

**Сорокин Алексей Павлович**

**МЕТОДЫ РАЗРАБОТКИ МОДУЛЕЙ АППАРАТНЫХ  
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ПЛАТФОРМ ДЛЯ ОБРАБОТКИ  
СЛОЖНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

Специальность 05.13.05 – элементы и устройства  
вычислительной техники и систем управления

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2018 г.

Работа выполнена в Ордена Трудового Красного Знамени  
АО «Научно-исследовательский институт вычислительных комплексов  
имени М.А. Карцева», г. Москва

**Научный руководитель:** **Сорокин Сергей Александрович**, доктор технических наук, Генеральный Конструктор АО «НИИ вычислительных комплексов им. М.А. Карцева», г. Москва

**Официальные оппоненты:** **Ворошили Евгений Павлович**, кандидат технических наук, начальник сектора 017 научно-тематического отдела АО «Всероссийский научно-исследовательский институт радиотехники»

**Талалаев Александр Борисович**, доктор технических наук, профессор, руководитель КБ АО «РТИ»

**Ведущая организация:** АО «Научно-технический центр промышленных технологий и аэронавигационных систем», г. Москва

Защита диссертации состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ г. в \_\_-\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 217.047.01 во ФГУП «Научно-исследовательский и экспериментальный Институт автомобильной электроники и электрооборудования» по адресу: 105187, Москва, ул. Кирпичная, д. 39-41.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГУП «Научно-исследовательский и экспериментальный Институт автомобильной электроники и электрооборудования».

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 2018 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д 217.047.01,  
доктор технических наук,  
старший научный сотрудник

Варламов О.О.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Использование цифровых изображений и видеoinформации постоянно возрастает, при этом неуклонно растет качество получаемого изображения, а как следствие и объем передаваемой, обрабатываемой и хранимой информации. Визуальное представление, получаемое в виде цифрового изображения, несет в себе много данных об объектах, а, следовательно, является источником важной информации для:

1. Систем машинного зрения.
2. Систем управления и принятия решений.
3. Автономных роботизированных систем и промышленных станков.
4. Систем видеонаблюдения.

Элементы технологий машинного зрения представляют собой взаимосвязанную технологическую последовательность, включающую следующие звенья: получение изображения от видеокамеры; обработку (оцифровку) изображения; логический анализ цифрового изображения и выделение нужной информации; перемещение камеры в пространстве. Видеокамера и устройство обработки изображения являются главными составляющими системы машинного зрения, их объединяет термин «техническое зрение». Для подобных систем характерно наличие нескольких потоков структурно-разнородных данных, в первую очередь от камер высокого разрешения. Данные могут поступать по различным интерфейсам и быть представлены в различных форматах, в том числе и нестандартных. Таким образом, современные прикладные задачи связаны с необходимостью обработки высокоинтенсивных потоков структурно-разнородных данных: это и видеопотоки от видеокамер высокого разрешения, сигнальная информация, потоки данных от многочисленных датчиков, обработка цифровых изображений, работа с базами данных и т.д. Производительность системы должна обеспечивать в реальном масштабе времени обработку всех входных данных и обеспечивать вывод результата. Постоянно растущее качество и развитие технических средств видеорегистрации, передачи и хранения данных, а также развитие методов обработки изображений требует все большей вычислительной мощности, что накладывает повышенные требования на производительность, функциональные характеристики и надежность системы и ее элементов.

В качестве прикладной проблемы выступает задача обработки сложноструктурированных цифровых изображений. Под сложноструктурированными понимаются изображения, имеющие сложную нелинейную структуру, большое число составных элементов. Поскольку на таких изображениях большинство объектов является слабоконтрастными, и может иметь большую вариабельность геометрических и оптических характеристик, то требуется применения специальных методов обработки. К сложноструктурированным можно отнести снимки изображения земной поверхности высокого разрешения, получаемые с некоторой периодичностью, например со спутников и летательных аппаратов. С повышением качества регистрируемых изображений повышаются требования к производительности вычислительных модулей системы и ресурсам систем ввода-вывода. При

обработке такой информации возникает ряд сложных научных, технических и технологических проблем.

Следует отметить, что на сегодняшний день на отечественном рынке не существует каких-либо конкурентных решений способных выступать в виде общей интегральной платформы построения защищенных гетерогенных вычислительных систем и их компонентов для решения задач высокопроизводительных вычислений обработки видеоизображений, особенно с возможностью эксплуатации в жестких условиях окружающей среды. Таким образом, есть необходимость проанализировать и дополнить существующие методики разработки и модели применения встраиваемых модулей на базе наиболее востребованных микроархитектур (x86, ПЛИС, графические процессоры, Эльбрус, Байкал и др.) для таких систем.

Надо сказать, что в литературе достаточно широко освещены методики разработки, а скорее конфигурации типовых расширяемых систем. В случае рассмотрения защищенных систем для жестких условий эксплуатации (имеющих защитную оболочку – корпус, со степенью защиты IP65, IP67 и отвечающих ряду требований по стойкости к внешним воздействиям), стандартных конфигурируемых систем практически не существует. Методики проектирования модулей для таких систем описаны достаточно поверхностно лишь в спецификациях международных консорциумов и имеют пробелы по ряду ключевых требований. Наличие неопределенности в обязательных требованиях, важных для достижения максимальной производительности, технологичности и совместимости создает существенные проблемы для развития современной вычислительной техники. При этом дальнейшее развитие ряда архитектур не наблюдается, что грозит снятием с производства и отсутствием возможности модернизации уже разработанных и внедренных решений.

Поэтому развитие методик разработки вычислительных и интерфейсных модулей ввода-вывода для применения в составе защищенных гетерогенных вычислительных платформ обработки изображений и отвечающих предъявляемым требованиям со стороны потребителей, является актуальной и востребованной задачей.

**Целью диссертационной работы** является анализ и развитие методик разработки (синтеза) электронных встраиваемых модулей для применения в защищенных аппаратных вычислительных платформах (АВП) для обработки сложноструктурированных изображений большой информативности. Автором решены следующие научные задачи:

1. Проведен анализ современных теоретико-методологических основ разработки встраиваемых электронных модулей АВП.
2. Рассмотрены модели применения модулей в современных гетерогенных защищенных вычислительных системах.
3. Осуществлен анализ применяемых методов обработки цифровых изображений и способов их реализации.
4. Предложена новая улучшенная методика разработки модулей стековой архитектуры и ее дальнейшее развитие.
5. Сформированы научно-технические принципы кондуктивного теплоотвода для модулей защищенных гетерогенных вычислительных платформ стековой архитектуры.

6. Проведены экспериментальные исследования разработанных по предложенной методике модулей, сформулированы, и обоснованы практические рекомендации по разработке защищенных вычислительных систем с кондуктивным теплоотводом, выбору элементной базы и организации производства.

**Объектом исследования** являются методики, модели и алгоритмы исследования и проектирования модулей гетерогенных защищенных вычислительных комплексов и платформ.

**Предметом исследования** являются методики разработки модулей для защищенных гетерогенных АВП обработки изображений, функционирующих в жестких условиях окружающей среды.

**Методы исследования** базируются на имитационном моделировании и экспериментальном исследовании применения модулей в составе гетерогенных вычислительных платформ Грифон и МК300.

**На защиту выносятся:**

1. Результаты анализа, позволившего обосновать применение модулей стековой и магистрально-модульной архитектуры для разработки защищенных гетерогенных АВП, функционирующих в жестких условиях окружающей среды.

2. Методика разработки модулей стековой архитектуры, улучшающая их технические характеристики и расширяющая область применения за счет определения более сбалансированного набора шин расширения, определения основных типов модулей и определения моделей их применения в защищенной системе.

3. Принципы применения предложенной методики с учетом необходимости реализации кондуктивного теплоотвода в защищенных АВП стековой архитектуры.

4. Научно-технические принципы создания ВГВП с применением модулей ПЛИС и графических процессоров для задач обработки изображений.

5. Практические результаты диссертационной работы, реализованные в виде новых технических решений и образцов вычислительной техники стандарта StackPC, выпускаемых серийно в ЗАО «НПФ «ДОЛОМАНТ»: модули центрального процессора (CPC800, CPB909, CPC309, CPC313), модули расширения (NIM354, NIM355, VIM302, KIC301), модули источника питания (PS352, PS353), интерфейсные модули (TMIC309), компьютер модульный МК300 и сетевой коммутатор NM350. Также разработаны опытные образцы модуля центрального процессора Intel Core i7 (OXY5535B), модуль видеопроцессора Nvidia GT730M (SK210), сетевой модуль 4x Gigabit Ethernet (SK506), модуль расширения твердотельного накопителя SATA (SK401) и защищенный вычислительный компьютер БВ05.

**Научную новизну** составляют следующие результаты:

1. Создание методики разработки модулей стековой архитектуры, которая отличается от существующих более сбалансированным набором шин расширения, уточнением типов модулей и их моделей применения, что позволяет:

- повысить производительность вычислительной системы;
- расширить область применения стековых модулей;

– существенно повысить технологичность изделий для производства.

2. Определение принципов комплексирования модулей с учетом ограничений и особенностей их применения в жестких условиях эксплуатации.

3. Определение принципов применения предложенной методики с учетом необходимости реализации кондуктивного теплоотода в защищенных вычислительных системах стековой архитектуры.

4. Разработка новой отечественной гетерогенной вычислительной платформы стековой архитектуры с высокими качественными и эксплуатационными характеристиками.

**Теоретическая значимость** результатов работы заключается в совершенствовании и развитии методик разработки вычислительных модулей с улучшенными техническими характеристиками и более широкими областями применения.

**Практическая ценность** результатов, представленных в работе исследований, определяется их использованием при разработке новых образцов изделий вычислительной техники как отечественного, так и иностранного производства с высокими эксплуатационными и техническими характеристиками, что подтверждено актами внедрения. Предложенные методики позволяют создать номенклатуру модулей стековой архитектуры и малогабаритных защищенных АВП с кондуктивным теплоотводом, повысить их технологичность при снижении затрат на производство и модернизацию.

В составе АВП стековой архитектуры появляется возможность применять передовые технологии, такие как: процессоры Байкал, Intel Atom, Core i7, AMD Ryzen; графические процессоры NVIDIA, Radeon; ПЛИС большой емкости Xilinx Kintex Ultra Scale; высокоскоростные шины расширения PCI-Express Gen2/3, SATA; интерфейсы ввода-вывода USB 2.0/3.0, GbE, 10GbE, Display Port, 3G-SDI. На отдельные результаты оформлена заявка на изобретение № 2017113675 «Система кондуктивного теплоотода от электронных модулей стекового форм-фактора для корпусных изделий электроники».

**Достоверность** выводов и рекомендаций определяется их реализацией в виде серийно выпускаемых модулей и защищенных компьютеров на их основе в ЗАО «НПФ «ДОЛОМАНТ». По предложенной методике на основе модулей StackPC спроектированы, и внедрены в производство следующие изделия: коммутатор сетевой NM350 ИМЕС.465275.001 и защищенный компьютер модульный МК300 ИМЕС.421459.074, разработанный автором лично.

**Область исследования.** Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 05.13.05 «Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления» по следующим областям исследования: пункт 2, 3:

2. Теоретический анализ и экспериментальное исследование функционирования элементов и устройств вычислительной техники и систем управления в нормальных и специальных условиях с целью улучшения технико-экономических и эксплуатационных характеристик.

3. Разработка принципиально новых методов анализа и синтеза элементов и устройств вычислительной техники и систем управления с целью улучшения их технических характеристик.

#### **Апробация результатов работы.**

Результаты исследований, выполненные по теме диссертации, применялись в практических разработках научно-производственных организаций и компаний: ЗАО «НПФ «Доломант», АО «Научно-исследовательский институт вычислительных комплексов имени М.А. Карцева» и ряд других отечественных компаний, являющихся партнерами компании ЗАО «НПФ «Доломант». По предложенной методике оформлен открытый стандарт разработки стековых модулей StackPC, по которому спроектирован ряд изделий, которые внедрены в серийное производство. Показана технологичность и надежность предложенных решений.

Результаты диссертационной работы изложены в ряде печатных публикаций, докладывались автором на международных форумах Embedded World Exhibition and Conference (Германия, Нюрнберг, 2014, 2015), Computex (Тайвань, Тайбэй, 2014, 2016г.), семинарах «День решений Fastwel» (Россия, Москва, 2015, 2016г.) и «День решений Прософт» (Россия, Санкт-Петербург 2014, 2016г.) с демонстрацией рабочих модулей и систем. Стандарт StackPC были внесен автором в технический комитет консорциума PC/104 для обсуждения и принятия их как международного стандарта.

**Публикации.** По теме диссертации опубликованы 16 печатных статей, из них 9 публикаций в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ.

**Объем и структура диссертации.** Диссертация изложена на «171» странице общего текста и состоит из введения, четырех глав, заключения с основными выводами и результатами, списка использованных источников из «65» наименований и четырех приложений.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** дано обоснование актуальности и охарактеризована степень разработанности темы диссертации по методикам разработки отечественных АВП для обработки цифровых изображений большой информативности. Определены цели и задачи работы. Сформулированы положения научной новизны, теоретической и практической значимости и апробации результатов исследований, а также основные положения, выносимые на защиту. Приведены достигнутые практические результаты. Дана характеристика структурных особенностей работы, а также соответствия профиля исследований позициям паспорта научной специальности 05.13.05.

**В первой главе** выполнен анализ состояния области проектирования встраиваемых модулей для применения в составе защищенных вычислительных систем обработки изображений и функционирующих в жестких условиях окружающей среды. Обосновывается необходимость развития и уточнения существующих методик проектирования встраиваемых модулей для повышения технических характеристик вновь разрабатываемых защищенных встраиваемых вычислительных систем. Рассмотрены встраиваемые модули (Embedded Modules) и встраиваемые системы (Embedded Systems) в качестве основных компонентов для разработки новых отечественных защищенных АВП обработки видеоизображений, имеющих важное народно-хозяйственное значение в условиях приоритетного

импортозамещения и обладающих высокими качественными и эксплуатационными характеристиками.

Спецификация применяемого интерфейса видеоввода предъявляет требования к проектируемой системе регистрации и обработки видеоизображений: скорость и качество получаемой и передаваемой информации, ограничения по длине линий передачи данных, тип требуемого для включения в состав системы оборудования, требования к производительности процессорного модуля, графического процессора, цифрового сигнального процессора или ПЛИС, объему памяти (табл. 1).

Таблица 1. Перечень распространенных цифровых интерфейсов видеоввода и их характеристики

Стандарт	Название	Скорость передачи данных, Мбит/с
IEEE 1394	FireWire 100, 200, 400, 800	98.3, 196.6, 393.2, 768.4,
IEEE 1394b	FireWire 1600, 3200	1573, 3145.7
SMPTE 259M-x	SD-SDI	270, 360, 143, 177
SMPTE-305M	SDTI	270, 360
SMPTE 344M	ED-SDI	540
SMPTE 292M	HD-SDI	1485
SMPTE 372M	Dual Link HD-SDI	2970
SMPTE 424M	3G-SDI	2970
SMPTE ST-2081*	6G UHD-SDI	6000
SMPTE ST-2082*	12G UHD-SDI	12000
Base Camera Link	Camera Link	2040
Medium Camera Link	Camera Link	4080
Full Camera Link	Camera Link	5440
Camera Link HS	Camera Link HS	300, 1200, 2100
CXP-1, 2, 3	CoaXPress	1250, 2500, 3125
CXP-5, 6	CoaXPress	5000, 6250
4x CXP-6	CoaXPress	25000
IEEE 802.3-2008	Gigabit Ethernet (IP Camera)	1000

Для решения задач обработки изображений высокого разрешения, возникает ряд сложных научных, технических и технологических проблем. Требуется все большая производительность и богатые ресурсы систем ввода-вывода для работы с большими объемами как цифровой, так и аналоговой информации.

Исходя из актуальности темы, разрабатываемые вычислительные модули должны быть ориентированы на решение задач, связанных с обработкой больших объемов видеоинформации в реальном времени - кодирование/декодирование данных, цифровая обработка цифровых изображений высокого разрешения, потоковая обработка видео- и аудиоинформации, анализ и синтез сложных сигнально-кодowych конструкций и отвечать требованиям по защищенности, стойкости к ВВФ, надежности и безопасности, предъявляемым к встраиваемым системам.

Проведен анализ и классификация существующих архитектур, стандартных форм-факторов и методик проектирования встраиваемых модулей и защищенных вычислительных систем на их основе (табл. 2).



Таблица 2. Основные стандарты встраиваемых процессорных модулей и систем на их основе.

Архитектура системы	Методика (Стандарт или Спецификация)	Габариты модуля, мм	Консорциум или компания-разработчик
Одноплатный компьютер	ATX	305x244	Intel
	microATX	244x244	Intel
	Mini-ITX	170x170	VIA Technologies
	Nano-ITX	120x120	VIA Technologies
	Pico-ITX, Pico-ITXe	100x72	SFF SIG
	Mobile-ITX	75x45	VIA Technologies
	EPIC, EPIC-Express	165x114	PC104
	EBX, EBX-Express	203x146	PC104
Стековая система	3,5"	146x102	PC104
	PC/104, PCI/104-Express	90x96	PC104
COM-модули	StackPC, StackPC-FPE	90x96	Fastwel
	COM-Express (mini, compact, basic, extended)	84x55, 95x95, 125x95, 155x110	PICMG
	ETX, XTX	114x95	
	CoreExpress	65x58	SFF SIG
	StackPC, StackPC-FPE	90x96	Fastwel
	QSeven	70x70, 70x40	SGeT
	SMARC	82x50, 82x80	SGeT
	NUC	101,6x101,6	SGeT
Магистрально-модульная система	MicroPC	124x112	Octagon
	CompactPCI, CompactPCI PlusIO, CompactPCI Serial	160x100, 160x233	PICMG
	ANSI/VITA 1.0 (VMEbus, VME64)	160x 100, 160x233	VITA
	ANSI/VITA 46, 65 (VPX, OpenVPX)	160x 100, 160x233	VITA
	AdvancedMC (AdvancedTCA, MicroTCA)	181,5x73,8, 181,5x148,8	PICMG

Таким образом, можно выделить следующие основные архитектуры гетерогенных вычислительных систем (рис. 1, 2, 3, 4):

- магистрально-модульные системы;
- стековые системы;
- системы на базе COM-модулей;
- одноплатные компьютеры.

По совокупности характеристик, наиболее перспективными являются магистрально-модульная и стековая архитектуры, поскольку предоставляют максимальный уровень стандартизации, унификации, поддержки современных интерфейсов, широкие возможности расширения и позволяют разрабатывать

защищенные высокопроизводительные АВП для решения задач обработки изображений.

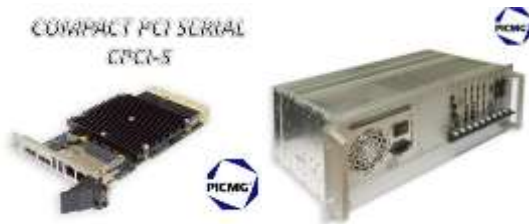


Рисунок 1. CPC512 Serial модуль CPC512 и платформа ВГВП «Грифон-С» отечественной разработки ЗАО «НПФ «Доломант»



Рисунок 2. Стековые модули форм-фактора PC/104-plus (CPC310) и StackPC (CPC309) отечественной разработки ЗАО «НПФ «Доломант»



Рисунок 3. СОМ-модуль CPC310 с платой-носителем КИВ1400 и Панельный ПК BC04 отечественной разработки ЗАО «НПФ «Доломант»



Рисунок 4. Одноплатный компьютер CPB909 и защищенный компьютер MK905 отечественной разработки. ЗАО «НПФ «Доломант»

Можно выделить типы модулей, принципиально отличающиеся между собой по назначению и выполняющие различные функции в вычислительной системе:

- модули центрального процессора или Процессорный модуль;
- интерфейсный модуль;
- модули расширения;
- модули источника питания.

Однако далеко не все спецификации используют такую классификацию, выделяя лишь модуль центрального процессора и модуль расширения. Кроме типа, важно ввести классификацию по:

- форм-фактору;
- функциональным характеристикам;
- эксплуатационным характеристикам (областям применения);
- экономическим критериям;
- надежности.

Результаты классификации, представленные в виде морфологических признаков, могут быть применены для решения задач морфологического анализа и морфологического синтеза при поиске удовлетворяющих решений – спецификаций разрабатываемых модулей. В свою очередь, набор морфологических признаков определяет перечень требуемых методов проектирования, моделирования и верификации.

Важно отметить, что при разработке модулей даже в соответствии с рекомендациями существующих стандартов, много вопросов остается без ответа. В частности, в литературе не представлено готовых методик разработки модулей с кондуктивным теплоотводом – есть лишь общие подходы, конструктивные решения и рекламируемые варианты реализаций, нередко запатентованные, но существенно не улучшающие производительность системы. Спецификации не дают ответа на ограничения по мощности и предельной рабочей температуре для высокопроизводительных вычислительных модулей, применяемых в составе защищенных кондуктивных АВП для жестких условий эксплуатации. В спецификациях зачастую не приводятся оценки максимальной потребляемой мощности на модуль в условиях эксплуатации при повышенной температуре окружающей среды, хотя это ограничение является ключевым для определения производительности встраиваемого модуля и защищенной системы в целом.

Следует подчеркнуть, что спецификации, описывающие стекковые и одноплатные модули не претерпевали значительных обновлений с 2013 года, что ограничивает их применение при разработке модулей на современной элементной базе и требуется улучшение существующих методик.

**Во второй главе** проводится анализ методов обработки цифровых изображений, методик разработки встраиваемых модулей, применения параллельно-конвейерной обработки данных. Формируются предложения по улучшению методик разработки модулей стекковой архитектуры, и определяются модели их применения.

Элементы технологий машинного зрения представляют собой взаимосвязанную технологическую последовательность, включающую следующие звенья: получение изображения от видеокамеры; обработку (оцифровку) изображения; логический анализ цифрового изображения и выделение нужной информации; перемещение камеры в пространстве. Основными компонентами системы машинного зрения, является видеокамера и устройство-обработчик изображения, объединяемые термином «техническое

зрение». Для подобных систем характерно наличие нескольких потоков структурно-разнородных данных, например видеопоток или одиночные снимки с камер высокого разрешения. Данные могут поступать по различным цифровым и аналоговым интерфейсам и быть представлены в различных форматах, в том числе и нестандартных. Производительность системы должна обеспечивать в реальном масштабе времени обработку всех входных данных, а также вывод результата, что накладывает требования на производительность, функциональные характеристики (архитектуру) и надежность системы.

При обработке изображений применяют наиболее подходящие методы для получения результата, наиболее приемлемого для конкретной решаемой задачи. То есть методы в значительной степени являются проблемно-ориентированными.

Цифровое изображение представляется в виде двумерной функции  $f(x,y)$ , где  $x$  и  $y$  – координаты в пространстве и значение функции в каждой точке – интенсивность (яркость) изображения (рис. 5). Представление координат в виде конечного множества называется дискретизацией, а представление яркости  $f$  конечным множеством значений – квантованием. Цифровой обработке подвергается кадр или последовательность кадров. Каждый кадр представляется в виде матрицы элемент изображения - пикселей (pixel – picture element)

$$\Phi = \{f_{ik}\}, \quad i = 1, \dots, N, \quad k = 1, \dots, M$$

и состоит из конечного набора  $M$  и  $N$  элементов изображения. Каждый пиксель  $s$  индексом  $i, k$  и имеет значение

$$f_{ik} = f(i, k)$$

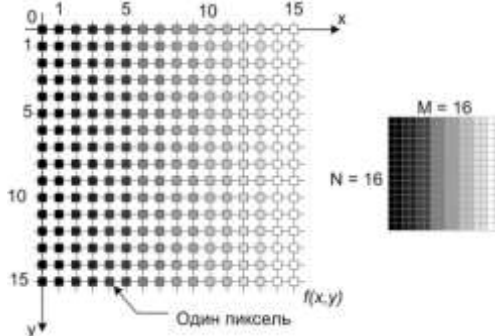


Рисунок 5. Исходное монохромное 8-битное цифровое изображение, представленное в виде матрицы значений яркости элементов изображения

Физически сигнал, возникающий в точке пространства, является функцией многих переменных, таких как длина волны  $\lambda$ , интенсивность  $I$  и время  $t$ . При разработке методов, обычно имеют дело со статическим изображением, часто монохромным, и в качестве значений рассматривают только яркость или оттенок серого, а не цвет и интенсивность.

Основными стадиями цифровой обработки изображений является: регистрация; улучшение; восстановление; обработка; вейвлеты и

кратномасштабная обработка; сжатие; морфологическая обработка; сегментация; представление и описание; распознавание объектов и движения.

Множество подходов к улучшению изображений распадается на две категории: пространственные методы и частотные. Пространственные методы работают с пространственной областью плоскости изображения и сводятся к преобразованию значений одного пикселя в зависимости только от его собственного значения или с учетом значений соседних пикселей. Частотные методы обработки изображения в частотной области основываются на модификации сигнала, формируемого путем применения ко всему изображению преобразований Фурье. Существуют также комбинации этих двух методов. Исходное изображение принято обозначать функцией яркости

$$f(x, y),$$

а преобразованное – как

$$g(x, y) = T[f(x, y)],$$

где  $T$  – оператор над  $f$ .

Получаемые с помощью различного оборудования изображения объектов и местности часто зашумлены, и в первую очередь к ним применяются методы фильтрации или улучшения изображения, что позволяет убрать дрожание, шумы различной природы или выделять объекты и их контуры. Линейные методы пространственной фильтрации обычно основаны на сканировании изображения маской с весовыми коэффициентами (маска свертки или ядро свертки). Для достижения требуемого результата задается размер маски и значения весовых коэффициентов оператора. Далее каждый пиксель преобразованного изображения задается суммой перемножения значений соответствующего пикселя и его окружения. К наиболее известным методам пространственной фильтрации в алгоритмах выделения границ относятся методы Собела, Превитта и Робертса.

Отдельный интерес представляют методы частотной фильтрации. Поскольку изображение является дискретным сигналом, часто получаемым с помощью регистрации электромагнитного излучения в определенном диапазоне волн, то для его обработки можно использовать фильтры, основанные на частотном разделении в дискретной области.

Метод оптимальной фильтрации изображений на основе частотных представлений является оптимальным в том смысле, что спектр получаемого в результате фильтрации изображения имеет наименьшее среднеквадратическое отклонение от спектра фильтруемого изображения в заданном двумерном частотном интервале, а вне этого интервала имеет наименьшее отклонение от нуля. Суть метода сводится к преобразованию исходного изображения, представленного в виде матрицы значений яркости

$$\Phi = \{f_{ik}\}, \quad i = 1, \dots, N, \quad k = 1, \dots, M$$

матрицами свертки

$$A = \{a_n\}, \quad i, n = 1, 2, \dots, N, \quad B = \{b_{km}\}, \quad k, m = 1, 2, \dots, M$$

Таким образом, матрица  $A$  имеет размерность  $N \times N$ , а матрица  $B$  – размерность  $M \times M$ . Каждая матрица отвечает за выделение частотной составляющей по осям  $x$  или  $y$ .

$$g(i, k) = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M f_{ik} \cdot a_{in} \cdot b_{km}$$

или

$$g = A^T \cdot \Phi \cdot B$$

Коэффициенты матриц свертки имеют вид

$$a_{in} = \begin{cases} \frac{\sin(u_2(i-n)) - \sin(u_1(i-n))}{\pi(i-n)}, & i \neq n, \\ \frac{u_2 - u_1}{\pi}, & i = n, \end{cases}$$

$$b_{km} = \begin{cases} \frac{\sin(v_2(k-m)) - \sin(v_1(k-m))}{\pi(k-m)}, & k \neq m, \\ \frac{v_2 - v_1}{\pi}, & k = m. \end{cases}$$

В описании метода используется понятие «пространственной частоты», определяемое как количество колебаний яркости изображения на единице длины. При выполнении вычислений принято, что размеры изображения совпадают с единицей длины. Таким образом, задавая верхнюю и нижнюю границу «пространственной частоты» по осям  $x$  и  $y$  –

$$(u_1, u_2) \text{ и } (v_1, v_2)$$

от 0 до  $\pi$ , задаются полосы фильтрации «пространственных частот», применяемых при фильтрации изображения. Пример результата фильтрации зашумленного исходного изображения приведен на рис. 6.

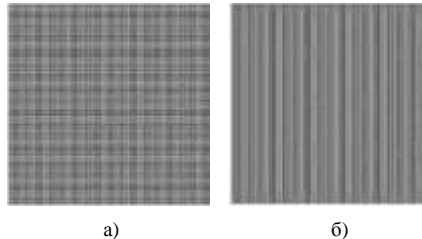


Рисунок 6. а) исходное зашумленное изображение б) изображение после преобразования методом оптимальной фильтрации

Описанные выше методы можно довольно компактно описать с использованием операций суммирования, умножения и накопления.

Повысить производительность возможно за счет применения самой передовой элементной базы, а также за счет конвейеризации, мультипроцессирования, организации памяти, буферизации информации, опережающей обработки, реструктурирования программ и векторизации операндов. Механизм параллельно-конвейерной обработки является признанным классическим методом повышения быстродействия систем обработки данных, и если структура данных и алгоритм позволяют

распараллеливать задачу, то это почти всегда повышает эффективность такой обработки.

Поскольку принцип построения защищенных систем на базе встраиваемых модулей в общем случае одинаков (рис. 7), то первым важным шагом в выборе правильной методики разработки модулей является выбор форм-фактора (архитектуры) и типа модуля.

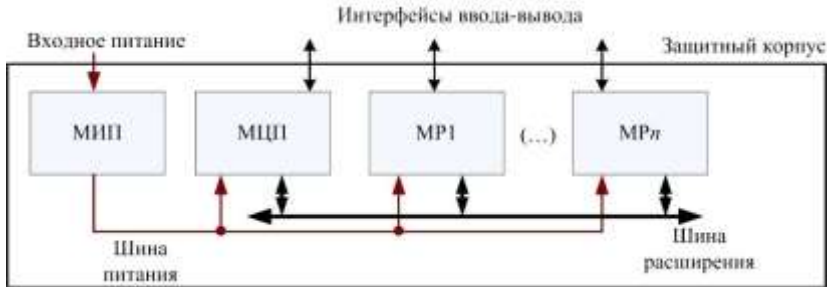


Рисунок 7. Принцип построения защищенной вычислительной системы

На основании анализа доступности, моделей применения и производительности модулей различных стандартов показано, что предъявляемым и требованиям производительности и условий эксплуатации удовлетворяет магистрально-модульная и стековая архитектуры.

Сегодня можно выделить следующие основные типы модулей:

- Процессорные модули (CPU module)
- Модули видеопроцессора (GPU module)
- Модули ЦСП (DSP module)
- Модули ПЛИС (FPGA module)
- Модули ввода-вывода (I/O module)
- Модули источника питания (Power module)

Все они необходимы для разработки АВП, наиболее эффективных с точки зрения стоимости, производительности и потребляемой мощности. Такие АВП являются гетерогенными, с точки зрения вычислительной среды.

Высокая производительность системы является одним из ключевых требований для решения задач обработки изображений. В вычислительном процессоре каждая операция над данными занимает несколько тактов (выбор инструкции, декодирование, выполнение, выбор данных для следующей инструкции, запись результата в память или регистр). В ПЛИС количество выполняемых математических операций за один такт ограничивается лишь быстродействием и логической емкостью ПЛИС (рис. 8).

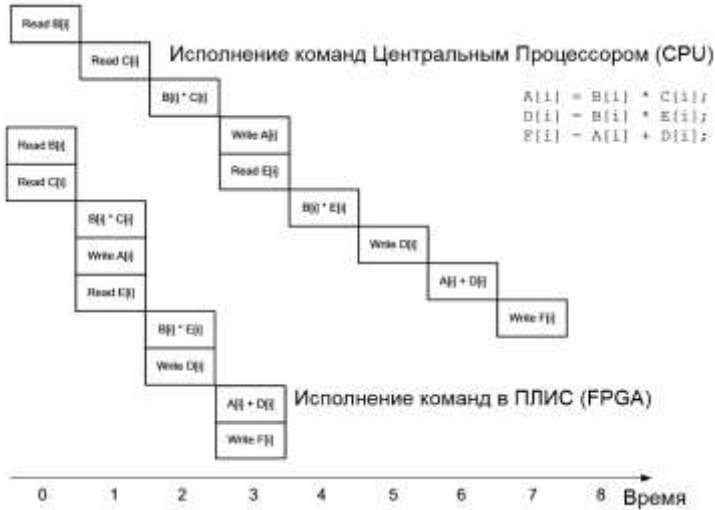


Рисунок 8. Сравнение последовательности выполнения команд центральным процессором и на ПЛИС

Тактовая частота современных процессоров составляет порядка 2 ГГц, а тактовая частота современных ПЛИС порядка 500 МГц. Но за счет конвейеризации и распараллеливания, тактовая частота входных данных на ПЛИС может быть равна ее тактовой частоте, а разрядность входных данных, количество параллельных конвейеров и длина конвейера (сложность алгоритма) ограничена лишь ресурсами ПЛИС.

На основании анализа приведенных выше материалов, для решения задач обработки изображений большой информативности (объема), вместо существующих решений на базе 4-х графических процессоров (рис. 9,а) предложена разработка модулей на базе ПЛИС большой емкости (рис. 9,б).



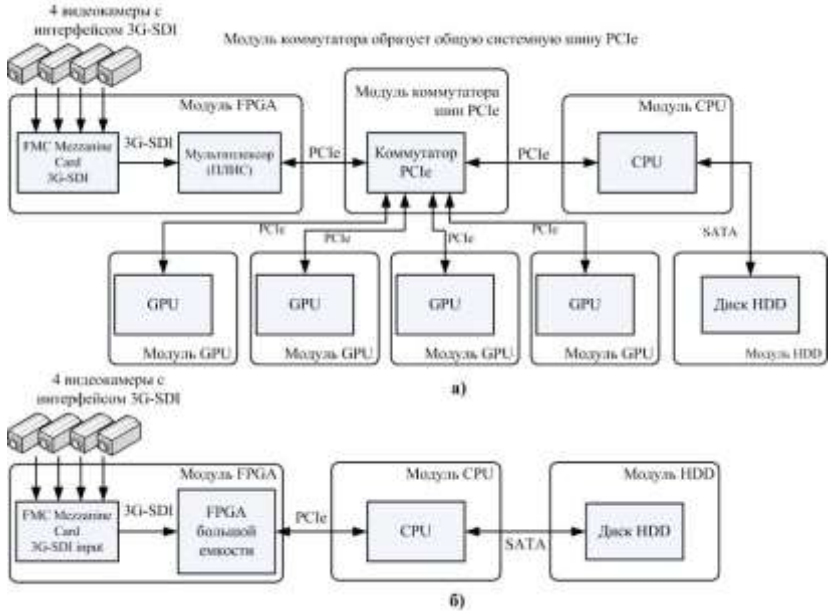


Рисунок 9. Гетерогенные конвейерные системы параллельной обработки 4-х входных каналов видео высокого разрешения а) на базе 4-х GPU и модуля коммутатора б) на базе ПЛИС большой емкости

Основное преимущество предлагаемой организации параллельно-конвейерной обработки в гетерогенной среде с применением модулей ПЛИС большой емкости заключается в:

1. Минимизации количества модулей в системе;
2. Снижение конвейерной задержки за счет исключения необходимости пересылки больших объемов данных из памяти одного модуля в память другого;

Параллельно-конвейерная организация обработки в ПЛИС позволяет разгрузить основные транспортные интерконнекты между узлами системы (системные шины PCI-express), а также позволяет существенно снизить вычислительную и коммутационную нагрузку (пересылку данных) на центральный процессор и сэкономить его ресурсы для выполнения других задач.

Для реализации предложенных алгоритмов на модулях стековой архитектуры предложено улучшение существующих методик. Проведена разработка спецификации StackPC и унифицированной методики кондуктивного теплоотвода в стековых защищенных АВП. Разработанная спецификация размещена на web-сайте [stackpc.org](http://stackpc.org) в открытом доступе и предложена техническому комитету консорциума PC/104 для принятия в качестве международного стандарта.

Основу методики StackPC составляет набор и тип шин расширения, классификация типов модулей, а так же определены модели их применения (рис. 10).

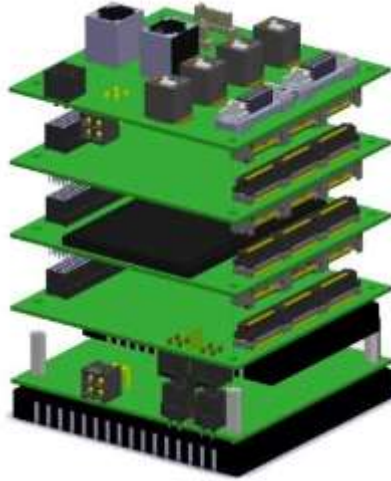


Рисунок 10. Модель типового стека модулей StackPC

При разработке модулей StackPC доступны следующие шины расширения:

- 4x PCIe x1 Gen2 (до 4x 500 Мбайт/с);
- 1x PCIe x4 Gen2 (до 2.0 Гбайт/с);
- 6x USB 2.0 (до 480 Мбит/с);
- 2x SATA II (до 3 Гбит/с);
- 2x Gigabit Ethernet (2x 1.0 Гбит/с);
- LPC, SMB;
- 2x FBUS (CAN или RS-232);
- SPI (3 линии выбора устройств на шине).

Данная функциональность является более сбалансированной, чем в существующих стандартах PC/104-express и дает возможность расширения области применения стековых модулей как COM-модулей с возможностью расширения функциональности (рис. 11).

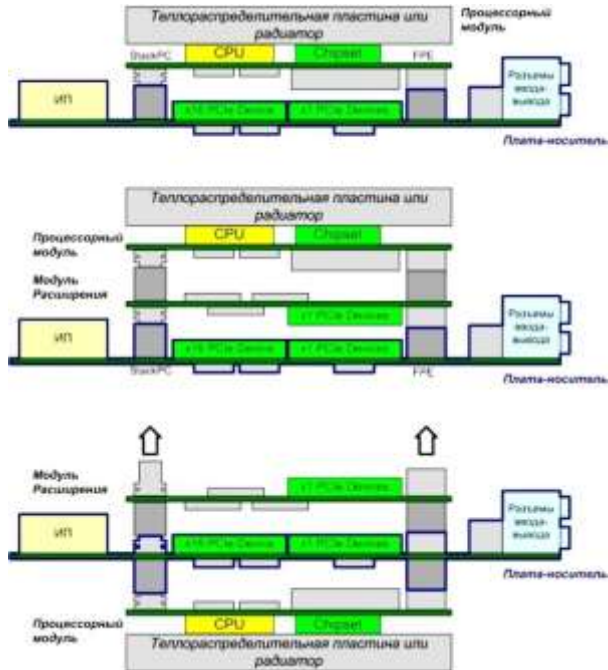


Рисунок 11. Модели применения модулей StackPC в качестве COM-модулей

Предложено дальнейшее развитие стековых систем путем стандартизации нового второго, дополнительного разъема расширения FPE (Fat Pipe Extension – расширение шинами с высокой пропускной способностью, рис. 12).



Рисунок 12. Модуль с разъемами StackPC и FPE, выполненный согласно спецификации StackPC

Вариант StackPC-FPE позволяет для решения задач обработки видео высокого разрешения использовать следующие шины расширения:

- PCIe x16, 2x8 или 2x4 Gen2/3 (до 15.8 Гбайт/с),
- 2x 10 GbE (2x 10 Гбит/с);
- Display Port;
- USB3.0 (до 5 Гбит/с);
- SATA II/III (до 6 Гбит/с);
- Видеоинтерфейсы SDI или CameraLink.

Для повышения производительности модулей в жестких условиях эксплуатации (повышенная температура окружающей среды и повышенные требования по стойкости к механическим нагрузкам), предложена система кондуктивного теплоотвода стековых модулей (рис. 13).



Рисунок 13. Система кондуктивного теплоотвода для стековых модулей

Проведены расчеты конструкции универсального корпуса, выполнено моделирование и оценка максимальной мощности модулей, которая должна составить не менее 20 Вт на модуль. Такие показатели мощности позволят применять современную элементную базу в стековых защищенных системах.

Определены следующие основные требования к модулям и кондуктивной системе теплоотвода:

- возможность установки в стек модулей с кондуктивной системой теплоотвода и без, в случае, если она не требуется для конкретного модуля;
- совместимость в стеке модулей стандартов PC/104 или StackPC различных производителей;
- возможность дооснащения типовой кондуктивной системой теплоотвода любых стековых модулей, соответствующих стандартам PC/104 или StackPC;
- возможность производства универсального кондуктивного корпуса на требуемое количество стековых модулей (сохранение регулярного шага стека);
- возможность вывода интерфейсов на верхнюю или боковые стенки корпуса, для сохранения конструктивной совместимости с существующими решениями;
- возможность гибкой модификации стека модулей за счет простоты сборки модулей и свободного доступа к интерфейсным разъемам;

Данная методика, успешно внедрена в компании ЗАО «НПФ «Доломант». По ней спроектирована платформа МК300, на базе которой разработан ряд изделий (МК300-01, МК300-01\T001, МК300-01\T002, БВ05).

**В третьей главе** приводится обоснование выбора отечественной элементной базы. Осуществляется построение моделей и их экспериментальное исследование: оценка производительности и максимальной потребляемой мощности. Проведена оценка производительности модулей ПЛИС по сравнению с модулями графических процессоров.

Показано, что модули разных производителей имеют схожие характеристики, поскольку разрабатываются на базе общедоступной элементной базы. Основным отличием является актуальность (новизна) применяемой элементной базы (серия и год выпуска центрального процессора Intel, AMD или графического процессора Nvidia (Intel) или Radeon (AMD), моделей ПЛИС (Xilinx, Intel (Altera), Actel, Microsemi или Lattice)), а так же соответствие тем или иным стандартам.

С экономической точки зрения, модули отечественного производителя представляют интерес как более доступная альтернатива комплектующим иностранного производства в целях импортозамещения ключевых компонентов отечественных вычислительных систем. ЗАО «НПФ «Доломант» предоставляет достаточно широкую линейку процессорных и модулей расширения, в числе которых есть процессорные модули на базе отечественных процессоров Байкал и Эльбрус. Перечень выбранных модулей приведен в Приложении А.

Для разрабатываемых гетерогенных АВП были выбраны следующие архитектуры:

1. StackPC – Стековая АВП «МК300».
2. CPCI Serial - Магистрально-модульная ВГВП «Грифон»:
  - a. конвективное исполнение – ВГВП «Грифон-С»;
  - b. кондуктивное исполнение – ВГВП «Грифон-К».

Обе платформы являются реконфигурируемыми и предполагают штатными средствами обеспечение подключения интерфейсов ввода видеoinформации или передачи цифровых изображений на обработку. Для решения задач обработки изображений в составе изделий предусмотрены модули с графическими процессорами GPU, модули ПЛИС и модули расширения с коммуникационными интерфейсами для подключения видеокамер высокого разрешения.

Приведено исследование разработанных платформ «МК300» и ВГВП «Грифон». Отдельное внимание было уделено измерению производительности при различных условиях окружающей среды.

По результатам экспериментального исследования (рис. 14) оценка максимальной рассеиваемой мощности  $P_{max}$  на модуль и производительности разработанной платформы «МК300» составляет:

- $P_{max70} = 22,73$  Вт, при температуре окружающей среды  $+70^{\circ}\text{C}$ ;
- $P_{max55} = 45,45$  Вт, при температуре окружающей среды  $+55^{\circ}\text{C}$ ;

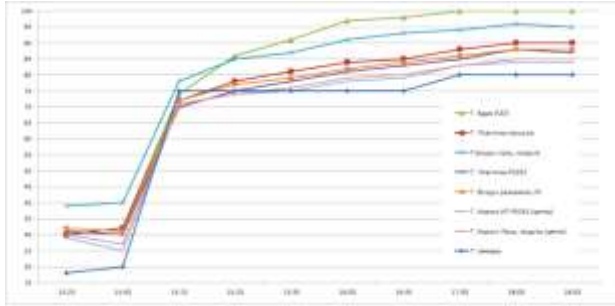


Рисунок 14. График изменения температуры узлов МК300 со временем в условиях эксплуатации +75, +80 °С, выдержка 1,5 часа

Данная оценка, полученная на основе экспериментальных данных, согласуется с теоретическими расчетами. Предложенный метод позволяет разрабатывать стекковые модули мощностью до 20Вт. Потенциальная производительность типовой вычислительной системы может составить до 1,1 ТФлопс и 12 ГФлопс/Вт.

Для ВГВП «Грифон-К», проведены исследования корпуса при нормальных условиях окружающей среды (рис. 15, 16) и проведены климатические испытания различных конфигураций с целью установить максимальную мощность платформы, поскольку существует возможность устанавливать любые комбинации высокопроизводительных модулей с различной потребляемой мощностью и что может привести к перегреву компонентов системы. Для каждой конфигурации регистрировалась температура самых тепловыделяющих (ключевых) компонентов каждого модуля (CPU, GPU, микросхема коммутатора), а так же контрольных точек каркаса платформы.

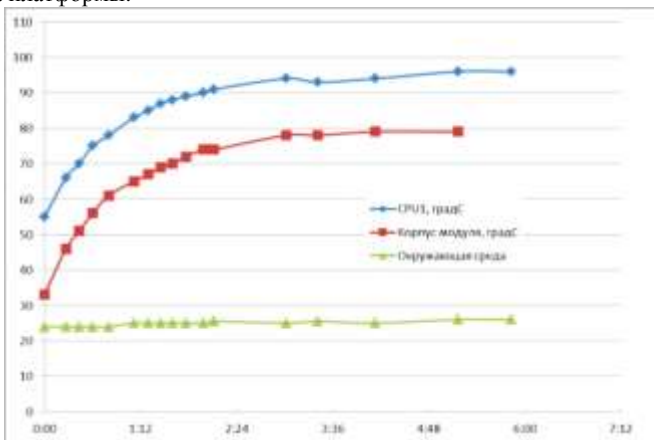


Рисунок 15. График изменения температуры узлов платформы «Грифон-К» при НУ



Рисунок 16. Платформа «Грифон-К», определительные испытания предельной потребляемой мощности

По результатам экспериментального исследования для ВГВП «Грифон-К» получены следующие значения максимальной мощности платформы:

- $P_{max55} = 184$  Вт, при температуре окружающей среды  $+55^{\circ}\text{C}$ , кондуктивное охлаждение;

- $P_{max55} = 348$  Вт, при температуре окружающей среды  $+55^{\circ}\text{C}$ , жидкостное охлаждение;

Производительность типовой вычислительной системы может составить до 3,8 ТФлопс и 30 ГФлопс/Вт для исполнения конвективного и кондуктивного исполнения. Для жидкостного охлаждения корпуса возможно достижение показателя максимальной производительности вычислительной системы до 9,4 ТФлопс и 30,5 ГФлопс/Вт.

На рис. 17 рассмотрен вариант ВГВП «Грифон» с применением модуля ПЛИС FPU502 и выделено четыре участка конвейера –  $K1$ ,  $K2$ ,  $K3$ ,  $K4$ .

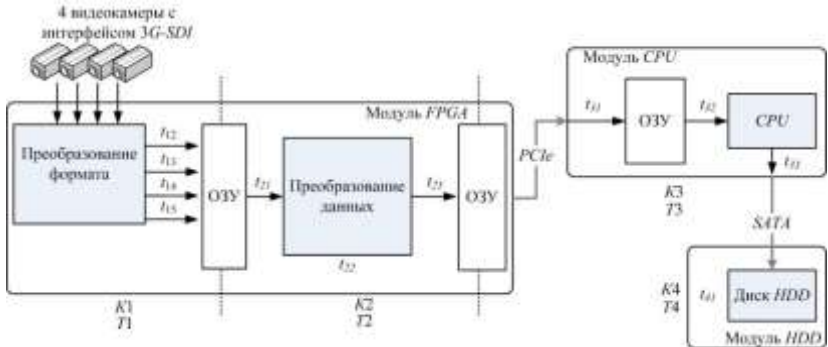


Рисунок 17. Разделение участков конвейера в ВГВП «Грифон» с применением модуля ПЛИС FPU502 для обработки 4-х потоков видео высокого разрешения.

Время обработки данных на каждом из участков обозначено как  $T1$ ,  $T2$ ,  $T3$ ,  $T4$ . При этом должно выполняться неравенство:

$$T1 \geq T2 \geq T3 \geq T4$$

Входной кадр с разрешением 1920x1080 поступает через мезонин ТВ-FMCH-3GSDI2A на вход блока приема данных ПЛИС, где преобразуется “на лету” из формата YUV422 в более легковесный YUV420 и размещаются в ОЗУ (DDR-памяти). Данные поступают со скоростью 30 кадров в секунду.

Таким образом, входной поток данных  $P1$  для  $N=4$  входных каналов видео со скоростью передачи  $f=30$  кадров/с и объемом каждого кадра  $U=3$  Мбайт составит:

$$P1=N*f*U = 360 \text{ Мбайт/с}$$

Так как данные по каждому из входных каналов поступают параллельно, то

$$T1 = t_{12} = 1/f = 1/30 = 33,33 \text{ мс/кадр}$$

Проведена оценка производительности модулей ПЛИС для решения задач обработки изображений. Для оценки производительности проведен ряд сравнительных тестов, результаты которых представлены в табл. 3.

Таблица 3. Сравнение производительности модулей GPU и FPGA

Тестируемый модуль	Запись в память, мсек	Время преобразования, мсек	Чтение из памяти, мсек
Тест: Поворот изображения (512 Кбайт)			
FPU502 (FPGA)	0,54	1,75	0,52
VIM556 (GPU)	0,41	0,25	0,42
Тест: Свертка (1 Мбайт)			
FPU502 (FPGA)	2,1	0,8	2,1
VIM556 (GPU)	3	7,8	2,8

Первый тест – поворот на произвольный угол изображения 512x512 пикселей, YUYV, 512Кбайт. Изображение вращается 360 раз на 1 градус, результат каждого поворота копируется на CPU и сохраняется в файл.

Второй тест - представляет из себя выполнение операции свертки с ядром размером 11x11 над изображением 1024x1024 в формате Grayscale 16 bit. Данный тест наиболее ярко показывает преимущества вычислителя на базе ПЛИС над графическим вычислителем. На FPU501 данный тест выполняется в 7 раз быстрее, чем на VIM556. Данные тесты позволяют определить производительность отдельных участков конвейера в различных конфигурациях. Выявлено, что чем больше ядро свертки, тем больше времени занимает операция свертки на модуле графического процессора

Согласно измеренным показателям (табл. 3) можно определить скорость записи в ОЗУ и рассчитать, что для свертки изображения объемом 3 Мбайт на модуле ПЛИС понадобится 7,3 мс, а последовательная обработка 4-х кадров займет порядка 29,2 мс, что экономит ресурсы ПЛИС. Выполнение аналогичной операции на модуле графического процессора VIM556 займет порядка 16,8 мс на кадр.

Таким образом, на модуле ПЛИС можно обрабатывать до 4-х каналов входного изображения с частотой  $f=30$  кадров/с, а в случае применения модуля видеопроцессора VIM556 - только 1 канал. Для обработки двух каналов входного видео на модуле VIM556 надо либо снижать частоту  $f$  до 1/25 кадров/с, либо оптимизировать или ухудшать алгоритм фильтрации входного изображения, либо необходимо повышать производительность модуля VIM556, поскольку более половины времени тратится на запись/чтение ОЗУ – 9 мс.



Полученные данные согласуются с теоретическими выводами, что на базе модулей ПЛИС возможно построение эффективных систем при необходимости распараллеливания вычислений и выполнении операций свертки.

**В четвертой главе** описано применение V-модели процесса разработки модулей, а также практическое применение метода морфологического исследования и определение ключевых морфологических классификационных признаков для поиска оптимальной спецификации, разрабатываемого модуля. Данный подход дает возможность на ранней стадии скорректировать требования к разрабатываемому модулю или архитектуре системы.

Результаты исследований, проведенных автором использованы при синтезе спецификаций и разработке модулей для защищенных гетерогенных АВП обработки видеоизображений в АО «НИИ вычислительных комплексов им. М.А. Карцева» и ЗАО «НПФ «ДОЛЮМАНТ». Автором разработаны:

- встраиваемые модули PC/104-plus: CPC306, CPC307, VIM301, VIM301A, KIB386;
- защищенный компьютер МК306, МК307;
- защищенный компьютер КМ03 для контроля условий транспортировки компонентов ракеты железнодорожным транспортом (Роскосмос);
- Мультимедийный компьютер ММК01 для применения в составе автомобиля как бортового компьютера и системы видеорегистрации. Разработан по техническому заданию для ООО «Маруся Моторз»;
- Защищенный компьютер МК1301 для применения в составе системы контроля дорожного движения (ГК «М2М телематика»).

Результаты анализа существующих методик, обобщение практического опыта позволили создать новую улучшенную методику, описание которой приведено во второй главе. Данная методика легла в основу разработанного автором стандарта StackPC.

Для верификации предложенных решений автором разработаны и экспериментально исследованы модули StackPC ТМІС309 и MF03, а также защищенный компьютер МК300-01 стековой архитектуры для транспортного применения с возможностью применения модулей StackPC и PC/104-plus (рис.18). Результаты экспериментальных исследований показали, что разработанные модули и защищенный компьютер МК300-01 соответствуют требованиям, предъявляемым к встраиваемым модулям и защищенным вычислительным системам, что подтверждается соответствующими протоколами испытаний.

Поскольку предлагаемый метод позволяет разработку стековых модулей с потребляемой мощностью до 20 Вт, то представляется целесообразным разработка модулей ПЛИС большой емкости и GPU для стековых защищенных АВП, применение которых, как было показано ранее, существенно повышает производительность вычислительной системы для решения задач обработки сложноструктурированных изображений.

При участии автора по методике StackPC разработаны встраиваемые модули: CPC805, CPC309, CPC314, CPB909, KIC301, NIM354, NIM355, PS353, VM302, PS352, OXY5535B, SK210, SK704, SK506, SK401.

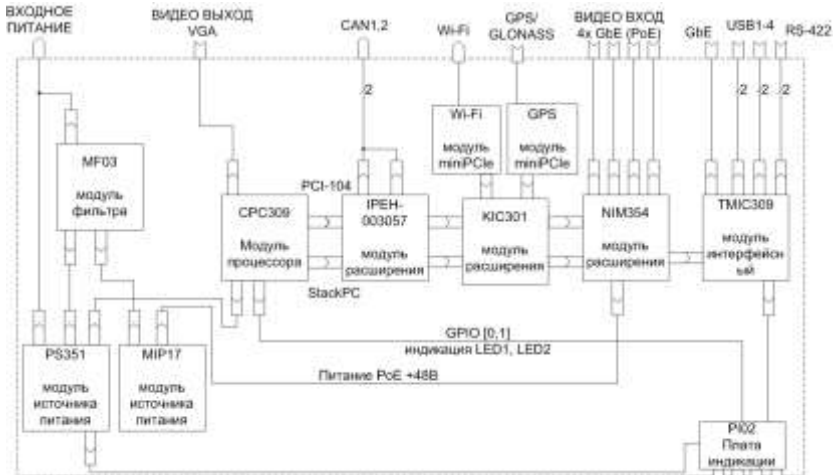


Рисунок 18. Схема соединений стековых модулей в защищенном компьютере МК300-01

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа содержит решение актуальной научной задачи, заключающейся в усовершенствовании методов разработки модулей защищенных АВП стековой архитектуры для обработки сложноструктурированных цифровых изображений.

Получены следующие основные научные результаты:

1. Предложена методика разработки встраиваемых модулей стековой архитектуры, которая отличается от существующих:

- Более рациональным выбором набора шин расширения, что позволяет повысить производительность вычислительной платформы;
- Расширенной классификацией модулей по типам. Показано, что можно выделить четыре основных типа стековых модулей: модуль центрального процессора, интерфейсный модуль, модуль расширения и модуль источника питания;
- Расширенной областью применения модулей стековой архитектуры в качестве COM-модулей;
- Существенным повышением технологичности изделий для производства;

2. Разработаны, и проанализированы модели применения стековых модулей, в том числе и в качестве COM-модулей. По результатам моделирования уточнены методики разработки, выделены ограничения и ключевые требования, предъявляемые к модулям каждого типа с учетом особенностей их применения в стековой системе.

3. Определены критерии выбора методик разработки модулей по предъявляемым техническим требованиям к модулю. Анализ показал, что для среднепроизводительных модулей целесообразно применение методик разработки модулей стековой архитектуры, а для высокопроизводительных – магистрально модульной. Для каждого возможного варианта получена оценка максимальной производительности и потребляемой мощности.

4. Разработанная методика положена в основу стандарта StackPC, что на практике позволило:

- Создать в АО «НИИ вычислительных комплексов им. М.А. Карцева» и ЗАО «НПФ «ДОЛОМАНТ» номенклатуру новых отечественных стековых модулей с улучшенными техническими характеристиками, которые применяются в решении задач, что подтверждено актами внедрения;

- Сформировать единую методику организации защищенной системы, позволяющей одновременно использовать модули с кондуктивным теплоотводом и без;

- Разработать отечественную гетерогенную защищенную АВП МК300 стековой архитектуры, в которой возможно одновременное применение новых модулей, разработанных как по стандарту StackPC, так и разработанных ранее по стандарту PC/104-Express и выпускаемых серийно;

- Предложить дальнейшее развитие модулей и защищенных систем стековой архитектуры с применением высокоскоростных шин расширения в виде методики StackPC-FPE. Для оценки возможности разработки высокопроизводительных стековых модулей при ведущем участии автора были разработаны высокопроизводительные модули с применением современной элементной базы: модуль процессора Intel Core i7 ( OXY5535B) и модуль графического процессора Nvidia GT730M (SK210) производительностью 556,8 Гфлопс.

5. Сравнительный анализ показал эффективность применения модулей ПЛИС для решения задач обработки цифровых изображений большой емкости. В случае многопоточной системы и применения пространственных методов фильтрации, за счет оптимизации используемых на ПЛИС ресурсов и распараллеливания можно добиться 10-кратного роста производительности, по сравнению с алгоритмами, реализуемыми на гетерогенных вычислительных системах с использованием графических процессоров GPU и тем более с использованием ресурсов только центрального процессора CPU.

6. Верификация предложенных решений проведена путем экспериментальных исследований разработанных рабочих моделей стековых и магистрально-модульных защищенных вычислительных систем с кондуктивным теплоотводом. Сделаны оценки максимальной производительности, и показана целесообразность разработки стековых модулей на базе ПЛИС большой емкости и графических процессоров для применения в составе защищенных АВП. Предложены пути дальнейшего повышения производительности вычислительных модулей и систем, эксплуатируемых в жестких условиях окружающей среды.

## **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **В изданиях из перечня ВАК РФ**

1. Сорокин А.П., Чудинов С.М. Научный подход к выбору высокопроизводительной гетерогенной вычислительной платформы для обработки изображений // Радиопромышленность. 2017. № 3. С. 68–73.

2. Чудинов С.М., Сорокин А.П. Применение ПЛИС для организации параллельно-конвейерной обработки данных в гетерогенной вычислительной среде // Вопросы радиоэлектроники. 2017. № 9. С. 51–56.

3. Сорокин С.А., Чудинов С.М., Сорокин А.П., Болгова Е.В. Методы оценки производительности вычислительных комплексов // Научные ведомости БелГУ. 2017. №9(258), выпуск 42. С.89-96.
4. Сорокин А. П. Методы обработки цифрового изображения для реализации в системах параллельно-конвейерной обработки данных в гетерогенной вычислительной среде // Радиопромышленность. 2017. № 4. С. 89–94.
5. Сорокин С.А., Бененсон М.З., Сорокин А.П. Методики оценки производительности гетерогенных вычислительных систем // Российский технологический журнал. 2017 Том 5 № 6. С.11-19.
6. Сорокин А.П. Методы проектирования защищенных кондуктивных аппаратно-вычислительных платформ для задач обработки видеоизображений // Вопросы радиоэлектроники. 2018. №5. С.24-31.
7. Сорокин А.П. Методы проектирования аппаратно-вычислительных платформ стековой архитектуры для применения в жестких условиях эксплуатации // Вопросы радиоэлектроники. 2018. №5. С.32-41.
8. Алексеев Г.Г., Алексеева Е.А., Галаган П.В., Сорокин А.П., Сорокин С.А. // Вопросы радиоэлектроники. 2018. № 5. С.63-69.
9. Сорокин С.А., Сорокин А.П. Методы разработки модулей для гетерогенных аппаратных вычислительных платформ // Вопросы радиоэлектроники. 2018. № 9. С.50-60.

#### **В других изданиях**

10. Сорокин А.П. Графические средства изделий формата PC/104-Plus // Современные технологии автоматизации (СТА) № 1 / 2010г., С.8 – 14.
11. Сорокин А.П. Промышленные компьютеры для встраиваемых систем // Современные технологии автоматизации (СТА) № 1 / 2011г. С.14 – 21.
12. Сорокин А.П. Форм-фактор StackPC – новый подход к разработке встраиваемых модулей и систем. Часть 1. Защищенные компьютеры на базе одноплатных, Stack- и COM-модулей // Современная электроника № 4 / 2013 г., С.36 – 41.
13. Сорокин А.П. Форм-фактор StackPC – новый подход к разработке встраиваемых модулей и систем. Часть 2. Стандарт StackPC и системы на его основе // Современная электроника № 5 / 2013 г., С.32 – 40.
14. Сорокин А.П. Форм-фактор StackPC – новый подход к разработке встраиваемых модулей и систем. Часть 2. Стандарт StackPC и системы на его основе (продолжение) // Современная электроника № 6/ 2013 г., С.30 – 34.
15. Сорокин А.П., Медведев А.В., Косолапов А. StackPC – гениальное просто // CONTROL ENGINEERING РОССИЯ, 2014, №5 (53). С.58-63
16. Галаган П. В., Кузьминский Л.С., Сорокин А.П. Решение задач машинного зрения на базе гетерогенной платформы ГРИФОН // Современные технологии автоматизации (СТА) № 3 / 2017г., С.82-88.