

ЭВОЛЮЦИЯ ЭКОНОМИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Srinivasan Ramasubramanian
Университет Аризоны
Suresh Subramaniam
Университет Джорджа Вашингтона
Satyaajeet S. Ahuja, Steven J. Hand, Serge Melle
Infinera Corp.
СЕНТЯБРЬ 2011

Эволюция экономики проектирования оптических сетей

Srinivasan Ramasubramanian¹, Suresh Subramaniam²,
Satyaajeet S. Ahuja, Steven J. Hand³, Serge Melle³

¹Университет Аризоны, ²Университет Джорджа Вашингтона,
³Корпорация Инфинера srini@ece.arizona.edu, suresh@gwu.edu,
sahuja@infinera.com, shand@infinera.com, smelle@infinera.com

1. Введение

Общеизвестно, что объем передаваемого Интернет-трафика демонстрирует взрывной рост, который также обеспечивается растущей популярностью видеосервисов типа Netflix и YouTube. В то время как подобный рост трафика привел к увеличению прибыли контент-провайдеров, операторы не всегда могли обеспечить соответствующий рост выручки [1, 2]. Поэтому основной задачей для операторов является максимально эффективное использование капитальных вложений, а также оптимизация операционных издержек. В рамках достижения этой цели в индустрии оптических транспортных сетей за последние несколько лет произошли значительные изменения [3]. Основной задачей данной работы является сопоставление затрат для различных вариантов проектных решений.

Мы сравним затраты для четырех наиболее значимых вариантов сетевой архитектуры, в порядке их эволюции и сроков появления на рынке. Данные архитектуры были выведены на рынок в разное время и основывались на технологиях, существовавших на тот момент, а также учитывали ряд экономических факторов. Мы считаем, что пришло время критически оценить данную эволюцию и сравнить различные архитектуры с позиции сегодняшнего дня. Фундаментальные различия между рассматриваемыми архитектурами заключаются в маршрутизации сервисов и их группировании по длинам волн, коммутационных возможностях сети и интеграции компонентов. Первая архитектура позволяет группировать сервисы на входе, но не обеспечивает цифровой коммутации внутри сети. Любое перераспределение трафика внутри сети требует остановки передачи, демультимплексирования длин волн на составляющие клиентские сигналы и последующей их агрегации в ручном режиме. Вторая архитектура облегчает агрегацию как внутри одной длины волны, так и между различными длинами волн с помощью дополнительного цифрового коммутатора, который является отдельным компонентом. Третья архитектура предлагает фундаментальное усовершенствование, обеспечивая возможность коммутации на каждом узле сети более недорогим способом по сравнению со второй архитектурой, а именно посредством интеграции линейных модулей WDM и цифровой коммутации на базе единого шасси [4]. Четвертая архитектура делает следующий шаг вперед, объединяя спектральные каналы в группы и формируя диапазоны волн, что позволяет увеличить производительность каждого линейного модуля. Эта архитектура использует преимущества недавно введенной в широкую коммерческую эксплуатацию технологии оптических интегральных схем (PIC) [5, 6]. Эта технология позволяет добиться большей пропускной способности линейного модуля и также сокращает расходы на волоконно-оптические элементы WDM. Подобные архитектуры будут рассмотрены более подробно в следующей секции.

Очевидно, что сопоставление затрат неизбежно зависит от: (1) способа моделирования сетевого трафика [7, 8, 9, 10], (2) способа обработки трафика и сервисов на промежуточных узлах [11, 12], (3) эволюции и стратегий перехода используемых компонентов [13], и (4) способа группирования и маршрутизации сервисов [14, 15]. Это весьма сложный вопрос. К примеру, если объем и тип трафика заранее известен, возможно «подогнать» одну из архитектур, скажем, вариант «А», к конкретному профилю трафика, что сделает именно этот вариант наиболее рентабельным. При этом, такая архитектура может быть недостаточно гибкой и может не справиться с необходимостью изменения конфигурации при изменении профиля трафика в будущем или при существенном отклонении реального трафика от прогнозируемых показателей. В подобном случае более гибкая архитектура, скажем, вариант «Б», может оказаться более производительной, чем вариант «А».

В этой связи мы принимаем во внимание планы развития сети в течение нескольких периодов времени и учитываем как первоначальную стоимость внедрения сетевой инфраструктуры, так и стоимость ее обновления.

Можно ожидать, что стоимость передачи трафика будет прогрессивно снижаться от первого варианта архитектуры к последнему, и это действительно подтверждается нашими наблюдениями, как будет показано далее. Мы априори не имели представления только об объеме сопутствующих издержек, и ответ на этот вопрос является задачей данного исследования.

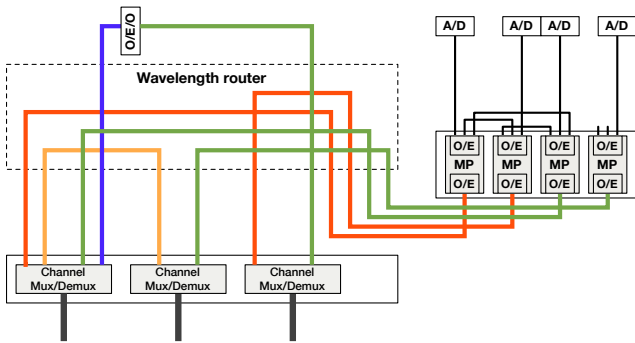
Наше исследование организовано следующим образом. В Разделе 2 описываются четыре варианта архитектуры, которые мы сравниваем в данной работе. Методика моделирования представлена в Разделе 3, а ситуационное исследование приводится в Разделе 4. В Разделе 5, который является заключительным, рассматриваются дальнейшие направления работы. В Приложении содержится описание функциональных характеристик компонентов, используемых в различных вариантах архитектуры.

2. Варианты архитектуры

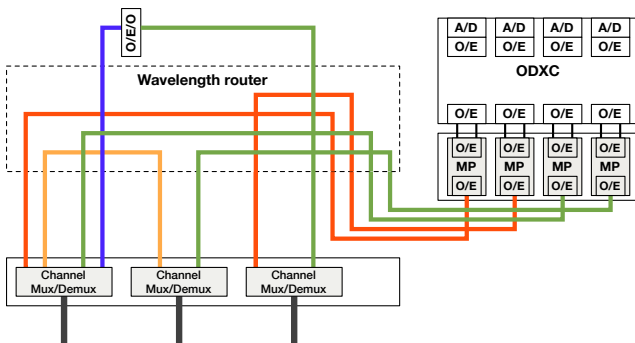
На Рисунке 1 изображены четыре рассматриваемых варианта архитектуры. В приложении описываются функциональные характеристики компонентов, используемых в данных вариантах архитектуры.

В Архитектуре 1 (Рисунок 1а) клиентские сервисы группируются вместе с помощью мукспондера и отображаются на длину волны WDM. Мукспондер имеет серый (т.е. не относящийся к длине волны WDM) оптический интерфейс со стороны клиента. Со стороны клиента он поддерживает спектр клиентских интерфейсов, которые могут быть сгруппированы в рамках длины волны 100 Гбит/с. Клиент может выбрать вариант 10x10 Гбит/с, 2x40 Гбит/с или 1x100 Гбит/с. Невозможно получить доступ к индивидуальным клиентским сигналам на промежуточных узлах в рамках маршрута без прерывания всей передачи и последующего перераспределения клиентских сигналов на необходимые длины волн в ручном режиме. На промежуточном узле входящий сигнал DWDM демультимплексируется до отдельных длин волн, а затем каждый сигнал перенаправляется с использованием (опционального) маршрутизатора волн оптического диапазона. Мы предполагаем, что подобный маршрутизатор является опциональным компонентом во всех архитектурах и реализуется с использованием конфигурируемых оптических мультиплексоров ввода-вывода (ROADM) [16, 17]. При отсутствии такого маршрутизатора может использоваться ручная коммутация. Спектральные каналы могут передаваться в оптическом диапазоне к выходному волокну с помощью ручной коммутации или устройства маршрутизации. С другой стороны, длины волн, которые требуют восстановления и/или преобразования, могут быть перенаправлены маршрутизатором в банк оптоэлектронных (ОЕО) преобразователей.

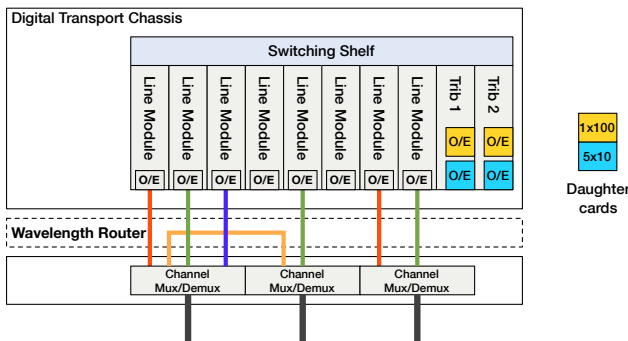
Повторная агрегация клиентских сигналов на промежуточном узле происходит следующим образом. Спектральные каналы, несущие клиентские сигналы, перенаправляются маршрутизатором в мукспондеры, которые в данном случае демультимплексируют каналы 100 Гбит/с на клиентские сигналы (т.е., 10x10 Гбит/с или более мелкие каналы с использованием иерархического демультимплексирования). Индивидуальные каналы 10 Гбит/с могут быть либо соединены оптически (т.е., перегруппированы), либо скоммутированы на клиентские порты ввода-вывода (A/D). Добавленные клиентом сервисы конвертируются от серой оптики



(a) Только мукспондер (Арх-1)



(b) Мукспондер + ODXC (Арх-2)



(d) Интегрированная коммутация и DWDM с PIC (Арх-4)

Рисунок 1. Четыре рассматриваемых варианта проектирования сети
Производительность сети предполагается на уровне 100 Гбит/с

до магистральной оптики, а также мультиплексируются с другими сервисами посредством мукспондеров. Получившийся в результате этого магистральный спектральный канал направляется на соответствующее направление с помощью оптического маршрутизатора, и затем мультиплексируется в указанный выходящий канал.

Архитектура 2 (Рисунок 1b) аналогична Архитектуре 1, за исключением того, что мультиплексирование облегчается с помощью добавления опционального оптического цифрового кросс-коммутатора (ODXC). ODXC представляет собой отдельный компонент, который коммутирует трафик при субволновой гранулярности. Мы предполагаем, что данная гранулярность достигает ODU0 (1,25 Гбит/с). Ввод в ODXC приходит по серой оптике (вывод из мукспондера)

и затем снова переводится ODXC в электрические сигналы для последующей коммутации. Преимуществом использования ODXC в Архитектуре 2 является упрощение коммутации транзитного трафика и, что еще важнее, возможность группирования трафика на промежуточных узлах, что позволяет максимизировать заполнение длины волны, обеспечивая тем самым максимальную эффективность работы сети и минимизацию требуемого количества 100 Гбит/с каналов. В Архитектуре 1 транзитный трафик коммутируется вручную. Необходимо также отметить, что любая длина волны, которая перенаправляется в банк мукспондеров, может выиграть от преобразования.

Архитектура 3 (Рисунок 1c) обеспечивает возможность агрегации на каждом узле, притом по более низкой стоимости в сравнении со второй архитектурой, посредством интеграции линейных модулей и цифровой коммутации в рамках единого цифрового транспортного шасси, что позволяет избежать дополнительных ОЕО-операций. Сначала входящий DWDM-сигнал демультиплексируется до отдельных длин волн. Затем передача может осуществляться согласно двум вариантам: длина волны может быть передана через узел в оптическом режиме посредством ручной коммутации (или с использованием оптического маршрутизатора) до WDM-мультиплексора на выходящем канале или, в качестве альтернативы, длина волны может быть выведены на соответствующем линейном модуле. Необходимо отметить, что коммутация в ручном режиме должна учитывать ограничение непрерывности длины волны. Линейный модуль (карта) сначала конвертирует длину волны WDM в электрический сигнал для коммутации. Каждая линейная карта подключена к коммутирующей плате. Последняя обеспечивает неблокирующую коммутацию на уровне гранулярности ODU0 по всем линейным и вспомогательным картам. Вспомогательные карты также используются для ввода/вывода клиентских сервисов. Каждая вспомогательная карта включает в себя одну или более плату более низкого уровня (1x100 или 5x10 Гбит/с), которые могут сопрягаться с вводом/выводом сервисов со стороны клиента. Данные второстепенные платы могут обеспечивать оптический интерфейс для ввода/вывода сервисов, поэтому для сопряжения в них может применяться серая оптика (Е/О преобразование). Любая длина волны, которая коммутируется на линейную карту, преобразуется в электрические сигналы в Архитектуре 3, и может выиграть от такого преобразования в процессе коммутации.

Технология оптической интеграции представляет собой следующий шаг в сокращении расходов при масштабировании эффективной полосы пропускания сети. Данный аспект используется в Архитектуре 4.

Архитектура 4 аналогична Архитектуре 3 в плане функциональности, за двумя исключениями: (1) Линейные модули в Архитектуре 4 имеют оптические интегральные схемы (PIC), которые поддерживают впятеро большую пропускную способность по сравнению с линейными модулями Архитектуры 3; и (2) Архитектура 3 имеет каналные Mux/Demux-устройства, в то время как в Архитектуре 4 эти устройства диапазонные. В Архитектуре 4 DWDM-сигнал разделяется на группы длин волн, которые также называются диапазонами волн или суперканалами. В рамках данной работы для наименования группы длин волн мы будем использовать термин «диапазон волн». Как и в Архитектуре 3, каждый диапазон может быть отведен на линейной карте, которая переводит диапазон в электрические сигналы для коммутации, или может быть передан по оптической сети посредством коммутации в ручном режиме (или с использованием оптического маршрутизатора). Необходимо еще раз отметить, что при коммутации в ручном режиме должно быть учтено ограничение непрерывности длины волны. Остальные детали повторяют Архитектуру 3.

Несмотря на то, что эти архитектуры могут быть более общими, подчиняясь принципам отраслевой практики, мы предполагаем, что пропускная способность каждой длины волны составляет 100 Гбит/с. Далее, мы предполагаем, что каждый диапазон в Архитектуре 4 состоит из 5 длин волн, что дает нам общую пропускную способность в 500 Гбит/с.

Теперь мы хотели бы проиллюстрировать, как происходит маршрутизация сигналов в каждой из архитектур, а также какие компоненты находятся на второстепенных узлах.

В Архитектурах 1 и 2 высокоскоростной сигнал от источника к пункту назначения перенаправляется посредством оптического маршрутизатора (или коммутируется в ручном режиме) от конкретной точки ввода до конкретного канала вывода на промежуточном узле. На промежуточном узле сигнал может быть обработан одним из ОЕО-устройств (в банке ОЕО), если есть необходимость восстановления или преобразования длины волны. При наличии оптических маршрутизаторов, вмешательство оператора при вводе высокоскоростного сигнала требуется только в точках отправки и получения (чтобы добавить требуемые линейные карты). При этом на промежуточных узлах ручное вмешательство не требуется.

В Архитектуре 3 высокоскоростной сигнал перенаправляется посредством оптического маршрутизатора (или коммутируется в ручном режиме) от конкретной точки ввода до конкретного канала вывода на промежуточном узле. В случае необходимости ОЕО-преобразования, длина волны автоматически или вручную перенаправляется на линейный модуль. В Архитектуре используется похожий сценарий, за исключением того, что вмешательство оператора на промежуточных узлах может потребоваться только в случае, если существующие линейные карты не обладают достаточными резервами пропускной способности, чтобы обеспечить коммутацию дополнительных длин волн. Здесь необходимо отметить, что пропускная способность модуля в Архитектуре 4 в пять раз превышает соответствующий показатель в других архитектурах.

Теперь давайте рассмотрим низкоскоростной сигнал, скажем, 10Гбит/с. В Архитектуре 1 такой сигнал может группироваться с другим низкоскоростным трафиком. Таким образом, длина волны данного трафика коммутируется на банк мукспондеров с использованием оптических маршрутизаторов. Мукспондеры разделяют производительность в 100 Гбит/с на отдельные низкоскоростные сервисы. Затем рассматриваемое соединение вручную коммутируется из вывода одного мукспондера на ввод другого. В связи с этим участие оператора требуется на нескольких участках (источник, пункт назначения, а также все промежуточные участки на пути сигнала). Отметим, что при необходимости коммутации низкоскоростного трафика, являющегося составной частью длины волны, на тот же самый канал вывода на узле, мы можем не использовать мукспондеры. Подобные возможности для сокращения издержек время от времени представляются операторам, однако это происходит довольно редко, и только на этапе базового планирования, в отличие от этапа непрерывного роста, когда все возникающие запросы необходимо обработать одновременно. В Архитектуре 2, запросы низкоскоростных сервисов маршрутизируются посредством ODXC. Поэтому, вмешательство оператора на промежуточных узлах не требуется, при условии, что ODXC имеет достаточно установленных карт. В Архитектурах 3 и 4, туннельные запросы коммутируются при выводе на линейную карту. Если обработка запроса требует установки новой линейной карты на промежуточном узле, требуется вмешательство оператора. Поскольку Архитектура 4 имеет более высокую производительность линейных карт, ожидается, что количество случаев, когда запросы низкоскоростных сервисов будут требовать установки новой линейной карты, будет меньше, чем в Архитектуре 3.

3. Моделирование экономики проектирования сетей

3.1 МОДЕЛЬ СЕТИ

Для ситуационного исследования по моделированию затрат мы используем топологию сети, изображенную на Рисунке 2 и состоящую из 82 узлов и 99 соединений. Рассматриваемая топология является типичной, поскольку несколько подобных схем встретились нам на практике. Узлы сети являются участками отправки/получения трафика или промежуточными участками, где может размещаться оборудование для оптико-электронных преобразований для задач коммутации и повторной генерации. Предполагается, что каждое соединение имеет многократные интервалы усиления и укомплектовано усилителями, которые обеспечивают максимальный показатель OSNR для этого звена. Мы выбрали продолжительность участков и тип волокна на основе традиционных показателей типичных сетей дальней связи в США. Оптическое экспресс-соединение (OER) представляет собой путь между двумя узлами, где коммутация может полностью происходить в оптическом режиме, без необходимости повторной генерации (ОЕО-преобразования). Мы определяем потенциальные OER-участки сети, используя вычисления, полученные при проектировании звеньев сети.

Таблица 1 отражает детали рассматриваемой сети. Такая же линейная система и производительность линейных модулей используется во всех вариантах архитектуры, рассматриваемых в данной работе. В результате мы имеем одинаковые характеристики охвата для всех архитектур на всех OER-участках. Мы предполагаем, что каждое соединение способно проводить до 80 длин волн производительностью 100 Гбит/с каждая, что в расчете на звено составляет 8 Тбит/с.

Данные сети	
Общая протяженность волокна	36382 км
(Узлы, соединения)	(82,99)
Средняя степень узла	2,41
Максимальная степень узла	5
Средняя протяженность соединений	367 км
Средняя протяженность интервала	83,8 км

Таблица 1. Типичная сеть дальней связи в США: Протяженность волоконных каналов и интервалы

3.2 МОДЕЛЬ ТРАФИКА

Мы рассматриваем модель генерации трафика на основе тяготения. Трафик, генерируемый на узле, оценивается пропорционально заполненности этого узла. Трафик между двумя узлами оценивается пропорционально объему, генерируемому клиентами между данными узлами. Пусть $P_i (> 0)$ – это заполненность узла i . Пусть $A(L)$ – общий поток трафика, генерируемый в сети, а $A(L)_{(i,j)}$ – трафик между узлами i и j за период планирования L . Тогда,

$$A(L)_{(i,j)} = A(L) \times \frac{P_i \times P_j}{\sum_{(x,y) \in N_2} \{P_x \times P_y\}}$$

Сервисные интерфейсы соотносятся с потоком трафика таким образом, чтобы наиболее близкий по объему запроса интерфейс имел большую вероятность получить команду на обработку запроса, чем интерфейсы, имеющие большую или меньшую производительность, например, поток 4,5 Гбит/с скорее всего получит 2 интерфейса OC-48, чем один 10Гбит/с или более производительный интерфейс. Мы

рассматриваем следующие сервисные интерфейсы для обработки запросов: 1 Гбит/с (GbE1G), 2,5 Гбит/с (OC-48), 10 Гбит/с (OC-192), 40 Гбит/с (OC-768), и 100 Гбит/с (GbE100G). Предполагается, что 50% сервисных запросов требуют резервирование 1+1 со стороны линии. Все сервисные запросы не защищены со стороны клиента. Мы рассматриваем пять периодов планирования с 50%-ным ростом между каждым из них, т.е. $A(L+1) - A(L) = 0.5 - A(L)$. Мы делаем допущение, что однажды установленная потребность в обслуживании сохраняется в сети на протяжении всего жизненного цикла, т.е. время удержания услуги не ограничено. В рамках периода планирования, запросы на обслуживание выбираются случайным образом из совокупности запросов за упомянутый период. При маршрутизации и назначении оборудования не принимаются во внимание будущие запросы. В Таблице 2 приводятся данные сервисных запросов за пять периодов планирования. Таблица 3 отражает общие показатели трафика, который был обработан на протяжении пяти периодов планирования.

	1 год	2 год	3 год	4 год	5 год
GbE1G	1479	2283	3001	3447	4233
OC48	755	1123	1752	2931	3747
OC192	134	232	382	722	1311
OC768	22	34	56	84	125
GbE100G	0	5	13	43	186

Таблица 2. Сервисные интерфейсы для пяти периодов планирования

	Производительность секции (Гбит/с)	Использование секции
1 год	831	10%
2 год	1308	16%
3 год	1874	23%
4 год	3079	38%
5 год	4342	53%

Таблица 3. Итоговая генерация трафика за пять периодов планирования

3.3 МОДЕЛЬ МАРШРУТИЗАЦИИ И АГРЕГАЦИИ

С учетом базовых потребностей трафика и ежегодного стабильного роста объемов передаваемого трафика, в целях планирования необходимо сначала рассмотреть изначальные запросы на трафик. Правило номер один заключается в предоставлении полноценного волнового оптического экспресс-соединения во всех возможных случаях. Поэтому, если какой-либо из элементов базовой матрицы трафика превышает производительность 100 Гбит/с, мы обеспечиваем одну или несколько длин волн для обработки этого запроса от источника до пункта назначения. Данные соединения маршрутизируются по оптическим каналам в максимально возможном количестве случаев. Таким образом, для минимизации затрат, с учетом данного количества длин волн от любого источника до любого пункта назначения, мы рассматриваем путь, который требует наименьшее количество ОЕО-преобразований. Если мы предположим, что длины волн w_{sd} обеспечиваются между парой $s-d$, и перенаправляются по пути, требующему k_{sd} промежуточных ОЕО-преобразований, получается, что стоимость подобного построения составит: $(k_{sd} + 2)C_l + k_{sd}C_{oeo}$, где C_l и C_{oeo} обозначают стоимость линейной карты на 100 Гбит/с и ОЕО-преобразователя, соответственно.

Затем мы рассматриваем матрицу остаточного трафика (s_{ub} -100Гбит/с) после передачи полноценных длин волн по оптическому

каналу. Поскольку есть несколько вариантов маршрутизации низкоскоростного трафика, вычисление оптимального пути, который позволил бы сократить издержки (посредством моделирования численной линейной программы), займет много времени. Мы предполагаем, что весь низкоскоростной трафик будет перенаправляться по кратчайшему пути, основываясь на количестве переходов в рамках оригинальной топологии. При использовании этого подхода нашей задачей является минимизация количества требуемых случаев повторной генерации трафика. Кратчайший путь трансформируется путем добавления соединений, в которых оптические экспресс-соединения присутствуют или могут быть организованы между узлами. Кратчайший путь на данном измененном графике представляет собой желательный путь с минимальным количеством повторных случаев генерации трафика.

3.4 КАПИТАЛЬНЫЕ И ОПЕРАЦИОННЫЕ ИЗДЕРЖКИ

Мы разделяем расходы на сетевую инфраструктуру на капитальные и операционные затраты, CapEx и OpEx, соответственно. В нашей модели, CapEx включают в себя стоимость линейных модулей, вспомогательных карт, мукспондеров, транспондеров, DWDM-шасси и коммутационных шасси. Мы не включаем CapEx, связанные с вводом в эксплуатацию оптоволоконных кабелей, линейных усилителей, мультиплексоров/демультиплексоров длин волн и их диапазонов из расчета на одно соединение, а также оптических маршрутизаторов. Предполагается, что данные позиции остаются неизменными для всех вариантов архитектур. Мы использовали стандартное ASP-ценообразование для всех типовых элементов замены, используемых в архитектурах.

Мы сравниваем OpEx с помощью относительного подсчета количества следующих компонентов: (1) Количество требуемых для установки узлов коммутации волокна; (2) Количество установленных шасси; (3) Количество требуемых для установки линейных/сервисных карт (типовых элементов замены - FRU); и (4) Рекомендаций относительно требований к занимаемым площадям и энергоснабжению. Расходы на помещения и электроснабжение существенно разнятся в рамках отрасли, поэтому для этих позиций мы можем применять только относительные показатели.

Мы предполагаем, что предоставление услуг осуществляется по возрастающей по мере появления спроса. Понимая, что подготовка требует определенного времени (от одного дня до недели), из практических соображений мы делаем допущение, что каждый запрос на предоставление услуги обрабатывается индивидуально и немедленно по получении. Обратите внимание, что исполнение заявки на предоставление услуги может быть отложено (к примеру, данные работы осуществляются периодически, скажем, раз в квартал) для сбора обновлений, которые необходимо осуществить на конкретном участке. Несмотря на то, что подобный подход приведет к серьезной задержке в предоставлении услуги, в данной работе мы этот вариант не рассматриваем.

4. Ситуационное исследование

4.1 СРАВНЕНИЕ КАПИТАЛЬНЫХ ЗАТРАТ

Мы сравниваем CapEx на сетевую инфраструктуру для всех четырех вариантов архитектур, используя модель трафика и политики агрегации и маршрутизации, описанные выше. На Рисунке 3 сравниваются затраты в рамках Архитектуры 1 с агрегацией и без неё. Для опции без агрегации, сервисы, происходящие из единого узла-источника и предназначенные для одного и того же пункта назначения агрегируются к полосе пропускания, ближайшей к 100G. Затем эти высокоскоростные сервисы 100G распределяются по всем переходам сетевого пути и не перегруппируются на каком-либо из

промежуточных узлов. Перераспределение трафика не производится даже на участках повторной генерации, где сигнал 100G должен быть регенерирован по причине ограничений оптического канала. Таким образом, становится очевидно, что использование Архитектуры 1 без агрегации приводит к тому, что потенциал имеющейся пропускной способности используется в высшей степени не полностью, что негативно сказывается на экономической эффективности.

На Рисунке 4 указана стоимость сетевой инфраструктуры для различных вариантов архитектур, рассчитанная с учетом того, что стоимость первого года Архитектуры 1 взята за исходную величину. Мы использовали среднюю стоимость всех компонентов с учетом реальных рыночных цен. В рамках данного сравнения агрегация разрешена для всех вариантов архитектур и осуществляется на всех участках для достижения минимальной стоимости каждой архитектуры. Поскольку рост сетевой нагрузки рассчитывается на протяжении пяти лет, различие в стоимости сетевой инфраструктуры становится существенным. Обратите внимание, что по мере продвижения от Архитектуры 1 до Архитектуры 4 мы наблюдаем тенденцию к сокращению издержек на эксплуатацию сети. Причиной этому является преимущественно низкоскоростная природа трафика и тот факт, что топология сети не приводит к высокой корреляции трафика 2. Поэтому, для топологии сети и структуры трафика более предпочтительными являются архитектуры, которые могут обеспечить экономически эффективные возможности агрегации сигналов.

Мы выявили ряд ключевых факторов, которые приводят к основным сокращениям издержек во всех вариантах архитектур. От Архитектуры 1 до Архитектуры 2, основная экономия достигается посредством использования ODXC, который убирает иерархическое разделение низкоскоростного трафика, требующего агрегацию на промежуточных участках в Архитектуре 1. Однако использование мукспондеров и ОЕО-преобразователей в Архитектуре 2 также формирует существенную часть расходов на сеть. Архитектура 3, использующая интегрированную коммутацию, существенно сокращает количество ОЕО-преобразований и случаи демультиплексирования до гранулярности низкого порядка. Использование Архитектуры 3 приводит к 20%-ному снижению издержек (к пятому году), по сравнению с Архитектурой 2. По мере увеличения коммутационной емкости узла дополнительное снижение издержек происходит по мере отказа от дополнительных мукспондеров и ODXC-карт. Рост производительности линейных карт по причине интегрирования оптических каналов в Архитектуре 4 обеспечивает существенное снижение издержек, по сравнению с Архитектурой 3. Мы ожидаем, что, по мере увеличения производительности линейных карт в будущем (скажем, до 1 Тбит/с), экономия будет еще более существенной.

1. Поскольку оптический маршрутизатор присутствует во всех вариантах архитектур, мы не учитываем его стоимость в расчетах CapEx.

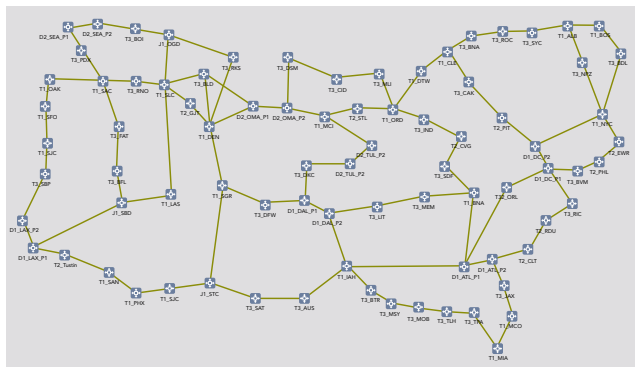


Рисунок 2. Типичная топология сети дальней связи в США.

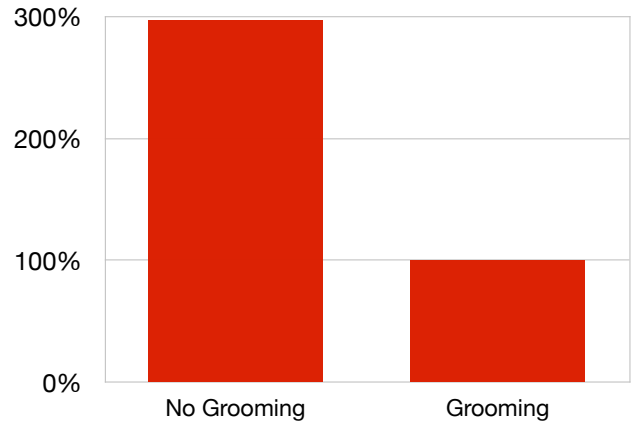


Рисунок 3. Сетевые издержки первого года для Архитектуры 1 с агрегацией и без неё на промежуточных участках. За исходную точку расчетом принимается объем издержек на сеть для Архитектуры 1 с использованием агрегации

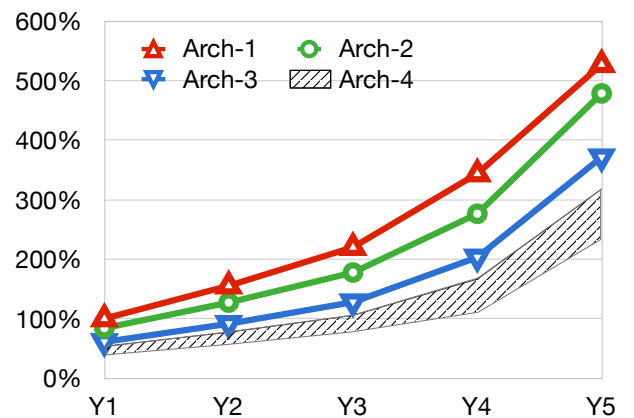


Рисунок 4. Издержки различных вариантов архитектур относительно издержек первого года для Архитектуры 1

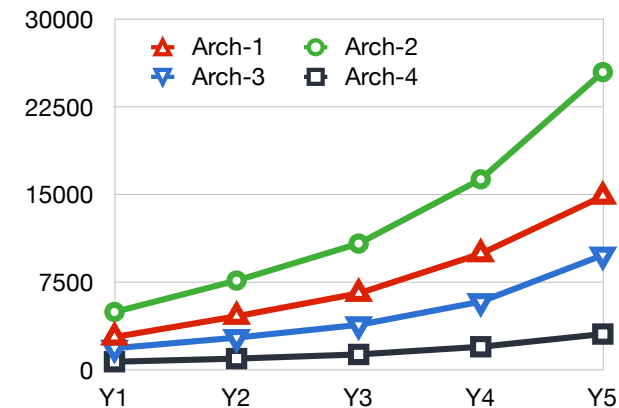
4.2 СРАВНЕНИЕ ОПЕРАЦИОННЫХ ИЗДЕРЖЕК

На Рисунках 5 и 6 сравниваются операционные факторы, связанные с различными вариантами архитектур. Архитектура 2 превосходит по производительности Архитектуру 1 в рамках показателя коммутации волоконно-оптических каналов, поскольку Архитектура 1 требует отдельную точку коммутации для каждого перекрестного соединения. Архитектура 2 для перекрестного соединения использует ODXC. Поскольку ODXC не интегрируется в DWDM-шасси, Архитектура 2 требует дополнительных FRU и шасси. Это приводит к росту требований к площади помещений и потребляемой мощности в рамках Архитектуры 2, по сравнению с Архитектурой 1.

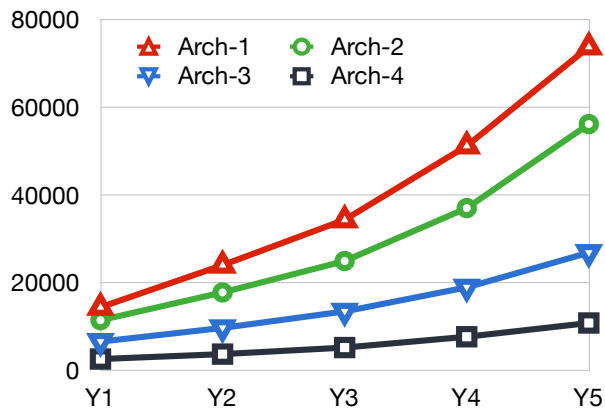
В Архитектуре 3 интегрированы DWDM и коммутация, что требует меньшего количества оптических соединений между FRU внутри шасси, чем в Архитектурах 1 и 2. Она также позволяет снизить требования к помещениям и потребляемой мощности.

В Архитектуре 4 внедрены оптические интегральные схемы на базе DWDM и коммутационной архитектуры. Это приводит к пятикратному увеличению емкости слота, по сравнению с Архитектурой 3. В Архитектуре 4 внедрены карты повышенной плотности, использование которых приводит к сокращению количества FRU и оптических соединений, а также снижает требования к размещению

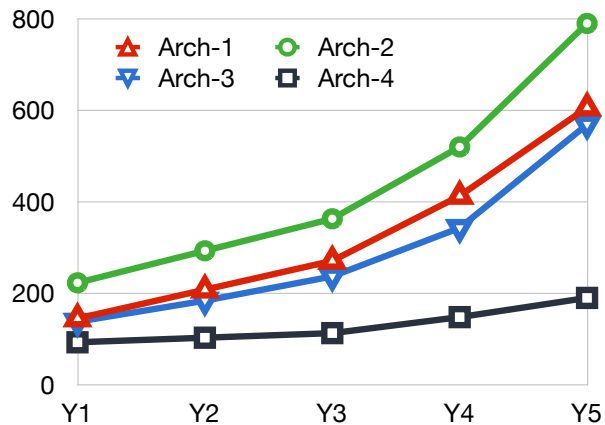
оборудования. Сокращение количества FRU и волоконных перемычек также положительно сказывается на надежности сети. Карты повышенной плотности используют оптическую интеграцию, которая позволяет существенно снизить потребление энергии.



а) Количество типовых элементов замены (FRU)

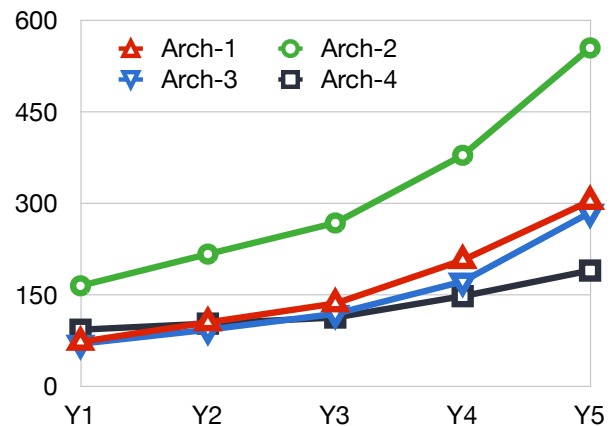


б) Количество точек коммутации оптоволоконна

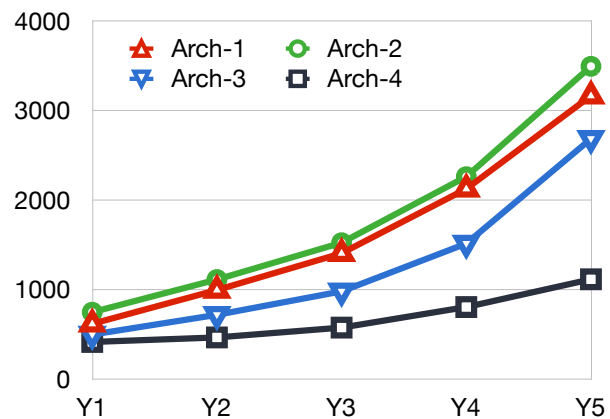


с) Количество шасси

Рисунок 5. Сравнение операционных издержек (OpEx) относительно количества типовых элементов замены (FRU), точек коммутации оптоволоконна и шасси для четырех вариантов архитектур



(а) Количество стоек



(б) Мощность (в киловаттах)

Рисунок 6. Сравнение операционных издержек для различных вариантов архитектур относительно количества стоек и потребляемой мощности на конец периода планирования 5

2 Вероятность, что запрос будет перенаправлен на определенное выходное соединение, с учетом его получения на определенном входном соединении, отражает корреляцию сетевого трафика. Чем выше корреляция, тем выше потенциал агрегации, что уменьшает необходимость коммутации. Сети с кольцевой топологией демонстрируют высокую степень корреляции, в то время как ячеистые сети характеризуются более низкой степенью корреляции.

5. Выводы

В рамках данной работы мы оценили четыре варианта архитектур для проектирования оптических сетей на базе типичной DWDM-сети дальней связи: 1) Мукспондер, 2) Мукспондер с ODXC, 3) Интегрированные DWDM и коммутация, 4) Интегрированные DWDM и коммутация с использованием высокопроизводительных линейных карт на базе оптической интеграции. Данные архитектуры различаются по своим возможностям агрегации сигналов и коммутации (коммутация в ручном режиме, с использованием отдельной коммутирующей платы или интегрированная), а также внедрением оптической интеграции с использованием PIC. Мы провели сравнение относительных показателей капитальных и операционных издержек на организацию сети на протяжении пяти различных периодов планирования. Расчет показателя CapEx осуществлен исходя из объема затрат на сеть, включающих стоимость линейных модулей, вспомогательных карт и шасси. Показатель OpEx определен методом сравнения количества использованных единиц

оборудования и оптического волокна, а также требований к пространству и мощности.

На основе проведенного имитационного моделирования мы установили, что интеграция DWDM и коммутация на базе оптических интегральных схем обеспечивает существенную экономию по сравнению с наилучшей альтернативой, включая сокращение количества FRU на 69%, точек коммутации оптоволокна – на 60%, шасси – на 67%, площади для размещения – на 33%, а потребляемой мощности – на 60%. После оценки полученных результатов становится очевидным, что интеграция DWDM и коммутация на базе оптических интегральных схем – это не вопрос выбора, а неотъемлемые требования к архитектурам для построения сетей дальней связи следующего поколения, поскольку помимо достижения существенной экономии на капитальных и операционных издержках, эти усовершенствования также повышают надежность сетей.

Использованная литература

- [1] Juniper Networks, "The converged supercore," <http://www.juniper.net/us/en/local/pdf/whitepapers/2000423-en.pdf>, 2011.
- [2] Juniper Networks, "Evolving back-bone networks with an MPLS supercore," <http://www.juniper.net/us/en/local/pdf/whitepapers/2000392-en.pdf>, 2011.
- [3] Juniper Networks, "Converged packet transport," <http://www.juniper.net/us/en/local/pdf/whitepapers/2000402-en.pdf>, 2011.
- [4] Serge Melle, Rick Dodd, Chris Liou, Marco Sosa, and Mark Yin, "Network planning and economic analysis of an innovative new optical transport architecture: The Digital Optical Network," in Optical Fiber Communication Conference and Exposition and The National Fiber Optic Engineers Conference. 2005, p. NTuA1, Optical Society of America.
- [5] R. Nagarajan, C.H. Joyner, Jr. Schneider, R.P., J.S. Bostak, T. Butrie, A.G. Dentai, V.G. Dominic, P.W. Evans, M. Kato, M. Kauffman, D.J.H. Lambert, S.K. Mathis, A. Mathur, R.H. Miles, M.L. Mitchell, M.J. Missey, S. Murthy, A.C. Nilsson, F.H. Peters, S.C. Pennypacker, J.L. Pleumeekers, R.A. Salvatore, R.K. Schlenker, R.B. Taylor, Huan-Shang Tsai, M.F. Van Leeuwen, J. Webjorn, M. Ziari, D. Perkins, J. Singh, S.G. Grubb, M.S. Reffle, D.G. Mehuys, F.A. Kish, and D.F. Welch, "Large-scale photonic integrated circuits," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 11, no. 1, pp. 50 – 65, Jan.-Feb. 2005.
- [6] S. C. Nicholes, "Large-scale photonic integration for advanced all-optical routing functions," PhD Dissertation, University of California, Santa Barbara, <http://www.ece.ucsb.edu/Faculty/Coldren/Dissertations/SNicholes%20Dissertation.pdf>, 2009.
- [7] P. Belotti, A. Capone, A. Carello, and F. Malucelli, "Multi-layer mpls network design: The impact of statistical multiplexing," *Computer Networks*, vol. 52, no. 6, pp. 1291 – 1307, 2008.
- [8] M. Mezhoudi and Y. Hu, "Optical backbone network evolution: Design, optimization and evaluation of NG-OTN," in Proceedings of Wireless and Optical Communications Conference, May 2010, pp. 1–6.
- [9] Juniper Networks, "MPLS, OTN, and the rising tide of traffic," <http://www.juniper.net/us/en/local/pdf/whitepapers/2000389-en.pdf>, 2011.
- [10] P. Belotti, K. Kompella, and L. Noronha, "A comparison of OTN and MPLS networks under traffic uncertainty," submitted to IEEE/ACM Transactions on Networking, 2011, <http://myweb.clemson.edu/pbelott/papers/robust-opt-network-design.pdf>.
- [11] G. Atkinson and R. Nagarajan S. Shaikh, "Economic benefits of optical transport layer reconfigurability and tighter coupling with the service layer," in Proceedings of Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium, NET-WORKS, June 2004, pp. 157–162.
- [12] M. Ruffini, D. O'Mahony, and L. Doyle, "Optical IP switching: A flow-based approach to distributed cross-layer provisioning," *Journal of Optical Communication Networks*, vol. 2, no. 8, pp. 609–624, Aug. 2010.
- [13] M. Mezhoudi and Y. Hu, "Economical analysis of NG-optical backbone transport network," in Proceedings of Wireless and Optical Communications Conference, April 2011, pp. 1–6.
- [14] M. De Groote et al., "Cost comparison of different translucent optical network architectures," in Proceedings of Telecommunications Internet and Media Techno Economics (CTTE), June 2010, pp. 1–8.
- [15] S. Melle and V. Vusirikala, "Network planning and architecture analysis of wavelength blocking in optical and digital ROADM networks," in Optical Fiber Communication and the National Fiber Optic Engineers Conference, OFC/NFOEC, March 2007, pp. 1–10.
- [16] M. Mezhoudi, R. Feldman, R. Gou-dreault, and B. Basch and V. Poudyal, "The value of multiple degree ROADMs on metropolitan network economics," in Proceedings of OFC/NFOEC, March 2006.
- [17] S. Gringeri, B. Basch, V. Shukla, R. Egorov, and T.J. Xia, "Flexible architectures for optical transport nodes and networks," *Communications Magazine*, IEEE, vol. 48, no. 7, pp. 40–50, July 2010.

Приложение

Мы приводим список компонентов, которые были использованы в архитектурах, рассмотренных в данной работе, вместе с кратким описанием их функциональных характеристик.

Канальный демультиплексор разделяет DWDM-сигнал на отдельные длины волн.

Канальный мультиплексор уплотняет отдельные длины волн в единый DWDM-сигнал.

Диапазонный демультиплексор разделяет DWDM-сигнал на отдельные группы длин волн. В данной работе делается допущение, что в каждой группе присутствует пять длин волн. Группа длин волн также часто называется диапазон волн или супер-канал.

Диапазонный мультиплексор уплотняет отдельные диапазоны длин волн в единый DWDM-сигнал. Длины волн в любых двух диапазонах должны отличаться.

Оптический маршрутизатор перенаправляет отдельные длины волн оптического диапазона от одного порта на другой. Маршрутизатор обычно имеет порты, соединенные с ODXC, банком OEO-преобразователей, банком мукспондеров, и т.д., на которые длина волны может быть перенаправлена для одной из следующих операций: отвод к клиенту, группирование, повторная генерация и преобразование длины волны.

Линейная карта преобразовывает длину волны (или диапазон длин волн) в электронный вид или обратно.

OEO-преобразователь превращает оптический сигнал в электронный, а затем обратно в оптический, осуществляя повторную генерацию. Входящая и выходящая длина волны могут быть различными в результате их преобразования. OEO-преобразователь может быть реализован на практике посредством установки двух линейных карт задними сторонами друг к другу.

Мукспондер представляет собой комбинацию мультиплексора/демультиплексора и транспондера. Он используется для уплотнения трафика малой гранулярности в высокопроизводительный трафик и разделения трафика высокой гранулярности на отдельные потоки трафика более низкой гранулярности (в серой оптике). Мукспондеры могут иметь несколько вариантов производительности, например 10x10 Гбит/с, 4x2,5 Гбит/с, и т.д. Несколько мукспондеров различной производительности могут сочетаться для реализации ввода/вывода сервисов меньшей гранулярности, чем емкость длины волны.

Оптический цифровой кросс-коммутатор (ODXC) используется для группирования трафика. Гранулярность коммутации ODXC принята на уровне ODU0 (1,25 Гбит/с).

Устройства ввода/вывода (A/D) на стороне клиента.

Любые мнения, результаты, выводы или рекомендации, приведенные в данном материале, являются личным мнением авторов данной работы и могут не отражать официальную точку зрения Университета Аризоны или Университета Джорджа Вашингтона.