

ПЕРСПЕКТИВНЫЙ РЕКОНФИГУРИРУЕМЫЙ СУПЕРКОМПЬЮТЕР С ИММЕРСИОННЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

И.И. Левин

НИЦ супер-ЭВМ и нейрокомпьютеров
Россия, 347900, Таганрог, пер. Итальянский, 106
E-mail: levin@superevm.ru

Ю.И. Доронченко

НИЦ супер-ЭВМ и нейрокомпьютеров
Россия, 347900, Таганрог, пер. Итальянский, 106
E-mail: doronchenko@superevm.ru

Ключевые слова: реконфигурируемые вычислительные системы, производительность вычислений, иммерсионные системы охлаждения, энергоэффективность вычислений, вычислительная плотность, сильносвязанные задачи, информационный обмен.

Аннотация: Рассматривается перспективный высокопроизводительный реконфигурируемый вычислительный блок «Арктур», построенный на основе современных ПЛИС фирмы Xilinx семейства UltraScale+ НВМ-линейки. Разработанный вычислительный блок обладает вычислительной плотностью до 128 ПЛИС в конструктиве 3U 19", а также широкими возможностями информационного обмена между ПЛИС внутри блока и между блоками для решения сильносвязанных задач, в которых количество пересылок данных между функциональными устройствами больше, чем количество таких устройств. В качестве основных связей между ПЛИС используются дифференциальные линии с подключенными к ним мульти-гигабитными трансиверами (MGT), обеспечивающие обмен на скорости до 25 Гбит/с. Вычислительный блок «Арктур» содержит в своем составе до 16 вычислительных модулей на основе шести ПЛИС UltraScale+ XCVU37P с встроенной НВМ-памятью, модули питания, модуль загрузки и управления с универсальным процессором и необходимыми интерфейсами ввода-вывода, являясь функционально законченным устройством. Взаимодействие подсистем изделия осуществляется с помощью оригинальной кросс-платы. Для охлаждения компонентов используется иммерсионная (погружная) технология, обеспечивающая отвод выделяемой суммарной тепловой мощности до 20 кВт. Объединение множества блоков в единый вычислительный контур позволит создавать вычислительные комплексы с реальной производительностью до нескольких десятков петафлопс.

1. Введение

В общем случае контур систем управления содержит электронную вычислительную машину в обратной связи с объектом (объектами) управления, а также АЦП (ЦАП), датчики, устройства ввода-вывода, интерфейсы и т.п. Данный контур обладает естественным противоречием, связанным с цифровой обработкой на ЭВМ и, как правило, аналоговой природой объектов управления.

Важнейшими особенностями управляющей ЭВМ являются дискретность и латентность обработки информации. Дискретность по времени определяется решаемой

задачей и вычислительными возможностями. Приращение по уровню обычно задается разрядностью ЭВМ и зачастую является избыточным в системах, построенных на универсальных процессорах. Латентность вносит наибольшие сложности при построении систем управления, в особенности, систем реального времени. В асинхронных схемах необходимо реализовывать прерывания и приоритеты. Если связь ЭВМ с объектом управления является синхронной, необходимо с помощью устройств единого времени задавать цикл обработки одинаковой продолжительности, которая должна учитывать возможную недетерминированность исполнения программного кода на универсальных процессорах.

Современные вычислительно трудоемкие задачи могут решаться только на многопроцессорных вычислительных системах с высоким уровнем параллелизма и зачастую характеризуются сильной связанностью, когда количество пересылок данных между функциональными устройствами больше, чем количество таких устройств.

Данные особенности построения систем управления ведут к неотвратимому простоям вычислительных ресурсов и падению производительности при решении задач реального времени. В этой связи решение таких сильносвязанных задач с помощью вычислителей на основе универсальных процессоров крайне неэффективно и требует создания специализированных вычислительных систем не только с высокой производительностью, но и с заранее определенным временем исполнения задачи и множеством каналов высокой пропускной способности для прямого информационного обмена между вычислительными устройствами.

В качестве таких вычислителей целесообразно применение реконфигурируемых вычислительных систем, которые позволяют адаптировать свою архитектуру под структуру решаемой задачи [1, 2].

2. РВБ «Арктур»

Существующие реконфигурируемые суперкомпьютеры характеризуются мощными информационными обменами только в пределах базовых функционально законченных узлов – вычислительных модулей. Пропускная способность между платами вычислительных модулей существенно ниже, что ограничивает возможности эффективного распараллеливания вычислений в прикладных программах.

При построении вычислительных комплексов используют различные типы охлаждения, как правило, жидкостного. Наиболее эффективным подходом представляется иммерсионная технология с непосредственным погружением электронных компонентов в теплоноситель [3], которая стала активно развиваться и получила свою реализацию в образцах вычислительной техники. Данная технология обеспечивает отсутствие технологически сложных элементов конструкции, что определяет наиболее высокую плотность компоновки, а также использование недорогих теплоносителей и гарантирует отсутствие критических протечек.

В настоящее время в НИЦ СЭ и НК (г. Таганрог) проводятся экспериментальные исследования перспективного реконфигурируемого вычислительного блока (РВБ) «Арктур» на основе ПЛИС, который дает возможность реализовывать крупные графы сложных задач в едином вычислительном контуре вычислительной системы, позволяя без разрывов выполнять вычисления за счет мощной системы информационного обмена (рис. 1), обеспечивая при этом необходимый уровень энергопитания и охлаждения.



Рис. 1. РВБ «Арктур».

Разработанный конструктив РВБ «Арктур» имеет стандартный размер 3U 19" и содержит до 16-ти вертикально расположенных на кросс-плате вычислительных модулей (ВМ) по шесть ПЛИС XCVU37P фирмы Xilinx семейства UltraScale+ в каждом. Микросхема XCVU37P обладает 8 Гбайт НВМ с пиковой пропускной способностью до 460 Гбайт/с. Подключение к контроллеру НВМ осуществляется через 256-разрядные интерфейсы AXI, общее число которых достигает 32. Для общего управления, конфигурирования, контроля над вычислительным процессом используется модуль загрузки и управления (МЗУ) на основе процессора Intel Skylake. Для электропитания ВМ разработан модуль питания (МП) DC/DC, выполняющий преобразования из входного электропитания 380 В постоянного тока в 12 В. Максимальная потребляемая мощность РВБ «Арктур» – 20 кВт. Данные электронные модули расположены на одной кросс-плате, с помощью которой обеспечивается межмодульное информационное и управляющее взаимодействие.

3. Система охлаждения РВБ «Арктур»

Охлаждение нагруженных электронных компонентов РВБ обеспечивается иммерсионной системой охлаждения на основе диэлектрического теплоносителя [4]. Корпус РВБ представляет собой герметичный контейнер с теплоносителем, в который погружены электронные модули. Насос обеспечивает циркуляцию теплоносителя в РВБ по следующему замкнутому контуру: нагретый теплоноситель поступает в пластинчатый теплообменник, там охлаждается, затем под необходимым давлением вновь поступает в корпус РВБ под кросс-плату, с помощью специальных направляющих форсунок протекает через радиаторы охлаждаемых электронных компонентов, отчего нагревается сам и вновь поступает в теплообменник.

Эффективность применения иммерсионной системы жидкостного охлаждения обуславливается эффективностью технических решений при реализации каждого из ее компонентов: применяемого теплоносителя, конструкции и параметров используемых радиаторов ПЛИС, насосного оборудования, теплообменников.

Теплоноситель системы охлаждения обладает наилучшей электрической прочностью, высокой теплопроводностью, максимально возможной теплоемкостью при низкой вязкости. Разработанные радиаторы обеспечивают максимальную поверхность теплосъема, возможность организации циркуляции теплоносителя через радиатор, турбулентность потока теплоносителя в радиаторе, технологичность изготовления. Применяемый термоинтерфейс не деградирует и не вымывается теплоносителем, имеет стабильно высокий коэффициент теплопроводности. Теплообменник обеспечивает высокий коэффициент теплопередачи между основным и

вторичным контуром охлаждения. Для обеспечения циркуляции теплоносителя в объеме РВБ используется погружной насос, который обладает необходимой производительностью.

Конструктив состоит из основной вычислительной секции с электронными модулями, заполненной охлаждающей жидкостью и располагающейся спереди дополнительной сухой секции, в которой размещены пользовательские интерфейсы, разъемы и оптические модули. Позади основной секции располагается теплообменник переноса тепловой энергии из первого во второй контур охлаждения. Разработанная система охлаждения позволяет в конструктиве 3U отвести до 20 кВт тепловой мощности. Снаряженная масса РВБ – около 150 кг.

4. Подсистема информационного обмена

Важнейшей особенностью РВБ «Арктур» является подсистема информационного обмена, которая представляет собой множественные каналы связи между ПЛИС в пределах ВМ, а также между ПЛИС соседних ВМ (рис. 2) [5]. Связь между ПЛИС обеспечивается по дифференциальным линиям с помощью встроенных в ПЛИС мульти-гигабитных трансиверов (MGT), вспомогательными связями являются дифференциальные LVDS линии. Общая пропускная способность каналов связи ВМ – 15,6 Тбит/с, в том числе между ВМ – 9 Тбит/с.

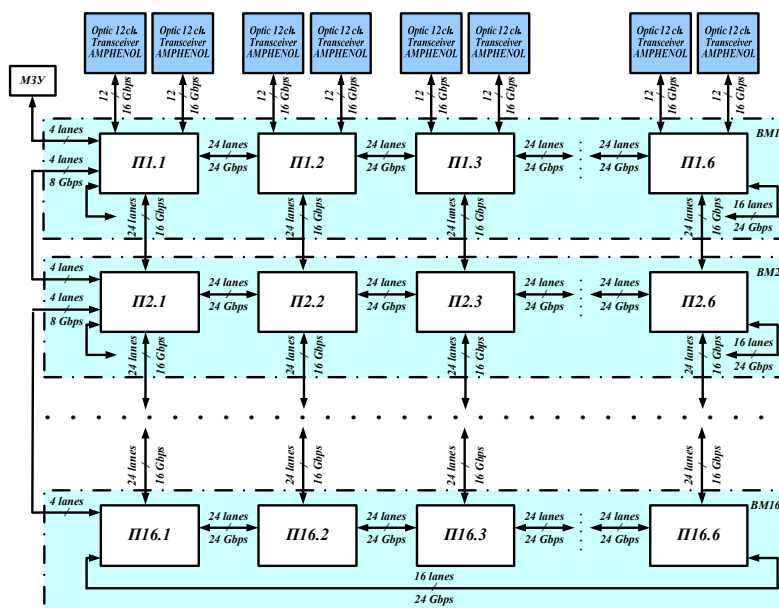


Рис. 2. Структура информационных связей РВБ «Арктур».

При построении вычислительных комплексов возможна организация информационного взаимодействия между РВБ, которое осуществляется через оптические каналы. Многоканальные оптические приемо-передатчики установлены на кросс-плате и подключаются к первому вычислительному модулю через разъемное соединение, обеспечивая пропускную способность до 4,5 Тбит/с. Фото вычислительного модуля «Арктур» показано на рис. 3.



Рис. 3. Вычислительный модуль «Арктур».

Применение РВБ «Арктур» позволяет максимально эффективно задействовать вычислительный ресурс даже при масштабировании ресурса до десятков и сотен РВБ. Все вычислители такого суперкомпьютера могут быть синхронизированы от формирователя опорной тактовой частоты, которым может выступать даже один из РВБ. ПЛИС-технологии обеспечивают точность исполнения реализованного алгоритма во времени – количество тактов на распространение как управляющих сигналов, так и обрабатываемых данных, является полностью детерминированным.

5. Заключение

РВБ «Арктур» с размещенными в его конструктиве (3U 19”) 96-ю ПЛИС высокой степени интеграции обладает уникальной плотностью компоновки вычислительного ресурса – всего более 270 млн. логических ячеек Logic Cells. При этом обеспечиваются соответствующее электропитание и иммерсионное охлаждение элементов изделия при решении вычислительно трудоемких задач.

Особенностью разрабатываемого РВБ являются широкие возможности информационного обмена внутри блока и между блоками для решения сильносвязанных задач. Объединение множества блоков в единый вычислительный контур позволит создавать вычислительные комплексы мирового уровня с производительностью до нескольких десятков петафлопс.

Список литературы

1. Каляев А.В., Левин И.И. Модульно-наращиваемые многопроцессорные системы со структурно-процедурной организацией вычислений. М.: Янус-К, 2003. 380 с.
2. Каляев И.А., Левин И.И. Реконфигурируемые вычислительные системы на основе ПЛИС. Ростов-на-Дону: Издательство ЮНЦ РАН, 2022. 475 с. <https://elibrary.ru/item.asp?id=49962846>.
3. Иммерсионное охлаждение BiXBiT. Москва, 2018.
URL:https://bixbit.io/assets/docs/ru/investment_project.pdf.
4. Levin I., Dordopulo A., Fedorov A., Doronchenko Yu. High-Performance Reconfigurable Computer Systems with Immersion Cooling // Parallel Computational Technologies (PCT 2018). 12th International Conference (Rostov-on-Don, Russia, April 2-6, 2018). P. 62–76.
https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-3-319-99673-8_5.pdf.
5. Левин И.И., Доронченко Ю.И., Дордопуло А.И., Левина М.Г. Высокопроизводительная реконфигурируемая вычислительная система на основе ПЛИС XILINX ULTRASCALE+ // Международная конференция «XXII Харитоновские тематические научные чтения. 24-27 мая 2021 года»: Сборник научных трудов / Под ред. доктора физ.-мат. наук Р.М. Шагалиева. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2022. С. 284-296.