

Современные и перспективные высокопроизводительные вычислительные системы с реконфигурируемой архитектурой*

И.И. Левин¹, А.И. Дордопуло², И.А. Каляев³, Ю.И. Доронченко¹, М.К. Раскладкин¹

ООО «Научно-исследовательский центр супер-ЭВМ и нейрокомпьютеров»¹,
Южный научный центр Российской академии наук²,
Научно-исследовательский институт многопроцессорных вычислительных систем
Южного федерального университета³

В статье рассматриваются архитектура и сравнительные технические характеристики реконфигурируемых вычислительных систем (РВС) на основе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) семейства Xilinx Virtex-7: вычислительных модулей 24V7-750 и «Тайгета», устанавливаемых в вычислительный шкаф, и реконфигурируемого вычислительного блока «Калеано» для настольного использования. Рассматриваются также архитектура и компоновка РВС нового поколения на основе жидкостного охлаждения, приводятся результаты расчетов и макетирования основных технических решений. Рассматриваются технологии решения прикладных задач с помощью комплекса средств разработки прикладного программного обеспечения. РВС нового поколения на основе жидкостного охлаждения позволяют достичь производительности 1 Пфлопс в стандартном вычислительном шкафу высотой 47U при потребляемой мощности 150 кВт, обеспечивая, тем самым, существенное преимущество по таким технико-экономическим параметрам, как реальная и удельная производительность, энергоэффективность, массогабаритные характеристики и другим по сравнению с аналогичными системами.

1. Введение

Одним из перспективных способов достижения высокой реальной производительности вычислительной системы является адаптация ее архитектуры под структуру решаемой задачи и создание вычислительного устройства, одинаково эффективно реализующего как структурные, так и процедурные фрагменты вычислений.

Поэтому отечественные [1] и зарубежные производители вычислительной техники все чаще включают в состав разрабатываемых вычислительных систем программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС) для ускорения работы при реализации вычислительно трудоемких алгоритмов. Создаются как отдельные ускорители с одним-двумя кристаллами ПЛИС, так и целые вычислительные комплексы. Такие фирмы как Nallatech (<http://www.nallatech.com>, дата обращения 12.12.2014) и Pico Computing (<http://picocomputing.com>, дата обращения 12.12.2014) выпускают ряд ускорителей и несущих плат с небольшим числом (до четырех) кристаллов ПЛИС, которые используются в создании серверов и гибридных кластерных систем фирмами HP и IBM.

Компании Convey (<http://www.conveycomputer.com>, дата обращения 12.12.2014) и Maxeler Technologies (<http://www.maxeler.com>, дата обращения 12.12.2014) создают гибридные суперкомпьютеры на основе собственных гетерогенных кластерных узлов, каждый из которых может содержать от одного до четырех кристаллов ПЛИС и несколько универсальных процессоров. Похожее решение используется и компанией SRC (<http://www.srccomp.com>, дата обращения 12.12.2014), которая выпускает узлы, названные MAP processor, для стойки (MAPstation)

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ по Соглашению о предоставлении субсидии №14.578.21.0006 от 05.06.2014, уникальный идентификатор RFMEFI57814X0006, НИР регистрационный №114061040060 и НИР регистрационный №01201460286.

форм-фактором 1U, 2U и 4U. MAPstation 1U содержит один MAP processor. MAPstation 2U содержит до трёх MAP processor. MAPstation 4U может содержать до 10 различных модулей – MAP processor, модуль с универсальным микропроцессором или модуль памяти.

В Научно-исследовательском центре суперЭВМ и нейрокомпьютеров («НИЦ СЭ и НК», г. Таганрог) в содружестве с Научно-исследовательским институтом многопроцессорных вычислительных систем Южного федерального университета (НИИ МВС ЮФУ, г. Таганрог) и Южным научным центром Российской академии наук (ЮНЦ РАН, г. Ростов-на-Дону) разрабатываются и производятся реконфигурируемые вычислительные системы класса суперЭВМ, где основным вычислительным ресурсом являются не микропроцессоры, а множество кристаллов ПЛИС, объединенных в вычислительные поля посредством высокоскоростных каналов передачи данных.

Спектр выпускаемых и проектируемых изделий достаточно широк: от полностью автономных малогабаритных реконфигурируемых ускорителей (вычислительных блоков), вычислительных модулей в настольном или стоечном конструктивном исполнении до вычислительных систем, состоящих из нескольких вычислительных шкафов, размещаемых в специально оборудованном машинном зале.

Реконфигурируемые вычислительные системы, содержащие большие вычислительные поля ПЛИС, находят применение для решения вычислительно трудоемких задач в различных областях науки и техники, поскольку обладают рядом существенных преимуществ по сравнению с многопроцессорными вычислительными системами кластерной архитектуры: высокими реальной и удельной производительностями, высокой энергоэффективностью и др.

2. РВС на основе ПЛИС Xilinx Virtex-7

2.1 Реконфигурируемый вычислительный блок «Калеано»

На основе ПЛИС Xilinx седьмой серии разработан реконфигурируемый вычислительный блок (РВБ) «Калеано» в конструктивном исполнении высотой 1U, предназначенный для обработки данных, поступающих по каналу Gigabit Ethernet без поддержки IP-протоколов.

На рис. 1-а представлена фотография РВБ «Калеано», на рис. 1-б - блок со снятой верхней крышкой и печатная плата.

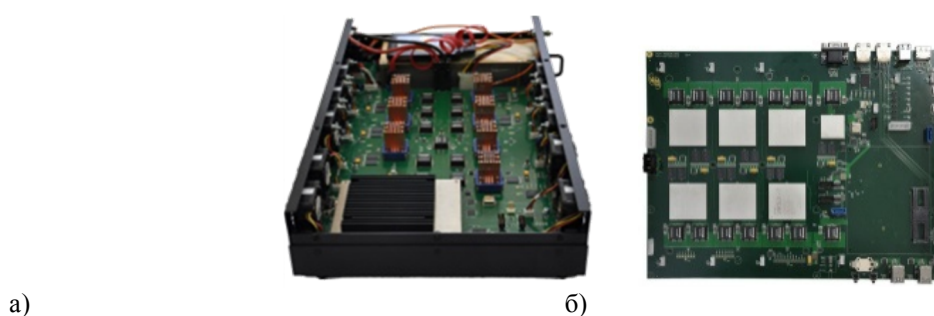


Рис. 1. Фотографии РВБ «Калеано» и его составных частей

РВБ «Калеано» выпускается в двух модификациях: «Калеано-К» на ПЛИС Kintex-7 XC7K160T и «Калеано-V» на ПЛИС Virtex-7 XC7VX485T. Технические характеристики РВБ «Калеано» для этих модификаций приведены в таблице 1.

РВБ «Калеано» содержит вычислительное поле из шести ПЛИС, встроенную управляющую ЭВМ, систему питания, систему управления, систему охлаждения и другие подсистемы. Все ПЛИС вычислительного поля соединены между собой по принципу близкодействия с помощью LVDS-каналов, ко всем ПЛИС РВБ подключены модули динамической памяти емкостью 256 Мбайт каждый.

Для управления и конфигурирования вычислительного поля РВБ используется ЭВМ семейства COM-Express фирмы Kontron, установленная непосредственно на плате вычислительного модуля. С ее помощью подключается периферийное оборудование, осуществляются подготовка и отладка параллельной программы для решения вычислительно трудоемких задач, формируются файлы исходных данных, которые вместе с исполняемым модулем задачи через шину PCI-Express загружаются в вычислительное поле по LVDS-каналу.

После выполнения задачи результаты решения пересылаются в процессорный модуль COM-Express.

Таблица 1. Технические характеристики РВБ «Калеано» для модификаций «Калеано-К» и «Калеано-V»

Технический параметр	Калеано-К	Калеано-V
Число и тип ПЛИС	6	6
Общее число эквивалентных вентилях в ПЛИС вычислительного поля, млн.	96	288
Объем оперативной памяти, Гб	3	3
Производительность вычислительного модуля P ₁₃₂ /P ₁₆₄ , Гфлопс	150/75	440/220
Частота работы, МГц	330	400
Скорость обмена данными по каналу Ethernet, Гбит/с	1	1
Частота передачи данных по LVDS между ПЛИС вычислительного поля, МГц	900	1200
Потребляемая мощность, Вт	200	320
Габаритные размеры, мм	480x270x70	480x270x70
Стоимость, млн. руб.	1,3	2,0

Возможные области применения РВБ «Калеано»: символьная обработка, математическая физика, моделирование и вычислительный эксперимент, цифровая обработка сигналов, линейная алгебра и т.п.

2.2 Реконфигурируемый вычислительный модуль «Плеяда»

По государственному контракту №14.527.12.0004 от 03.10.2011 г. в НИИ МВС ЮФУ была разработана реконфигурируемая вычислительная система РВС-7 на основе ПЛИС Virtex-7, которая содержит вычислительное поле из 576 микросхем ПЛИС Virtex-7 XC7V585T-FFG1761 объемом 58 миллионов эквивалентных вентилях каждая, конструктивно объединенных в один вычислительный шкаф высотой 47U с пиковой производительностью 10^{15} операций с фиксированной запятой в секунду.

Основным структурным компонентом РВС-7, предназначенным для установки в стандартную 19" вычислительную стойку, является вычислительный модуль (ВМ) 24V7-750 (ВМ «Плеяда»), в состав которого входят: четыре платы вычислительного модуля (ПВМ) 6V7-180, представленные на рис. 2; управляющий модуль УМ-7; подсистема питания; подсистема охлаждения и другие подсистемы. Фотография ВМ 24V7-750 представлена на рис. 2.

В состав каждой платы ВМ 24V7-750 входят: вычислительное поле, состоящее из шести ПЛИС XC7V585T-1FFG1761 семейства Virtex-7, соединенных последовательно с возможностью передачи данных по 144 дифференциальным линиям LVDS-интерфейса на частоте 800 МГц, и распределенная память общим объемом 12 Гбайт (на каждой плате установлены 12 микросхем динамической памяти MT47H128M16HR-25E с организацией 128 М*16 и частотой записи/чтения до 400 МГц).

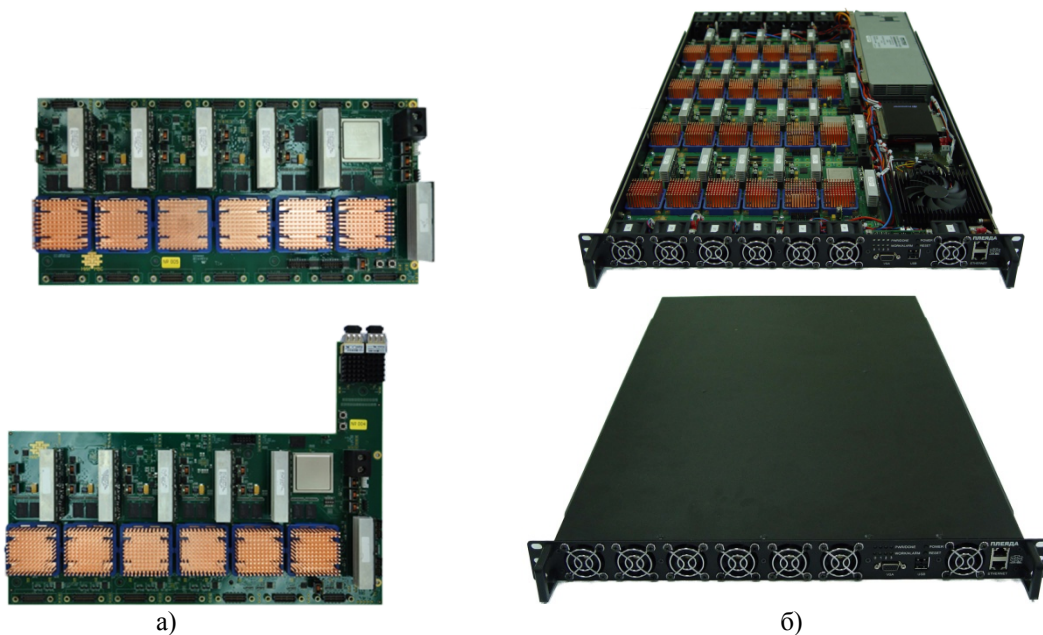


Рис. 2. Фотография вычислительного модуля (ВМ) 24V7-750 (а – платы ВМ «Плеяда», б – ВМ «Плеяда» со снятой и установленной верхней крышкой)

Производительность одной платы составляет 645,9 Гфлопс при обработке 32-разрядных данных с плавающей запятой, а производительность ВМ 24V7-750 составляет 2,58 Тфлопс при обработке 32-разрядных данных с плавающей запятой.

2.3 Реконфигурируемый вычислительный модуль «Тайгета»

В ООО «НИЦ СЭ и НК» на основе ПЛИС Virtex-7 разработан 19" вычислительный модуль «Тайгета» высотой 2U, предназначенный для создания высокопроизводительных многостоечных РВС. ВМ «Тайгета», представленный на рис. 3-а, содержит четыре платы 8V7-200, встроенную управляющую ЭВМ, систему питания, систему управления, систему охлаждения и другие подсистемы. Платы в составе ВМ «Тайгета» соединяются LVDS-каналами, работающими на частотах до 1000 МГц. Внешний вид платы 8V7-200 показан на рис. 3-б.

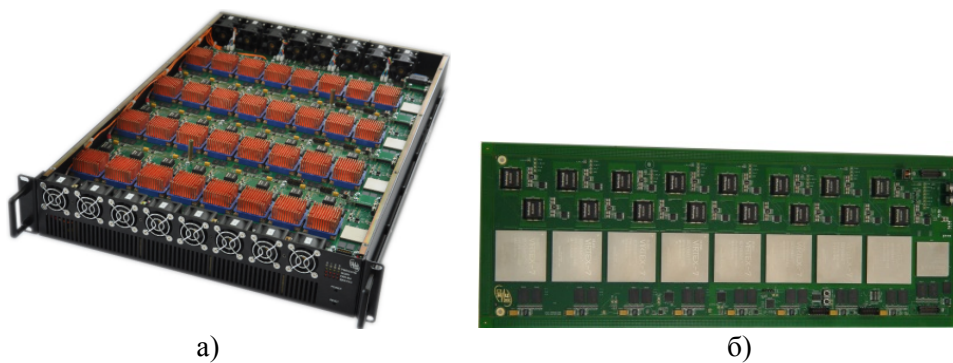


Рис. 3. Фотография ВМ «Тайгета» (а – фотография ВМ «Тайгета» со снятой верхней крышкой, б – фотография ПВМ 8V7-200)

Плата вычислительного модуля (ПВМ) 8V7-200 представляет собой 20-слойную печатную плату с двухсторонним монтажом элементов, на которой располагаются восемь ПЛИС типа XC7VX485T-1FFG1761, содержащих по 48,5 миллионов эквивалентных вентилей, 16 микросхем распределенной памяти SDRAM типа DDR2 общим объемом 2 Гбайт, интерфейсы LVDS и Ethernet и другие компоненты.

Производительность одной ПВМ 8V7-200 составляет 667 Гфлопс при обработке 32-разрядных данных с плавающей запятой, а производительность ВМ «Тайгета» составляет соответственно 2,66 Тфлопс.

2.4 PBC на основе ВМ «Плеяда» и ВМ «Тайгета»

На основе рассмотренного выше ВМ «Плеяда» в 2013 году была создана реконфигурируемая вычислительная система PBC-7 (рис. 4-а), содержащая 24 вычислительных модуля и имеющая возможность наращивания системы до 36 вычислительных модулей. Производительность PBC-7 при комплектации от 24 до 36 ВМ 24V7-750 составляет от 62 до 93 Тфлопс при обработке 32-разрядных данных с плавающей запятой и 19,4÷29,4 Тфлопс при обработке 64-разрядных данных с плавающей запятой соответственно. Области применения PBC-7 и вычислительных комплексов на ее основе являются решение задач цифровой обработки сигналов и многоканальная цифровая фильтрация.

На основе ВМ «Тайгета» была создана PBC, внешний вид которой представлен на рис. 4-б. Производительность одной стойки PBC при комплектации 18 ВМ «Тайгета» составляет 48 Тфлопс при обработке данных с плавающей запятой одинарной точности и 23 Тфлопс при обработке 64-разрядных данных с плавающей запятой.

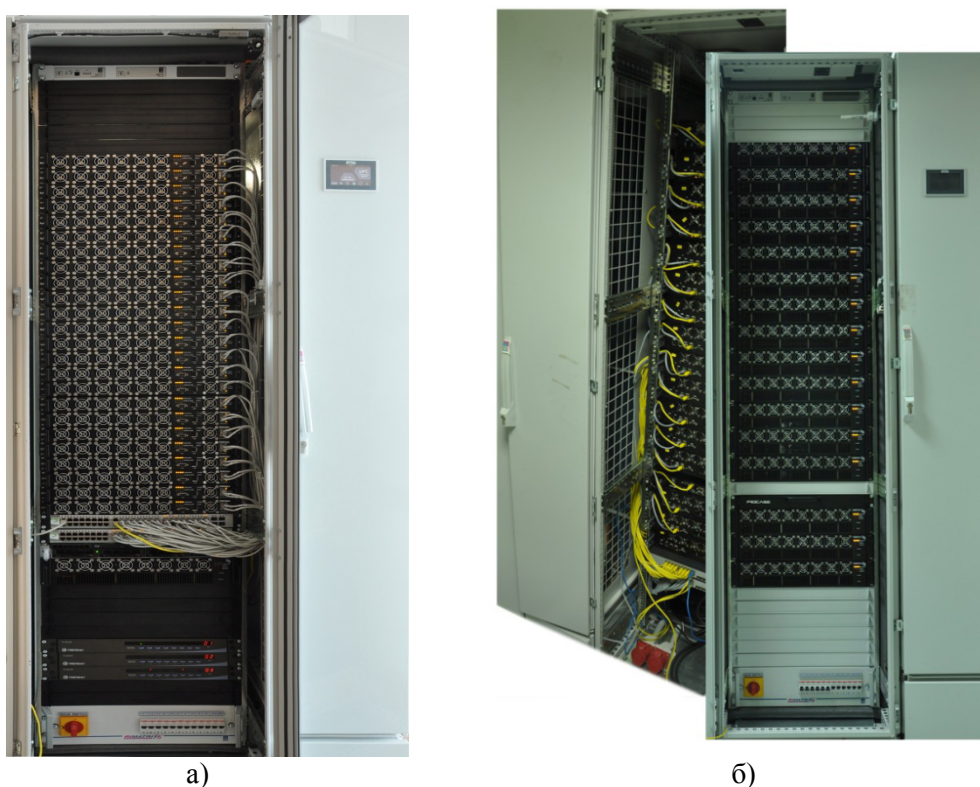


Рис. 4. Внешний вид PBC на основе ПЛИС Xilinx Virtex-7 (а – PBC-7 на основе ВМ «Плеяда», б – PBC на основе ВМ «Тайгета»)

Высокопроизводительные PBC на основе ВМ «Тайгета» ориентированы на решение вычислительно трудоемких задач науки и промышленности, задач синтеза лекарств и задач символьной обработки и обеспечивают при этом существенное конкурентное преимущество по большинству технико-экономических параметров: удельной производительности, энергоэффективности и другим по сравнению с суперЭВМ традиционной кластерной архитектуры.

3. Перспективные реконфигурируемые системы на основе ПЛИС Xilinx UltraScale

Дальнейшим развитием использованной при построении PBC на основе ПЛИС Xilinx Virtex-7 открытой масштабируемой архитектуры [2] является использование в новых разрабатываемых изделиях перспективной элементной базы – ПЛИС Xilinx нового поколения семейства UltraScale, выполненных по технологии 20 нм и обладающих сниженным энергопотреблением и повышенным быстродействием по сравнению с ПЛИС седьмого семейства.

3.1 Реконфигурируемый вычислительный блок на основе ПЛИС UltraScale

Разрабатываемый РВБ «Калеано-U» будет выполнен также в конструктиве высотой 1U, но в отличие от своих предшественников «Калеано-K» и «Калеано-V», будет содержать четыре ПЛИС Xilinx UltraScale XCVU095 объемом 95 млн. эквивалентных вентилях каждая, что позволит создать вычислительное поле общим объемом 380 млн. эквивалентных вентилях. Структурная схема РВБ «Калеано-U» и эскиз компоновки платы показаны на рис. 5,а-б.

На рис. 5 обозначены:

- DD1-DD4 – вычислительные ПЛИС Xilinx UltraScale XCVU095;
- DD5 – ПЛИС контроллера ПВМ Xilinx UltraScale XCKU040;
- A1-A9 – модули распределенной памяти;
- X2-X4, X7-X12 – разъемы различных типов интерфейсов.

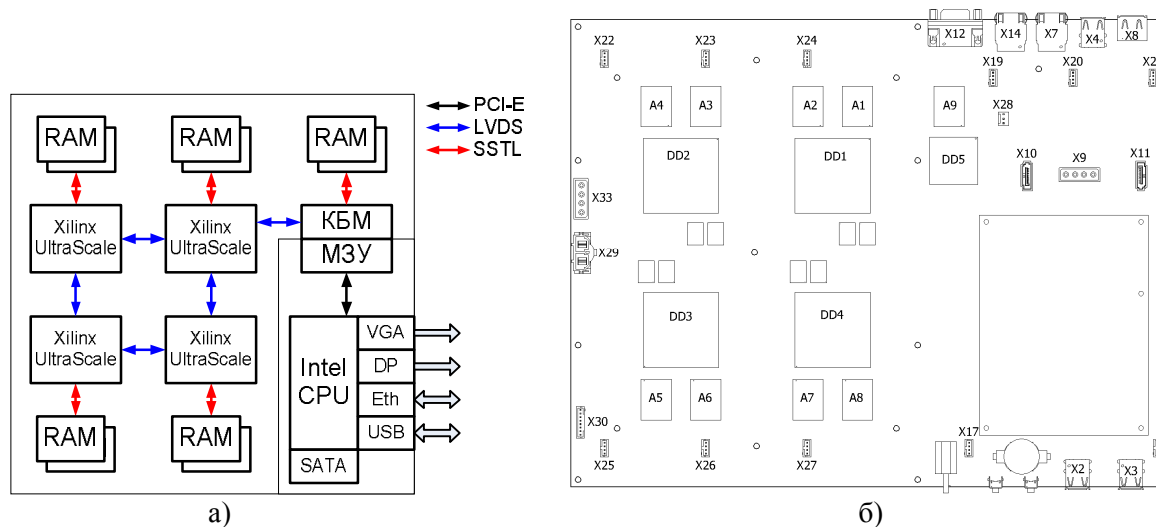


Рис. 5. РВБ «Калеано-U» (а - структурная схема, б - эскиз компоновки платы РВБ)

По сравнению с предыдущей версией РВБ «Калеано-V» производительность РВБ «Калеано-U» возрастет в 1,7–1,8 раза при увеличении потребляемой мощности не более чем в 1,3 раза.

3.2 РВС с жидкостным охлаждением на основе ПЛИС UltraScale

Использование воздушных систем охлаждения современных высокопроизводительных вычислительных систем и построенных на их основе суперкомпьютеров, в том числе реконфигурируемых, практически достигло своего предела. Большинство разработчиков вычислительной техники в качестве перспективы для решения проблем охлаждения проектируемых вычислительных комплексов ориентируются на применение жидкостного охлаждения.

Для вычислительных модулей РВС, проектируемых на основе перспективных семейств ПЛИС, целесообразно использовать жидкостное охлаждение, в частности, непосредственное погружение плат вычислительных модулей в жидкостный хладагент на основе минерального масла.

В ООО «НИЦ СЭ и НК» активно развивается направление по созданию РВС нового поколения на основе жидкостного охлаждения. Разработаны новые конструкции печатных плат и вычислительных модулей, характеризующиеся высокой плотностью компоновки. В частности, в настоящее время ведется разработка перспективных вычислительных модулей «Скат-8» для многостоечных РВС сверхвысокой производительности.

Плата перспективного вычислительного модуля содержит восемь ПЛИС семейства Virtex UltraScale логической емкостью не менее 100 млн. эквивалентных вентилях каждая. Вычислительный модуль состоит из двух секций: в первой секции размещается 16 плат вычислительных модулей с потребляемой мощностью до 800 Вт каждая, причем все платы полностью погружены в электрически нейтральный жидкостный хладагент; во второй секции

располагаются насосная группа и теплообменник, обеспечивающие проток и охлаждение хладагента. Эскиз ВМ с высотой конструктива 3U показан на рис. 6-а.

Согласно проведенным расчетам, использование жидкостного охлаждения и построение вычислительных систем на основе ВМ «Скат-8» обеспечивает сверхпетафлопсную производительность одного вычислительного шкафа РВС.

Вычислительная 19” стойка суперкомпьютера, эскиз которой представлен на рис. 6-б, может содержать до 12 ВМ «Скат-8» с жидкостным охлаждением. Производительность и потребляемая мощность перспективной РВС приведены в таблице 2.

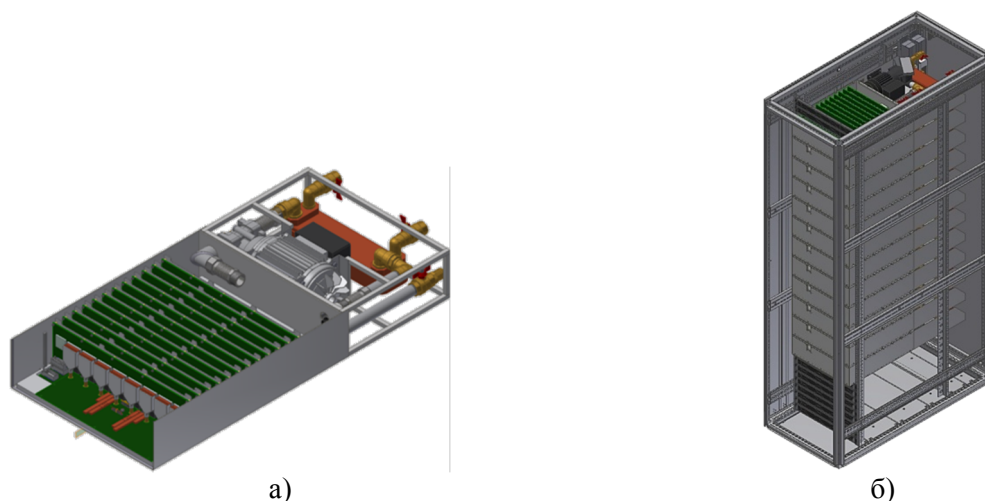


Рис. 6. Эскиз вычислительной системы на основе жидкостного охлаждения (а - эскиз ВМ «Скат-8», б - эскиз вычислительной стойки на основе ВМ «Скат-8»)

Таблица 2. Производительность и потребляемая мощность перспективной РВС на основе ПЛИС Xilinx UltraScale

Характеристика	Значение
Производительность ВМ «Скат-8»	105 Тфлопс
Производительность вычислительной стойки на основе ВМ «Скат-8»	1 Пфлопс
Потребляемая мощность ВМ «Скат-8»	13 кВт
Потребляемая мощность вычислительной стойки на основе ВМ «Скат-8»	150 кВт

На основе производимых в «НИЦ СЭ и НК» реконфигурируемых систем можно проследить темпы роста производительности РВС при переходе от семейства к семейству ПЛИС (таблица 3).

Таблица 3. Производительность реконфигурируемых суперЭВМ

Изделие, год выпуска, семейство ПЛИС	Производительность платы Pi_{32}/Pi_{64} , Гфлопс	Производительность ВМ Pi_{32}/Pi_{64} , Гфлопс	Производительность шкафа 47U Pi_{64} , Тфлопс
«Орион-5», 2009 год, Virtex-5	250/85	1000/340	19,2 - 28,8
«Ригель», 2010/2012 год, Virtex-6	400/125	1600/500	34,5 - 51,8
«Тайгета», 2012/2013 год, Virtex-7	900/300	3600/1200	68 - 100
«Скат», 2015/2016 год, UltraScale	7250/2500	82500/30000	1000 - 1250

На основе представленного конструктивного исполнения в 2015-2016 годах будут созданы сверхпроизводительные вычислительные комплексы, в которых обеспечивается эффективное

охлаждение вычислительных ПЛИС как семейства UltraScale, так и следующего прогнозируемого семейства ПЛИС.

4. Программное обеспечение PBC

В настоящее время существует множество различных систем проектирования, позволяющих создавать структурные решения прикладных задач на ПЛИС. Наиболее популярными как в качестве отдельного средства разработки, так и в составе комплексов, являются программы-синтезаторы, предоставляемые фирмами-изготовителями ПЛИС: ISE и Vivado фирмы Xilinx [3], Quartus II фирмы Altera [4] и Actel Libero IDE фирмы Actel [5]. Данные средства, помимо непосредственно среды проектирования цифровых устройств, включают в себя ряд вспомогательных утилит: анализаторы временных характеристик, редакторы размещения, модули программирования ПЛИС, системы моделирования цифровых устройств и др. Благодаря широкому инструментарию эти системы проектирования обеспечивают полный цикл разработки цифровых устройств в пределах одного кристалла ПЛИС: создание исходного описания проекта, синтез, моделирование, размещение, трассировку, конфигурирование кристалла.

В связи с постоянным ростом ёмкости кристаллов ПЛИС проектирование решений прикладных задач в кристаллах ПЛИС с помощью языков описания аппаратуры (VHDL, AHDL, Verilog и др.), а также разработка цифровых устройств в графических редакторах становится всё более трудоёмкой. Поэтому в настоящее время ведущие производители ПЛИС и реконфигурируемых вычислителей ориентируются на языки высокого уровня. Так, в новой среде разработки Vivado фирмы Xilinx добавлен новый инструмент проектирования Vivado HLS [6], основанный на языке высокого уровня, а компания Altera для своих ПЛИС предлагает инструментарий разработки Altera SDK (<http://www.altera.com/literature/lit-openccl-sdk.jsp>, дата обращения 12.12.2014) для нового стандарта параллельного программирования гетерогенных систем OpenCL. В данных решениях используются трансляторы C-подобных языков, генерирующие из программы на аналоге языка программирования высокого уровня C код на языках описания аппаратуры на уровне регистровых передач (RTL-уровень, трансляторы C-to-RTL).

Несмотря на схожесть синтаксисов данных C-подобных языков с самим языком C, подобный подход вовсе не означает, что исходный код на языке C, написанный под персональный компьютер или кластерную вычислительную систему, будет понят трансляторами C-to-RTL. Выбор языка C в качестве основы обусловлен широкой распространённостью данного языка, что существенно упрощает освоение новых инструментариев разработки решений прикладных задач для ПЛИС.

Также при использовании трансляторов C-to-RTL весь код программы либо явно указанные процедуры транслируются в RTL-описания отдельных кристаллов ПЛИС. В подобных системах разработки отсутствует инструментарий, обеспечивающий автоматические разбиения параллельной программы на множество связанных кристаллов ПЛИС.

В Vivado HLS проект разрабатывается в рамках одного кристалла ПЛИС, и если программисту недостаточно аппаратного ресурса кристалла, то он вынужден самостоятельно распределять вычисления между несколькими проектами для каждой ПЛИС и синхронизировать управляющие и информационные потоки между ними.

Стандарт OpenCL используется компанией Nallatech (разработчик реконфигурируемых вычислителей) и подразумевает использование нескольких ПЛИС в одном проекте. Программирование решений в кристаллах ПЛИС в данном случае осуществляется с помощью вызова функций из библиотек инструментария разработки Altera SDK, и в каждом задействованном кристалле ПЛИС выполняются вычисления, описанные отдельным участком кода. Таким образом, программа, написанная в стандарте OpenCL, представляет собой основной код, написанный под традиционные процессоры, и отдельные участки кода, написанные под ПЛИС, задействованные как сопроцессоры. В данном случае задача синхронизации данных также возлагается на самого программиста.

Ещё одним известным средством программирования ПЛИС является комплекс, разработанный компанией Mitrionics, состоящий из виртуального процессора Mitrion Virtual Processor (MVP), программирование которого осуществляется на языке высокого уровня Mitrion-C, и библиотеки функций для построения хост-программ MithalAPI, входящих в пакет разработки

Mittrion SDK [7]. Разрабатываемая на языке Mittrion-C программа должна быть полностью реализована на одном виртуальном процессоре MVP, что не позволяет программировать многокристальные PBC, и следовательно, существенно снижает эффективность использования программного комплекса компании Mittrionics. Для программирования многокристалльных PBC со связями между ПЛИС программисту необходимо самому реализовать интерфейс (протокол) обмена данными между ПЛИС и решить вопросы, связанные с синхронизацией потоков данных. В этом случае программа для PBC вырождается в программу для кластера (множество процессоров MVP), реализованного на ПЛИС, что существенно снижает эффективность реализации задач на многокристалльных PBC.

5. Язык COLAMO и комплекс средств программирования многокристалльных PBC

Альтернативный подход к программированию PBC предлагается в НИИ МВС ЮФУ, занимающемся разработкой многокристалльных реконфигурируемых вычислительных систем различных архитектуры и конфигурации уже более 15 лет.

Опыт решения различных классов задач в НИИ МВС ЮФУ показал, что для эффективного решения современных трудоемких задач программисту необходимы средства программирования, обеспечивающие:

- программирование на языке высокого уровня;
- поддержку многокристалльного программирования;
- обеспечение высокой частоты работы ПЛИС;
- высокую плотность заполнения кристалла ПЛИС;
- поддержку конвейерной и макроконвейерной организации вычислений.

В НИИ МВС ЮФУ разработан и широко используется программный комплекс, состоящий из:

- транслятора языка программирования COLAMO, осуществляющего трансляцию исходного кода на COLAMO в информационный граф параллельной прикладной программы;
- синтезатора масштабируемых схемотехнических решений на уровне логических ячеек ПЛИС Fire!Constructor, осуществляющего отображение полученного от транслятора языка программирования COLAMO информационного графа на архитектуру PBC, размещение отображенного решения по кристаллам ПЛИС и автоматическую синхронизацию фрагментов информационного графа в разных кристаллах ПЛИС;
- библиотеки IP-ядер, соответствующих операторам языка COLAMO (функционально-законченных структурно-реализованных аппаратных устройств) для различных предметных областей, и интерфейсов для согласования скорости обработки информации и связи в единую вычислительную структуру;
- средств отладки и программ доступа и мониторинга состояния PBC.

Язык высокого уровня COLAMO предназначен для описания реализации параллельного алгоритма и создания на основе принципов структурно-процедурной организации вычислений [1, 8, 9] в архитектуре PBC специализированной вычислительной структуры, которая предполагает последовательную смену структурно (аппаратно) реализованных фрагментов информационного графа задачи, каждый из которых является вычислительным конвейером потока операций.

Таким образом, приложение (прикладная задача) для PBC состоит из структурной составляющей, представленной в виде аппаратно реализованных фрагментов вычислений, и процедурной составляющей, представляющей собой единую для всех структурных фрагментов управляющую программу последовательной смены вычислительных структур и организации потоков данных.

Для представления такой организации вычислений в языке используется понятие «кадр». Кадром является программно-неделимый компонент, представляющий собой совокупность операторов, которые реализуются в виде арифметико-логических команд и команд чтения/записи, выполняемых на различных функциональных устройствах, соединенных между собой в соответствии с информационной структурой алгоритма.

В языке COLAMO отсутствуют явные формы описания параллелизма, а распараллеливание достигается с помощью объявления типов доступа к переменным и индексации элементов массивов, что характерно для языков потока данных. Для обращения к данным используется два основных метода доступа: параллельный доступ (задаваемый типом *Vector*) и последовательный доступ (задаваемый типом *Stream*). Степень параллелизма определяется по минимальному значению параметра распараллеливания. Для типа доступа *Stream* степень параллелизма равна 1, а для типа доступа *Vector* определяется наименьшим значением векторной составляющей каждого массива, участвующего в вычислениях. Для параллельного типа доступа возможна одновременная обработка всех размерностей массивов, заданных типом *Vector*, при этом повышается аппаратный ресурс на обработку, но снижается время обработки.

Многомерные массивы данных могут иметь множество измерений, каждое из которых может иметь последовательный или параллельный тип доступа, задаваемый ключевым словом *Stream* или *Vector* соответственно. Изменение типа доступа позволяет достаточно просто управлять как степенью распараллеливания вычислений на уровне описания структур данных, так и скоростью обработки и занимаемым ресурсом, что позволяет программисту описывать различные виды параллелизма в достаточно сжатом виде.

Помимо типа доступа, для переменной в языке COLAMO определены также и типы ее хранения: мемориальный (*Mem*), регистровый (*Reg*) и коммутационный (*Com*).

Мемориальной переменной называется величина, хранящаяся в ячейке распределенной памяти и, следовательно, сохраняющая свое значение до очередного переприсваивания. Для мемориальной переменной возможно одновременное выполнение только одного процесса. Поэтому в семантике языка COLAMO для мемориальной переменной в теле кадра действуют правило однократного присваивания и правило единственной подстановки. Правило однократного присваивания указывает на то, что мемориальная переменная в кадре изменяет свое значение только один раз. Правило единственной подстановки определяет, что переменная в кадре может использоваться только для одного процесса чтения или записи.

Для описания связей между элементами информационного графа задачи в языке COLAMO предназначена коммутационная переменная. Поскольку коммутационная переменная описывает информационные связи, то она не требует никакого вычислительного аппаратного ресурса для своей реализации. Доступ к значению коммутационной переменной после выполнения кадра невозможен. Коммутационная переменная необходима транслятору для указания информационных зависимостей при построении вычислительной структуры задачи. На коммутационную переменную, как и на мемориальную переменную, действует правило однократного присваивания, но для нее не выполняется правило единственной подстановки. Использование коммутационных переменных позволяет легко разветвлять и дублировать потоки данных, но не позволяет реализовать рекурсию.

Для организации рекурсии в языке COLAMO используется регистровая переменная, которая представляет собой регистр на аппаратном уровне и используется для хранения промежуточных данных, полученных в процессе вычислений. Единственным ограничением для регистровой переменной в теле кадра является правило однократного присваивания.

Трансляция программы на языке высокого уровня COLAMO состоит в создании схемотехнической конфигурации вычислительной системы (структурной составляющей) и параллельной программы, управляющей потоками данных (потокосовой и процедурной составляющих) [1, 8, 9]. Создание структурной составляющей заключается в построении вычислительного графа, соответствующего описанному на COLAMO информационным зависимостям между результатами вычислений.

При этом для каждой используемой в тексте программы операции подставляется специализированный вычислительный блок в зависимости от типа доступа к переменным, типа данных, их разрядности и т.д. Синтезированный информационный граф задачи передается в синтезатор *Fire!Constructor* для отображения на аппаратный ресурс многокристалльной ПВС [10].

Задача автоматического отображения параллельной программы на аппаратный ресурс многокристалльной ПВС состоит из трех подзадач: разбиения информационного графа на непересекающиеся подграфы, размещения сформированных подграфов в ПЛИС ПВС и трассировки внешних связей размещенных подграфов в системе коммутаций ПВС.

Результатом работы синтезатора Fire!Constructor являются файлы VHDL-описаний и файлы временных и топографических ограничений (User Constraints Files). Файлы VHDL описывают структурные реализации фрагментов параллельной программы. На основании этих файлов и библиотеки схемотехнических элементов формируются проекты для синтезатора ISE под каждую отдельную ПЛИС. Далее с помощью синтезатора ISE формируются конфигурационные файлы ПЛИС. Полученные конфигурационные файлы загружаются в PBC.

Программа на языке COLAMO разрабатывается в едином проекте и может быть транслирована на любую PBC, описание которой и соответствующие библиотеки присутствуют в комплексе программирования PBC. В отличие от других существующих систем разработки решений прикладных задач на ПЛИС пользователю не требуется в тексте программы указывать, какие фрагменты программы в каких ПЛИС будут выполняться. Синтезатор Fire!Constructor обеспечивает автоматическое разбиение вычислительной структуры программы на языке COLAMO на несколько проектов в синтезаторе Xilinx ISE, при этом обеспечивается синхронизация информационных потоков как внутри кристалла ПЛИС, так и между ними.

5. Заключение

ПЛИС как элементная база реконфигурируемых суперЭВМ, согласно данным таблицы 3, обеспечивают устойчивый, близкий к линейному, рост производительности PBC, открывая новые перспективы по созданию суперкомпьютеров петафлопсной производительности. Можно утверждать, что конструктивные решения, положенные в основу перспективных вычислительных модулей на основе ПЛИС Xilinx Virtex UltraScale, в том числе на основе жидкостного охлаждения, позволят сосредоточить в пределах одной вычислительной стойки высотой 47U мощный вычислительный ресурс и обеспечить удельную производительность PBC на основе ПЛИС Xilinx Virtex UltraScale на уровне лучших мировых показателей для суперЭВМ с кластерной архитектурой.

Это позволяет рассматривать PBC на основе ПЛИС Xilinx Virtex UltraScale как основу для создания высокопроизводительных вычислительных комплексов нового поколения, обеспечивающих высокую эффективность вычислений и близкий к линейному рост производительности при наращивании вычислительного ресурса.

Литература

1. Каляев И.А., Левин И.И., Семерников Е.А., Шмойлов В.И. Реконфигурируемые мультиконвейерные вычислительные структуры /Изд. 2-е, перераб. и доп. / Под общ. ред. И.А. Каляева. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2009. 344 с.
2. Левин И.И. Реконфигурируемые вычислительные системы с открытой масштабируемой архитектурой // Труды Пятой Международной конференции «Параллельные вычисления и задачи управления» PACO'2010. - М.: Учреждение Российской академии наук Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2010. - С.83-95.
3. Зотов В.Ю. Проектирование цифровых устройств на основе ПЛИС фирмы XILINX в САПР WebPACK ISE [Текст] М.: Горячая линия-Телеком. 2003 – 624 с.
4. Quartus II Handbook Version 10.1 Volume 1: Design and Synthesis. Altera Corporation 2010.
5. Libero IDE v9.1 User's Guide. Actel Corporation 2010.
6. Проектирование для ПЛИС Xilinx с применением языков высокого уровня в среде Vivado HLS. Компоненты и технологии. 2013 г. №12.
7. <http://www.mitronics.com/>(дата обращения 12.12.2014)
8. Kalyaev I.A., Levin I.I., Dordopulo A.I., Slasten L.M. Reconfigurable Computer Systems Based on Virtex-6 and Virtex-7 FPGAs // IFAC Proceedings Volumes (ISSN 14746670), Programmable Devices and Embedded Systems, Volume №12, part №1, 2013, pp. 210-214.

9. Igor A. Kalyaev, Ilya I. Levin, Alexey I. Dordopulo, Liuba M. Slasten. FPGA-based Reconfigurable Computer Systems // Science and Information Conference (SAI) 2013, Oct 7, 2013 - Oct 9, 2013, London, UK, pp. 148-155;
10. V.A. Gudkov, A.A. Gulenok, V.B. Kovalenko, L.M. Slasten. Multi-level Programming of FPGA-based Computer Systems with Reconfigurable Macroobject Architecture // IFAC Proceedings Volumes (ISSN 14746670), Programmable Devices and Embedded Systems, Volume №12, part №1, 2013, pp. 204-209.