

**официального оппонента  
Титенко Евгения Анатольевича**

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»

1. Актуальность темы выполненного исследования

Системы когерентной обработки цифровых данных предъявляют очень высокие требования к синхронности поступления набора элементов, полученных в один физический момент времени. Даже незначительная десинхронизация данных (отставание, забегание элементов вперед) ведет к появлению ошибок в расчетах выходных значений.

Активные фазированные антенные решетки (АФАР), состоящих из типовых приемо-передающих модулей (ППМ) и реализующие цифровое диаграммообразование, являются представителями таких систем когерентной обработки.

Рассматривая АФАР как измерительно-вычислительную систему, необходимо особо выделить процессы подготовки (обеспечения) передачи данных с необходимым уровнем синхронизации элементов, так называемую изохронную передачу.

Введение в состав ППМ цифровых вычислительных узлов позволяет выполнить преобразование аналогового сигнала в цифровой на более раннем этапе в приемной части решетки, а также цифрового сигнала в аналоговый в передающей части. Тем не менее итоговое построение диаграммы направленности зависит от качества данных, поступающих по каналам АФАР, имеющих объективные и субъективные предпосылки десинхронизации.

Сами антенные элементы (ППМ) имеют определённые встроенные средства удержания частоты передачи, но значительное количество антенных элементов (десятки-сотни тысяч) и их территориальная распределенность приводят к недетерминированным задержкам передачи элементов, измеренных в один физический момент времени.

В связи с этим задача информационно-вычислительного обеспечения изохронной передачи данных является актуальной и востребованной в классических (адаптивное подавление помех, пространственно-временная обработка, поиск и сопровождение движущихся объектов) и новых областях применения АФАР (мониторинг космического мусора на низкой околоземной орбите). В диссертации решена научная задача, заключающаяся в разработке

методов и инструментальных программных средств, повышающих гарантированность программного комплекса изохронной передачи данных при работе с большим числом каналов и высокими частотами.

## 2. Научная новизна полученных результатов

Автором получены значимые результаты, которые вносят существенный вклад в повышение гарантированности инструментального программного обеспечения РВС при многопоточной обработке массивов данных от антенных элементов. Наиболее важными из них являются:

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, что в совокупности обеспечивает синхронизацию подачи элементов данных, относящихся к одному физическому моменту времени;

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, что в совокупности обеспечивает значительное увеличение количества и размеров синхронно обрабатываемых массивов данных (в несколько раз);

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.

## 3. Теоретическая и практическая ценность результатов работы

Теоретическая ценность работы состоит в совершенствовании методов программирования реконфигурируемых вычислительных систем, предназначенных для многоканальной обработки данных в реальном времени путем введения информационно-вычислительных блоков предобработки, блоков 2-х портовой памяти для параллельного чтения и записи данных и специализированных узлов обработки битовых признаков ожидания и готовности. В исследовании определены базовые принципы разработки инструментального ПО для согласованной обработки информации в цифровых системах обработки сигналов (ЦОС). На основании этих принципов

автором созданы методы информационно-вычислительного обеспечения изохронной передачи данных.

Автором доказано, что сочетание различных методов обнаружения и нейтрализации аварийных ситуаций позволяет достичь требуемого уровня гарантоспособности программных средств для РВС при когерентной обработке данных от множества элементов фазированной антенной решетки при больших частотах дискретизации.

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

- разработанный автором комбинированный метод изохронной передачи данных повышает гарантоспособности прикладных программ РВС в 3,8 раза по сравнению с традиционными методами, при этом требуя минимальных аппаратных и временных ресурсов и сохраняя фиксированные частоты дискретизации.

- модернизированный метод изохронной передачи данных позволяет повысить гарантоспособность прикладных программ РВС для изохронной передачи данных в 2,5 раза по сравнению с комбинированным методом.

- разработанный алгоритм переключения опорных каналов обеспечивает непрерывную передачу данных даже в случае аварийного отключения основного канала.

#### 4. Степень обоснованности научных положений, выводов, рекомендаций и их достоверность

Научные выводы и рекомендации, предложенные автором, основаны на корректном использовании методов структурно-процедурной организации вычислений, статистического анализа и цифровой обработки сигналов, программировании РВС. Достоверность практических результатов подтверждается экспериментальными исследованиями на специализированных реконфигурируемых вычислительных системах, предназначенных для формирования диаграмм направленности фазированных антенных решёток и цифровой обработки сигналов.

Результаты диссертационной работы были применены в ходе научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в Научно-исследовательском центре супер-ЭВМ и нейрокомпьютеров (НИЦ СЭ и НК), а также внедрены в учебный процесс кафедры Интеллектуальных и многопроцессорных систем Института компьютерных технологий и информационной безопасности (ИКТИБ) Южного федерального университета (ЮФУ), что подтверждается актами внедрения.

Основные результаты диссертационного исследования отражены в 11 научных публикациях, включая 2 статьи в ведущих рецензируемых журналах, включенных в перечень ВАК РФ. Автором получено свидетельство об

официальной регистрации программ для ЭВМ. Результаты работы также были представлены на международных и всероссийских научно-технических конференциях, где автор выступил с докладами по теме исследования и получил положительные отзывы научного сообщества. География апробации работы свидетельствует о широкой информированности научной общественности о результатах диссертационных исследований.

## 5. Оценка содержания диссертации

Диссертация включает введение, три главы, заключительную часть, перечень использованных источников и два приложения. В автореферате содержатся сведения о проведенных исследованиях, ключевые выводы, а также перечень основных научных публикаций автора по теме диссертации. В работе представлен значительный объем иллюстративного материала в виде рисунков и таблиц.

**Введение** включает обоснование актуальности темы исследования, постановку цели и задач, описание научной новизны и практической значимости работы. Также автор изложил основные положения, выносимые на защиту, и привел аннотацию к каждой главе.

**В первой главе** автор анализирует существующие методы и средства обеспечения когерентной обработки данных в комплексах цифровой обработки сигналов.

Показано, что современные АФАР должны иметь в своем составе высокопроизводительные вычислители, способные обрабатывать большие объемы данных с минимальной задержкой. Важную роль играют оптимизированные алгоритмы, работающие в реальном масштабе времени, а также параллельные архитектуры обработки, необходимые для выполнения множества операций одновременно. С развитием АФАР и увеличением количества каналов, которые могут достигать сотен или даже тысяч параллельных потоков, а также с ростом частоты дискретизации до сотен мегагерц и выше, возникает сложность синхронной доставки данных от антенных элементов в блоки обработки.

Исследования архитектур dataflow и методов синхронизации информационных потоков в них показали неспособность гарантировать изохронную передачу данных из-за механизмов, вызывающих недетерминированные задержки.

Далее в первой главе автором проведен анализ различной элементной базы для построения систем когерентной обработки данных в комплексах ЦОС. Были рассмотрены применения универсальных процессоров, сигнальных процессоров, специализированных интегральных схем для обеспечения изохронной передачи данных. В результате были выявлены такие недостатки, такие как низкая вычислительная мощность, ограниченный параллелизм и сложности интеграции с аппаратным обеспечением комплексов ЦОС. Сигнальные процессоры оказываются неподходящими для

многоканальных систем ЦОС, поскольку изначально не рассчитаны на обработку большого числа каналов. Специализированные интегральные схемы, напротив, обеспечивают максимальную производительность за счет оптимизации под конкретные алгоритмы, но их применение сдерживается высокой сложностью разработки, дороговизной производства и отсутствием гибкости после изготовления.

Автор предлагает применять реконфигурируемые вычислительные системы (РВС), построенные на основе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС), для создания комплексов когерентной цифровой обработки сигналов. Среди ключевых преимуществ таких систем отмечается их высокая эффективность при выполнении ресурсоёмких вычислений, в том числе при потоковой и многоканальной обработке данных. Благодаря оптимизации логики и прямому доступу к аппаратным ресурсам, а также близости частот работы современных ПЛИС и частот дискретизации сигналов, РВС на основе ПЛИС позволяют минимизировать задержки при обработке информации. Кроме того, использование высокоуровневых языков программирования ускоряет разработку, упрощает отладку и модификацию функционала, что в итоге сокращает временные и финансовые затраты на создание таких систем.

**Во второй главе** автор подчеркивает важность синхронизации всех узлов комплекса ЦОС, чтобы добиться одновременного формирования потоков данных от всех источников и их точной привязки к физическому времени. Для решения этой задачи предлагается комбинировать систему единого времени с системой опорной тактовой частоты. Эти сигналы будут распределяться из центрального узла во все остальные, обеспечивая синфазную работу тактовых генераторов во всех блоках ЦОС, что гарантирует высокую точность хода машинного времени во всех узлах комплекса.

Автор обращает внимание на необходимость выравнивания задержек между разными каналами, возникающих из-за временных расхождений между информационными потоками при передаче через оптические линии связи. Эти рассогласования связаны с разбросом параметров компонентов канала данных, такими как различия в длине линий связи и дрейф характеристик в процессе эксплуатации. Автором предложено разделить входной информационный поток на группы одинаковой длины, дополнить их служебной информацией и передавать на повышенной частоте, вводя специальные служебные промежутки. Для компенсации задержек, используется буферная память, что позволяет обеспечить предсказуемую латентность и снизить требования к объему памяти, поскольку она является критическим ресурсом. Перед началом массива операндов в служебном промежутке автор предлагает разместить заголовок с временной меткой, а в конце массива добавить контрольную сумму для проверки целостности передаваемых данных. Представлены формулы для вычисления основных параметров протокола передачи массивов операндов с служебными

промежутками, включая коэффициент заполнения данных и величину служебного интервала. Также в работе представлена формула для определения частоты передачи данных в зависимости от частоты их оцифровки.

Автором описана процедура назначения опорного канала, относительно которого будет формироваться диапазон допустимого рассогласования задержек между каналами. При поступлении массивов данных в каждом канале проверяется, соответствуют ли их задержки установленному диапазону. Если задержка выходит за допустимые границы, данные заменяются на массивы с нейтральной информацией. Автором описана процедура обработки ошибок целостности данных с применением контрольных сумм CRC. Этот подход позволяет задать максимально допустимое количество ошибок за фиксированный промежуток времени, при превышении которого канал отключается. Кроме того, определяется временной интервал, в течение которого отсутствие ошибок дает возможность возобновить работу канала.

На основе разработанного автором метода была создана программа, реализующая комбинированный метод на ПЛИС Xilinx Virtex-7 XC7VX485T. В работе подробно рассматриваются алгоритмы работы всех программных блоков. Показано, что разработанная программа демонстрирует высокую эффективность в использовании ресурсов ПЛИС, занимая незначительную их часть.

Далее во второй главе, автор проводит анализ гарантоспособности двух вариантов программы: первая реализует базовый метод, а вторая предложенный комбинированный подход. Оценка проводилась с использованием атрибутивной модели, в рамках которой были выделены ключевые параметры, определяющие гарантоспособность программных комплексов, предназначенных для изохронной передачи данных. Для каждого из этих параметров были определены соответствующие метрики, а их весовые коэффициенты установлены на основе экспертных оценок с учётом данных, полученных в ходе экспериментальных исследований.

Результаты проведённого анализа показали, что базовый метод обеспечивает требуемый уровень гарантоспособности, равный 0,95, при работе с количеством каналов данных до 10900. В то же время комбинированный метод, при аналогичном числе каналов, демонстрирует значительно более высокий уровень гарантоспособности - 0,987. Согласно предложенной автором методике расчёта коэффициента улучшения, это означает, что комбинированный подход превосходит базовый в 3,8 раза по данному показателю. Полученные данные подтверждают эффективность разработанного метода и его преимущества перед традиционными решениями.

**В третьей главе** автором обоснована необходимость разработки более совершенных систем с ФАР, с высоким разрешением для задач мониторинга космического мусора на низкой околоземной орбите, количество которого

неуклонно растет с каждым годом. Для увеличения разрешающей способности ФАР предлагается увеличить число антенных элементов. Однако, автор обращает внимание на необходимость модернизации комбинированного метода чтобы сохранить заданный уровень гарантоспособности при увеличении числа каналов. Предлагается модернизировать процедуры обнаружения и парирования вероятных ошибок для повышения эффективности процедур.

Автор выделяет наиболее значимые ошибки, негативно влияющие на общую гарантоспособность программного комплекса, такие как: аварийное отключение опорного канала и значительное рассогласование массивов операндов, которое не обнаруживается и не парируется в комбинированном методе.

Первую проблему автор предлагает решить с помощью процедуры переназначения отказавшего опорного канала. В разработанной процедуре происходит непрерывное отслеживание статусов всех каналов и их задержек относительно опорного. В случае отказа текущего канала происходит переключение на один из доступных каналов, задержка которого наиболее близка к задержке отказавшего опорного канала. Процесс происходит без прерывания процесса передачи данных и позволяет сохранить работоспособность программы, обеспечивающей изохронную передачу данных при отключении текущего опорного канала.

Следующая аварийная ситуация, рассмотренная автором, связана со значительным рассогласованием задержек, при котором расхождение между массивами операндов, соответствующих одному времени оцифровки, достигает величины периода их следования. Это происходит из-за сбоев в системе синхронизации, приводящих к отставанию массива операндов в неисправном канале на один или несколько периодов. Подобное нарушение противоречит принципам изохронной передачи данных и может исказить формирование диаграммы направленности фазированной антенной решётки. Для решения этой проблемы автор предлагает новую процедуру обнаружения и устранения таких аварийных ситуаций. Каждому массиву операндов присваивается уникальный порядковый номер перед отправкой, который размещается в служебном промежутке перед началом массива. На приёмной стороне происходит сравнение полученного номера с номером, передаваемом в опорном канале. В случае несоответствия формируется признак превышения допустимого рассогласования задержки, и данные такого массива заменяются на нейтральные значения.

Далее в третьей главе, автор указывает на необходимость усовершенствования процедуры обнаружения и парирования ошибок целостности данных. В отличие от комбинированного метода, предполагающего отключение сбойного канала после превышения порогового значения ошибок, автор предлагает предварительную верификацию контрольных сумм массивов операндов перед их отправкой в блоки

обработки. Отличие заключается в том, что данные считываются из памяти только после подтверждения корректности контрольных сумм всех массивов операндов, соответствующих заданным временным ограничениям. Если контрольные суммы не совпадают, устанавливается флаг ошибки целостности и данные из поврежденного канала заменяются нулевыми значениями.

Автором разработана программа, реализующая модернизированный метод обеспечения изохронной передачи данных. Приведены детальные расчеты ключевых параметров протокола, включая размер массива операндов, длину служебного промежутка и коэффициента заполнения данных. Подробно описана структура программы, а также детально рассмотрены алгоритмы работы каждого программного блока, и уделено особое внимание взаимодействию программных блоков между собой.

Проведенный автором, анализ аппаратных затрат, занимаемых разработанной программой на ПЛИС XC7VX485T, показал, что предложенная модернизация приводит к незначительному увеличению потребления ресурсов по сравнению с реализацией комбинированного метода.

Выполнена оценка гарантоспособности программы, реализующей модернизированный метод. Результаты показали, что гарантоспособность программного комплекса, реализующего модернизированный метод, увеличилась в 2,54 раза по сравнению с реализацией комбинированного метода. При непрерывной работе цифрового обрабатывающего комплекса в течение 6 часов модернизированный метод способен поддерживать функционирование 106500 каналов с заданным уровнем гарантоспособности 0,95. Это превышает установленные требования к модернизированному методу, составляющие 90 000 каналов.

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

## 6. Замечания по диссертации

1) Автор неоднократно указывает, что не допускается большая задержка обработки данных, однако не приводит количественных критериев, определяющих границы этой задержки. Неясно, какие значения считаются допустимыми, а какие — критическими, и от чего зависит этот порог.

2) Во второй главе, на временной диаграмме процедуры выравнивания задержек (рисунок 2.11), присутствует задержка чтения `rd_delay`, однако в тексте отсутствует описание того, как определяется величина этой задержки и какие факторы на нее влияют. Неясно, рассчитывается ли она теоретически, определяется эмпирически или зависит от характеристик оборудования.

3) Во второй главе при описании алгоритма проверки целостности данных указано что канал отключается, когда счетчик ошибок достигает

