данных до 10900. В то же время комбинированный метод при таком же числе каналов достигает гарантоспособности 0,987, что в 3,8 раза выше, чем у

базового метода, согласно предложенной формуле расчёта коэффициента улучшения гарантоспособности.

В третьей главе рассмотрена перспективная задача для радиолокационных станций с фазированными антенными решетками, связанная с мониторингом космического мусора на низкой околоземной орбите (НОО). Увеличение количества космического мусора на НОО указывает на необходимость создания новых РЛС с высоким разрешением, способных отслеживать даже мелкие фрагменты. Автором проведена оценка рационального количества антенных элементов используя формулу для расчета ширины луча половинной мощности HPBW и утверждает, что компромиссным вариантом можно считать 90000 элементов - при этом значении прирост разрешающей способности еще остается значительным.

Автор обращает внимание на проблему обеспечения гарантоспособности комплекса ЦОС, поскольку при значительном увеличении числа каналов даже ранее незначительные ошибки могут оказывать существенное влияние на общую гарантоспособность. Автор указывает на необходимость модернизации комбинированного метода для сохранения заданного уровня гарантоспособности при увеличении количества каналов до 90000. Обеспечить заданный уровень гарантоспособности автор предлагает за счет повышения эффективности процедур парирования ошибок и разработки новых процедур обработки ошибок, которые ранее не учитывались.

Автор обращает внимание на одну из ключевых проблем для корректной работы системы, - аварийное отключение канала, назначенного в качестве опорного. Поскольку опорный канал играет критически важную роль в функционировании всей системы изохронной передачи данных. Он является источником временных меток и относительно него задается допустимый диапазон рассогласования задержек. Для решения проблемы автором предложена процедура переназначения опорного канала в случае отказа текущего. В качестве нового опорного канала автор предлагает назначать тот канал, чья задержка наиболее близка к задержке опорного канала.

Следующей проблемой на которую указывает автор, является критическая ситуация, когда расхождение между массивами операндов, которые соответствуют одному временному интервалу, достигает величины, равной периоду их следования, возникающая в случае если обрабатываемый массив существенно отстает или опережает остальные массивы на один или даже несколько периодов их следования. Для обнаружения подобных ситуаций автор предлагает новую процедуру проверки допустимого расхождения между массивами. В предложенной процедуре каждый массив операндов маркируется уникальным порядковым номером, который записывается в служебный промежуток на стороне передающего блока. На принимающей стороне этот номер сравнивается с номером, переданным по

опорному каналу. В случае несоответствия автор предлагает заменять данные сбойного массива на нейтральные данные, которые для задач ЦОС, как правило, являются нулевыми данными.

Далее в третьей главе автором указана необходимость модернизации процедуры парирования ошибок целостности данных. В данной процедуре парирование (подмена сбойных массивов на массив с нейтральными данными) осуществлялась после достижения определённого порога количества ошибок, что при масштабировании системы не обеспечит требуемого уровня гарантоспособности, так как повышается общая вероятность возникновения ошибок целостности данных, способных негативно повлиять на итоговый результат обработки. Автор предлагает проверять контрольные суммы массивов операндов перед их отправкой в блоки обработки, путем установки команды на чтение данных из памяти только после успешной проверки контрольных сумм всех массивов операндов.

Автором создана программа, реализующая модернизированный метод. Проведен расчет новых параметров: размера массива операндов, длины служебного промежутка, коэффициента заполнения данных. Описана структура программы и детально описаны алгоритмы работы каждого программного блока. Автором показано незначительное увеличение занимаемого аппаратного ресурса по сравнению с реализацией комбинированного метода.

Проведена оценка гарантоспособности реализации модернизированного метода. Показано, что гарантоспособность программного комплекса, реализующего модернизированный метод, по сравнению с реализацией комбинированного метода улучшилась в 2,54 раза. При 6 часах непрерывной работы комплекса ЦОС, модернизированный метод сможет обеспечить работу 106500 каналов при заданном уровне гарантоспособности 0,95, что удовлетворяет выдвинутым требованиям для модернизированного метода в 90000 каналов.

В заключении автором изложен научный результат диссертации и сформулированы теоретические и прикладные результаты, полученные в диссертационной работе.

Замечания по диссертации

1. Автором не приведен расчет требуемого размера буферной памяти для хранения операндов, которая является критическим ресурсом в ПЛИС для задач ЦОС.
2. Автором указано, что требуемый уровень гарантоспособности комплекса ЦОС равный 0.95 достигается для базового метода при количестве каналов в системе до 10900. Остается неясным, насколько быстро падает уровень гарантоспособности при превышении этого количества каналов.
3. В модернизированном методе изохронной передачи данных, предлагаются три изменения: переназначение опорного сигнала, при

аварийном отключении такового; обнуление данных при значительном (равном одному и более периодов) рассогласовании сигналов; проверка целостности данных до начала их обработки. Однако не указан вклад каждого из данных изменений в повышении гарантоспособности программного комплекса. Возможно включение всего одного или двух изменений позволит достигнуть заданный уровень гарантоспособности - 0,95 при выдвинутым требованиям в 90000 каналов для систем ЦОС с ФАР.

Выводы

Материалы диссертации и автореферата не содержат смысловых противоречий и отвечают нормам представления научных текстов.

Указанные замечания не снижают научной ценности и практической значимости работы.

Диссертация Бурякова Дмитрия Сергеевича «Методы и программные средства обеспечения изохронной передачи данных в комплексах цифровой обработки сигналов» представляет собой завершенное научное исследование, в котором решена актуальная научная задача, заключающаяся в 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.

Содержание диссертации Бурякова Д.С. соответствует п. 8 («Модели и методы создания программ и программных систем для параллельной и распределенной обработки данных, языки и инструментальные средства параллельного программирования») паспорта специальности 2.3.5 «Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей».

Диссертация удовлетворяет всем квалификационным требованиям, установленным раздела 2 положения «О присуждении ученых степеней в ЮФУ» в редакции от 29.03.2024 г., а её автор Буряков Д.С. заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук.

Официальный оппонент:
заместитель генерального директора
по специальным проектам
АНО «Институт инженерной физики»,
д.т.н., профессор,
почетный работник науки и высоких технологий РФ

О.И. Атакищев

Подпись Атакищева О.И. заверяю.

Начальник отдела кадров
АНО «Институт инженерной физики»

«18» 08 2025 г.

М.П. РФ

Е.В. Сафронова