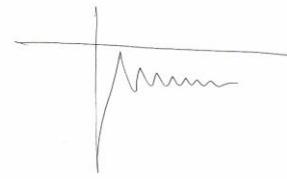


На правах рукописи



ГРИШИН Вячеслав Юрьевич

**Повышение эффективности систем цифровой обработки
радиосигналов в аппаратуре космических средств**

Специальность 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и
устройства телевидения

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Владимир 2016

Работа выполнена в АО «НИИ «Субмикрон», г. Москва, Зеленоград

Научный руководитель: **Никитин Олег Рафаилович**
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых

Официальные оппоненты: **Толстов Евгений Федорович**
доктор технических наук, профессор, начальник отдела ЗАО «Аэрокон», г. Жуковский

Чистюхин Виктор Васильевич
кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой микроэлектронных радиотехнических устройств и систем, Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», г. Москва, Зеленоград

Ведущая организация: Филиал федерального государственного унитарного предприятия «Государственный научно-производственный ракетно-космический центр «ЦСКБ-Прогресс» - Научно-производственное предприятие «Оптико-электронные комплексы и системы», г. Москва, Зеленоград

Защита диссертации состоится «23 » июня 2016 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д212.025.04 при ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» по адресу: г. Владимир, ул. Горького, д.87, ВлГУ, корпус 3, ауд. 301.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ВлГУ и на сайте университета <http://www.vlsu.ru>.

Автореферат разослан «15» апреля 2016 года.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87, ВлГУ, ФРЭМТ.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор

А.Г.Самойлов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Космические радиотехнические системы – одна из важнейших составляющих технической базы информационной инфраструктуры страны. Такие системы являются основой в процессе глобального экологического мониторинга Земли. С их помощью обеспечиваются добывание и транспортировка знаний о погоде и состояниях поверхности Земли и Океана, подверженных антропогенным воздействиям.

Интеллектуальным ядром радиотехнических систем космических аппаратов (КА) являются системы цифровой обработки сигналов (ЦОС). Многообразие режимов работы, обработка с высокой точностью больших массивов информации, формирование большого числа команд управления предъявляют высокие требования к быстродействию бортовых цифровых вычислительных машин (ЦВМ), а условия эксплуатации и невозможность ремонта (текущего или профилактического) – к надежности. Режим обработки данных в КА должен производиться в режиме реального времени.

К настоящему времени накоплен большой опыт создания и эксплуатации бортовых радиотехнических специализированных систем, в том числе для управления КА. Следует отметить, что большой вклад в развитие информационных технологий, микроЭВМ внесли ученые: В.А. Котельников, К. Шеннон, В.М. Глушков, В.С. Пугачев, К.А. Валиев, Ю.В. Гуляев, Е.А. Микрин, В.Н. Бранец, В.Г. Сиренко, А.В. Лобанов, Й.Эйкхофф, Р.С. Мур, Д.Томаяко и другие.

Разработкой аппаратуры для построения распределенных гетерогенных бортовых радиотехнических систем аэрокосмического назначения занимаются Европейское космическое агентство (ESA), космические агентства США (NASA), Японии (JAXA), организации ГК «Роскосмос». Возрастающий объем задач, которые должны решать КА, требует дальнейшего совершенствования систем ЦОС и управляющих комплексов с учетом специфики воздействия космического пространства. Эффективность защиты элементной базы от воздействия радиации может отличаться в сотни раз и зависит от параметров орбиты, на которых используются КА, что не учитывают большинство методик испытания и сертификации аппаратуры. Известно большое число методов и систем диагностики, обеспечивающих локализацию неисправностей. Однако для эффективного решения задач повышения надежности цифровых радиотехнических комплексов и их диагностики следует использовать систему анализа и формирования причинно-следственных связей наступления отказов при накоплении эффекта от воздействия радиации.

Другой важнейшей особенностью проектирования и обеспечения эффективности радиотехнической аппаратуры для КА является разработка таких вычислительных платформ, где обеспечена оптимальная сбалансированность выбранных ресурсов при заданной точности расчетов. На современном этапе при создании КА со сроками активного существования (САС) 10 лет и более возрастают требования к системам ЦОС и комплексам управления по производительности, а к основным параметрам периферийных систем – по скорости передачи данных. Требуется обеспечение бессбойности, отказоустойчивости, радиационной устойчивости электронно-компонентной базы (ЭКБ) при ограниченной потребляемой мощности и массогабаритных характеристиках.

Таким образом, разработка новых и совершенствование известных методов проектирования и обеспечения надежности систем ЦОС и управления КА с учетом еще не до конца изученных условий воздействия космического пространства явля-

ется актуальной задачей, особенно для систем ЦОС целевой нагрузки, опыт эксплуатации которых в условиях космоса отсутствует.

Объектом исследования являются бортовые системы ЦОС и вычислительные комплексы управления КА.

Предметом исследования являются методы повышения точности и вычислительной эффективности базовых алгоритмов ЦОС, надежности, сбое- и отказоустойчивости, а также радиационной стойкости многопроцессорных вычислительных систем КА.

Целью работы является разработка принципов и методов построения высокоэффективных систем цифровой обработки радиосигналов и вычислительных комплексов управления космического базирования, что обеспечивает повышение точности вычислительных процессов, надежности функционирования КА с длительными сроками активного существования.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие основные задачи:

1. Определение основных требований к перспективным радиотехническим системам ЦОС космического базирования по производительности, скорости обмена данными, объемам памяти.

2. Повышение точности воспроизведения функциональных зависимостей, вычисления элементарных функций и амплитуды комплексного радиосигнала.

3. Разработка методологии обеспечения высокой надежности систем путем повышения радиационной стойкости электронно-компонентной базы.

4. Разработка методики повышения надежности и реализации цифровых устройств, структур бортовых компьютеров с гибкой ресурсосберегающей архитектурой и резервированием, в том числе мультиплексных каналов.

5. Совершенствование известных и создание нового метода повышения надежности необслуживаемых многопроцессорных систем ЦОС и управления, основанного на репликации задач, возможности самореконфигурации и самоуправления деградацией.

6. Развитие методологии создания бортовых вычислительных комплексов обработки сигналов и управления с резервируемой функциональностью.

Методы исследования. В работе использовались методы теории цифровой обработки сигналов, теории надежности, теории проектирования процессорных устройств с мажоритарным принципом принятия решений, теории статистической радиотехники.

Научная новизна работы. Научная новизна работы заключается в том, что в ней впервые дается систематизированное решение задачи, связанной с созданием высокоэффективных систем ЦОС и управляющих комплексов КА:

1. Разработаны методы управления вычислительной сложностью алгоритмов расчета ряда библиотечных функций в системах ЦОС при контроле точности вычислений.

2. Предложены новые методы реализации высоконадежных структур ЦОС с аппаратно-программным мажоритированием, с управляемой деградацией надежности, с сетевой архитектурой и возможностью реконфигурации.

3. Разработаны новые алгоритмы взаимного информационного согласования с обнаружением и идентификацией неисправностей в необслуживаемых многопроцессорных структурах ЦОС.

4. Разработаны методологические основы разработки высоконадежных синхронных мультиплексных каналов информационного обмена для вычислительных систем ЦОС и управляющих комплексов КА.

Основные научные результаты и положения, выносимые на защиту

1. Результаты анализа радиационной стойкости электронной компонентной базы для аппаратуры космического базирования, которые обеспечивают повышение достоверности оценки показателей надежности с уточненными методиками их оценки, проведение экономически обоснованных испытаний блоков бортовой радиотехнической аппаратуры КА, корректировку положений и требований действующих нормативных документов по оценке стойкости по дозовым эффектам, использование экономически обоснованных технологий.

2. Алгоритмы распределенного системного самодиагностирования на базе алгоритма взаимного информационного согласования, позволяющие необслуживаемой системе обнаруживать и идентифицировать место возникновения (ОЗУ процессорного ядра, ПЗУ, синхронный мультиплексный канал информационного обмена, передающий/принимающий узел) и вид (сбой, программный сбой и отказ) проявления неисправностей.

3. Архитектура, структура и метод построения бортовых высокопроизводительных резервированных устройств ЦОС и управляющих систем КА на отечественной электронной компонентной базе, обеспечивающие гибкое масштабирование и реконфигурацию вычислительных ресурсов, обладающие высокой надежностью.

Достоверность результатов. Достоверность результатов подтверждается использованием апробированного математического аппарата, логической обоснованностью разработанных положений, натурными экспериментами и многолетней эксплуатацией аппаратуры на борту действующих КА.

Практическая ценность. На основе разработанных принципов, методик, технологий, алгоритмов и структур создано семейство высоконадежной бортовой радиотехнической аппаратуры ЦОС и для управления КА, разработаны модули обмена информацией. Аппаратура, разработанная с использованием результатов диссертации, установлена и успешно эксплуатируется на КА «Меридиан», «Ресурс-П», «Союз-ТМА», «Глонасс-М», «Прогресс-М», «Экспресс-АМ» и др.

В результате исследований определены направления и концепции развития электронной промышленности по производству радиационно стойкой элементной базы радиотехнических систем аэрокосмического сектора. Использование предложенных методов взаимного информационного согласования аппаратуры ЦОС обеспечивает бесперебойное функционирование радиотехнической аппаратуры на КА с длительным САС, методики программно-аппаратного резервирования позволят в 3...90 раз увеличить среднее время безотказной работы. Разработанные методы унификации построения систем обработки информации позволяют на 60% сократить затраты, трудоемкость и сроки выполнения ОКР.

Личный вклад автора. Основные идеи и технические решения предложены лично автором и явились результатом исследований, в которых автор принимал непосредственное участие в течение последних 15 лет в качестве исполнителя, ответственного исполнителя, научного руководителя.

Реализация и внедрение. Результаты диссертационной работы в виде аппаратуры модулей обмена, бортовой аппаратуры обработки сигналов, бортовых

управляющих ЦВМ внедрены в ОАО «РКК «Энергия», ОАО «Корпорация «Комета» с экономическим эффектом 750 млн. руб., что подтверждается актами.

Апробация работы. Результаты исследований, составляющие основное содержание диссертации, докладывались на 12 международных, 4 всероссийских и 4 ведомственных конференциях, симпозиумах и семинарах, в том числе: на VIII Международной науч.-практ. конференции «Пилотируемые полеты в космос» (Звездный городок, 2010); 7-й Международной конференции «Системный анализ и управление аэрокосмическими комплексами» (Украина, Крым, Евпатория, 2002); IV Всероссийской науч.-практ. конференции «Перспективные системы и задачи управления» (Москва, 2009); 4-ой Всероссийской конференции «Новые информационные технологии в исследовании сложных структур» (Томск, 2002); XXII науч.-техн. конференции ФГУП «ЦНИИ «Комета» «Космические информационно-управляющие системы наблюдения» (Москва, 2008); II Всероссийской науч.-практ. конференции «Космическая радиолокация» (Муром, 2013), I Расплетинские чтения (Москва, 2014), а также на ежегодных пленумах, проводимых ГК «Роскосмос» (Москва, 2005-2015 г.г.) по проблемам космической техники и других НТК.

Основные публикации по теме диссертации. По теме диссертации опубликовано более 29 работ: 12 статей, в том числе 9 статей в периодических изданиях, рекомендованных ВАК (включая 4 в БД Scopus), 12 материалов и тезисов докладов. Основные технические решения защищены 5 патентами РФ.

Структура диссертации, объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы и 4-х приложений. Общий объем работы составляет 190 страниц, в том числе 145 страниц основного текста, 38 рисунков, 12 таблиц. Список литературы содержит 238 наименований и 29 работ автора. Приложения размещены на 45 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснованы актуальность и практическая значимость диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследований, приведены достигнутые новые научные результаты и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассматриваются основные проблемы создания высокоэффективных цифровых систем обработки радиосигналов и вычислительных комплексов управления (ЦОСиУ) космических аппаратов, определяются требования к перспективным цифровым системам по производительности, сбое- и отказоустойчивости.

Для перспективных космических комплексов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) проведен анализ базовых алгоритмов ЦОС при формировании высокодетальных радиофизических и оптических изображений, определен состав многократно используемых функций, требующих увеличения вычислительной точности или скорости расчетов. На рис. 1, 2 представлены расчетные для низкоорбитального КА зависимости скорости потока данных от разрешающей способности. Для перспективных систем оптико-электронного наблюдения в системе ЦОС надо обеспечить прием и обработку потоков данных со скоростью до 60 Гбит/с, а для записи результатов 10-ти минутной съемки требуется память общим объемом до 3,66 Тбайт. Отсюда следуют актуальные проблемы создания высокоскоростных линий передачи, интерфейсов и процессоров ЦОС и организации работы больших объемов памяти.

Аппаратура ЦОС должна обладать устойчивостью к воздействию вредных факторов космического пространства. Отмечается, что стандарты в области требований к радиационной стойкости не всегда являются совершенными, поэтому поставлена задача коррекции и совершенствования их базовых положений. Для повышения эффективности алгоритмов вычисления нелинейных функций использован критерий равномерного приближения Чебышева. За основу повышения надежности систем ЦОСиУ были выбраны аппаратные (холодное и горячее резервирование, мажоритарное резервирование) и программные (взаимное информационное согласование) методы.

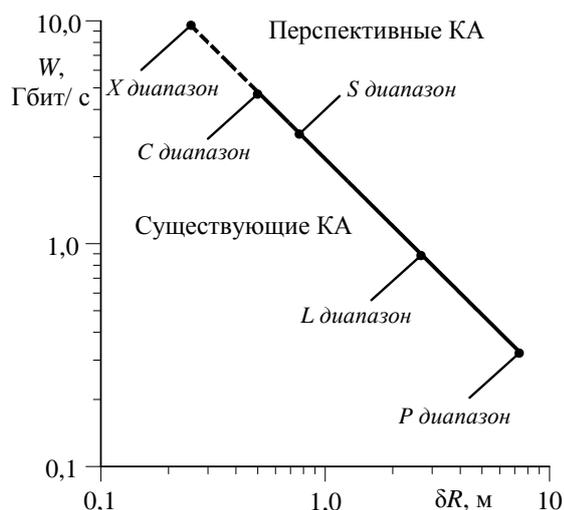


Рисунок 1 – Зависимость скорости потока данных от предельной разрешающей способности радиодатчика

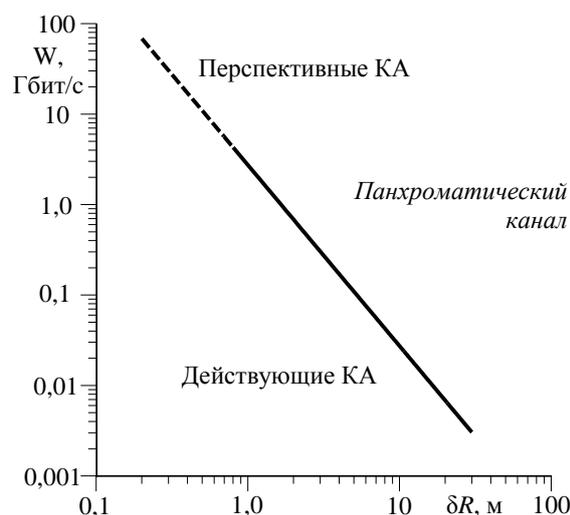


Рисунок 2 – Зависимость скорости потока данных от разрешающей способности опико-электронного датчика

Поставленные проблемы создания таких ответственных компонентов КА как системы ЦОС и управления, обладающих высокой эффективностью и надежностью, являются важными для всей аэрокосмической отрасли.

Вторая глава посвящена исследованию ряда базовых алгоритмов ЦОСиУ, которые в силу многократного использования в рабочих процессах требуют высокого быстродействия. Основное внимание уделяется алгоритмам приближенных вычисления нелинейных прямых $y = f(x)$, где x – входной цифровой сигнал, y – выходной цифровой сигнал, и обратных им функций $x = f^{-1}(y)$. Глава также включает в себя исследования по анализу влияния точности вычисления амплитуды комплексного радиосигнала на характеристики обнаружения системы. Эффективная реализация данных операций важна в системах ЦОС на ПЛИС или гетерогенных структурах (комбинация ПЛИС и сигнальных процессоров). Предложена методика управления погрешностью с устранением избыточной точности и обеспечением заданного быстродействия.

Для построения нелинейных функций используется полином наилучшего приближения (полином Чебышева) степени n с $n + 1$ членами ряда

$$L_n(x) = a_0 \cdot x^0 + a_1 x^1 + a_2 x^2 \dots + a_i x^i + \dots + a_n x^n \quad (1)$$

с константами a_i и верхним значением погрешности $\delta_{МП}$

$$\delta_{МП} = f(x) - L_n(x) \leq \frac{f^{[n+1]}(x)(b-a)^{n+1}}{(n+1)!2^{2n+1}}, \quad (2)$$

где $f^{[n+1]}(x)$ – производная $(n+1)$ -го порядка, a, b – диапазон изменения.

Устранение избыточной точности результата вычислений и снижение программно-аппаратных затрат производится за счет исключения неэффективных членов ряда $a_i x^i$ полинома $L_n(x)$, а также симметрирования составляющих погрешностей дискретизации и округления при одновременном сокращении аппаратных затрат при хранении констант.

В качестве примера повышения точностных характеристик рассмотрена процедура вычисления функции $\sin(x)$ на интервале аппроксимации $x \in [0; \pi/2]$. Определён полином наилучшего приближения седьмой степени

$$P(x) = x \cdot (a_1 + (a_2 + (a_3 + a_4 \cdot x^2) \cdot x^2) \cdot x^2). \quad (3)$$

На рис. 3 приведены графики текущего значения погрешности δ_M при использовании полинома (3) с разными коэффициентами. Максимальная погрешность и значения коэффициентов приведены в таблице 1. Для уменьшения погрешностей дискретизации δ_D получено условие

$$N_t = g \cdot \delta_{PM} / f'(t)_{\max}, \quad (4)$$

при котором интервал дискретизации N_t следует выбирать таким образом, чтобы аналоговые значения функции $f(t)$ при таком приращении аргумента изменялись не более, чем на g -ю часть от погрешности δ_{PM} . Погрешность дискретизации аргумента можно уменьшить примерно в два раза путём симметрирования со сдвигом на полдискрета значения аргумента.

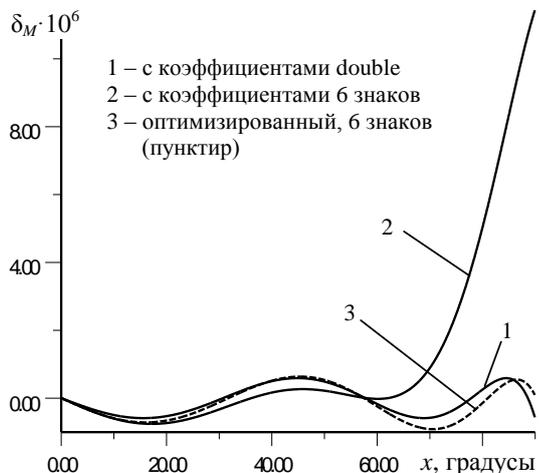


Рисунок 3 – Графики погрешностей полиномов

Таблица 1 – Погрешность различных полиномов для вычисления функции $\sin(x)$

№ п/п	Номер полинома (графика)		
	1	2	3
a_1	0,99999661573	0,999996	0,999996
$-a_2$	0,166648283427	0,166648	0,166646
a_3	0,008306324986	0,008306	0,008304
$-a_4$	0,000183636492	0,000183	0,000183
δ_M	$5,891 \cdot 10^{-7}$	$1,122 \cdot 10^{-5}$	$9,121 \cdot 10^{-7}$

Предложенная методика позволила в 12 раз снизить максимальную погрешность вычислений.

Проведен сравнительный анализ быстродействующих методов вычисления амплитуды радиосигнала $A_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2}$ по квадратурным составляющим радиосигнала x_i, y_i . Рассмотрены 2 группы приближенных алгоритмов: 1) модульные алгоритмы вычисления амплитуды комплексного сигнала на основе модулей квадратурных составляющих $|x_i|$ и $|y_i|$, которые записываются в виде $A_i = \max_{j=1,2,..,m} \{c_j\}$, где последовательность $c_j = a_j |x_i| + b_j |y_i|$, m – четное целое число; 2) алгоритмы с предварительной сортировкой на максимальное $\max_i = \max(|x_i|, |y_i|)$ и минимальное

$\min_i = \min(|x_i|, |y_i|)$ значения. Характеристики некоторых алгоритмов приведены в таблице 2, из которой следует, что можно подобрать алгоритм с широким диапазоном требуемой точности и производительности.

Таблица 2 – Характеристики алгоритмов вычисления амплитуды

№	Алгоритм приближенных вычислений	Макс. ошибка, %	Макс. ошибка, дБ	Средняя ошибка, %	Средняя ошибка, дБ	Полная шкала, %
1	$\max_i + 0,5 \min_i$	11,803	0,969	8,847	0,736	111,803
2	$0,9609375 \max_i + 0,40625 \min_i$	4,328	0,368	1,522	0,131	104,328
3	$0,9615 \max_i + 0,3971 \min_i$	4,027	0,343	1,193	0,103	104,027
4	$m = 4$	-2,986	-0,263	-0,615	-0,054	100,778
5	$m = 4$	-1,288	-0,113	-0,012	-0,001	100,645
6	$m = 8$	-0,321	-0,028	-0,001	-0,00007	100,161

Примечание: Значения коэффициентов для алгоритма 4 равны $a_1 = b_2 = 0,875$; $a_2 = b_1 = 0,5$; $a_3 = b_4 = 1$; $a_4 = b_3 = 0$; для алгоритма 5 – $a_1 = b_2 = 0,836836$; $a_2 = b_1 = 0,559156$; $a_3 = b_4 = 0,987116$; $a_4 = b_3 = 0,19635$; для алгоритма 6 – $a_1 = b_2 = 0,774254$; $a_2 = b_1 = 0,635414$; $a_3 = b_4 = 0,883340$; $a_4 = b_3 = 0,472155$; $a_5 = b_6 = 0,958479$; $a_6 = b_5 = 0,290752$; $a_7 = b_8 = 0,996785$; $a_8 = b_7 = 0,098175$.

Проведено исследование влияния точности вычисления амплитуды на качественные показатели радиосистемы на примере решения задачи обнаружения радиосигнала с неизвестной случайной фазой, т.е. на системные характеристики радиотехнических систем обнаружения. Показано, что при вероятности ложной тревоги $10^{-4} \dots 10^{-8}$ и применении алгоритмов, имеющие максимальную ошибку вычислений 4...12%, потери в пороговом отношении сигнал-шум невелики (0,1...0,2 дБ). Однако в случае формирования радиофизического изображения с высоким радиометрическим разрешением 0,5...0,75 дБ необходимо применять более затратные с вычислительной точки зрения высокоточные алгоритмы, обеспечивающие ошибки не более 0,05 дБ.

Рассмотрены комбинированные полиномиальные, итерационные и гибридные методы вычислений алгоритмы деления чисел в системах ЦОС. Синтезированы полиномы наилучшего приближения, обеспечивающие точность вычислений от 0,003% до 28% при контролируемом числе вычислительных операций (от 38 до 11). При значениях относительной погрешности 0,15%...0,1% метод с нормализацией интервала становится более эффективным, чем комбинированный метод. В то же время дальнейшее повышение точности вычислений только за счет увеличения степени полинома приведет к дополнительным программно-аппаратным затратам и снижению быстродействия. Показано, что при числе значащих цифр результата порядка 14...16 и более целесообразным будет применение гибридного метода.

Третья глава посвящена совершенствованию методов повышения надежности бортовых систем ЦОСиУ КА. Подробно рассмотрены радиационные эффекты в сверхбольших интегральных схемах, проведено исследование надежности предлагаемых структур ЦОСиУ космических аппаратов с длительными сроками активного существования.

Дана общая характеристика радиационных эффектов в системах ЦОСиУ и их компонентах, выделены доминирующие радиационно-стимулированные эффекты: дозовые эффекты Э1, эффекты Э2–Э4 от воздействия тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) и высокоэнергетических протонов (ВЭП) и эффекты Э5 от совместного действия Э1 и Э2–Э4. Проведено исследование влияния интенсивности дозовых и ти-

ристорных эффектов на работоспособность СБИС бортовых систем ЦОС. Оценки поглощенных доз от электронов D_e , протонов D_p и их суммы D для наиболее жестких радиационных условиях эксплуатации приведены в сводной таблице 3. Экспериментальные данные и уточненные расчеты в условиях сотовой (плоскостной) компоновки показали, что критичность стойкости в среднем составляет 25 крад для промышленных СБИС без дополнительных мероприятий по их защите.

Таблица 3 – Поглощенные дозы и тиристорные отказы процессорных СБИС в системе ЦОС

Орбита	САС, лет	Поглощенные дозы, крад			Количество тиристорных отказов процессорных СБИС в системе ЦОС, макс./мин., 1/САС		
		D_e	D_p	D	Процессор МБК	Сигнальный контроллер СБК	Контроллер ЛБК
ВЭО	7	31,6	55,1	86,7	37,6/4,65	50,0/6,2	12,5/1,55
ГСО	10	81,0	5,0	86,0	53,4/6,6	71,2/8,8	17,8/2,2

МБК – мажорированный бортовой компьютер, СБК – бортовой компьютер сигнальной обработки, ЛБК – локальный бортовой компьютер

Когда в системах ЦОСиУ во время эксплуатации требуется корректировка программного обеспечения (ПО), наиболее критичными по дозе становятся СБИС ПЗУ-FLASH из-за низкой стойкости по функции «стирание-запись». В таблице 4 приведены оценки частот сбоев для элементов памяти устройств, входящих в системы различной архитектуры при экстремальных условиях.

Таблица 4 – Интенсивность одиночных сбоев в памяти бортовых компьютеров

Тип БК	Память БК		Диапазоны частот сбоев, макс./мин., 1/с		
	Тип памяти	Объем, Мбит	от ТЗЧ солнечных космических лучей	от ВЭП солнечных космических лучей	от ВЭП радиационного поля Земли
МБК (ГБК)	ВП МП	0,6	3,1/0,0021	0,064/0,0005	0,018/0,0006
	СОЗУ	48	328/2,24	5,08/0,04	1,44/0,048
СБК	ВП СМК	8	41/0,28	0,846/0,007	0,24/0,008
	СОЗУ	192	985/6,82	20,3/0,016	5,85/0,032
	ДОЗУ	1024	59700/35	1085/3,37	307/1,83
ЛБК	СОЗУ	2	10,3/0,07	0,212/0,017	0,06/0,002

ВП МП – встроенная память микропроцессора, ВП СМК – встроенная память сигнального микроконтроллера, СОЗУ – сверхоперативное запоминающее устройство (ЗУ), ДОЗУ – динамическое оперативное ЗУ, ТЗЧ – тяжелые заряженные частицы, ВЭП – высокоэнергетические протоны.

Полученные результаты показали, что максимальная интенсивность сбоев достигается в фазе солнечной вспышки, а минимальная – от воздействия ВЭП радиационного пояса Земли. Рассмотрены вопросы совершенствования проведения радиационных испытаний СБИС и устройств ЦОС и нормативных требований при оценках стойкости блоков по дозовым эффектам, что позволяет:

- повысить достоверность оценки и избежать наиболее опасных отказов целевых систем ЦОС при штатной эксплуатации на орбите;
- подтвердить допустимость применения ЭРИ промышленного уровня;
- исключить заключения по признанию стойких ЭРИ нестойкими;
- гарантированно обосновать замену ЭРИ на более стойкие;
- определить целесообразность проведения дополнительных испытаний.

На основе рассмотренных ограничений и недостатков применения схемной защиты от ТЭ в бортовой аппаратуре космического базирования разработаны реко-

мендации по использованию КМОП ЭРИ, в том числе индустриального исполнения.

В процессе разработки ряда КА были синтезированы многопроцессорные системы ЦОСиУ с разными принципами обеспечения отказо- и сбоеустойчивости и эффективностью аппаратной защиты от сбоев. Рассмотрена система ЦОС, состоящая из нескольких вычислительных кластеров (рис. 4).

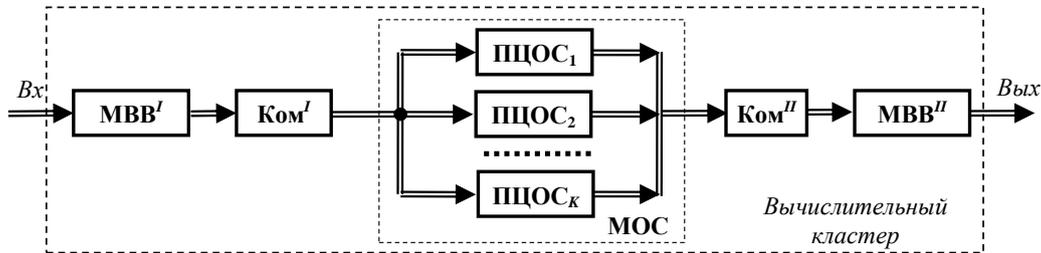


Рисунок 4 – Кластер цифровой обработки сигналов

Модуль обработки сигналов (МОС) состоит из нескольких процессоров цифровой обработки сигналов (ПЦОС), на которые поступают входные данные через модуль ввода-вывода МВВ¹ и коммутатор Ком¹. Сбор результатов обработки сигналов и вывод потребителю осуществляется второй частью коммутатора Ком² и модуля ввода-вывода МВВ².

С учетом радиационных воздействий при дозах 10 крад проведен расчет зависимостей вероятности безотказной работы $P_1(t)$ для процессора и кластера «МВВ-Ком-МОС» различной размерности от нормированного времени $t \cdot \lambda_{ПЦОС}$, где $\lambda_{ПЦОС}$ – интенсивность отказов процессора ЦОС (без учета радиационных эффектов). Анализ результатов показал существенную деградацию эффективности функционирования аппаратуры КА в условиях космического пространства. Поэтому для обеспечения надежности устройств ЦОС применяется скользящее нагруженное резервирование из M аналогичных кластеров, которые подключаются с помощью переключателя.

В общем случае вероятность безотказной работы такой системы определяется соотношением

$$P_{MN}^{(1)}(t) = \sum_{i=N}^{N+M} \sum_{k=i-N}^M C_N^{i-k} C_M^k P_1^{i-k}(t) [1 - P_1(t)]^{N-i+k} [P_{ПК}(t) P_1(t)]^k [1 - P_{ПК}(t) P_1(t)]^{M-k}, \quad (5)$$

где $P_{ПК}(t)$ – вероятность безотказной работы переключателя, C_M^k – число сочетаний из M по k .

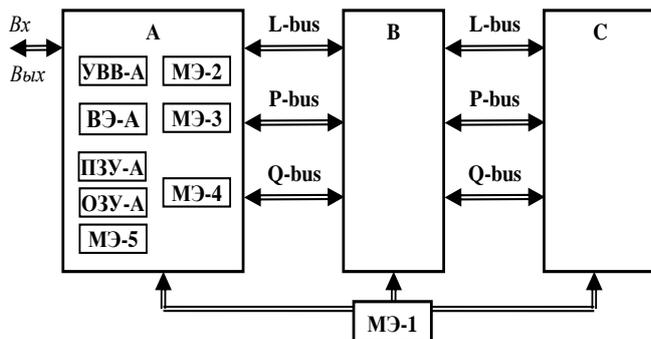


Рисунок 5 – Обобщенная структурная схема резервированной цифровой управляющей системы

Для трех рабочих конфигураций (без резервирования, с одним и двумя резервными кластерами) и с учетом конечной надежности переключателя проведен расчет вероятности безотказной работы, который показал, что увеличение скользящего резерва дает заметный рост вероятности безотказной работы, а наличие переключателя снижает среднее время

безотказной работы на 6%. Резервированные системы имеют преимущества по показателю вероятности безотказной работы на начальных стадиях эксплуатации.

Разработаны оригинальные структуры с мажорированием двунаправленных сигналов по критерию «2 из 3» и введением диагностики. Предлагаемая базовая система состоит из трех однотипных каналов А, В, С (рис. 5, МЭ – мажоритарный элемент), которые работают в нагруженном режиме и выполняют одну и ту же задачу. В системе используются следующие интерфейсные шины для обмена информацией: шина вычислительного элемента (ВЭ) – Р-bus; локальная шина устройств ввода-вывода (УВВ) – L-bus; межмодульная шина – Q-bus.

Проведен сравнительный анализ надежности цифровой управляющей системы, работающей в различных режимах. Показано, что для троированной системы вероятность безотказной работы $P_{21}(t)$ можно существенно увеличить за счет дублирования интерфейсных линий.

Мажоритарные устройства позволяют сохранить достоверность обрабатываемых и хранящихся в памяти данных и программ. Вероятность безотказной работы при подключении МЭ определяется соотношением

$$P_{moon}^{(1)}(t) = P_{MЭ}(t) \sum_{i=0}^{(n-1)/2} C_n^i P_1^{n-i}(t) [1 - P_1(t)]^i, \quad (7)$$

где $P_{MЭ}(t)$ – вероятность безотказной работы мажоритарного элемента, n – число мажорируемых элементов, m – порог голосования.

На рис. 6 представлены расчетные зависимости вероятностей безотказной работы без учета $P_{2003}(t)$ и с учетом $P_{2003M}(t)$ надежности МЭ. Для сравнения аналогичные графики приведены для мажорированной троированной системы $P_{21M}(t)$. Применение МЭ приводит к заметному снижению вероятности безотказной работы, однако позволяет сохранить информацию в элементах вычислительной системы (элементах памяти, интерфейсных устройствах). Предложена схема управляемой деградации реконфигурируемой вычислительной системы. Исходное состояние соответствует мажорированной резервированной системе 2003. При выходе из строя одного из каналов система диагностики перестраивает логику работы МЭ-1 на работу по критерию «один из двух» (1002). С течением времени, когда выйдет из строя еще один канал, система переходит в одноканальный режим без голосования и без резервирования (1001).

На рис. 7 представлены характеристики надежности для последовательности этих режимов. Графики показывают, что переход от режима 2003 к 1002 сопровождается некоторым увеличением вероятности безотказной работы.

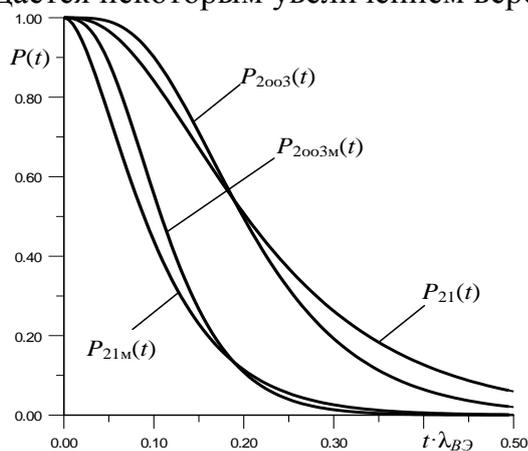


Рисунок 6 – Вероятность безотказной

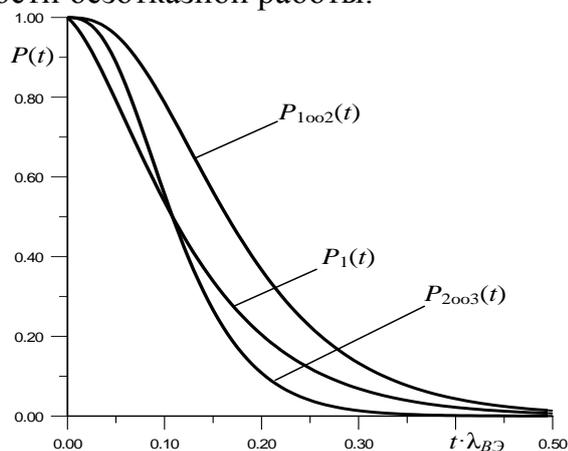


Рисунок 7 – Характеристики управляемой

Дальнейшее повышение надежности возможно за счет подключения идентичного блока D из состава холодного резерва.

Рассмотренные структуры мажоритарного и общего резервирования цифровых систем управляющих комплексов и ЦОС позволяют получить высокие характеристики надежности при работе в условиях космического пространства. В радиотехническом комплексе КА программно-аппаратные средства обеспечения надежности и управления деградацией позволят продлить срок активного существования КА до 10...15 лет.

В *четвертой главе* разработаны алгоритмы функционального и распределённого системного диагностирования и взаимного информационного согласования многокластерных систем ЦОС и управления, применение которых позволяет алгоритмическим путем решить задачу повышения сбое- и отказоустойчивости.

При разработке алгоритмов самодиагностирования рассмотрены системы ЦОС, состоящие из n МОС или кластеров процессоров, соединённых между собой n каналами межсистемной связи шинной архитектуры. Модель многокластерной вычислительной системы изображается в виде графа, в котором вершины отображают МОС, а рёбра – дуплексные каналы связи, каждый МОС имеет собственный номер и обозначается так же, как соответствующая вершина графа через M_i . В такой модели идентификация места возникновения неисправностей осуществляется с точностью до МОС или дуплексного канала связи.

Разработаны новые алгоритмы распределённого системного самодиагностирования и взаимного информационного согласования с повышенной точностью и глубиной идентификации проявлений неисправностей, с обнаружением и идентификацией проявлений кратных неисправностей. Предложена модель многокластерной вычислительной системы, обеспечивающая идентификацию враждебных неисправностей МОС, включая дуплексные межмашинные каналы связи, с максимально возможной точностью. Рассмотрена графовая модель D системы, которая приведена на рис.8 и содержит подграф F , гомеоморфный полносвязному графу с числом вершин $n = 3m+1 = 7$ для $m = 2$. Основными вершинами в графе D являются вершины $M_1 - M_7$, неосновными – $M_8 - M_{11}$, разделительными – $M_8 - M_{10}$. Предположим, что неисправны МОС M_2 и M_{11} . Проверяющими для МОС M_2 являются основные МОС M_1, M_3, M_4, M_6, M_7 , а для МОС M_{11} – основные МОС M_1 (через M_{10}), M_4, M_5 (через M_9), M_6, M_7 (через M_8).

Выражения подозреваемых неисправностей, строящиеся во всех исправных основных МОС, для каждого из проявлений соответственно имеют вид:

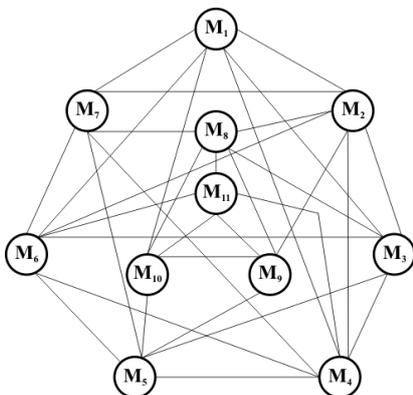


Рисунок 8 – Граф D системы

$$1) (M_{2 \rightarrow 3}^1)^4 \vee (M_{3 \leftarrow 2}^1)^4 \vee (M_3^2)^4;$$

$$2) (M_{2 \rightarrow 3}^2)^4 \vee (M_{3 \leftarrow 2}^1)^4 \vee (M_3^2)^4;$$

$$3) (M_{2 \rightarrow 1}^2)^4 \vee (M_{1 \leftarrow 2}^1)^4 \vee (M_1^4)^4;$$

$$4) (M_{11 \rightarrow 4}^2)^4 \vee (M_{4 \leftarrow 11}^2)^4 \vee (M_4^4)^4.$$

Конъюнкция всех этих выражений после приведения к виду дизъюнкции конъюнкций и исключения каждого терма, не удовлетворяющего условию допустимой кратности неисправностей (не более двух неисправных МОС), будет иметь два терма, каждый из которых представляет допустимую сово-

купность сбоев передающих и принимающих устройств МОС, при которой возможно имеющее место поведение системы

$$(M_{11 \rightarrow 4}^2)^4 (M_{11 \leftarrow 6}^{10})^3 (M_{2 \rightarrow 3}^1)^4 (M_{2 \rightarrow 1}^2)^4 \vee (M_{11 \rightarrow 4}^2)^4 (M_{11}^2)^4 (M_{2 \rightarrow 3}^1)^4 (M_{2 \rightarrow 1}^2)^4.$$

Как видно из выражения, идентификация места неисправности в предлагаемом подходе возможна с точностью до передающего/принимающего устройства в части ЦОСиУ, участвующей в обмене по дуплексному каналу.

Результаты исследований четвёртой главы носят принципиальный характер, поскольку определяют возможные пути создания сбое- и отказоустойчивых много-процессорных систем ЦОС и управления.

В пятой главе разработаны принципы построения систем ЦОС и вычислительных комплексов управления КА с длительными САС, определены основные направления унификации проектов их реализации, которые обеспечивают сокращение сроков и стоимости проектов. Предлагаемая архитектура системы ЦОСиУ включает в себя создание резервированных вычислительных модулей, высоконадежной бортовой сети и коммутационной среды, через которую осуществляется обмен потоками команд и данных на борту космического аппарата.

Предлагаемая структура бортовой системы КА представлена тремя типами подсистем (рис. 9), связанных высокоскоростными каналами SpaceWire (SW), FibreChannel (FC), SpaceFibre (SpF). Схема блока ЦОС с возможностью наращивания масштабируемой производительностью представлена на рис. 10.

Учтено, что для унификации работ по созданию аппаратуры бортовых систем часто используется шина МКО, поэтому принятые технические решения позволяют увязывать в единую систему уже существующие решения. Разработан подход к построению всех бортовых систем КА на основе резервируемой функциональности и однородной коммутационной среды, к которой могут быть подключены различные ресурсы (рис.11). Анализ показал перспективность использования интерфейсной шины SpaceWire, модификации которой SpaceWire-RT и SpaceFibre обеспечивают скорость передачи 10 Гбит/с и более.

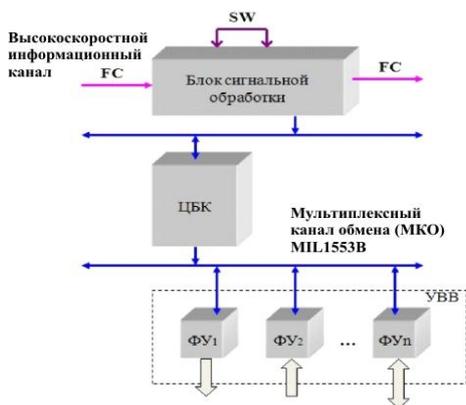


Рисунок 9 – Бортовая вычислительная система

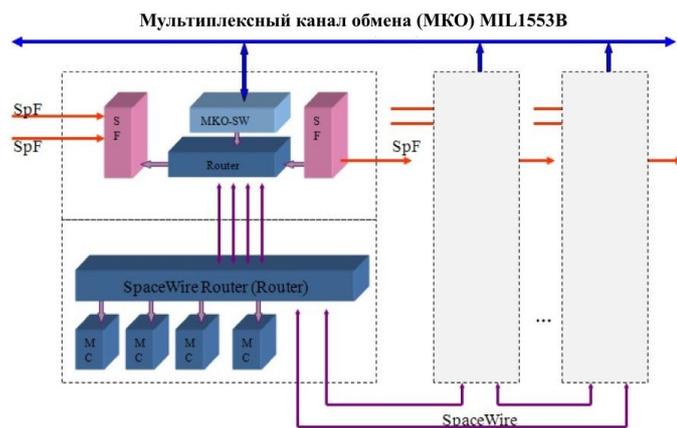


Рисунок 10 – Блок ЦОС с модульной конструкцией и наращиваемой производительностью

Проведена оценка надежности классической резервированной системы ЦОС и предлагаемой аппаратуры ЦОС на основе сетевой технологии, упрощенная схема которой приведена на рис.12. Предлагаемый вариант построения аппаратуры ЦОС позволяет подключать резервные процессоры к общей шине, что приводит к возрастанию надёжности вычислителя. Различия между резервным или основным

ПЦОС стираются. Показано, что одним из ненадежных элементов аппаратной части является модуль ввода-вывода. Данные результатов расчета приведены в таблице 5.

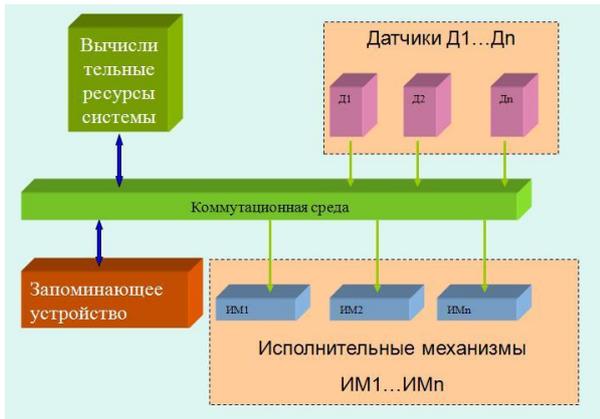


Рисунок 11– Структура с резервируемой функциональностью и коммутационной средой

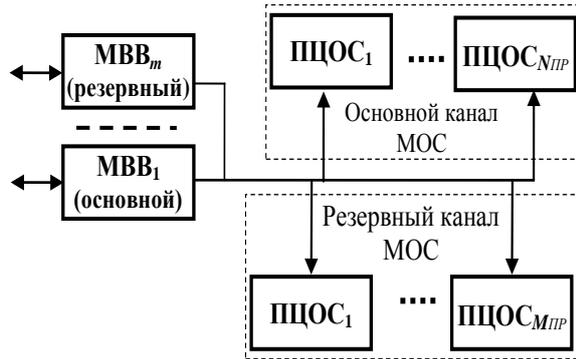


Рисунок 12 – Упрощенная схема бортовой аппаратуры ЦОС, созданной по сетевой технологии

Полученные данные подтверждают, что использование резервирования процессоров ЦОС с одним МВВ (Вариант 1) не приводит к существенному повышению надёжности. Вероятность безотказной работы с 0,9 повышается до 0,9655, но при этом наблюдается проигрыш однократно резервированной структуре ЦОС по схеме «МВВ-МОС» – среднее время безотказной работы в 3,4 раза меньше ($\gamma = 0,29$). Однократное резервирование МВВ даёт положительный эффект и позволяет увеличить вероятность безотказной работы до уровня 0,9988, а среднее время безотказной работы – в 8,4 раза.

Таблица 5 – Исходные данные и результаты расчёта характеристик надёжности

Параметры схемы	Схема ЦВМ (Вариант 1)		Схема ЦВМ (Вариант 2)	
	Рис.4	Рис.12	Рис.4	Рис.12
Число основных (резервных) структур МВВ-МОС	1(1)	–	2(2)	–
Число основных (резервных) ПЦОС	4(4)	4(4)	8(8)	8(8)
Общее число основных (резервных) МВВ	–	2/1	–	3/2
Вероятность безотказной работы	0,99	0,9988 0,9655	0,9963	0,99996 0,99880
Выигрыш в среднем времени безотказной работы γ	8,4 / 0,29		90 / 3,11	

При использовании двух основных и двух резервных МВВ-МОС (Вариант 2) достигается вероятность безотказной работы 0,9963. Данные свидетельствуют о том, что надёжность при использовании 3-х и 2-х МВВ вместо 4-х будет снижаться, однако в любом случае она остаётся выше, чем у соответствующей резервированной структуры аппаратуры ЦОС по схеме МВВ-МОС. По оценке среднего времени безотказной работы выигрыш составляет 90 и 3 раза.

Таким образом, предложенные унифицированные решения для построения бортовой вычислительной среды КА с реализацией контура управления по технологии SpaceWire позволяют заметно повысить характеристики надёжности бортовой аппаратуры ЦОС. С участием автора создан первый отечественный SpaceWire-комплект микросхем «Мультиборт» для аэрокосмических применений.

В **заключении** приведены основные результаты диссертационной работы:

1. Проведен анализ вариантов использования целевой нагрузки КА с бортовой обработкой радиосигналов. Показано, что в аппаратуре ЦОС должны обеспечиваться: реальная производительность – не менее 10^{12} операций/с; пропускная способность интерфейсных устройств – до 10...60 Гбит/с; объем памяти – 0,9...3,7 Тбайт.

2. Для решения информационно-измерительных задач (телеметрия, формирование и ввод информации бортовым потребителем) вычислительный комплекс управления должен обеспечивать скорость потока при обмене данными не менее 20 Гбит/с, а в моменты пиковой нагрузки – до 30 Гбит/с.

3. Для широкого класса прикладных задач ЦОС разработаны высокоэффективные алгоритмы вычисления амплитуды комплексного радиосигнала, деления чисел, воспроизведения зависимостей с погрешностью 15%...0,001%. Разработана методика компенсации для уменьшения ошибок расчетов. Показано, что для систем обнаружения радиосигналов для вычисления амплитуды достаточно иметь погрешность 10..12% при потерях в пороговом отношении сигнал-шум не более 0,1...0,2 дБ.

4. Проведен анализ радиационно-стимулированных эффектов в КМОП СБИС, уточнена методика оценки показателей надежности. Предложено проведение дополнительных испытаний «критичных» ЭРИ по стойкости к дозовым и тиристорным эффектам и эффектам случайных сбоев.

5. Разработаны предложения по введению единых сертифицированных требований к элементной базе по стойкости, надежности и обеспечению качества.

6. Разработаны высоконадежные архитектуры и структурные схемы высокопроизводительных систем ЦОС и управления КА. Запатентованы отказоустойчивые системы (патенты РФ № 2387000, 2455681, 2559767), мажоритарное устройство (№ 2395161), коммутатор каналов (№ 2405196).

7. Разработаны алгоритмы распределенного системного диагностирования и взаимного информационного согласования для систем ЦОС, обеспечивающие обнаружение и идентификацию неисправностей, как по месту возникновения, так и по виду (сбой, программный сбой или отказ) проявления.

8. Разработаны принципы построения унифицированных систем обработки информации на основе сетевой технологии, обеспечивающие гибкое масштабирование систем ЦОС и возможность модернизации при увеличении времени безотказной работы в 3...90 раз.

В **приложениях** приведены сводные результаты по исследованию точности алгоритмов, уточнение методики учета радиационных воздействий, описание алгоритмов взаимного информационного согласования, копии документов о внедрении.

Таким образом, в работе решена важная научная проблема, имеющая большое значение для обороноспособности страны и народного хозяйства в области разработки принципов и методов создания высокоэффективных систем ЦОС, реализация которых в значительной степени удовлетворит текущие потребности страны в комплектации группировки КА.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Гришин В.Ю. Функциональное диагностирование в распределенном системном диагностировании многомашинных вычислительных систем / В.Ю.Гришин, А.В.Лобанов, В.Г.Сиренко // Автоматика и телемеханика. – 2002. – № 1. – С.154-160.
2. Гришин В.Ю. Взаимное информационное согласование в многомашинных вычислительных системах с обнаружением и идентификацией кратных враждебных неисправностей / В.Ю.Гришин, А.В.Лобанов, В.Г.Сиренко // Автоматика и телемеханика. – 2003. – №4. – С.123-132.
3. Гришин В.Ю. Взаимное информационное согласование с обнаружением и идентификацией враждебных неисправностей в неполносвязных многомашинных вычислительных системах / В.Ю.Гришин, А.В.Лобанов // Автоматика и телемеханика. – № 6. – 2003. – С.175-186.
4. Гришин В.Ю. Бортовые резервированные компьютеры космических аппаратов зондирования с гибкой архитектурой и требования к номенклатуре радиационных характеристик их элементов / В.Ю. Гришин, Н.Н. Зубов, В.Г. Сиренко // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2003. – Вып.1-2. – С.106-111.
5. Гришин В.Ю. Распределенное системное диагностирование враждебных неисправностей в неполносвязных многомашинных вычислительных системах / В.Ю. Гришин, В.Г.Сиренко, А.В.Лобанов // Автоматика и телемеханика. – 2005. – №2. – С.148-157.
6. Сиренко В.Г. Критерии оценки радиационной стойкости высокопроизводительных бортовых компьютеров малых космических аппаратов с длительными сроками активного существования / В.Г.Сиренко, В.Ю.Гришин, Н.Н.Зубов // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2007. – Вып.3-4. – С.3-9.
7. Сиренко В.Г. Применение нормативной базы для оценки и обеспечения стойкости бортовой аппаратуры космических аппаратов к радиационным воздействиям / В.Г.Сиренко, В.Ю.Гришин, Н.Н.Зубов // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2010. – Вып. 3. – С.5-17.
8. Чекушкин В.В. Совершенствование полиномиальных методов воспроизведения функций в цифровых системах обработки информации / В.В.Чекушкин, И.В.Пантелеев, В.Ю.Гришин, И.Р.Сарибжанов // Радиопромышленность. – 2012. – № 2. – С.63-68.
9. Чекушкин В.В. Совершенствование алгоритмов деления чисел в информационно-измерительных системах / В.В.Чекушкин, В.Ю.Гришин, В.В.Костров // Метрология. 2013. №11. С.3-14.

Публикации в других изданиях

10. Басаев А.С. Космическое приборостроение: главное – правильная концепция / А.С. Басаев, В.Ю. Гришин // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2009. – №8. – С.4-10.
11. Гришин В. Микросхемы приемопередатчиков для основных типов мультиплексных каналов обмена / В. Гришин, П. Еремеев, Н. Зубов, С. Муратов, Н. Шелепин // Компоненты и технологии. – 2002. – №5. – С.68-74.
12. Сиренко В.Г. Требования к параметрам оценки радиационной стойкости элементов резервированных бортовых комплексов космических аппаратов / В.Г. Сиренко, В.Ю. Гришин, Н.Н.Зубов // Радиационная стойкость электронных систем «Стойкость-2001»: Научно-технич. сб. – 2001. – Вып. 4. – С.19-20.
13. Николаев Ю.М. К вопросу обеспечения радиационной стойкости РЭА / Ю.М. Николаев, Г.П. Руднев, Ю.Н. Иванов, В.Ю. Гришин, Л.С. Павленко // Радиационная стойкость электронных систем «Стойкость-2002»: Научно-технич. сб. – 2002. – Вып. 5. – С.21-22.
14. Сиренко В.Г. Обеспечение радиационной надежности высокопроизводительных бортовых резервированных компьютеров с гибкой архитектурой для космических аппаратов с длительными сроками активного существования / В.Г. Сиренко, В.Ю. Гришин, Н.Н.Зубов //

- Радиационная стойкость электронных систем «Стойкость-2003»: Научно-технич. сб. – 2003. – Вып. 6. – С.15-16.
15. *Лобанов А.В.* Взаимное информационное согласование с обнаружением и идентификацией кратных враждебных неисправностей в полностью связанных многомашинных вычислительных системах / *А.В. Лобанов, В.Г. Сиренко, В.Ю. Гришин* // Супервычисления и математическое моделирование: Тезисы докладов международного семинара. 13-15 июня 2001 г. Саратов. – С.20-21.
16. *Лобанов А.В.* Самопроверяемое распределенное системное самодиагностирование многомашинных вычислительных систем / *А.В. Лобанов, В.Г. Сиренко, В.Ю. Гришин* // Автоматизация проектирования дискретных систем: Материалы 4-й Международной конференции (14-16 ноября 2001 г., Минск). Том 3. – Минск, 2001. – С.45-52.
17. *Лобанов А.В.* Повышение точности идентификации кратных враждебных неисправностей во взаимном информационном согласовании / *А.В. Лобанов, В.Г. Сиренко, В.Ю. Гришин* // Информационные технологии в науке, образовании, бизнесе, IT+SE'2002: Труды XXIX международной конференции. Украина, Крым, Ялта-Гурзуф 20-30 мая 2002 г. С.134-137.
18. *Сиренко В.Г.* Проблемы и стратегия проектирования высокопроизводительных комплексов управления малыми космическими аппаратами с длительными сроками активного существования / *В.Г. Сиренко, В.Ю. Гришин, П.М. Еремеев, Н.Н. Зубов* // Перспективы использования новых технологий и научно-технических решений в ракетно-космической технике ГКНПЦ им. М.В. Хруничева: Сб. пленарных докладов III научно-технической конференции. – М.: 2003. – С.51-72.
19. *Сиренко В.Г.* Методические и организационные проблемы обеспечения полноты и достоверности оценки стойкости бортовой аппаратуры космических аппаратов к естественным радиационным воздействиям космического пространства с учетом условий эксплуатации / *В.Г. Сиренко, В.Ю. Гришин, Н.Н. Зубов* // Элементная база космических систем: Сб. материалов НТК (25.09 – 01.10.2008 г., Москва). – М.: МНТОРЭС им. А.С.Попова, 2008. – С.62-72.
20. *Гришин В.Ю.* Унификация бортовых систем управления, обработки и накопления информации на основе технологии SpaceWire / *В.Ю. Гришин, П.М. Еремеев, В.Г. Сиренко* // Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли: Материалы IX научно-технической конференции (Геленджик, 17-21 сентября 2012 г.). – М.: МНТО РЭС им. А.С.Попова, филиал «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс»-НПП «Оптэкс», 2012. – 407-408 с.
21. *Гришин В.Ю.* Оценка надежности структуры вычислительного комплекса для обработки сигналов и формирования изображений на борту КА / *В.Ю. Гришин, А.В. Ракитин, В.В. Костров* // Космическая радиолокация / Материалы II Всероссийской научно-практической конференции (Муром, 25.06-27.06. 2013 г.) – Муром: ИПЦ МИ ВлГУ, 2013. – С.34-39.
22. *Гришин В.Ю.* Облик перспективного вычислительного комплекса космического базирования с гибкой архитектурой для обработки сигналов / *В.Ю. Гришин, А.В. Ракитин, В.В. Костров* // Космическая радиолокация / Материалы II Всероссийской научно-практической конференции (Муром, 25.06-27.06. 2013 г.) – Муром: ИПЦ МИ ВлГУ, 2013. – С.52-57.
23. *Чекушкин В.В.* Совершенствование методов, математических моделей реализации вычислительных процессов в радиолокационных системах / *В.В. Чекушкин, И.В. Пантелеев, В.Ю. Гришин* // Вестник воздушно-космической обороны. – 2014. – №3. – С.25-29.
24. *Гришин В.Ю.* Влияние точности вычисления амплитуды комплексного радиосигнала на системные характеристики радиотехнических систем / *В.Ю. Гришин* // Перспективные технологии в средствах передачи информации: Материалы 11-ой международной научно-технической конференции. – Владимир: ВлГУ, 2015. – С.219-222.

Патенты РФ на изобретения

25. Патент РФ № 2387000. Трехканальная резервированная управляющая система / *Еремеев П.М., Беликов Ю.А., Гришин В.Ю. и др.* / Класс G 06F 11/16. Оpubл. 20.04.2010. Бюл. № 11.
26. Патент РФ № 2395161. Мажоритарное устройство / *Еремеев П.М., Гришин В.Ю. и др.* / Класс H03K 19/23, G 06F 11/18. Оpubл. 20.07.2010. Бюл. № 20.
27. Патент РФ № 2405196. Коммутатор LINK-портов / *Еремеев П.М., Гришин В.Ю., Нестерова К.Ю. и др.* / Класс G 06F 15/173. Оpubл. 27.11.2010. Бюл. № 33.
28. Патент РФ № 2455681. Отказоустойчивая вычислительная система с аппаратно-программной реализацией функций отказоустойчивости и динамической реконфигурации / *Еремеев П.М., Гришин В.Ю., Сиренко В.Г. и др.* / Класс G 06F 11/20. Оpubл. 10.07.2012. Бюл. № 19.
29. Патент РФ № 2559767. Способ обеспечения сбое- и отказоустойчивости вычислительной системы, основанный на репликации задач, возможности самореконфигурации и самоуправлении деградацией / *Тихонов С.Н., Гришин В.Ю., Еремеев П.М. и др.* / Класс G 06F 11/20. Оpubл. 10.08.2015. Бюл. № 22.

Подписано в печать 07.04.2016 г
Формат 60x84 1/16. Печ. л1,0. Тираж 100 экз.

Типография
Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых

600000, Владимир, ул. Горького, 87.
