МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования   
**«Национальный исследовательский   
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»**

**(ННГУ)**

**Институт информационных технологий, математики и механики**

**Кафедра: МОСТ**

Направление подготовки: «Фундаментальная информатика и информационные технологии»

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

**Тема:**

**«Оптимальные коммуникационные взаимодействия в высокопроизводительных вычислениях»**

Допущена к защите Выполнил:

студент группы 381706-1м

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ Гладков Дмитрий Олегович

ученая. степень, ученое звание, ф.и.о.

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ подпись подпись

Научный руководитель:

к.т.н. Сысоев Александр Владимирович

ученая степень, ученое звание, ф.и.о.

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

подпись

Рецензент:

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

ученая степень, ученое звание

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

подпись

Нижний Новгород  
2018

Содержание

[Аннотация 3](#_Toc508228708)

[Введение 5](#_Toc508228709)

[Цель работы 9](#_Toc508228710)

[Обзор предметной области 11](#_Toc508228711)

[InfiniBand Architecture 14](#_Toc508228712)

[Элементы InfiniBand Architecture 15](#_Toc508228713)

[Уровни InfiniBand Architecture 18](#_Toc508228714)

[Коммуникационные модели InfiniBand Architecture 22](#_Toc508228715)

[Intel® Omni-Path Architecture 24](#_Toc508228716)

[Элементы Intel® Omni-Path Architecture 25](#_Toc508228717)

[Заключение 27](#_Toc508228718)

[Литература 28](#_Toc508228719)

Аннотация

За последние десятилетия были разработаны и представлены несколько высокоскоростных сетей, каждая из которых отличается от других показателями производительности, коммуникационными особенностями и возможностями. Однако инициативы по разработке новых сетевых решений сопровождаются увеличением расхождений в коммуникационных интерфейсах или “языках”, используемых каждой сетью. Соответственно, переносимость приложений на различных коммуникационных интерфейсах стала темой обширных исследований. В качестве основного средства для достижения переносимости приложений широко использовались такие модели программирования, как Sockets, Shared Memory, Message Passing Interface (MPI), Symmetric Hierarchical MEMory (SHMEM), Global Arrays (GA), Charm++ и другие.

В данной работе исследуются различные подходы к созданию унифицированного программного интерфейса доступа к сети, которая может быть использована различными параллельными программными моделями, такими как MPI, SHMEM и другими, в различных высокоскоростных сетевых средах (например, InfiniBand, Omni-Path Architecture, Ethernet, а также решения, основанные на Ethernet – iWARP, RoCE). В частности, исследования в данной работе посвящены:

1. анализу существующих программных моделей для параллельного программирования и их требований к коммуникационным интерфейсам;
2. рассмотрению существующих и широкоиспользуемых программных интерфейсов для работы с высокоскоростными сетями и возможности построения единой программной модели, способной обеспечить переносимость приложений;
3. анализу ограничений перспективных коммуникационных интерфейсов для мультисетевого программирования, рассмотрению и разработке возможностей для обеспечения наибольшей эффективности сетевого стека для параллельных программных моделей.

Введение

За последние несколько десятилетий достигнуты большие успехи в области компьютерных технологий. Компьютеры проникли во все области деятельности человека, будь то промышленность или исследования, и оказывают влияние на каждый аспект человеческой жизни. В начале 70-х гг XX века, когда обычные компьютеры набирали популярность среди исследователей, возникла необходимость в более мощных машинах, которые могли бы решить проблемы, слишком сложные для обычных компьютеров. Это осознание привело к развитию суперкомпьютеров – передовых и мощных машин, состоящих из нескольких обрабатывающих подсистем. Cray-1, разработанный Cray Research (ныне, Cray Inc.), был одним из таких мощных суперкомпьютеров. Развитие суперкомпьютеров и компьютерных технологий сопутствовало экспоненциальному росту требований приложений. Высокая стоимость проектирования, разработки и поддержки таких суперкомпьютеров для обеспечения высокой производительности приложений требовала, чтобы исследователи искали альтернативу этим суперкомпьютерам в виде кластерных систем (кластеров).

Кластеры состоят из недорогих коммерческих, готовых к использованию без дополнительных модификаций компьютеров (готовое коммерческое изделие, Commercial off-the-shell – COTS), соединенных между собой посредством сети. Кластеры становятся все более популярными в различных сферах применения, главным образом, из-за высокой производительности и относительно низкой стоимости. Такие системы теперь могут быть спроектированы для достижения различного уровня производительности из-за увеличения производительности процессоров, памяти и сетевых технологий.

Поскольку системы на основе кластеров опираются на возможности вычислительных узлов, взаимодействующих друг с другом по сети, характеристики сети (аппаратное обеспечение, а также связанное с ним программное обеспечение) являются важным компонентом в эффективности и масштабируемости кластеров. На рис. 1 показаны типичные среды, используемые параллельными и распределенными вычислительными приложениями. Среды могут варьироваться от локальных сетей внутри одного кластера до нескольких различных кластеров, подключенных через WAN или высокоскоростную магистральную сеть.

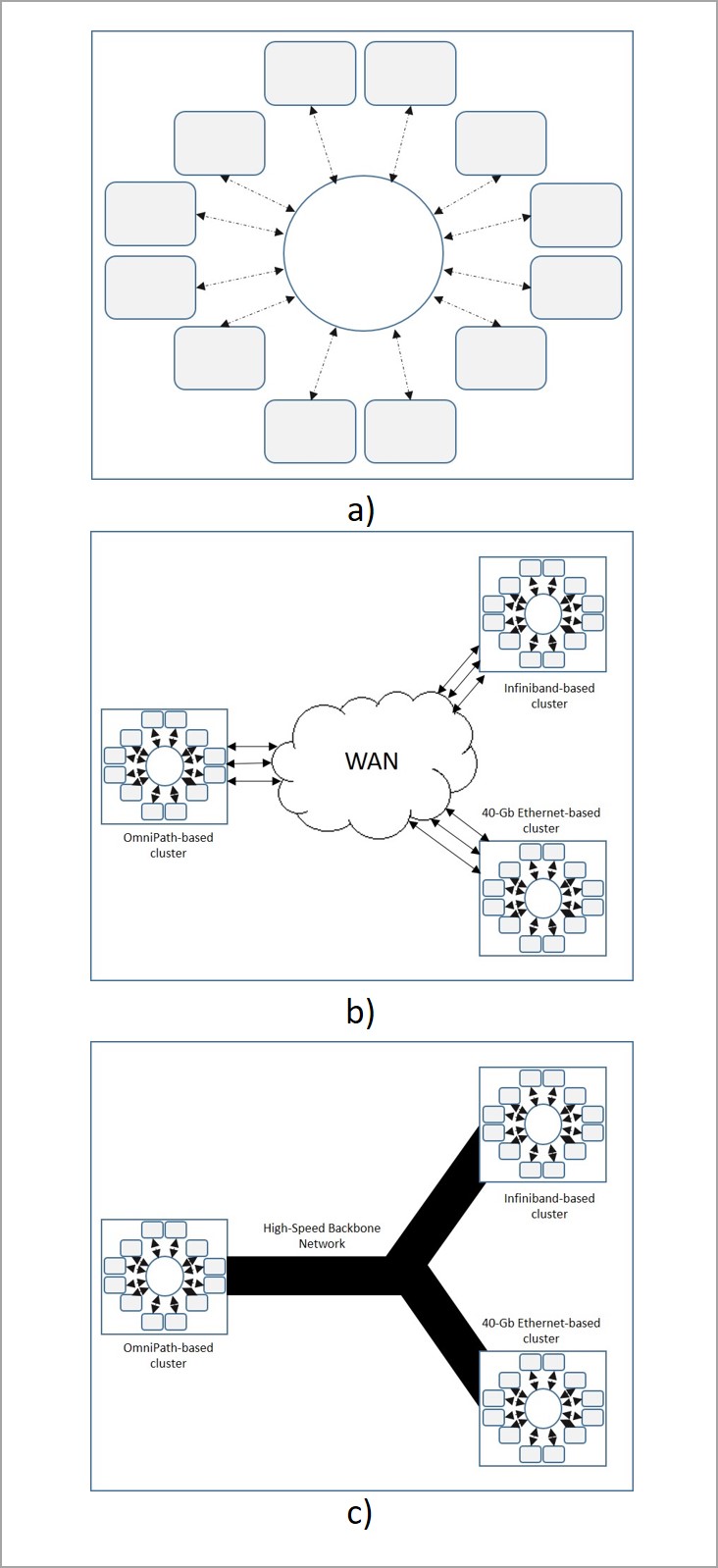


Рис. 1. Типичные коммуникационные среды для распределенных и параллельных приложений:

(a) Связь внутри локальной сети кластера;

(b) Межкластерная связь по WAN;

(c) Межкластерная связь по высокоскоростной магистральной сети.

За последние несколько лет на рынке был представлен ряд высокоскоростных сетей, включая 1/10/40/100-гигабитный Ethernet, InfiniBand, Myrinet, Omni-Path и т.д. С появлением таких сетей коммуникационные издержки в кластерных системах переходят от самой сети к сетевым протоколам на стороне отправителя или получателя. Сетевые протоколы предыдущего поколения, такие как TCP/IP, полагаются на ядро операционной системы для обработки сообщений. Это вызывает множество копирований и переключений контекста ядра на критическом пути обработки сообщения. Таким образом, накладные расходы на связь были высокими. В течение последних нескольких лет исследователи рассматривают альтернативы для увеличения производительности коммуникаций в кластерах посредством разработки протоколов низкого уровня с низкими задержками и высокой пропускной способностью, таких как FM и GM для Myrinet, EMP (Ethernet Message Passing) для Gigabit Ethernet и т.д. Чтобы стандартизировать эти решения, в конце 90-х годов была предложена архитектура виртуального интерфейса (VIA), но VIA не смог добиться успеха. В последние годы в индустрии была стандартизирована InfiniBand Architecture для разработки кластеров нового поколения. Все это приводит к сокращению отставания между функциональными возможностями физической сети и тем, что получают конечные пользователи.

Тем не менее, каждая новая сеть и протоколы пользовательского уровня предоставляют пользователю новый API (Application Programming Interface) или «язык» для взаимодействия с пользователем. Хотя эти новые API могут быть эффективно использованы для разработки новых приложений, они могут оказаться непригодными для уже существующих приложений, которые были разработаны несколько лет назад. Разработчики приложений нацелены на переносимость на различные будущие платформы и сети. Модель параллельного программирования MPI широко признана в качестве приемлемого подхода для достижений такой переносимости и является де-факто стандартом для научных приложений.

Для обеспечения переносимости основные реализации MPI основываются на широко используемом интерфейсе Sockets. Интерфейс Sockets является стандартом для написания сетевых приложений и поддерживается большим количеством современных системам, но не позволяет в полной мере использовать коммуникационные возможности сети. Каждая операция с пользовательскими данными несет значительные накладные расходы для обеспечения надежности, правильной последовательности, которые перекрывают низкие затраты сетевого интерфейса.

Цель работы

Имея ввиду поставленные проблемы интерфейса Sockets для построения высокоскоростных коммуникаций между объектами сети, которые не позволяют раскрыть полностью возможности сетевого оборудования, и проблемы специализированных API, разработанных для конкретных сетей, которые ограничивают переносимость приложений, в данном дипломном проекте предлагается рассмотреть перспективные подходы к созданию унифицированного интерфейса для различных параллельных технологий со следующими возможностями:

1. Позволять приложениям быть переносимыми на разные высокоскоростные сети без каких-либо изменений в программном продукте, имея возможность извлекать наилучшую производительность из сети.
2. Иметь возможность извлекать выгоду от предоставляемых функциональных способностей сетей, не ограничивая производительность и переносимость при переходе на другие сетевые технологии.
3. Обеспечивать надежность передачи данных, высокую масштабируемость приложений.

Цели данной работы состоят в том, чтобы:

1. Исследовать Open Fabric Interface (OFI), который предоставляет высокопроизводительное, многофункциональное, переносимое промежуточное ПО для существующих параллельных моделей, используемых для высокопроизводительных вычислений, таких как MPI, GlobalArrays, SHMEM и другие.
2. Рассмотреть и предложить возможные решения для текущих недостающих функциональных возможностей OFI, которые мешают обеспечивать низкие задержки, высокую пропускную способность, требуемую масштабируемость на известных сетевых технологиях.
3. Провести исследования, экспериментальные доказательства состоятельности и возможности дальнейшего применения предложенных решений на примере широко используемого программного интерфейса программирования высокопроизводительных приложений MPI.

Обзор предметной области

Последние десятки лет производительность вычислительных узлов увеличивается в два раза каждые 18 месяцев. Как отмечалось ранее, современные высокопроизводительные системы создаются путем объединения вычислительных узлов посредством сетевых интерфейсов в кластерные системы. Кластерные системы зависят от вычислительных мощностей узлов и производительности сети. Таким образом развитие сетевых интерфейсов и ПО, поставляемого вместе с сетевыми интерфейсами, влияет на эффективность кластерных систем.

В данной работе основные исследования связаны с MPI, поскольку большинство параллельных программ, разработанных для кластерных систем, использует именно эту технологию.

Стандарт MPI определяет четыре коммуникационных режима:

* Стандартный (Standard). В этом режиме решение о том, будет ли исходящее сообщение буферизовано или нет, принимает MРI. MРI может буферизовать исходящее сообщение. В таком случае операция посылки может завершиться до того, как будет вызван соответствующий прием. С другой стороны, буферное пространство может отсутствовать или MРI может отказаться от буферизации исходящего сообщения из-за ухудшения характеристик обмена. В этом случае операция отправки не будет завершена, пока данные не будут перемещены в процесс-получатель. Следовательно, в стандартном режиме посылка может стартовать вне зависимости от того, выполнен ли соответствующий прием. Она может быть завершена до окончания приема. Посылка в стандартном режиме является нелокальной операцией: она может зависеть от условий приема.
* Буферизованный (Buffered). Данный режим операции посылки может стартовать вне зависимости от того, инициирован ли соответствующий прием. Однако, в отличие от стандартной посылки, эта операция является локальной и ее завершение не зависит от обстоятельств приема. Следовательно, если посылка выполнена и никакого соответствующего приема не инициировано, тогда MPI обязан буферизовать исходящее сообщение, чтобы позволить завершиться соответствующему вызову операции отправки. Если не имеется достаточного объема буферного пространства, возникнет ошибка. Объем буферного пространства задается пользователем. Для того, чтобы буферизованный режим был эффективным, может потребоваться распределение буферов пользователем.
* Синхронный (Synchronous). Посылка, которая использует синхронный режим, может стартовать вне зависимости от того, был ли начат соответствующий прием. Однако, посылка будет завершена успешно, только если соответствующая операция приема стартовала. Следовательно, завершение синхронной передачи не только указывает, что буфер отправителя может быть повторно использован, но также и отмечает, что получатель достиг определенной точки в своей работе, а именно, что он начал выполнение приема. Если и посылка, и прием являются блокирующими операциями, тогда использование синхронного режима обеспечивает синхронную коммуникационную семантику: посылка не завершается на любой стороне обмена, пока оба процесса не выполнят синхронизацию (так называемый, рандеву) в процессе операции обмена. Выполнение обмена в этом режиме является нелокальным.
* По готовности (Ready). Посылка, которая использует режим обмена по готовности, может быть запущена только тогда, когда прием уже инициирован. В противном случае операция является ошибочной и результат будет неопределенным. На некоторых системах обмен по готовности позволяет устранить необходимость в синхронизации (рандеву), что улучшает характеристики обмена. Завершение операции посылки не зависит от состояния приема и в основном указывает, что буфер посылки может быть повторно использован. Операция посылки, которая использует режим по готовности, имеет ту же семантику, как и стандартная или синхронная передача. Это означает, что отправитель обеспечивает систему дополнительной информацией (а именно, что прием уже инициирован), которая может уменьшить накладные расходы.

Для разработки этих четырех коммуникационных режимов, обычно используются два внутренних протокола, Eager и Rendezvous. Эти протоколы обрабатываются механизмом процессинга (компонента в реализации MPI – Progress engine). Реализация Eager протокола обеспечивает передачу сообщений на удаленную (принимающую) сторону независимо от ее состояния. В Rendezvous протоколе, принимающая и отправляющая стороны участвуют в двухстороннем “рукопожатии” (handshake) через специальные сервисные сообщения перед тем, как данные будут переданы на принимающую сторону. Обычно Eager протокол используется для маленьких сообщений (< 16 килобайт), а Rendezvous – для больших.

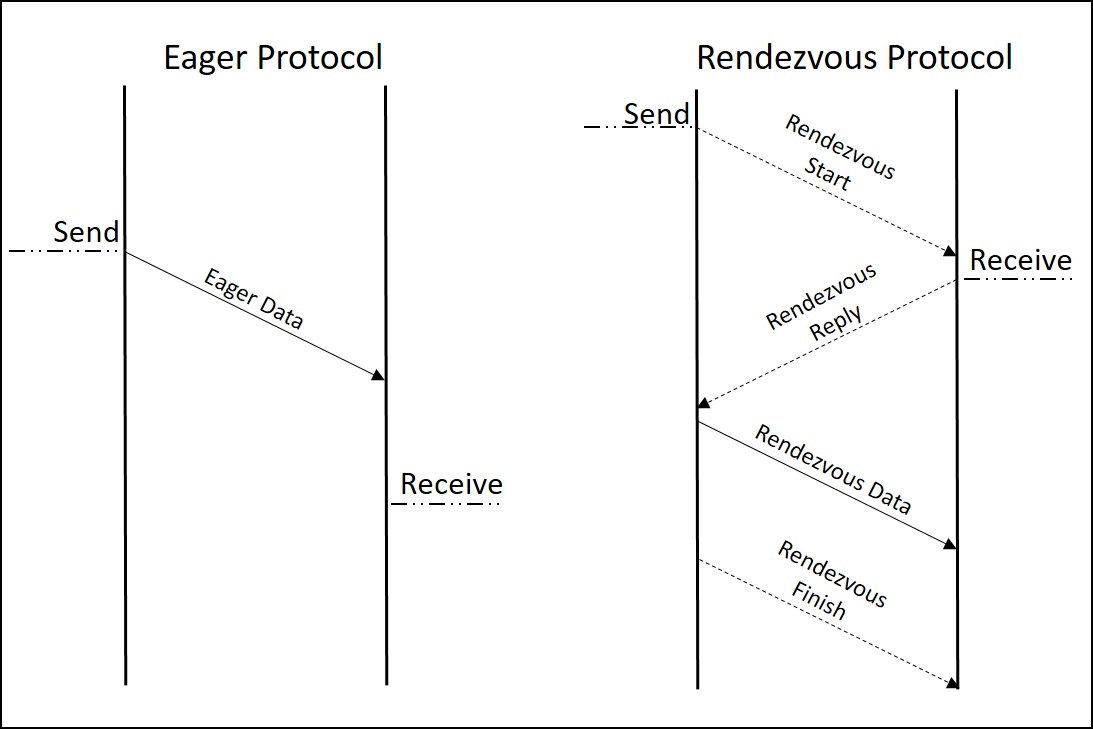


Рис. 2. Типичная реализация Eager и Rendezvous протоколов.

При передаче больших буферов с данными намного оптимальнее не выполнять дополнительных копирований данных, возникающих при использовании TCP/IP стека, который копирует пользовательские данные в ядро операционной системы и обратно.

InfiniBand Architecture

InfiniBand Architecture (IBA) была предложена как следующее поколение для I/O и межпроцессных взаимодействий. InfiniBand [1] становится все более популярным для кластерных вычислений, благодаря открытому стандарту и высокой производительности. До недавнего времени параллельные технологии, такие как MPI, разрабатывались поверх Ethernet, с использованием широко используемого TCP/IP стека. Но с развитием IBA, стали появляться MPI реализации, которые способны работать поверх InfiniBand для обеспечения высокой производительности взаимодействия процессов, развернутых на разных узлах.

InfiniBand определяет сетевую фабрику для взаимодействия вычислительных и I/O узлов. Она предоставляет сетевую инфраструктуру и инфраструктуру управления для обеспечения межпроцессорного взаимодействия и I/O. В InfiniBand сети вычислительные узлы и I/O узлы объединяются в фабрику посредством Channel Adapters (CA) – это конечные узлы в InfiniBand подсети, задача которых состоит в создании и потреблении трафика. Host Channel Adapter (HCA) – это CA, которые располагаются на вычислительных узлах, выполняет роль транспортного уровня и поддерживает Verbs интерфейс.

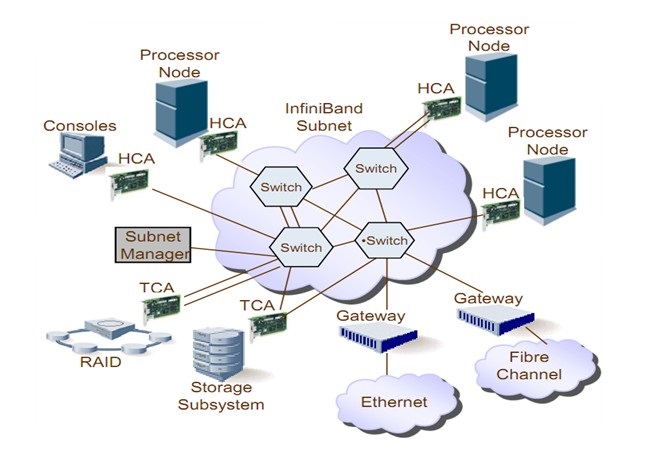


Рис. 3. Пример организации InfiniBand подсети.

Элементы InfiniBand Architecture

InfiniBand Architecture определяет несколько устройств для построения коммуникаций: канальный адаптер (channel adapter), коммутатор (switch), маршрутизатор (router) и менеджер подсети (subnet manager). Внутри подсети должен быть по-крайней мере один канальный адаптер для каждого конечного узла и менеджер подсети, который устанавливает и поддерживает каналы. Все канальные адаптеры и коммутаторы должны содержать Subnet Management Agent (SMA), который требуется для обработки взаимодействий с менеджером подсети.

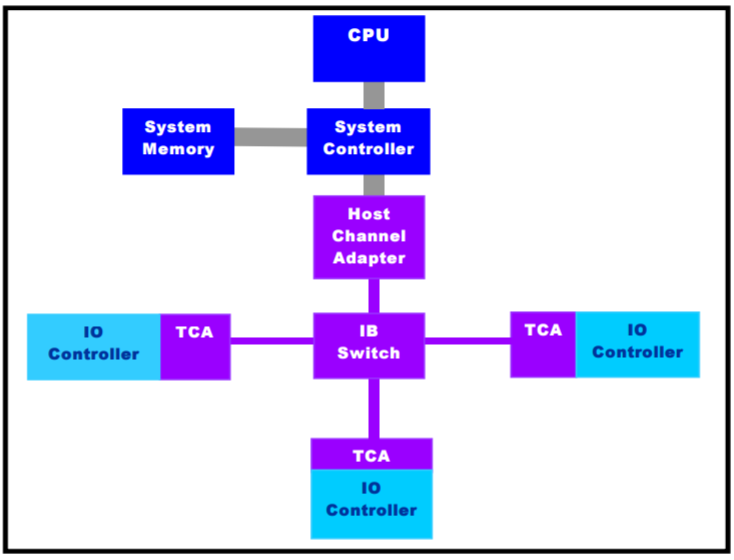


Рис 4. Элементы InfiniBand Architecture.

InfiniBand Architecture определяет следующие элементы:

* Канальные адаптеры (Channel Adapters – CA)

Канальные адаптеры соединяет InfiniBand к другим устройствам. Имеется два типа канальных адаптеров, Host Channel Adapter (HCA) и Target Channel Adapter (TCA).

HCA предоставляет интерфейс конечному устройству и поддерживает все программные Verbs, определенные InfiniBand Architecture. Verbs – это абстрактное представление, которая определяет требуемый интерфейс между ПО, предоставляемым клиенту, и функциональностью HCA. Verbs не определяют API для операционных систем, но определяет операции для производителей ОС для разработки, способного к использованию, API.

TCA предоставляет соединение к I/O устройствам из InfiniBand c некоторым необходимым подмножетсвом функциональностей из HCA для специфичных операций для каждого устройства.

* Коммутаторы (Switch)

Коммутаторы – это фундаментальные компоненты InfiniBand фабрики. Коммутатор содержит более чем один InfiniBand порт и перенаправляет пакеты из одного его порта в другой, основываясь на значении LID, содержащегося внутри LRH. Кроме сервисных пакетов, коммутаторы не потребляют и не генерируют пакетов. Как и CAs, требуется, чтобы SMA был реализован в коммутаторах, чтобы отвечать на пакеты от менеджера подсети (так называемые Subnet Management Packets). Коммутаторы могут быть сконфигурированы, чтобы перенаправлять одноадрессные (unicast) пакеты (к одному получателю) или многоадрессные (multicast) пакеты (адресуемые к нескольким устройствам).

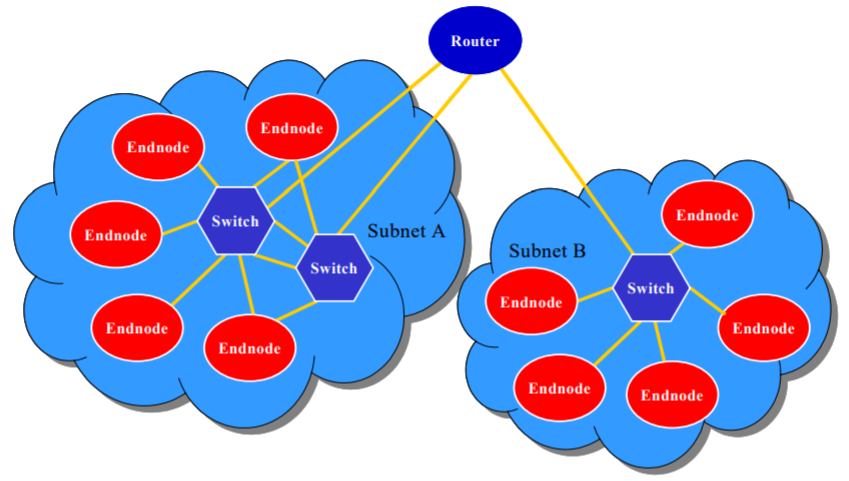


Рис 5. Связь компонент между двумя подсетями и внутри подсетей в InfiniBand Architecture.

* Маршрутизатор (Router)

InfiniBand маршрутизаторы перенаправляют пакеты из одной подсети в другую подсеть без потребления или генерации дополнительных пакетов. В отличие от коммутаторов, маршрутизатор читает Global Route Header (GRH), чтобы перенаправить пакет, основываясь на его IPv6 адресе Сетевого уровня. Маршрутизатор пересобирает каждый пакет с правильным LID следующей подсети.

* Менеджер подсети (Subnet Manager)

Менеджер подсети конфигурирует локальную подсеть и обеспечивает ее последующую работоспособность. В одной подсети обязательно должен быть по крайней мере один менеджер подсети, чтобы управлять всеми коммутаторами и маршрутизаторами и для реконфигурации подсети, когда поднимаются новые каналы или текущие каналы отключаются. Менеджер подсети может быть внутри любого устройства подсети. Менеджер подсети осуществляет связь между устройствами в подсети через SMA, который требуется для каждой компоненты InfiniBand.

Имеется возможность содержать несколько менеджеров подсети в подсети, но только один из них должен быть активным. Неактивный менеджер подсети (Standby SM) копирует информацию о пересылках активного менеджера подсети и проверяет, что активный менеджер подсети является работоспособным. Если активный менеджер подсети становится неработоспособным, резервный менеджер подсети перенимает ответственность обеспечения работоспособности фабрики внутри подсети.

Уровни InfiniBand Architecture

InfiniBand Architecture разбивается на несколько уровней, где каждый уровень работает независимо от других. Как показано на рисунке 4, InfiniBand разбивается на следующие уровни:

1. Физический уровень

InfiniBand является комплексной архитектурой, которая определяет оба электрические и механические характеристики для системы. Они включают кабели и емкости для волоконных и медных сред, разъемы для соединений и характеристики «горячей замены».

InfiniBand определяет три скоростных канала на физическом уровне, 1X, 4X, 12X. Каждый канал – это четырехпроводное последовательное дифференциальное соединение (два провода в каждом направлении), которое предоставляет полнодуплексное соединение со скоростью 2,5 Гбит/с.

1. Канальный уровень

Канальный уровень (совместно с транспортным уровнем) является основой InfiniBand Architecture. Канальный уровень выполняет функции компоновки пакетов, канальные операции типа точа-точка и транспортировку пакетов внутри локальной подсети.

* Пакеты

Имеется два типа пакета, определенные для канального уровня, пакеты управления и данных. Пакеты управления используются для конфигурации коммуникационных каналов и поддержки сервисов канального уровня. Пакеты данных могут транспортировать до 4 Кбайт полезных данных (payload).

* Транспортировка пакетов внутри одной подсети (Switching)
* QoS (Quality of Service)
* Управление потоком на кредитной основе (Credit Based Flow Control)
* Целостность данных

1. Сетевой уровень

Сетевой уровень обрабатывает маршрутизацию пакетов с одной подсети до другой (внутри одной подсети, сетевой уровень не требуется). Отправляемые между подсетями, пакеты содержат Global Route Header (GRH). GRH содержит 128 бит IPv6 адреса отправителя и получателя пакета. Пакета передаются между подсетями с помощью роутера, основываясь на 64 битном значении глобального уникального ID (Global Unique ID - GUID). Роутеры изменяют LRH (Local Route Header) на правильный локальный адрес внутри каждой подсети. Таким образом, последний роутер изменяет LID в LRH на LID удаленного порта. Внутри сетевого уровня, InfiniBand пакеты не требуют информации сетевого уровня и дополнительного заголовка, когда пакеты пересылается внутри одной подсети.

1. Транспортный уровень

Транспортный уровень требуется для доставки пакетов в правильном порядке, разбиение пакета на части, мультиплексирование канала (несколько логических соединений, основанных на одном физическом) и предоставление различных видов транспорта(reliable connection (RC), reliable datagram (RD), unreliable connection (UC), unreliable datagram (UD), raw datagram (RD)). Транспортный уровень обрабатывает сегментацию данных на стороне отправителя и восстановление на стороне получателя. Основываясь на Maximum Transfer Unit (MTU) пути, транспортный уровень разбивает данные на пакеты правильных размеров. Получатель повторно собирает пакет, основываясь на Base Transport Header (BTH), который содержит идентификатор удаленной QP (Queue Pair) и последовательный номер пакета. Получатель подтверждает пакеты и отправитель, получая эти подтверждения, обновляет очередь готовности (Completion Queue - CQ), записывая статус выполненной операции. InfiniBand Architecture предлагает значительное улучшение для транспортного уровня: все функциональности реализованы на аппаратном уровне. InfiniBand определяет несколько транспортных сервисов надежности отправки данных. Таблица 1 описывает каждый из поддерживаемых сервисов.

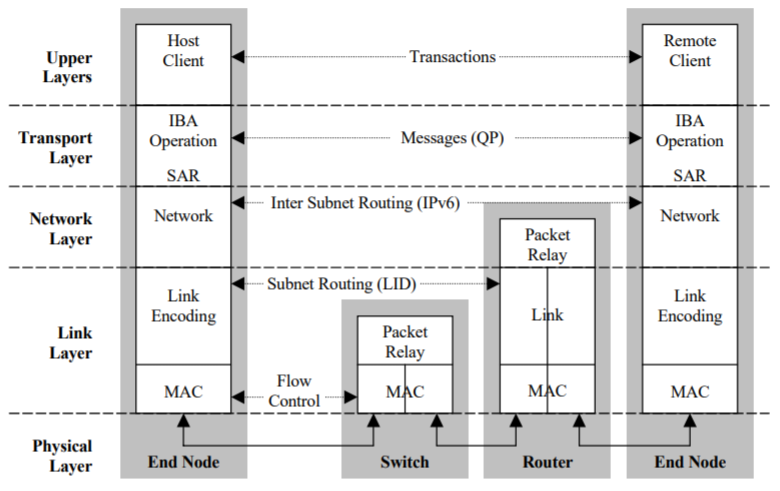


Рис 4. Уровни InfiniBand Architecture.

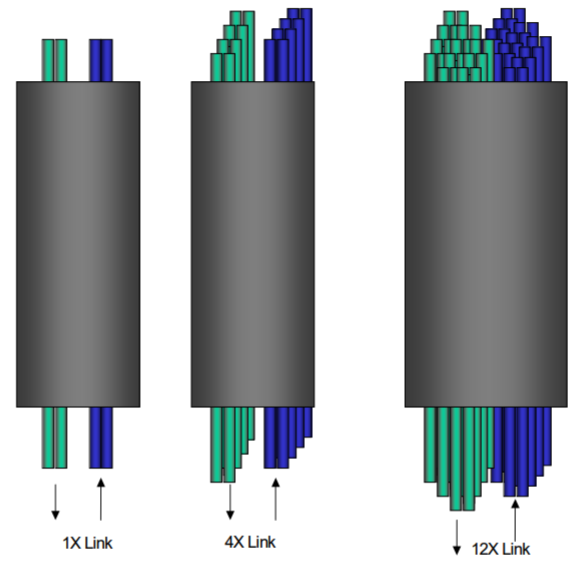


Рис 5. Три скоростных канала, определенных на физическом канале InfiniBand Architecture.

|  |  |
| --- | --- |
| Тип Сервиса | Описание |
| Reliable Connection | Подтверждающий пакеты, ориентированный на соединения |
| Reliable Datagram | Подтверждающий пакеты, мультиплексируемый |
| Unreliable Connection | Неподтверждающий пакеты, ориентированный на соединения |
| Unreliable Datagram | Неподтверждающий пакеты, неориентированный на соединения |
| Raw Datagram | Неподтверждающий пакеты, неориентированный на соединения |

Таблица 1. Типы сервисов транспортного уровня InfiniBand Architecture.

Коммуникационные модели InfiniBand Architecture

Основной целью InfiniBand является уменьшенье накладных расходов системы на обработку сетевых данных посредством уменьшения количества копий, ассоциированных с передачей сообщений и невовлечения ядра операционной системы в критический путь отправки сообщения. Это достигается путем предоставления приложениям пользовательского уровня прямого, защищенного доступа к HCA.

InfiniBand Architecture поддерживает два типа коммуникационных семантик: канальную семантику (Send-Receive модель) и семантику доступа к памяти (RDMA модель).

В канальной семантике, каждый запрос на отправку имеет соответствующий запрос на прием на удаленной стороне. Такой подход отражает один-к-одному соответствие между каждой операцией отправки и приема. В семантике доступа к памяти, используются Remote Direct Memory Access (RDMA) операции. Эти операции неявны для удаленной стороны, так как они не требуют, чтобы дескриптор операции приема был создан. Имеются два типа RDMA операций: RDMA Write и RDMA Read. В случае RDMA Write операций, инициатор напрямую пишет данные в пользовательский буфер, выделенный на удаленном узле. По аналогии, в случае RDMA Read операции, инициатор читает данные из пользовательского буфера, выделенного на удаленном узле.

InfiniBand был разработана с учетом VIA (Virtual Interface Architecture) архитектуры. VIA – это распределенная технология передачи сообщений, которая является аппаратно-независимой и совместима с текущими сетевыми высокоскоростными картами, предаставляет API, который может предоставить высокоскоростную, с низкими задержками связь между коммуницирующими сторонами в кластерных приложениях.

InfiniBand забирает обязанности по контролю траффика из программной части клиента с помощью использования исполняемых очередей. Эти очереди, называемые Work Queues (WQ) создаются клиентом и передаются в InfiniBand для последующего управления. Для каждого коммуникационного канала между устройствами назначается Work Queue Pair (WQP – очередь приема и отправки) для каждой конечной стороны. Клиент добавляет транзакцию в WQ (транзакция называется Work Queue Entry - WQE), которая обрабатывается канальным адаптером из очереди отправки и отправляется на удаленное устройство. Когда удаленное устройство отвечает, канальный адаптер возвращает статус клиенту, через очередь готовности (CQ - Completion Queue).

Клиенты могут добавлять несколько WQEs, а канальные адаптеры буду обрабатывать каждый из этих запросов. Затем канальные адаптеры генерируют CQE (Completion Queue Entry), чтобы предоставить статус для каждой WQE в правильном приоритезированном порядке. Это позволяет клиенту продолжать работу с другими активностями, пока транзакция обрабатывается.

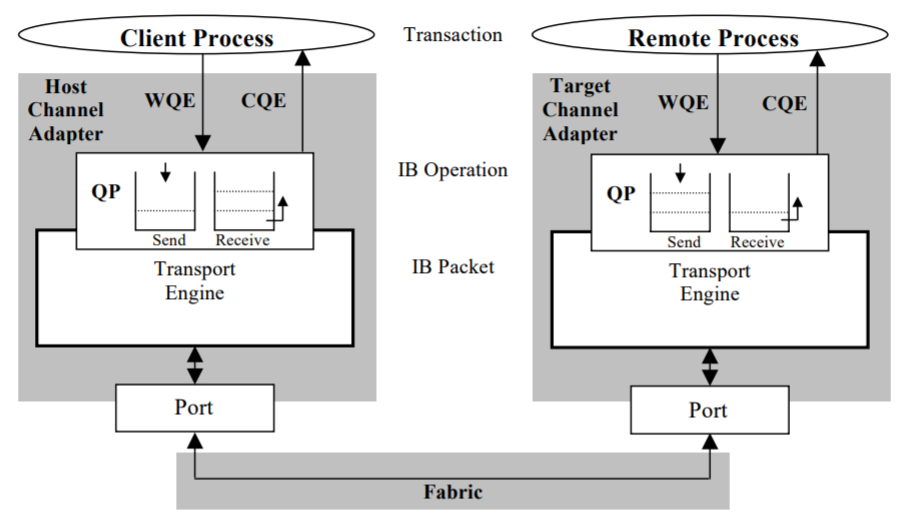


Рис 6. Коммникационный стек InfiniBand.

Intel® Omni-Path Architecture

Intel® Omni-Path Architecture (OPA) представляет собой новое поколение сетевой фабрики с наследием от Intel® TrueScale продуктовой линейки, основанной на InfiniBand Architecture, и Cray Aries высокоскоростных сетевых карт. Intel OPA разработана для интеграции компонент фабрики с CPU и компонентами памяти, что позволяет обеспечивать низкие задержки и высокую пропускную способность, которые требуются для датацентров следующего поколения. Интеграция фабрики использует преимущества подсистем обработки, кэширования и памяти, а также локальность инфраструктуры связи, обеспечивая быстрое внедрение аппаратных нововведений.

Первые реализации продуктов, основанных на Intel® OPA, фокусируются на суперкомпьютерные технологии, т.е. на выскопроизводительные вычислительные среды. Однако, Intel® OPA обычно применяется к классам датацентров, требующих масштабируемых и тесно связанных ресурсов CPU, памяти и хранилищей данных.

Intel® OPA определяет 1 и 2 уровни модели OSI, которые обеспечивают сетевое соединение между элементами для энергоэффективных суперкомпьютерых систем (к примеру, основанные на семействе продуктов Intel® Xeon Phi), критически важных корпоративных компьютерных систем (к примеру, основанные на Intel® Xeon™ процессорах) и недорогих серверов для датацентров (к примеру, использующие Intel® Atom™ процессоры).

Чтобы обеспечить максимальную масштабируемость систем, как в HPC, так и для датацентров, существенно повышена надежность фабрики путем объединения механизмов повторной отправки на канальном уровне (обычно используемых в HPC фабриках) и end-to-end потвторной отправкой (которые используются в традиционных сетях). Сетевая адресая 2 уровня модели OSI расширена для учета систем с более чем 10 миллионов конечных точек соединения (endpoint), что позволяет использовать выскоую масштабируемость для датацентров на годы вперед. Чтобы обеспечить поддержку более широкого числа тополгий, Intel® OPA предоставляет механизмы для пакетов для изменения виртульных полос (virtual lanes - VLs) по мере и прохождения через фабрику. В дополнение, высокоприоритетные пакеты способны удерживать пакеты с меньшим приоритетов для обеспечения наиболее предсказуемой производительности системы, в особенности при одновременном запуске нескольких приложений. Также предоставляется механизм разделения фабрики для изоляции трафика между запускаемыми задачами и между пользователями.

Элементы Intel® Omni-Path Architecture

Intel® OPA состоит определяет следующие коммуникационные элементы:

* Host Fabric Interface (HFI)

Каждый узел соединяется с фабриков через HFI. HFI – это мост между процессором на узле и фабрикой. Минимально, HFI состоит из логики, которая необходима, чтобы реализовать физический и канальный уровени архитектуры фабрики, так что узел может быть присоединен к фабрике и способен обмениваться пакетами с другими серверами или устройствами. HFI может включать специализированную логику для исполнения и ускорения более высокоуровневых протоколов. HFI должен поддерживать логику, нгеобходимую, чтобы отвечать на сообщения от сетевых компонент управления.

* Коммутатор (Switch)

Коммутаторы Intel® OPA являются устройствами 2-го уровня OSI модели и действуют как механизм перенаправления внутри одиночной Intel® OPA фабрики. Intel® OPA отвечают за QoS (Quality of Services) функциональности, такие как адаптивная маршрутизация (adaptive routing) и балансировка нагрузки (load balancing), а также реализуют Intel® OPA функциональности по управлению перегрузками (congestion management). Коммутаторы централизованно управляются ПО менеджера фабрики (Fabric Manager - FM) и каждый коммутатор включает Management Agent (MA) для обработки транзакций управления. Централизованное управление означает, что конфигурация каждого коммутатора настраивается менеджером фабрики, что вклоючает в себя настройку таблиц пересылки для поддержки специфичных топологий фабрики, конфигурирование QoS параметров и предоставление альтернативных маршрутов для адаптивной маршрутизации. Все Intel® OPA коммутаторы должны содержать MA для поддержки коммуникаций с Intel® OPA FM.

* Менеджер фабрики (Fabric Manager)

Intel® OPA фабрика централизованно управляется и поддерживает модель избыточности (redundant) для менеджеров фабрики, которые управляют каждым устройством (то есть HFI, коммутаторыми) в фабрике через MA, которые ассоциируются с теми устройствами. Основная FM в модели избыточности выбирается во время процесса инициализации фабрики. Основной FM отвечает за:

1. Обнаружение топологии фабрики;
2. Установление индентификаторов фабрики и другие значения, необходимые для функционирования фабрики;
3. Создание и заполнение таблицы перессылок коммутатора;
4. Поддержание базы данных Fabric Management;
5. Мониторинг использование фабрики, производительности и коэффициент ошибок.

Фабрика управляется путем отправки пакетов управления через фабрику. Эти пакеты являются внутриполосными, т.е. отправляются через те же самые физические среды, как и обычные сетевые пакеты, используя специально отведенные буфферы на специальной VL (VL15). Эта специальная VL для управления может быть сконфигурирована, чтобы функционировать с вклоюченным или выключенным управлением потока. Без управления потока, пакеты управления не будут обработаны, если ресурсы очереди не доступны на порту. Двухсторонние протоколы, обеспечивающие надежность передачи данных, используются для обнаружения потерянных пакетов.

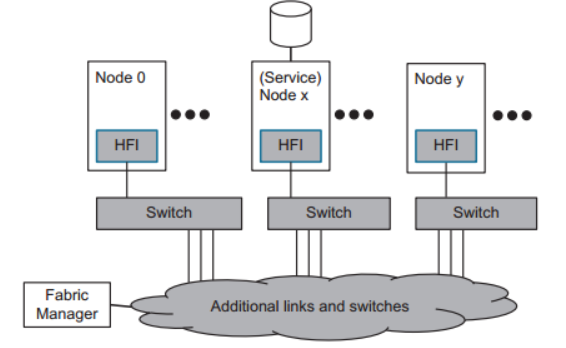


Рис 7. Элементы Intel® Omni-Path Architecture.

Уровни Intel® Omni-Path Architecture

Omni-Path Architecture разбивается на несколько уровней, где каждый уровень работает независимо от других. С сетевой точки зрения Omni-Path достаточно точно вписывается в эталонную модель OSI с одним небольшим нюансом: в описании протокола используется термин «полуторный уровень», отвечающий за надежную доставку объектов второго уровня, контроль потока и соединения. В ведении второго уровня остается адресация, коммутация и выделение ресурсов.

1. Физический уровень (Layer 1)

Использует существующие Ethernet и InfiniBand стандарты физического уровня.

1. Уровень канальной передачи (Layer 1.5)

Уровень канальной передачи (LT, Link Transfer) служит интерфейсов между Физическим и Канальным уровнями. LT уровень сегментирует пакеты фабрики (FP, Fabric Packets) на 64-битные сегменты, к ним просоединяется бит типа (65-ый бит) и получается, так называемый, флит (FLIT, Flow Control Digits). Затем 16 FLITs группируются в пакеты канальной передачи (LTP, Link Transfer Packet) для обеспечения надежности транспортировки 16 FLITs, на которые был разбит FP, и контрольной информации по каналу. Каждый LTP пакет защищен с помощью канального LCRC (Link Cyclic Redundancy Check), и выполняется повторная отправка LTP пакетов, когда присходят ошибки. LTP пакет может содержать FLITs с нескольких FP. Каждый LTP пакет может быть отправлен по одной из четерех полос, которые предоставляются Физическим уровнем.

Контрольные (Control) FLITs используются для управления протоколом повторной отправки. Командные (Command) FLITs используются для возврата кредитов управления потока VL передающей стороне.

FP FLITs и Командные FLITs могут быть отправлены в одном LTP пакете. Контрольные FLITs могут быть отправлены только в специальных нулевых LTP пакетах и не являются частью какого-либо пакета фабрики. Холостые (Idle) FLITs вставляются в постоянно отправляемые LTP пакеты, когда нет, доступных для отправки, FP FLITs.

LTP пакеты содержат 16 FLITs и, ассоциируемые с каждым FLIT, биты типа для отправки по каналу. В дополнении к 16 FLITs каждый LTP имеет два бита кредита канала VL и 14 битов LCRC, который охватывает весь контент всего LTP пакета. Общий размер LTP пакета составляет 128 байт полезной нагрузки (16 FLITs) и дополнительные 4 байта (16 битов типа для каждого FLIT, 14-битный CRC и 2 бита для кредита VL), что обеспечивает эффективность передачи данных, равную 64/66. Имеется два типа LTP пакетов. Надежные LTP пакеты содержат FP FLITs и VL кредиты вернувшихся FLITs и хранятся в буффере повторной отправки в течение периода времени, который достаточно длинный, чтобы гарантировать, что отсутствие запроса повторной отправки означает, что он был успешно принят удаленной стороной. Нулевые LTPs не потребляют буффер повторной отправки и никогда не передаются повторно. Они различаются с помощью Контрольного FLIT, который задает конкретную операцию в протоколе повторной передачи.

Механизмы, реализованные на Уровне 1.5:

1. Intel® Omni-Path Packet Integrity Protection (PIP) - Защита целостности пакетов

Intel® Omni-Path PIP используется для улучшения надежности передачи данных по каналу. Когда возникает ошибка CRC проверки, запрос на повторную отправку, содержащий последовательный номер LTP пакета с ошибкой, отправляется на удаленную сторону, информируя ее о повторной отправке указанного LTP пакета с ошибкой и всех последующих LTP пакетов. Принимающая сторона отбрасывает все LTP пакеты, пока не начнется прием пакетов повторной передачи, который указан в нулевом LTP пакете, который запрашивает повторную передачу. Буфера повторной отправки используются для предоставления достаточного по размеру временного хранилища, покрытить время прохождения пакета в оба конца (round trip time) кабеля максимальной длины. В протоколе повторной передачи используются подразумеваемые подтверждения для уменьшения накладных расходов. После инициализации канала, отправитель посылает спецаильный маркер о повторной отправе в нулевой LTP пакете, который означает, что посылка надеждых LTP пакетов начнется немедленно. В ответ, удаленная сторона посылает специальный одноразовый round-trip маркер в нулевом LTP, чтобы сообщить отправителю о завершении приема первого round-trip. До тех пора пока запрос о повторной отправке не получен, все пакеты считаются успешно принятыми удаленной стороной. Протокол поддреживает время полного прохождение пакета в оба конца (round trip time), который превышает глубину буфера повторной отправки, путем отправки пустых нулевых LTP, когда буфер заполнен. Врея полного прохождения пакета в оба конца (round trip time) устанавливается путем посдчета LTP пакетов во время ожидания начального round-trip маркера.

1. Intel® Omni-Path Traffic Flow Optimization (TFO) and Interleave – Оптимизация контроля трафика и чередование

Link Transfer Layer разрешает, чтобы FLITs из различных пакетов на различных VLs чередовались внутри LTP пакета и между LTP пакетами, когда они отправляются по каналу. Это дает более лучшее использование канала, меньшие задержки для высокоприоритетных пакетов. FP, использующий высокоприоритетный VL и поступающий на точку выхода канала, может вытеснить незавершенный FP, чтобы минимизировать задержку приоритетного FP, то есть, незавершенная передача FP приостанавливается, чтобы обеспечить передачу пакета с более высоким приоритетом. Как только FP с более высоким приоритетом будет передан, передача приостоновленного пакета возобновляется. FP с низким приоритетом может быть выгружен несколько в точке выхода канала. Точка выхода канала контролирует общее время, в течение которого FP с низким приоритетом задерживается путем приоритетного прерывания несколькими высокоприоритетными FPs, и позволяет выполнить FP с низким приоритетом, если превышен лимит, если превышен лимит, настроенный менеджером фабрики. Пузыри в FP определяются как отсуствие доступных FLITs для незавершенного FP в точке выхода канала. Если посылка FP по какой-либо причине прерывается пузырями, FLITs из второго пакета может использовать канал вместо распространения Idles на канале. В этом случае замещенный пакет может иметь одинаковую или более низкую приоритетность. Когда FLITs снова доступны для первого пакета, точка выхода канала может вернуться к передаче первого пакета или дождаться завершения второго пакета.

1. Virtual Lane Credit Management – Управление кредитам вирутальных каналов

Сторона передачи канала информируется об общем пространстве физического буфера (информируемый размер - в FLITs) на удаленной стороне как часть процесса инициализации канала. Сторона приема рассматривает пространство как единый пул для всех VL. Передающая сторона управляет этим пространством на основе VL. В дополнение к одному VL управления поддерживается до 31 FP VL. Для каждого VL поддерживается выделенное пространство, а также общее пространство для всех VL. Соотношение фиксированного к общему пространству и выделенным размером пространства VL может быть динамически изменено менеджером фабрики. Для каждого VL подтверждения возвращаются в единицах по 8 FLITs как только они удаляются из пула буферов для конкретного VL. Эти подтверждения перемещаются по каналу в 2-битном поле VL-кредитования в каждом LTP. 2 бита из 4 последовательных LTP объединяются в 8-битное поле, которое используется для указания VL и номер 8 возвращаемых FLITs. Существуют также дополнительные Command FLITs, которые могут использоваться для возврата занчения кредитов VL по каналу. 2-битное поле кредита VL LTP и Command FLITs передаются во время последовательности повторных передач, так что инкрементные значения кредита VL не теряются, когда возникают ошибки канала передачи.

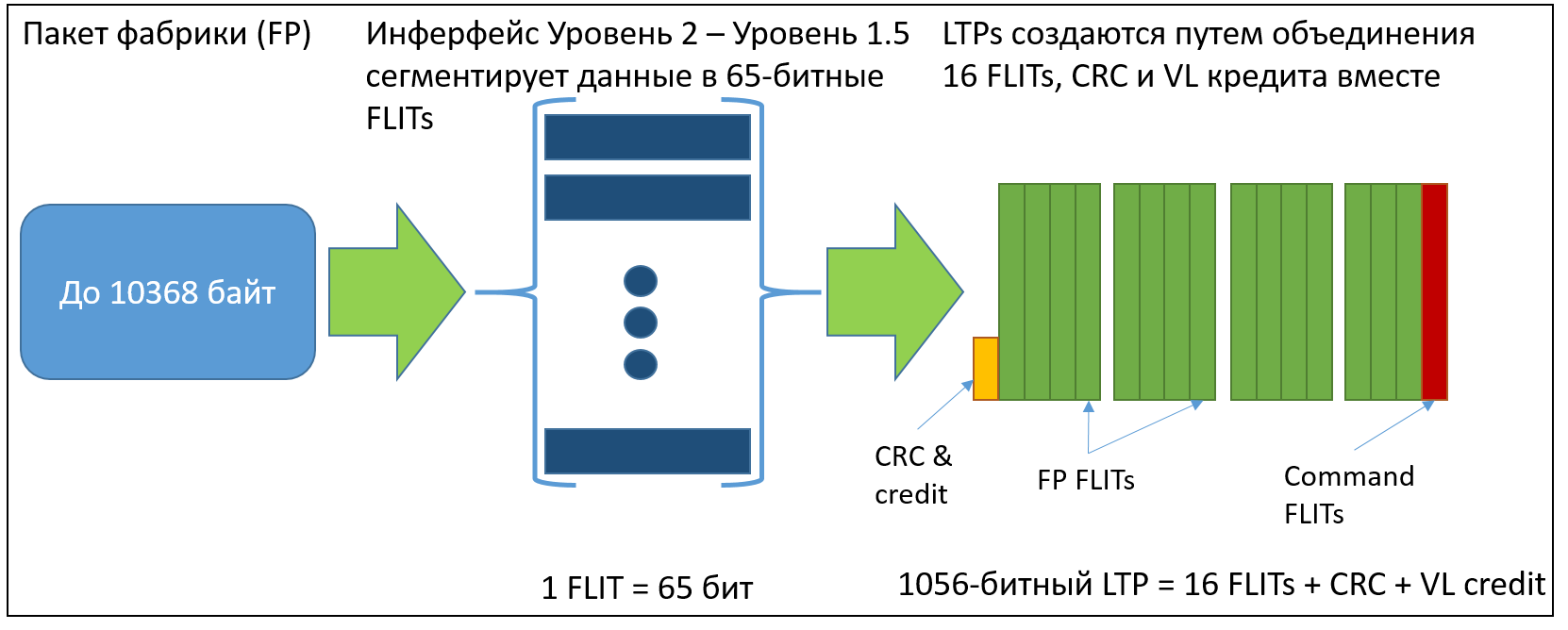


Рис 8. Сегментация FP – FLITs - LTP Intel® Omni-Path Architecture.

1. Канальный уровень (Layer 2)

Intel® OPA Канальный уровень разработан для огромных масштабируемых систем. Пакеты канального уровня используют 24-битную адресацию, а также оптимизированные форматы для небольших систем. До 10 киллобайт может быть передано в одно пакете после учета самого большого заголовка транспортного уровня. Service Channels (SCs) и Virtual Lanes (VLs) предосставляют строительные блоки для поддержки широкого класса топологий, а также для реализации Quality of Service (QoS) функциональностей.

Quality of Service (QoS). В рамках Intel® OPA фабрики QoS предоставляет ряд возможностей, в том числе разделение задач/распределение ресурсов; разделение услуг/распределение ресурсов; разделение трафика приложений в рамках данной задачи; протокол (то есть, запрос/ответ); механизм избегания взаимобокировки; приоритезация трафика и распределение полосы пропускания; оптимизация дрожания задержки путем приоритизации трафика.

Intel® OPA предоставляет очень гибкие механизмы для QoS через Виртуальные Фабрики (vFabrics, Virtual Fabrics), Классы Трафика (TCs, Traffic Classes), Уровни Сервиса (SLs, Service Levels) и Виртулаьные Полосы (VLs, Virtual Lanes). В сердце QoS лежит SC механизм, который используется для дифференцирования пакетов (FP) в рамках фабрики. Для поддержки широкого спектра топологий фабрики и конфигураций, назначение SC управляется с помощью менеджера фабрики и SC конкретного пакета фабрики может изменится по мере прохождения фабрики для маршрутизации в зависимости от возникновения взаимоблокировок.

Операции, выполняемые операция приложениями и системными администраторами, централизованы вокруг vFabrics. vFabric – это пересечение множества портов фабрики и один или более протоколов уровня приложений. Множество QoS функциональностей и политик безопасности устанавливается системным администратором для каждой vFabric. Каждая vFabric ассоциируется с классов трафика для QoS и разделение (Partition) для безопасности.

Класси трафика представляет группу уровней сервиса (SLs), которые будут использоваться данным транспортным уровнем или приложением. Некоторые транспортные уровни могут использовать несколько QoS уровней, чтобы избежать взаимную блоикровку (такие как разделение запросов и ответов в определенных протоколах), пока другие могут использовать преимущество QoS уровней для разделения высокоприоритетного управляющего трафика от низкоприоритетного трафика с данными. Транспортные уровни могут ассоциировать классы трафик с единственным уровнем сервиса. Intel® OPA позволяет иметь до 32 классов трафика, но 4-8 является наиболее типичной конфигурацией. Классы трафика реализуются через сквозную (end to end) концепцию уровней сервиса. Классы трафика могут охватывать множество уровней сервиса, но уровень сервиса может быть назначен только к одному классу трафика. Intel® OPA поддерживает до 32 уровней сервиса, но 4-8 является наиболее типичной конфигурацией. Уровни сервиса – это самый низкий уровень QoS концепции, который виден транспортному уровню OPA и приложениям.

Каналы Сервисов (SC, Service Channel), лежащие в основе уровней сервиса, дифференциируют пакеты различных уровней сервиса как только они проходят через фабрику. Канал сервиса – это только QoS идентификатор, содержащийся в пакетах фабрики, который уменьшает накладаные расходы пакета. В некоторых топологиях фабрики, уровни сервиса могут охватывать множество каналов сервиса, но канал сервиса может быть назначен только на один уровень сервиса. Intel® OPA поддерживает 32 канала серсива, однако, SC15 выделен под внутриполосного менеджмента фабрики.

Для каждой конечной точки соединения(endpoint) HFI уровни сервиса отображаются на каналы сервиса через SL2SC таблицы при передаче (отображение каждого уровня сервиса на канал сервиса) и SC2SL таблицы (отображение входящих каналов сервиса на данный уровень сервиса с возможно несколькими каналами сервиса, отображенными на тот же уровень сервиса). Рисунок 9 показывает пример использования класса трафика, уровня сервиса и канала сервиса. В этом примере две конечные точки HFI соединены через коммутор, предоставляющий маршрут из 8 сетей перехода (hop) через фабрику. Два класса трафика используются, один – для запрос/ответ протокола (к примеру, PGAS модель), назначеный на TC0, другой – для сетевой протокол хранилища данных, назначенный на TC1. Запрос/ответ протокол на TC0 требует два уровня сервисов (SL0 и SL1), сетевой протокол хранилища данных на TC1 требует только один уровень сервиса (SL2). Каждому уровню сервиса назначается пара каналов сервиса (SC0/SC1, SC2/SC3 и SC4/SC5) для избегания взаимной блокировки в фабрике, которая обычно используется в топологии тор. Когда пакеты переходят через фабрику, канал сервиса может изменять канал за каналом. Однако, уровень сервиса и класс трафика, видные для транспортного уровня и приложений, являются сквозными (end to end).

Внутри данного канала, каналы сервиса назначаются на виртуальные полосы (Virtual Lanes). Виртуальные полосы предоставляют выделенные буфера приема для входящих пакетов фабрики. Виртуальные полосы также используются для разрешения взаимных блокировок маршрутизации. Intel® OPA поддерживает до 32 виртуальных полос, таким образом действительное количество поддерживаемых виртуальных полос будет зависеть от реализации. Intel® OPA поддерживает отображение каналов сервиса на виртульные полосы, так что могут поддерживаться гетерогенные конфигурации фабрики. SC15 отображается на VL15 для внутриполосного менеджмента фабрики. Реализации могут выбрать поддержку менее, чем 32 виртуальных полос или могут быть сконфигурированы, оптимизировав количество буферизации для каждой виртуальной полосы путем уменьшения доступного количества виртуальных полос.

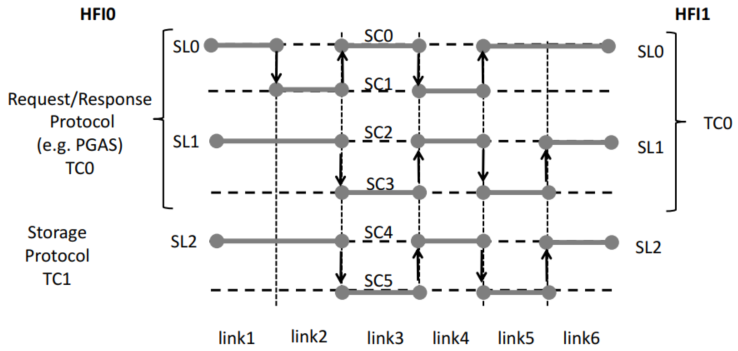


Рис 9. Пример использования классов трафика (TC), уровней сервиса (SL) и каналов сервиса (SC) в топологии с предотвращением взаимной блокировки маршрутизации из-за кредитов.

Каждый канал сервиса передает трафик одного уровня сервиса в одном классе трафика, и менеджер фабрики конфигурирует как каналы сервиса отображаются на ресурсы виртуальных полос на каждом порту. Огромное количество каналов сервиса помогает поддерживать производительность на высоких уровнях использования, и отображение каналов сервиса на независимые виртуальные полосы может предоставить независимый каналы через фабрику. Таким образом, Intel® OPA обширно использует каналы сервиса для предотвращения взаимных блокировок маршрутизации и протокола и для предотвращения «head-of-line blocking» между классами трафика. Однако, практические ограничения могут быть причиной, что данная реализация поддерживает меньшее количество виртуальных полос на большем количестве каналов. В этих случаях несколько уровней сервиса могут разделять виртулаьную полосу, и менеджер фабрики отвечает за конфигурирование какие уровни сервиса могут корректно разделять виртуальную полосу и как как уровни сервиса разделяют виртулаьную полосу, так что QoS характеристики могут быть соблюдены.

Менеджер фабрики так же конфигурирует как передача пакетов через виртуальную полосу запланирована через конфигурируемыей VLArbitration алгоритм. В дополнение, преимущество на отправку пакетов моет быть сконфигурировано, чтобы разрешить высокоприоритетному трафику упредить менее приоритетные пакеты. Это дает возможность уменьшить возможность возникновения «head-of-line blocking» феномена для высокоприоритетного трафика.

Управление перегрузками (Congestion Management). …

Заключение

Текущее состояние развития сетевых технологий позволяет использовать современные сетевые среды и оптимальные механизмы для передачи/приема данных, но появлением новой сетевой технологии влечет за собой создание нового программного интерфейса для разработчиков. Такая тенденция ведет к созданию проприетарных реализаций MPI протокола, которые являются непортируемыми на другие системы.

Создание унифицированного интерфейса, который позволит оптимально, с минимальными накладными расходами обеспечить портируемость на все современные сетевые технологии, является важной задачей, стоящей перед разработчиками и исследователями современных HPC сообществ.

За последние пару лет появились два конкурирующим между сообой интерфейса - OFI (Open Fabric Interfaces)[2], разработанный Open Fabric Alliance, и UCX (Unified Communication X)[3], разработанный OpenUCX сообществом. Современные реализации MPI переходят на использование этих интерфейсов для обеспечения лучшей переносимости.

Литература

1. Tom Shanley, MindShare, Inc. InfiniBand Network Architecture, Addison-Wesley Professional, 2003;
2. OpenFabrics Interfaces Working Group - <https://www.openfabrics.org/>; <https://github.com/ofiwg>;
3. Unified Communication X Working Group - <https://github.com/openucx>; <http://www.openucx.org/>.