

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЯ МОДЕЛИ ВНЕШНЕДОМЕННОЙ И
ВНЕСЕТЕВОЙ ОРГАНИЗАЦИЙ ИЕРАРХИЧЕСКИХ ОПТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ НА
ОСНОВЕ МЕТОДА λ -MPLS**

Были проанализированы основные проблемы и характеристики в современных иерархических оптических сетях на базе внешнедоменной и внесетевои моделей с λ -MPLS маршрутизацией. Исследованы основные характеристики пропускной способности данных моделей сетей на базе λ -MPLS и определены их основные преимущества и недостатки. Также приведены пути к повышению основных характеристик. Предложена универсальная модель распределенной λ -MPLS сети, с повышенной информационной пропускной способностью. Проведен сравнительный анализ технологии λ -MPLS на внесетевои и внешнедоменном уровнях сетевой иерархии на базе традиционных технологий с IP-маршрутизацией. Определены основные оптимальные пути повышения информационной пропускной способности.

Ключевые слова: каналы передачи информации; λ -MPLS модель; сетевая топология; узлы сети; трафик.

ASHRAF I.M. ALQAISI
Vinnitsa National Technical University

**RESEARCH AND DEVELOPMENT OF INTERDOMAIN AND OFF-NET MODELS OF OPTICAL
HIERARCHICAL NETWORKS WITH λ -MPLS METHOD**

The main problems and the characteristics of modern hierarchical optical networks based on interdomain and off-net models with λ -MPLS routing were analyzed. The basic characteristics of the bit rate and capacity of data networks based of this models on λ -MPLS. Also were identifies their main advantages and disadvantages. The ways of improving of their basic characteristics are also given. The universal model of distributed λ -MPLS network, with increased information bandwidth are present. The comparative analysis of the λ -MPLS technology of off-net and interdomain levels of the network hierarchy based on traditional technologies to IP-routing war presented. The main best ways to increase information throughput are defined.

Keywords: communication channels; information networks; λ -MPLS model information- networks ; network topology, network nodes; traffic.

Вступление и постановка проблемы

Современные методы коммутации и маршрутизации такие как OSPF и IGRP/EIGRP [1] на базе IP в современных оптических информационно-вычислительных сетях с SDH/SONET/ATM иерархией, не всегда дают необходимые технические характеристики по производительности ИВС, времени латентности (задержки при передаче), а также числу потерянных пакетов. Это обусловлено в результате возникновения таблиц построения маршрутов. На смену традиционным технологиям маршрутизации и коммутации в оптических сетях приходят новые методы и модели, которые базируются на оптической коммутации и маршрутизации по меткам это – λ -MPLS (или optical-MPLS, OMPLS) протоколы и архитектуры, которые строятся поверх IP-оптических сетей с обязательным WDM-мультиплексированием в опорных сетях на 1-физическом уровне модели OSI [1].

Модель внешнедоменной сети

Для решения задач построения внешнедоменной λ -MPLS иерархических сети используются специальные граничные λ -ESB (magistral λ -ESP) или «Boundary» Switch Routers маршрутизаторы, которые связаны между доменами скоростной волоконно-оптической магистралью на 100Гбит – 10Тбит. Внутри доменов они связываются между собой с помощью коммуникационных портов на базе ВОЛЗ с λ -ESR. Модель внешнедоменной сети λ -MPLS показана на рис.1.

В данной модели (рис.1) обозначены следующие типы существующих маршрутизаторов:

- оптический λ -EDGE λ -LSB (E-LSB) — λ -LSB магистральный маршрутизатор, который находится на границе доменов в иерархической сети λ -MPLS и обрабатывает IP пакеты в стеке протоколов TCP/IP, как с наложением меток в рамках одного домена для передачи меток на другой домен. Также его называют Optical Label Edge Boundary Router (λ -L-LEB);
- INGRESS λ -E-LSR — маршрутизатор конкретного пакета, который выполняет агрегацию пакетов без метки, прежде чем поместил метку в пакет;
- λ - EGRESS (λ - E-LSR) — маршрутизатор конкретного пакета, который выполняет агрегацию пакетов с меткой и затем убирает все метки MPLS и передает IP-пакет дальше в сети TCP-IP другим маршрутизаторам.

Очевидно, что такая модель междоменной организации оптической ИВС на базе λ -MPLS за счет большей спектральной эффективности магистральных каналов F_S будет иметь выигрыш по сравнению с традиционной структурой IP-сетей, однако учитывая сложность в наложения меток будет крайне сложной в плане построения таблиц маршрутизации по сравнению с внутредоменной сетью с учетом критерия границы информационной пропускной способности ИВС и коммуникационных сетей (критерия Хартли-Шеннона (1) с величиной дополнительной хроматической дисперсии, которая адаптивно формируется при разных длинах волн [2]:

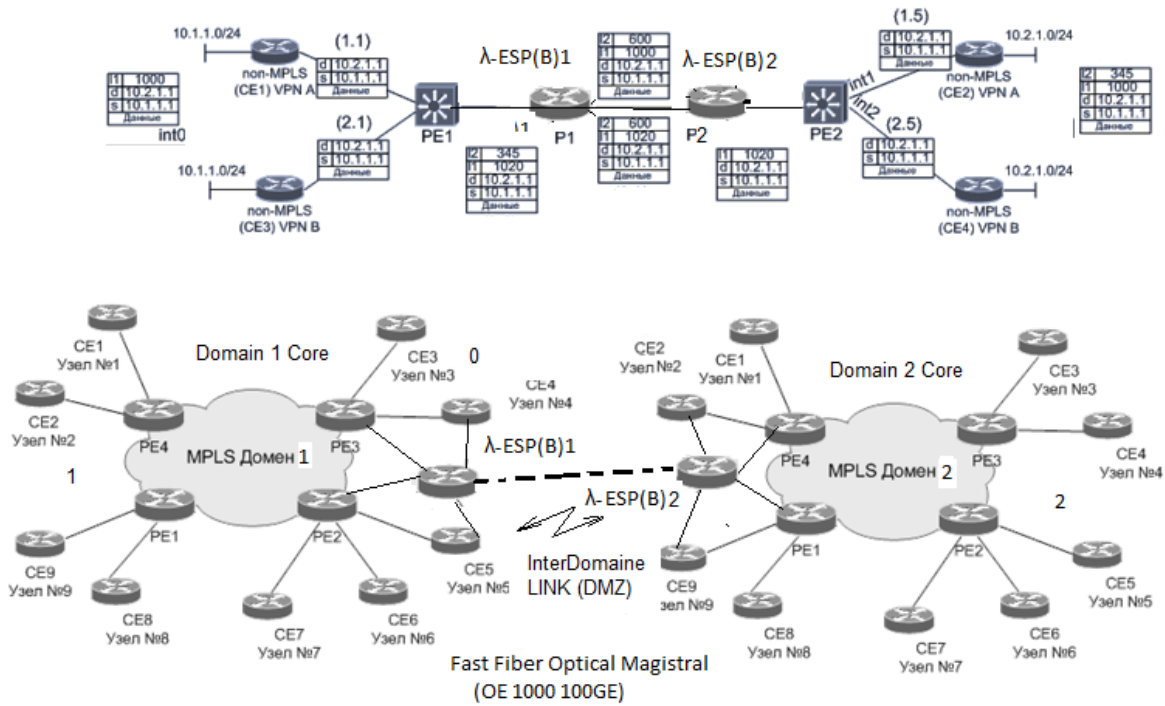


Рис.1. Структурная модель λ -MPLS междоменной сети с использованием магистральных «Boundary» λ -ESP маршрутизаторов

$$\begin{aligned} \tau_{chr}(\lambda_{ESB-ESB}) &= A + B \times \lambda_{ESR}^2 + C \times \lambda_{ESR}^2 \ln \lambda_{ESR} + A + B \times \lambda_{ESB}^2 + C \times \lambda_{ESB}^2 \ln \lambda_{ESB}; \\ \tau_{chr}(\lambda_{ESB-ESB}) &= D(\lambda_{ESB-ESB}) \times \Delta \lambda_{ESB-ESB}; \end{aligned} \quad (1)$$

где λ_{ESR} – длины волн меток внутредоменной модели ИВС на базе λ -MPLS; λ_{ESB} – длины волн меток междоменной модели ИВС на базе λ -MPLS; комплексное наложение длин волн $\Delta \lambda_{ESB-ESB}$ меток как внутри домена, так и междоменами в общей междоменной модели ИВС на базе λ -MPLS; $\tau_{chr}(\lambda_{ESB-ESB})$ – величина общей хроматической дисперсии в междоменной системе ИВС на базе λ -MPLS.

Величина общей хроматической дисперсии $\tau_{chr}(\lambda_{ESB-ESB})$ в междоменной системе ИВС на базе λ -MPLS, является основным негативным фактором, влияющим на величину общей дисперсии τ_z и соответственно на скорость и пропускную способность каналов волоконно-оптической иерархической сети.

Значение полной дисперсии системы ВОЛС определяется известным и хорошо отработанным на практике выражением: $\tau_z = \sqrt{\tau_{mat}^2 + \tau_{chr}^2 + \tau_{mod}^2 + \tau_{dNE}^2}$ [2], где τ_{mat} , τ_{chr} , τ_{mod} , τ_{dNE} – составляющие материальной, хроматической, модовой, нелинейной или другой адаптивной дисперсии в оптическом волокне. Составляющие τ_{chr} , τ_{mod} имеют место во всех многомодовых волокнах традиционных волоконно-оптических систем передачи данных. А составляющая нелинейной и адаптивной дисперсии τ_{dNE} проявляется только при высоких граничных значениях оптической мощности P_{opt} в ОВ.

Значения именно в последних определяется двумя основными показателями τ_{chr} и τ_{dNE} , которые зависят как от количества $M_{\lambda k}$ длин волн λ_k междоменной системы λ -MPLS, так и от мощности, каждого информационного сигнала на каждой из этих длин волн.

В междоменной ИВС на базе λ -MPLS ключевым фактором является хроматическая дисперсия τ_{chr} , хотя при достаточно больших дальностях разнесения доменов ($L > 10$ км) в ВОЛС применяют волоконные передатчики и SFP-волоконные модули с рабочей оптической мощностью P_{opt} 100-200 мВт, что также способствует возникновению дополнительного компонента τ_{dNE} для таких систем. В целом, это приводит к уменьшению общей пропускной способности магистральной сети, расположенной вне домена, поскольку полоса пропускания обратно пропорциональна общей величине среднеквадратической дисперсии

τ_z и определяется для ВОЛС как $F_{max} = 0.44 / \tau_z$ [2]. Суммарная среднеквадратической дисперсия τ_z – это процесс уширения составляющих информационного импульса в результате распространения его по волоконно-оптической среде. Чем больше ее значение, тем меньше полоса пропускания волоконно-оптического канала и меньше символьная скорость передачи данных, как в магистральном единичном

канале, так и в междоменной структуре ИВС на базе λ -MPLS . Общая пропускная способность [Бит/с] междоменной модели ИВС на базе λ -MPLS будет определяется количеством магистральных каналов связи домена n_{chM} и количеством каналов внутри домена n_{ch} ИВС и общей дисперсией системы в ОБ:

$$\max \text{Bit traffic} = n_{ch} \times n_{chM} \times F_{\max} \log_2[V + S/N] = \frac{0.44 \cdot n_{ch} \cdot n_{chM}}{\tau_z} \log_2[V + S/N],$$

$$\max \text{Bit traffic} = \frac{0.44 \cdot n_{ch} \cdot n_{chM} \cdot N_i \cdot \log_2[2 + S/N]}{\sqrt{\tau_{mat}^2 + \tau_{chr}^2 + \tau_{mod}^2 + \tau_{dNE}^2}} \quad [\text{Бит/с}] \quad (2)$$

де V – количество уровней сигналу ($V=2$ при цифровой передаче); S/N – отношение сигнал-шум в канале, $S/N_n = \sqrt{\sum_n P_i^2}$; P_i – мощность помехи в системе ВОЛС среди полного количества помех n ; N_i – количество единичных оптических каналов ВОЛС в междоменной системе λ -MPLS.

При совместном использовании технологии λ -MPLS в высокопроизводительных сетях 100GE (100-Gbps channel) и метода WDM мультиплексирования возникает необходимость правильного их согласования с основным содержанием IP-пакетов для достижения оптимальной скорости передачи пакетов.

На таких высоких скоростях (100-200 Гбит/с) комбинации меток с основными IP-пакетами в трактах WDM должны быть максимально плотными во временном интервале, во избежании расширения полного поля пакетов и как следствие увеличение времени передачи полного кадра. На сегодняшнее время, очень мало приложений используют такую высокую скорость в основном – это только междоменные мультисервисные платформы агрегации пакетов (Например, такие как Cisco EDGE 6500), предназначенные для агрегации каналов и потоков между региональными центрами и глобального распределения сети Internet [3].

Пропускная способность одной ветки λ -MPLS домена будет определяться как:

$$C_{MPLS} = W \times F_s = \frac{1}{T_Z + T_{MPLSD}} \times F_s, \quad (3)$$

Обобщенная междоменная модель λ -MPLS может быть представлена с учетом структуры (рис. 1) на рис. 2.

Очевидно что сравнивая традиционные сети TCP/IP на базе OSPF или EIGRP маршрутизаторами, λ -ESB MPLS ИВС будут иметь значительно большее общее время латентности по сравнению с традиционными λ -ESR маршрутизаторами. $T_Z \lambda\text{-ESB} \gg T_Z \lambda\text{-ESR}$ за счет агрегации содержимого IP-трафика в магистральных каналах между доменами λ -MPLS и менее быстрой коммутации (L3).

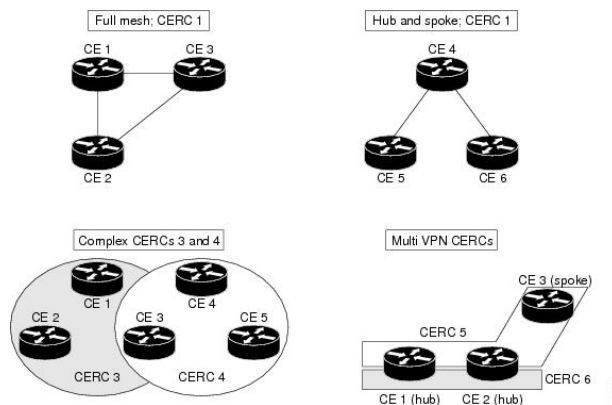


Рис.2. Обобщенная модель волоконно-оптической иерархической λ -MPLS сети с междоменной организацией

Пропускная способность внешнедоменной магистрали (связь между λ -ESP(B)1 и λ -ESP(B)2, показанная на рис.1) с коммутацией пакетов и статистическим мультиплексированием и λ -MPLS определится как:

$$BW_{\lambda\text{-MPLS}(\lambda\text{-ESB})}(i) = C_{MPLS} \times \frac{\bar{L}_{layer}(i)}{\bar{L}_{packet}(i+1)} \cdot K_{usable} \cdot R(i) \cdot K_{\lambda\text{-ESB}} \quad (4)$$

где $\bar{L}_{layer}(i)$ и $\bar{L}_{packet}(i+1)$ - слои иерархии сети ИВС на базе и λ -MPLS; K_{usable} - коэффициент использования слоя; $R(i)$ - функция распределения пакетами нагрузки сети по слоям; $K_{\lambda\text{-ESB}}$ – коэффициент распределения скорости на λ -ESB маршрутизаторах.

Модель формирования меток λ_c (внутридоменных) и λ_j (междоменных) меток при построении единичной

цепочки междоменной иерархической ИВС на базе λ -MPLS (показана на рис. 3) с кодирование каждой метки пакетами на каждой из длин волн λ_c из общего диапазона $\lambda_1 \dots \lambda_k$ ($\lambda_i \in \lambda_1 \dots \lambda_k$) – внутредоменных меток и $\lambda_{1j} \dots \lambda_{kj} \dots \lambda_{kj}$ ($\lambda_j \in \lambda_1 \dots \lambda_j$) – междоменных меток представлена графом кодирования меток (табл. 1). Причем: $M_{\lambda_i} = \text{SUM } \lambda_i$ ($\lambda_i=1$ for λ_k). $\text{SUM } \lambda_j$ ($\lambda_i=1$ for λ_k).

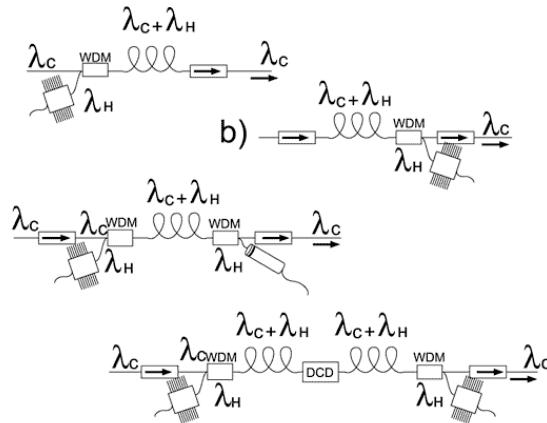


Рис. 3. Модель построения единичной цепочки междоменной иерархической ИВС на базе λ -MPLS

Таблица 1.

Таблица кодирования меток λ_c из общего числа M для $M_{\lambda_i} = 5$

λ_{1k} (метка 1, внутр. домен.)	λ_{2k} (метка 2, внутр. домен.)	λ_{1j} (метка 1, междомен.)	λ_{2k} (метка 2, междомен.)	Сумарное количество меток $M_{\lambda_i}(\lambda_i) \& \lambda_k \& M_{\lambda_j}(\lambda_j) \& \lambda_j$
1310	1510	1320	1520	8
1320	1520	1330	1530	4
1330	1530	1340	1540	8
1340	1540	1350	1550	8
1350	1550	1310	1510	4

На рис. 4 приведены результаты моделирования процесса передачи сигнала (в среде моделирования ВОЛС – OptiSim R-Soft TM Trial) и получены основные аналитические оценки влияния дисперсии в λ -MPLS междоменных иерархических сетях (канал по модели домена λ -MPLS изображен на рис.2).

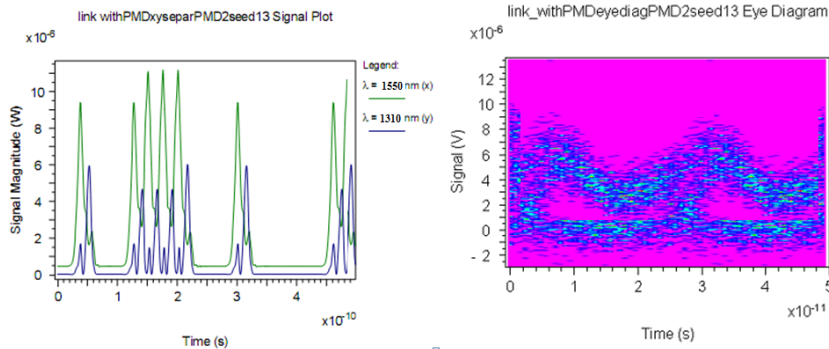


Рис. 4. Основные аналитические оценки влияния дисперсии в λ -MPLS – междоменных λ -MPLS ИВС

Проведены основные аналитические оценки внутредоменной модели ИВС (рис.4) на базе λ -MPLS – по математической модели (3)- (4) в программе MathCAD 14 и были получены аналитические выражения для выигрыша в производительности (рис.5).

Сама компьютерная модели показана на рис. 6. Здесь функция распределения пакетной загрузки сети по слоям $R(i)$ задана в зависимости от степени неравномерности трафика при использовании тракта коммутации λ -MPLS . Значительное улучшение степени оптимизации работы внутредоменной модели сети и пропускной способности при передаче неравномерного смешанного трафика и соответственно значения загрузки можно получить при использовании многоуровневой технологии иерархии.

По сравнению с внутредоменной ИВС на базе λ -MPLS достигается возможность гибкой маршрутизации, однако общая производительность междоменной сети будет меньшей за счет использования большого числа меток и соответственно длин волн λ_j и λ_k , необходимых для выделения под них. Предположим, что по сети λ -MPLS расположенной поверх ATM или FrameRelay передаются IP-пакеты.

Средний размер Internet-пакета (IP- пакета) в междоменной сети составляет на данный момент составляет 1518 бит. Каждый пакет содержит сервисную информацию протоколов IP (20 байт), TCP (от 20

до 25 байт), HDLC (6 байт), причеm последняя опускается при коммутации по λ -MPLS (1500-битный пакет IPv4 содержит 320 бит служебной информации L Service на уровнях L2-L3 и 2064 бита данных B_{data}). Кроме этого, перед передачей на AAL3 к каждому пакету присоединяется дополнительно 8 байт фрейма AAL3, и 8 байт LLC/SNAP, и 2 бита LLC/SNAP / λ -MPLS т.е. Кроме этого, перед передачей на AAL3 к каждому пакету присоединяется дополнительно 8 байт фрейма AAL5, и 8+2 байт LLC / SNAP, т.е. $L_{aal5} = 8 \cdot 8 + 8 \cdot 8 \cdot 2 = 192$ (бит).

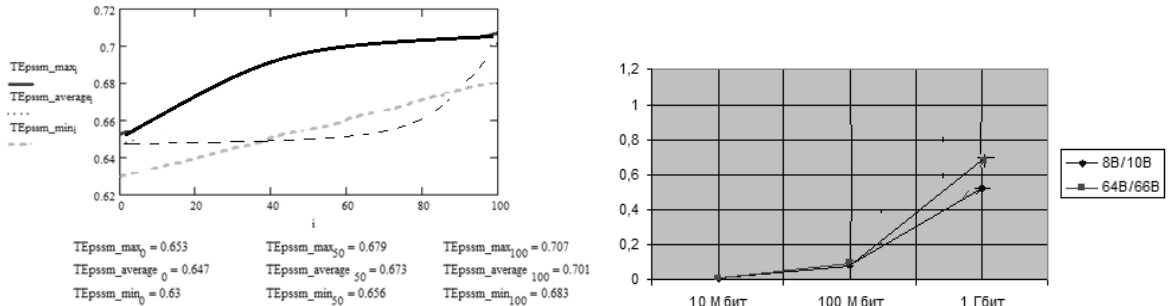


Рис.5. Результаты моделирования зависимости времени передачи и пропускной способности в сетях IP и в междоменных ИВС λ -MPLS пр. разных параметрах загрузки сети на основе стандарта Gigabit Ethernet

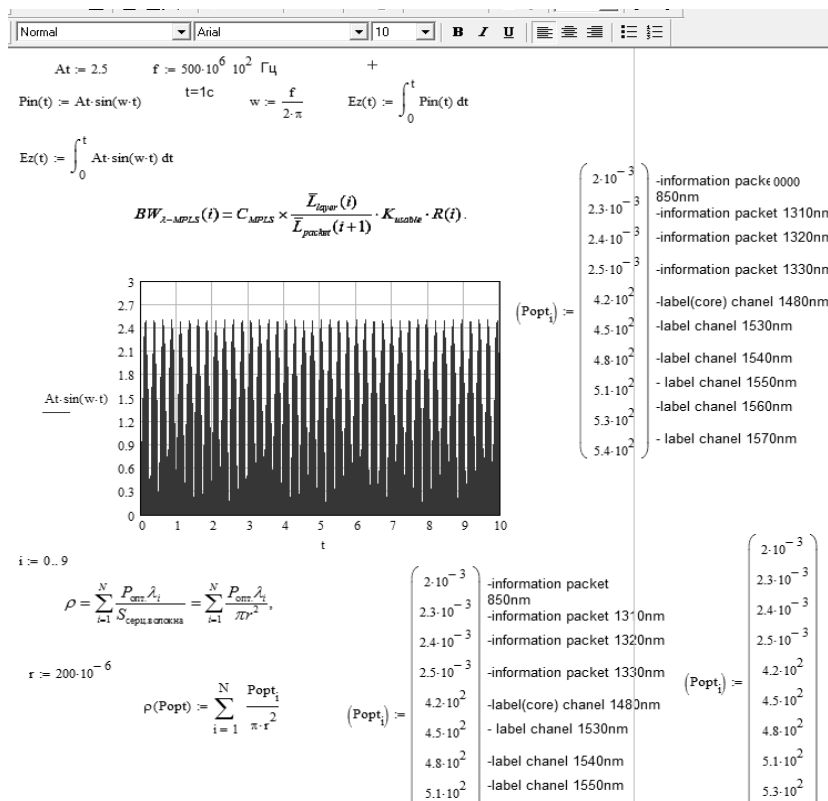


Рис.6. Компьютерная модель процесса передачи данных через ИВС на 2-х доменах на базе λ -MPLS

Результаты моделирования показывают, что больше всего при высоких скоростях и степени загрузки сети и передачи большого количества трафика в междоменных сетях на величину пакетной задержки во внутредоменном λ -MPLS влияют размер пакета, количество меток соответствующего количеству каналов N_i и количество возможных каналов коммутации (IP- пакеты малых размеров несут большое число служебной информации) и максимальную загрузку, которая может быть поддержана соответствующим λ -ESB маршрутизатором или коммутатором (L3). Размер нагрузки при этом уменьшается до значения 70-80% для кадра 1518 байт (IP- пакета) в приведенной модели значения загрузки составит 2,46.

Сложность схем организации кодирования меток и высокая стоимость оборудования λ_k -ESR и очень высокие требования к оптическим трактам и компонентам является основным сдерживающим фактором по внедрению междоменных ИВС на базе λ -MPLS, что также подтверждает значительный опыт в этом направлении корпорации Cisco Systems (США).

Модель иерархических оптических сетей на основе λ -MPLS с внесетевой организацией

В существующей литературе по методу организации ИВС и транспортных сетей а базе λ -MPLS [4, 10, 11] очень мало информации посвящено именно организации λ -MPLS на мультидоменном и

магистральном уровне построения сетей. Именно, ведущие в области телекоммуникаций и построения иерархических ИВС корпорации: Cisco Systems (США), Alcatel-Lucent (Франция) и Huawei(Корея) ограничиваются исследованием сетей λ -MPLS на уровне внедоменной организации на уровне до 10 доменов. Это обусловлено в первую очередь тем, что технология λ -MPLS в магистральных высокопроизводительных иерархических оптических сетях крайне сложна и дорогостояща в экономическом плане при ее практической реализации. Стоимость граничных маршрутизаторов λ -MPLS - λ -ESR превышает по крайней мере в 3-5 раз стоимость аналогических оптических ESR решений на оптоэлектронной элементной базе с электрооптическим и оптико-электрическим преобразованием на электронной матрице коммутации/маршрутизации (L3). Стоимость пограничных магистральных междоменных маршрутизаторов λ -ESB может в несколько десятков раз превышать стоимость традиционных электронных решений (с электронной коммутацией/маршрутизацией (L3) и находится в размерности до 100 000 USD. (дол. США). Такие маршрутизаторы, как правило являются составляющими компонент транспортных мультисервисных платформ агрегации магистральных потоков (типа Cisco EDGE 6500, 12000 и выше). Кроме этого, основным фактором, сдерживающим распространение λ -MPLS на уровне магистральных сетей является значительные значение хроматической дисперсии на больших дистанциях $L > 10$ км. Этот процесс описывается зависимостью удельной хроматической дисперсии на больших значениях длины L [4]:

$$\tau_{\lambda_i}(\lambda_L) = \partial \tau / \partial \lambda \cdot \partial L = 2(B\lambda - C\lambda^{-3})\partial L = \frac{1}{2}(L_0 - L)S_0(\lambda - \lambda_0^4 / \lambda^3) / 4, \quad (5)$$

где $\lambda_0 = (C/B)^{1/4}$ – длина волны нулевой дисперсии, $S_0 = 8B$ – наклон нулевой дисперсии [2, 5], λ – рабочая длина волны, для которой определяется удельная хроматическая дисперсия; L_0 , L – нулевая и поточная точки отчета длины участка волоконно-оптической линии, которые определяют активную длину участка. Нулевая точка отчета длины участка волоконно-оптической линии как правило берется равной 0 и является точкой размещения конечного передатчика ВОЛС маршрутизаторов λ -ESR (λ -ESB).

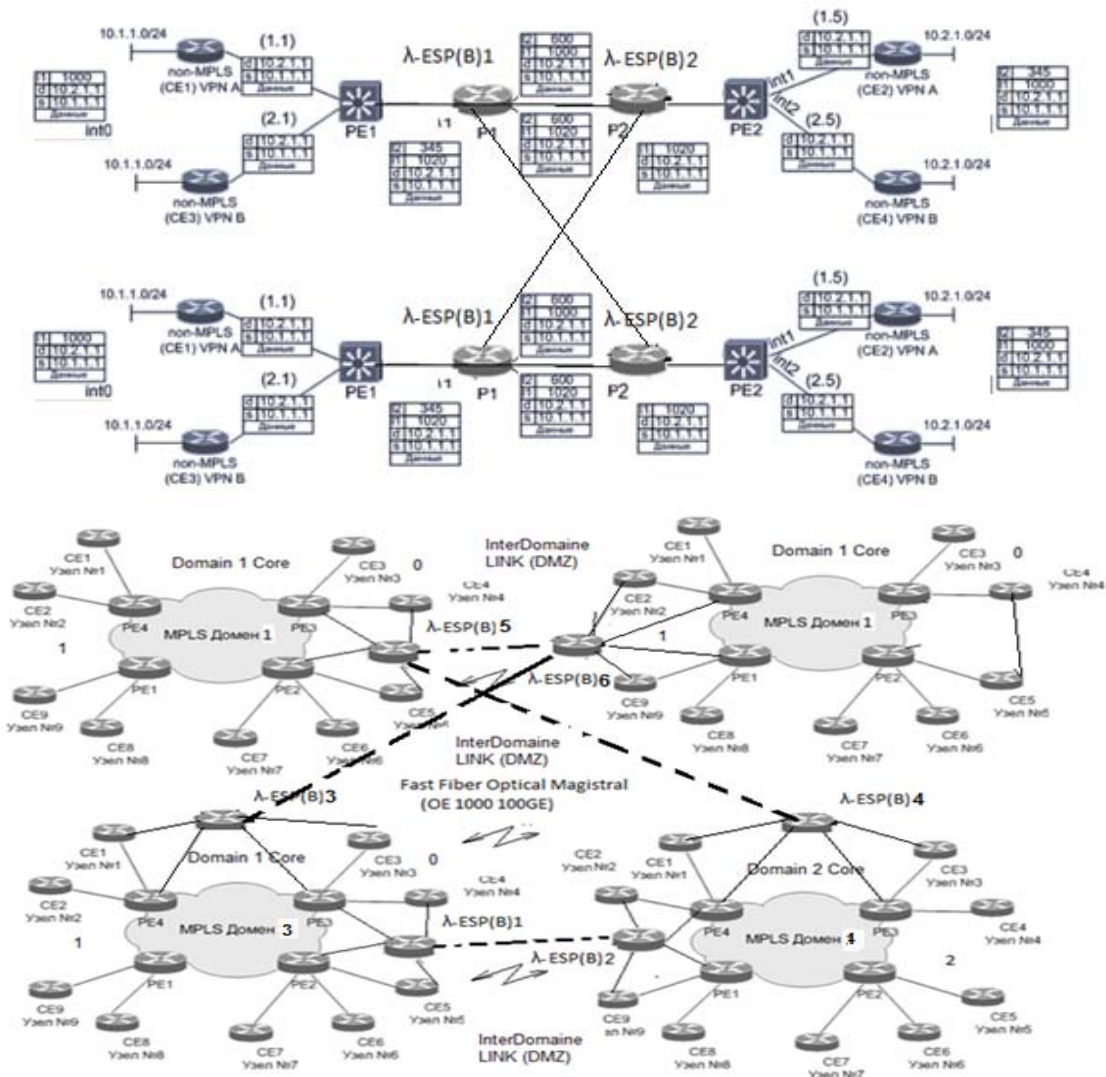


Рис.7. Модель межсетевой ИВС (мультидоменного) на основе λ -MPLS на базе 4-х доменов

Проблематика оптической λ -коммутации в цепях усилителей EDFA внутри каждого домена и особенно во введомной организации с конкретного количеством длин волн меток λ_k и λ_j в WDM системах является действительно значительной. В зависимости от количества каналов, мультиплексированных в тракт λ -MPLS λ -ESB-маршрутизатором, каждый канал передачи является автономным, однако не может быть линейно усилен в трактах EDFA – усилителей и в плане стороннего формирования нелинейного усиления, некоторые каналы будут утеряны в силу потер меток λ_k для тракта без потери дальности связи для информационных пакетов. Ширина спектра большинства традиционных усилителей EDFA составляет $\Delta\lambda=1450-1480$ и соответствует активным областям поглощения волокна легированного ионами Er^{3+} , что используется у волоконно-оптических усилителей EDFA.

Модель межсетевой ИВС (мультидоменного) на основе λ -MPLS представлена на рис.7.

Данная модель (рис.7) крайне сложна в практической реализации и описании и включает большое количество маршрутизаторов/коммутаторов уровня (L3). При ее описании и настройке на практическом уровне возникают проблемы с управлением большого количества служебного трафика таблиц, маршрутизации в оптических. Как краевых λ -ESR, так и магистральных пограничных λ -ESB маршрутизаторов. Таблицы маршрутизации представленных на разных длинах волн. Главным критерием, является отсутствие перекрытия двух длин волн внутри домена с кодирование каждой метки пакетами на каждой из длин волн λ_c из общего диапазона $\lambda_1 \dots \lambda_c \dots \lambda_k$ ($\lambda_i \in \lambda_1 \dots \lambda_k$) и общим числом $M_{\lambda_i} = \sum \lambda_i$ ($\lambda_i=1$ for λ_k).

Пути улучшения междоменной маршрутизации λ -MPLS

Канал ВОЛС на базе λ -MPLS с полосой пропускания 100-Gbps, строится на базе комбинации многих сигналов на более низких скоростях, так как очень мало отдельных приложений сегодня используют эту высокую пропускную способность. Такие аппаратные решения в объединении с междоменными λ -ESB маршрутизаторами в λ -MPLS-доме не предназначены для объединения низкоскоростных мультиплексированных каналов внутри домена в высокоскоростные магистрали λ -ESB роутерами. С оптимальным временем формирования кадра с разными метками λ_k для формирования каналов с более высокой скоростью. Такая обобщенная схема (рис. 2) используется для оптимального повышения скорости для всей полосы пропускания междоменной модели ИВС на базе λ -MPLS, так как она ограничена скоростью времени мультиплексирования и демуплексирования компонент.

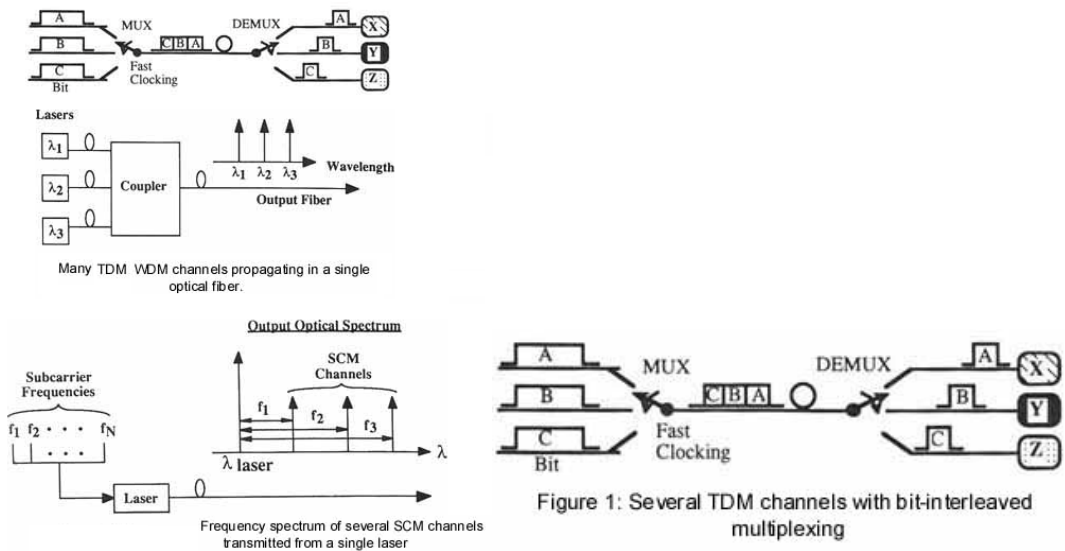


Рис.8. Схема для оптимального повышения скорости для всей полосы пропускания междоменной модели ИВС на базе λ -MPLS, так как она ограничена скоростью времени мультиплексирования и демуплексирования компонент [6]

Также активно применяется и мультиплексирование с временным разделением (TDM) в сочетании с WDM трактами, которое может быть осуществлено и в электрической и в оптической области, с каждым меньшей скорости канала передачи бит/с (пакет/с) в заданном временном интервале с ожиданием своей очереди маршрутизации и передачи на скоростях <100-200Gbps.

Другим методом, концептуально связанным с WDM и который эффективно можно использовать в схеме (рис. 8) является использование вторичных поднесущих мультиплексирование (SCM) для непосредственного модулирования $\sim 10^{12}$ терагерцового оптического диапазона сигналов с несущей волны с пакетами данных до 100Gb/s (Гбит/с) базовой полосы (рис.9).

Оптическая схема мультиплексирования с использованием SCM (рис.9) называется мультиплексированием с пространством разделением, в котором канал для канала маршрутизации в λ -MPLS междоменной структуре определяется различным пространственным положением с использованием формирования меток на длинах волн λ_k . Схема показана на рисунке 3, в котором оптический выход волокна разделяется на N различных и параллельных каналов с мультиплексированием и маршрутизацией меток λ_k как внутри домена так и вне оптического луча. Каждая из выходных N – меток из общего числа пропускается через

световод модулирующего переключателя, а затем соединяется с другим выходным волокном. Управляя коэффициент пропускания каждого оптического модулятора, сигнал на входе в волокно может быть направлен и маршрутизирован λ -ESB на любой выходной оптический порт. По такому сценарию, N входных меток в одном волокне может быть полностью соединены между собой с $N_{\lambda k}$ портами волоконным выходом с помощью матрицы оптических переключателей N_k . Подобная технология для внедрения систем управления метками λ_k в умеренной скорости уже активно выходят на рынок. В отличие от всех других методов, однако, каждый канал занимает свою пространственную координату, и все другие каналы не могут быть переданы одновременно на одном волокне. Другими словами, мы не более полного использования высокой пропускной способности волокна, но создается матрица пространственной коммутацией (L3) с высокой пропускной способностью, в результате чего большая общая емкость коммутации (L3) может быть реализована.

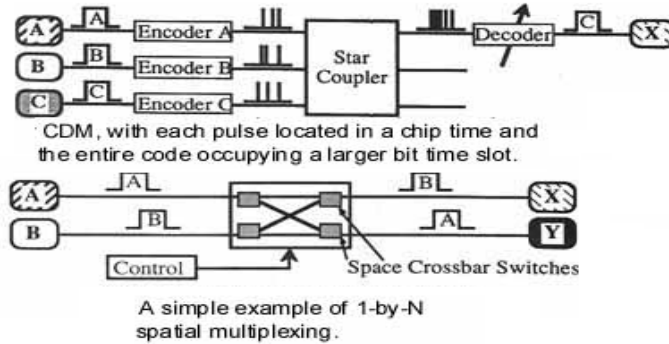


Рис.9. Схема для повышения скорости для всей полосы пропускания междоменной модели иерархических ИВС на базе λ -MPLS с использованием мультиплексирования SCM

Значения максимальной полосы пропускания такой комплексной модели на физическом уровне (L1) оптического волокна для единичного волоконного канала может быть выведено с учетом схем (рис.8-рис.9) и формулы (3), как:

$$W_{\lambda MPLS(TDM-WDM-SCM)} = \frac{0.44 N_{TDM} \cdot N_{WDM} \cdot N_{SCM}}{\tau_z} \cdot \sum_{i=1}^{N_{\lambda k}} S_i \quad (6)$$

Пропорциональное увеличение единичного волоконного канала в междоменной модели λ -MPLS позволит повысить количество каналов и соответственно скорость еще на один уровень полосу пропускания системы на уровне:

$$W_{\max SCM-TDM-WDM} \approx \sum_k^{K_{SCM}} \sum_j^{N_{TDM}} \sum_i^{M_{WDM}} \frac{0.44}{\tau_z} N_i S_i, \quad (7)$$

где τ_z – общая дисперсия единичной волоконно-оптической линии; K_{PFOI} – общее количество единичных волоконно-оптических линий, которые входят в состав междоменной модели λ -MPLS ($k \in 1..K_{\lambda-MPLS}$); N_i – количество каналов мультиплексированных во времени (TDM) и за методами WDM и SCM с с помощью технологии комплексного сжатия пакетов и меток ($\lambda_j, \lambda_j \in 1..N_j$).

Выиграш по продуктивности в междоменных λ -MPLS сетях можно оценить минимальным временам передачи заголовка пакета $T_{загMPLS}$, которое определяется следующим соотношением:

$T_{загMPLS} = m(T_p + T_{MPLSD} + D(K_{MPLS} - 1)\Delta\lambda_{MPLS}L)$, где T_{MPLSD} – время латентности при междоменном взаимодействии.

В отличии от формулы (6), формула модели (7) будет иметь большие временные взаимодействия, за счет формирования дополнительных больших таблиц маршрутизации и использования дополнительных меток на других длинах волн λ_k и λ_j для взаимодействия меж доменами.

Разработка универсальной модели λ -MPLS сети

Хорошо изучена технология и модель оптических коммутационных λ -MPLS сетей с внутредоменной организацией, когда основой выступают INGRESS λ -E-LSR и λ -EGRESS (λ -E-LSR) – роутеры, которые выполняют направление каждого пакета и выполняют их агрегацию без метки, прежде чем поместить/удалить метку из пакета в рамках прохождения его внутри MPLS-пакета и передачи IP-пакет далее на другие компоненты сети TCP-IP и другими маршрутизаторами (рис.10) [3].

Обобщенная структурная схема оптической внутредоменной сети λ -MPLS [6] показана на рис. 10 представляет собой оптический DWDM-домен с границами преобразования λ -ESR- маршрутизаторов и передачей пакетов от электронных пакетов в оптические сигналы. Основной узел источника пакетов Client A генерирует IP-пакеты, которые направляются с помощью обычных электронных IP-маршрутизаторов Ingress (L3) на маршрутизатор в оптическую сеть MPLS. Метки, закодированные в оптической форме λ -ESR

добавляются IP-пакеты на оптический коммутатор, расположенный на входном маршрутизаторе. Оптические коммутаторы ядра выполняют маршрутизацию и пересылку по меткам стопинга (Swoping). Ядро сети представляет собой оптический домен с WDM/DWDM – маршрутизаторами и скоростными волоконно-оптическими линиями связи. В процессе работы, когда информационные пакеты с λ -метками оставляют оптическое ядро сети. Краевые маршрутизаторы λ -ESR снимают оптические метки и превращают пакеты в электронные сигналы и направляют в обычную электронную сеть с маршрутизаторами L3.

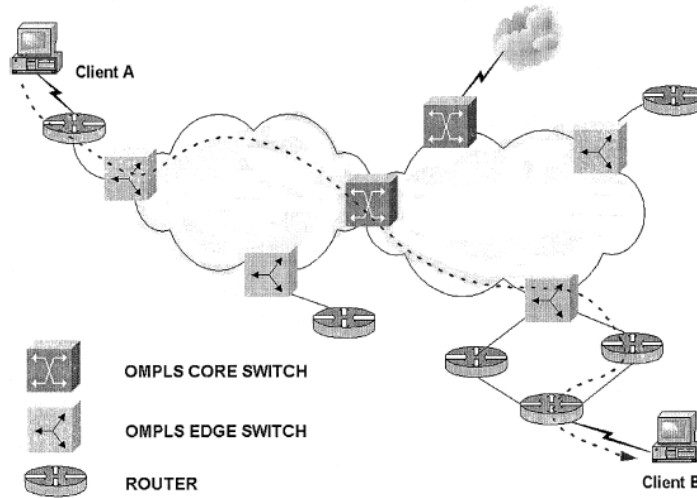


Рис.10. Базовая структурная модель универсальной оптической сети λ -MPLS сети

На рисунке 10 изображены сетевые элементы физического уровня, соединенных волоконно-оптических линий и маршрутизации пакетов и иерархия переадресации [7]. IP-пакеты генерируются в электронный слой маршрутизации (IP-маршрутизаторы) и обрабатываются в адаптации λ -MPLS (OMPLS). Основной слой, который инкапсулирует IP-пакеты с оптической меткой λ_k без изменения оригинала. Структура пакета во внутридоменной организации показана на рис.11.

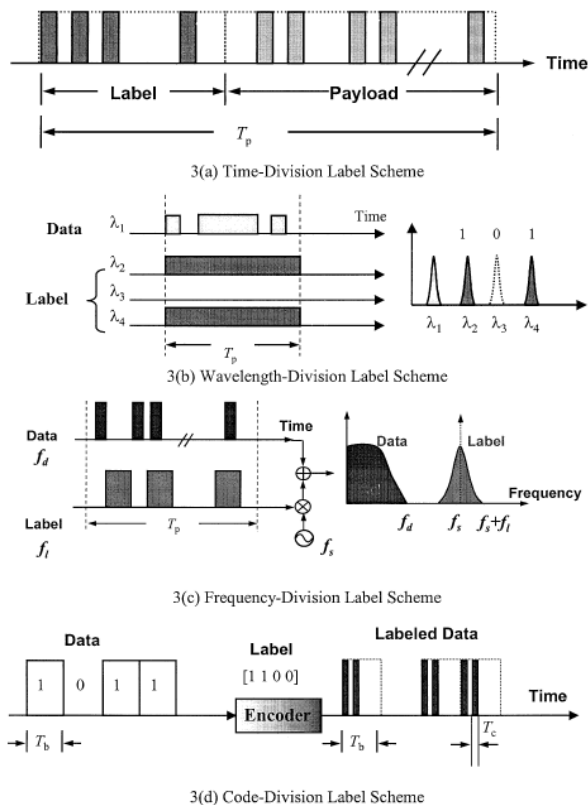


Рис.11. Схемы технологий формирования оптических меток на ранних длинах волн λ_k с использованием ранних частот f_k : (а) – накладные расходы во временной области формирования метки T_p в процессе длительности пакета на промежутке $f_d - f_l$, (б) f_s – поднесущая метки; (с) T_b и T_c – время распространения кода метки и (д) λ_1 длины волны распространения информационного пакета; $\lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ – длины волны кодирования меток при различных комбинация этих носителей, которые обозначают различные метки

В процессе работы адаптационный слой превращает пакет и метки в новые длины волн и определяет локальные таблицы маршрутизации. $\lambda_n - \lambda_k$ при WDM-мультиплексировании в оптический слой мультиплексирования и маркированные пакеты на общую среду волокна.

Для построения универсальной модели λ -MPLS (OMPLS) иерархической оптической сети необходимо в корне пересмотреть тип соединения маршрутизаторов λ - ESR и λ - ESB, которые во всех известных моделях не являются прямыми (direct – route-connection-path). Универсальная модель сети λ -MPLS строится на традиционной архитектуре трехуровневых оптических сетей с учетом применения универсальной трехграничной ячейки (tree-boundary cell) (рис.11а), которая применяется НПО всей структуре на всех 3-х уровнях (core-access-distribution) и позволяет соединять все слои сети гармонично из контролируемой иерархией (модель такой сети показана на рис.11б). Контролируемая иерархия позволяет выборочно соединять все слои системы λ -MPLS и избежать переполнения меток и нагромождения аппаратуры в системе λ -MPLS, что позволяет перенять преимущества внутредоменной и внедоменной моделей сетей избежать недостатков присущих межсетевой модели λ -MPLS сетей. Предложенная универсальная модель λ -MPLS оптических иерархической сети, показанная на рис.12.

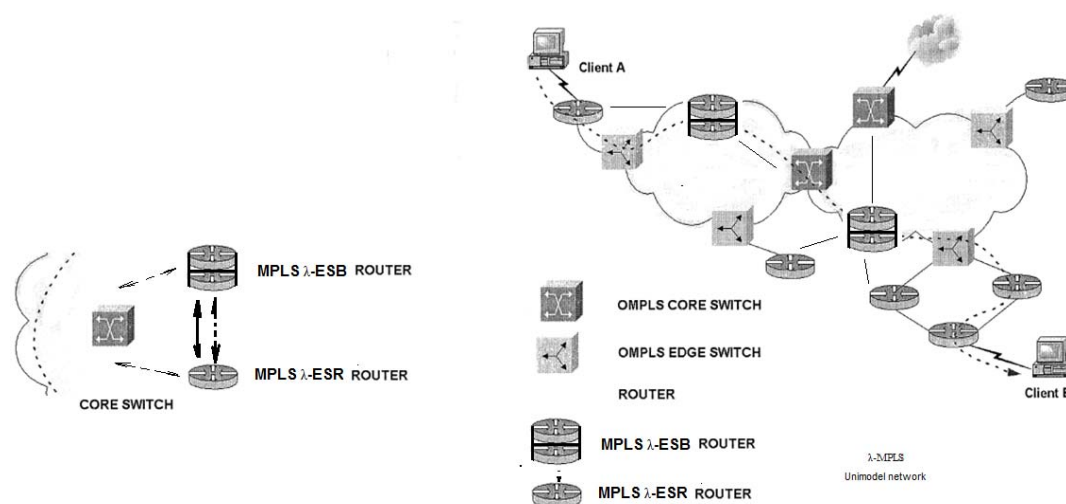


Рис.12. Структурная универсальная модель λ -MPLS оптических иерархических сетей на базе а) универсальной трехграничной ячейки (tree-boundary cell) и б) полная модель универсальной сети

Некоторые подходы к оптическому мультиплексированию могут быть использованы в данной модели, в том числе при введении непосредственно на доступный канал WDM [8, 9], при сжатии пакетов через оптический временной TDM или оптический WDM-мультиплексор при времени смешивания при компрессии(сжатии) информации через временной и оптический порт. Также может применяться кодовое разделение каналов в ядре оптической сети MPLS, когда магистральные маршрутизаторы λ -MPLS – λ -ESR, которые могут быть разделены на 2 основные части: компонент управления и компонент пересылки, выполняют маршрутизацию при передачи функций управления(агрегации) трафика.

Основные преимущества универсального (унидоменного λ -MPLS):

- Быстрая скорость коммутации и пересылки пакетов в ядре λ -MPLS оптической сети;
- Большая производительность ядра сети и возможность агрегации большего количества трафика B_i ;
- Высокая скорость коммутации пакетов и каналов в структуре центра оптического ядра λ -MPLS.
- Возможность пересылки большого объема трафика внутри оптического ядра сети и построение скоростного ядра сети на основе оптических методов мультиплексирования WDM с λ -коммутацией.

Основными недостатками сетей λ -MPLS являются :

- высокая стоимость оборудования и высокие аппаратурные затраты организации ядра сети;
- отсутствие широкого промышленного производства линейки λ -ESR и λ -ESP маршрутизаторов, что исключает возможность широкой замены и функциональности широкого внедрения оптической λ -MPLS – технологии на практике, что подтверждают последние исследования и разработки компании Cisco(США) [3];
- невозможность гибкой реорганизации ядра сети, за счет специализированности оборудования и сложности оптических схем и WDM-компонент и коммутаторов ядра λ -MPLS сети.
- высокие требования к оптическим компонентам системы оптического ядра λ -MPLS-сети, что требует необходимости внедрения и использования более дорогих технологий обслуживания и эксплуатационно-технических работ;
- более высокая удельная стоимость передачи информационного трафика (Гбит/грн., Гбит/\$,) за счет дороговизны и сложности оборудования.

Выводы

В данной статье были исследованы характеристики современных внешнедоменной и внесетевой моделей иерархических оптических сетей на базе λ -MPLS маршрутизации. Проведен сравнительный анализ технологии λ -MPLS на внесетевом и внешнедоменном уровнях сетевой иерархии на базе традиционных технологий с IP-маршрутизацией. Исследованы основные характеристики пропускной способности данных моделей построения сетей на базе λ -MPLS и определены пути улучшения междоменной маршрутизации с целью повышения пропускной способности сети. Также приведены пути к повышению основных характеристик. Предложена универсальная модель распределенной λ -MPLS сети, с повышенной информационной пропускной способностью.

Достоинства от внедрения оптической технологии λ -MPLS в информационно-вычислительные иерархические сети перекрывают недостатки от внедрения таких систем, и способны значительно улучшить как скорость передачи трафика, так и производительность и качество обслуживания сети.

Если моделировать процессы прохождения информационного трафика во внутредоменной системе λ -MPLS-сети, то можно увидеть рост внешних затрат.

Литература

1. Олифер В. Г. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы / В. Г. Олифер, Н. А. Олифер. – СПб: Издательство “Питер”, 1999. – 672с.
2. Лисенко Г. Л. Волоконна та інтегральна оптика. Ч.1. ; [навчал. посіб.] / Г. Л. Лисенко. – Вінниця: ВДТУ, 1998. – 127 с.
3. Александр Бахаревский. Решения и продукты компании Cisco Systems по построению оптических сетей. Могущество сетевых технологий сегодня: [Электронный ресурс] / Материалы компании Cisco systems. – ССIE. 60стр.– Режим доступа: Wolrd Wide Web: <http://www.cisco.com/go/optical>
4. А. Снайдер, Дж. Лав. Теория оптических волноводов ; [пер. с англ. под ред. Е.М. Дианова, В.В. Шевченко]. – М.: Радио и связь, 1987. – 655с.
5. Убайдулаев Р. Р. Волоконно-оптические сети [Текст] / Р. Р. Убайдуллаев. – М.: Эко-Тренз, 1998. – 268 с. – ISBN 5-88405-023-2.
6. On Architecture and Limitation of Optical Multiprotocol Label Switching (MPLS) Networks Using Optical-Orthogonal-Code (OOC)/Wavelength Label Y. G. Wen, Y. Zhang, and L. K. Chen / Department of Information Engineering, The Chinese University of Hong Kong, Shatin, New Territories, Hong Kong, Special Administrative Region, China. – October 22. – 2001. – pp.201-212.
7. Никульский И.Е. Оптические интерфейсы цифровых коммутационных станций и сети доступа : [Монография] / Никульский И.Е. – М.: Техносфера, 2006. – 256с. – ISBN 5-94836-087-3.
8. Frank Briamonte. Lucent Technologies unveils world's fastest single-laser optical transmission system: [Электронный ресурс]/ F. Briamonte // Photonics Online. – March 11. –1999. – Тип доступа: World Wide Web: www.photonicsonline.com/article.mvc/LUCENT-Lucent-Technologies-unveils-worlds-fas-0001.
9. Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи / Р. Фриман ; [пер. с англ. под ред. Слепов Н.Н.]. – М.: Техносфера, 2004. – 495 с. – (2-е изд., Мир связи). – ISBN 5-94836-010-5.
10. Frank Effenberger, Tarek S. El-Bawab Passive Optical Networks (PONs): Past, present, and future / F. Effenberger, T. S. El-Bawab // Optical Switching and Networking, Volume 6, Issue 3, July 2009, Pages 143-150.

References

1. Olifer V. G. Kompyuternyye seti. Printsipyi, tehnologii, protokolyi / V. G. Olifer, N. A. Olifer. – Spb: Izdatelstvo “Piter”, 1999. – 672s.
2. Lisenko G. L. Volokonna ta Integralna optika. Ch.1. ; [navchal. poslb.] / G. L. Lisenko. – Vlnnitsya: VDTU, 1998. – 127 s.
3. Aleksandr Baharevskiy. Resheniya i produkty kompanii Cisco Systems po postroeniyu opticheskikh setey. Moguschestvo setevykh tehnologiy segodnya: [Elektronniy resurs] / Materialy kompanii Cisco systems. – SSIE. 60str.– Rezhim dostupu: Wolrd Wide Web: <http://www.cisco.com/go/optical>
4. A. Snayder, Dzh. Lav. Teoriya opticheskikh volnovodov ; [per. s angl. pod red. E.M. Dianova, V.V. Shevchenko]. – M.: Radio i svyaz, 1987. – 655s.
5. Ubaydullaev R. R. Volokonno-opticheskie seti [Tekst] / R. R. Ubaydullaev. – M.: Eko-Trenz, 1998. – 268 s. – ISBN 5-88405-023-2.
6. On Architecture and Limitation of Optical Multiprotocol Label Switching (MPLS) Networks Using Optical-Orthogonal-Code (OOC)/Wavelength Label Y. G. Wen, Y. Zhang, and L. K. Chen / Department of Information Engineering, The Chinese University of Hong Kong, Shatin, New Territories, Hong Kong, Special Administrative Region, China. – October 22. – 2001. – pp.201-212.
7. Nikulskiy I.E. Opticheskie interfeysyi tsifrovih kommutatsionnykh stantsiy i seti dostupa : [Monografiya] / Nikulskiy I.E. – M.: Tehnosfera, 2006. – 256s. – ISBN 5-94836-087-3.
8. Frank Briamonte. Lucent Technologies unveils world's fastest single-laser optical transmission system: [Elektronniy resurs]/ F. Briamonte // Photonics Online. – March 11. –1999. – Tip dostupu: World Wide Web: www.photonicsonline.com/article.mvc/LUCENT-Lucent-Technologies-unveils-worlds-fas-0001.
9. Friman R. Volokonno-opticheskie sistemy svyazi / R. Friman ; [per. s angl. pod red. Slepov N.N.]. – M.: Tehnosfera, 2004. – 495 s. – (2-e izd., Mir svyazi). – ISBN 5-94836-010-5.
10. Frank Effenberger, Tarek S. El-Bawab Passive Optical Networks (PONs): Past, present, and future / F. Effenberger, T. S. El-Bawab // Optical Switching and Networking, Volume 6, Issue 3, July 2009, Pages 143-150.

Рецензія/Peer review : 10.5.2016 р.

Надрукована/Printed :28.6.2016 р.

Стаття рецензована редакційною колегією