

Ашраф И. М. Алькейси

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ ВНУТРИДОМЕННЫХ МОДЕЛЕЙ И СТРУКТУР ОПТИЧЕСКИХ ИЕРАРХИЧЕСКИХ СЕТЕЙ НА ОСНОВЕ МЕТОДА λ -MPLS

В работе проанализированы основные проблемы в современных иерархических оптических сетях с λ -MPLS-маршрутизацией. Проведены исследования основных характеристик скорости и пропускной способности внутридоменной модели сетей на базе λ -MPLS-метода. На основе исследований определены их основные преимущества и недостатки, а также приведены пути к улучшению основных характеристик. Предложен подход повышения информационной пропускной способности, основанный на использовании универсальной модели распределенных λ -MPLS-цепочек специализированных маршрутизаторов, коммутаторов. Проведен сравнительный анализ технологий λ -MPLS на разных уровнях сетевой иерархии с традиционными технологиями с IP-маршрутизацией, определены основные оптимальные пути повышения информационной пропускной способности.

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

Введение и постановка проблемы

Современные методы коммутации и маршрутизации OSPF и IGRP/EIGRP 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 по числу потерянных пакетов в результате неверных таблиц построения маршрутов. На смену традиционным технологиям маршрутизации и коммутации в оптических сетях приходят новые методы и модели, базирующиеся на оптической коммутации и маршрутизации по меткам, это – λ -MPLS-протоколы и архитектуры (или optical-MPLS), которые строятся поверх IP-оптических сетей (рис. 1) с обязательным WDM-мультиплексированием в опорных сетях на 1-ом уровне модели OSI [2].

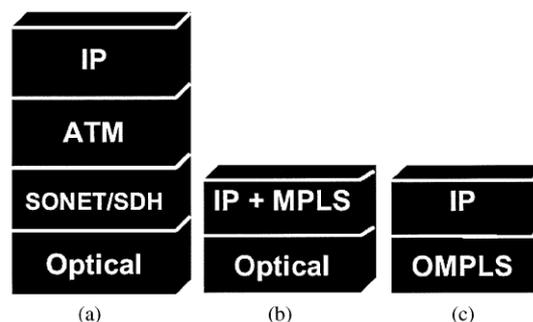


Рис. 1. Схема стека протоколов TCP/IP в IP-сетях с WDM-опорных сетях: а) традиционный подход; б) подход построения сети на базе IP/MPLS; в) подход построения сети с IP/OMPLS [1]

Технология быстрой коммутации пакетов λ -MPLS в многопротокольных информационно-вычислительных сетях преимущественно основана на использовании оптических меток. Optical MPLS или λ -MPLS сочетает в себе преимущество скорости коммутации и широкие функциональные возможности управления трафиком, присущие технологиям канального уровня (L2) – коммутация модели OSI с масштабируемостью и гибкостью протоколов, характерных для сетевого уровня (L3) – маршрутизация. Архитектура MPLS обеспечивает

построение сетей передачи данных, имеющих практически неограниченные возможности масштабирования сетей, повышенную скорость агрегации (обработки) трафика и возможность адаптации для организации различных видов дополнительных сервисов.

В традиционных сетях IP в общем случае маршрутизация пакетов осуществляется на основе IP-адреса назначений по протоколам EGRP или OSPF. Каждый маршрутизатор в традиционных IP-сетях обладает информацией о том, через какой интерфейс необходимо отправить IP-пакет, и принимает независимое решение о передаче. В протоколах MPLS рассматривают другой подход, когда информационный пакет ассоциируется с тем или иным классом сетевого уровня, каждый из которых идентифицируется определённой меткой. В оптическом MPLS эти метки представлены длинами волн, которые идентифицируются WDM/DWDM-инфраструктурой сети, и выполняется соответствующая агрегация пакетов по меткам λ -LSR – маршрутизаторами.

По значению метки пакета определяют его принадлежность к кадру на каждом из участков коммутируемого маршрута. Значение метки уникально лишь для участка пути между соседними узлами оптической сети λ -MPLS. Оптическую метку, закодированную конкретной длиной волны λ_i , передают в составе любого пакета, причём способ ее привязки к пакету зависит от используемой технологии канального уровня IP (L3). Маршрутизаторы принимают решение о передаче пакета следующему устройству на основании значения метки. λ -MPLS создает модель установления оптического соединения, используя WDM-технологии, наложенную на традиционную структуру ИВС. Технология построения ИВС на базе λ -MPLS строится поверх технологии IP на базе Optical Ethernet (OE), объединяя возможности фундаментального процесса маршрутизации с высокой производительностью и скоростью процесса коммутации.

Наиболее значимые возможности λ -MPLS: высокая скорость коммутации пакетов за счет использования оптических трактов ввода/вывода; разделение и многоцелевое управление IP-трафиком в многофункциональных сетях; создание безопасных VPN-соединений между различными узлами; независимость стеков IP и MAC адресов для пространств операторской и клиентских сетей.

В общих случаях технология IP/ λ -MPLS является базой для реализации целого спектра услуг, таких как:

- создание виртуальных частных сетей λ -MPLS L1, L2, L3 и VPN;
- организация каналов типа точка-точка (P2P) «Виртуальная выделенная линия» (VPWS, Virtual Private Wire Service,) или «MPLS TRANSPORT» (разновидность Any transport over MPLS, AoMPLS);
- эмуляция распределенных ИВС и ЛВС;
- эффективное управления пакетами/потоками IP-трафика по VPN каналам MPLS.

По показателям времени латентности (задержки) и коммутации, за счет отсутствия агрегации содержимого пакета данных и его заголовка технология λ -MPLS позволяет значительно повысить производительность ИВС благодаря: 1) разгрузке процессорных ресурсов коммутаторов, маршрутизаторов L2/L3 (E-LSR); 2) уменьшению времени коммутации/маршрутизации $t_{L2/L3}$ за счет использования более быстрых оптических потоков и аппаратно-программных средств их обработки в оптических WDM-сетях и каналах с разновидностью технологий WDM: SWDM/(HDWDM)/DWDM/CWDM; 3) мультипротокольности оптической λ -MPLS-архитектуры (позволяет накладывать λ -MPLS поверх большого числа имеющихся оптических ИВС на основе IP, что делает такую конфигурацию масштабируемой, гибкой и прозрачной в большинстве внутридоменных структур).

В литературе по относительно новому инновационному методу λ -MPLS хорошо изучены вопросы внутридоменной организации ИВС и ЛВС на базе λ -MPLS [3], однако плохо изучены технологии внешнедоменной и внешнесетевой организации λ -MPLS оптических сетей, что

представляет большой интерес и большую актуальность для области современных сетей в т. ч. Internet.

Современные вызовы и требования к информационным сетям формируют необходимость разработки новых подходов к организации λ -MPLS архитектуры на базе гибких моделей, которые можно с успехом применять на всех уровнях иерархии оптических сетей с целью повышения их производительности и простоты масштабируемости.

Цель работы повышение информационной пропускной способности в иерархических оптических сетях с использованием λ -MPLS маршрутизации.

Технологии оптических иерархических сетей и технологии организации их каналов, достаточно быстро развиваются в наше время. Параметры производительности современных вычислительных сетей на базе внутридоменных λ -MPLS (MPLS - сети IP/MPLS) составляют до 10-100TFlops при скорости передачи информации до 200Гбит/с на канал [2, 3].

За счет преимущества использования волоконно-оптических сетей и механизмов в качестве среды передачи информации применяют оптику с очень высокой пропускной способностью до десятков и до 300 Тбит/канал (широкая полоса пропускания $1.5-2 \times 10^{14}$ Гц и малое затухание $< 0.01-0.02$ Дб/км).

Исследования традиционных моделей и процессов внутридоменной оптической λ -MPLS коммутации

Традиционная модель внутридоменной λ -MPLS-архитектуры оптической иерархической ИВС (рис. 2, рис. 3) строится на базе организации взаимосвязей с λ -LSR-маршрутизаторами (роутерами). В таком случае домен строят на базе оптических маршрутизаторов (роутеров) с коммутацией по меткам Label Switch Router (λ -LSR), которые организуют меточные пути – Label Switched Path (LSP).

В таком случае маршрутизатор λ -LSR, который проставляет метки в MPLS-пакетах и удаляет метки или перехватывает пакеты с метками, организует ветку пути в рамках λ -MPLS-домена.

Протокол, используемый в LSR-маршрутизаторах, называют Label Distribution Protocol (LDP), его используют для обмена информацией (описан в спецификации IEEE RFC +3036).

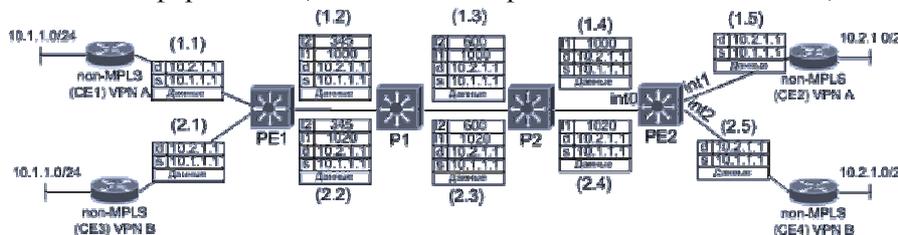


Рис. 2. Модель организации Label Switched Path (LSP) в рамках домена на базе λ -MPLS и процесс прохождения пакета VPN через MPLS-путь

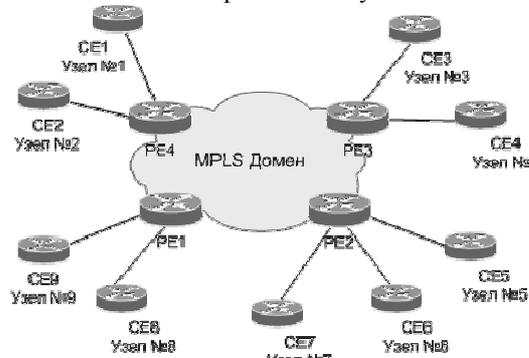


Рис. 3. Модель организации λ -MPLS-домена (внутридоменный λ -MPLS) с внутренними VPN

Типы существующих λ -LSR:

- оптический λ -EDGE λ -LSR (E-LSR) – λ -LSR-маршрутизатор, который находится на

границе сети λ -MPLS и обрабатывает IP-пакеты в стеке протоколов TCP/IP с метками и без меток. Также его называют Optical Label Edge Router (LER);

– INGRESS λ -E-LSR – маршрутизатор конкретного пакета, который выполняет агрегацию пакетов без метки, прежде чем поместить 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 внутридоменной организации оптической ИВС на базе λ -MPLS за счет большей спектральной эффективности F_s будет более выигрышна по сравнению с традиционной структурой IP-сетей, учитывая критерий границы информационной пропускной способности ИВС и коммуникационных сетей – критерий Хартли – Шеннона [4]:

$$C = W \log_2 \left(V + \frac{S}{N} \right) = W \times F_s = \frac{0.44}{\tau_z} \log_2 \left(V + \frac{S}{N} \right), \quad (1)$$

где W – спектральная ширина канала (полоса пропускания), $\frac{S}{N}$ – отношение сигнал-шум, F_s – спектральная эффективность системы; τ_z – величина общей дисперсии системы канала передачи данных; V – количество уровней сигнала для цифровых систем $V = 2$.

Общую величину трафика, передаваемую во внутридоменной ИВС, определяют количеством активных существующих каналов в домене – n_{ch} и с учетом (1) выражают как:

$$C_{tr} = n_{ch} \times W \times F_s = \frac{0.44 \cdot n_{ch}}{\tau_z} \log_2 \left(V + \frac{S}{N} \right). \quad (2)$$

Выигрыш по продуктивности в традиционных внутридоменных λ -MPLS-сетях можно оценить минимальным временем передачи заголовка пакета $T_{3\lambda 2MPLS}$, которое определяют следующим соотношением:

$$T_{3\lambda 2MPLS} = m(T_p + D(K_{MPLS} - 1)\Delta\lambda_{MPLS}L). \quad (3)$$

В таком случае пропускную способность одной ветки λ -MPLS-домена определяют как:

$$C_{MPLS} = W \times F_s = \frac{1}{T_z} \times F_s = \frac{1}{T_{IP} + T_{AGREG} + k_i T_{3\lambda 2MPLS}} \times F_s, \quad (4)$$

где k_i – коэффициент пропорциональности влияния времени заголовка на ширину импульсов пакета (может иметь знак \pm); T_{IP} – время латентности пакета IP; T_{AGREG} – время агрегации пакета в сетях TCP/IP и в роутерах λ -EGRESS (λ -E-LSR).

Очевидно, что, сравнивая традиционные сети TCP/IP на базе OSPF или EIGRP-маршрутизаторами, λ -MPLS ИВС будут иметь значительно меньшее общее время латентности T_z TCP/IP $\gg T_z$ λ -MPLS за счет отсутствия агрегации содержимого IP-пакетов со середины домена и более быстрой коммутации.

Пропускную способность магистрали с коммутацией пакетов и статистическим мультиплексированием для λ -MPLS определяют как:

$$BW_{\lambda-MPLS}(i) = C_{MPLS} \times \frac{\bar{L}_{layer}(i)}{\bar{L}_{packet}(i+1)} \cdot K_{usable} \cdot R(i), \quad (5)$$

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

Модель построения единичной цепочки внутридоменной иерархической ИВС на базе λ -MPLS (показана на рис. 4) с кодированием каждой метки пакетами на каждой из длин волн λ_c из общего диапазона $\lambda_1 \dots \lambda_c \dots \lambda_k$ (λ_i и $\lambda_1 \dots \lambda_k$) представлена графом кодирования меток (табл. 1). Причем: $M_{\lambda_i} = \text{SUM } \lambda_i$ ($\lambda_i=1$ для λ_k).

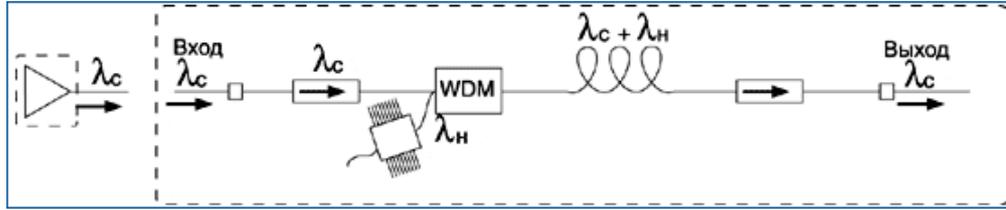


Рис. 4. Модель построения единичной цепи внутридоменной иерархической ИВС на базе λ -MPLS

Разнос по длине волны $\Delta\lambda$ определяется минимальным значением распознавания меток схемами оптической коммутации:

$$\Delta\lambda = \frac{\left[\int_0^{\lambda_k} S(\lambda_i)(\lambda_i - \lambda_{i_c})^2 d\lambda_i \right]^{1/2}}{S_0(\lambda_i)}, \tag{6}$$

где $S_0(\lambda_i)$ – спектральное распределение мощности центральной длины волны относительно метки λ_i .

Таблица 1

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

λ_i (метка 1)	λ_k (метка 2)	Суммарное количество меток $M_{\lambda_i}(\lambda_i)$ и λ_k (бит 2)
1310	1510	1
1320	1520	2
1330	1530	2
1340	1540	2
1350	1550	1

Реально сформированные метки λ_i имеют не дискретный спектр, а некоторую сформированную спектральную полосу $\Delta\lambda_i$ за счет неидеальности лазерных источников питания и распределения мощности излучения в некоторой спектральной области $S(\lambda_i)$. В таком случае конечная ширина метки в оптическом λ -MPLS будет намного шире и этот фактор нужно тоже учитывать.

В системах передачи информации без обратной связи реализуется способ помехоустойчивого кодирования в виде повторной передачи [4]. Но для высокопродуктивных сетей с быстродействующими каналами данный способ не подходит, так как будет способствовать уменьшению скорости и снижению производительности иерархических оптических ИВС.

Метки при WDM-мультиплексировании в волоконно-оптических каналах сетей λ -MPLS определяют суммой интегралов (учитывая формулу для общего количества спектров длин

волн в таких каналах при WDM-мультиплексировании):

$$N_{S(\lambda)} = \sum_{i=1}^N \int_{\lambda_{\text{ниж}}}^{\lambda_{\text{верх}}} S(\lambda_i) d\lambda_i + \sum_{j=1}^M \int_{\lambda_{\text{ниж}}}^{\lambda_{\text{верх}}} S(\lambda_j) d\lambda_j, \quad (7)$$

где $\lambda_{\text{ниж}}$ - $\lambda_{\text{верх}}$ – границы спектров $S(\lambda_i)$ для единичной метки информационного канала; $\lambda_{\text{ниж}}$ – $\lambda_{\text{верх}}$ – границы спектра $S(\lambda_j)$ для единичного бита информационного пакета; N, M – количество меток и соответственно битов в информационном пакете мультиплексированных каналов.

В общем виде график распределения меток в ИВС и иерархических системах λ -MPLS будет иметь спектральную область, показанную на рис. 5.

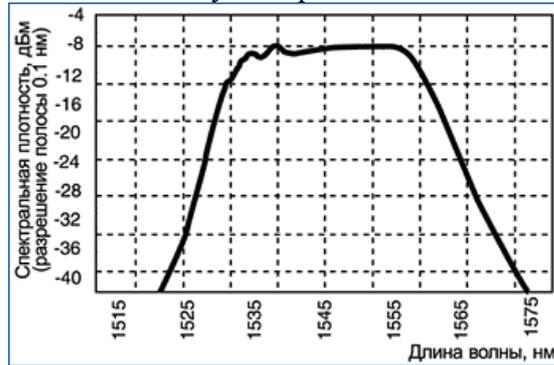


Рис. 5. Рабочая спектральная область формирования меток λ -ESR-маршрутизаторами в оптических λ -MPLS иерархических сетях

Эта зависимость хорошо адаптирована в стандартных компонентах ВОЛС, в том числе и в стандартных системах WDM, которые работают в составе с EDFA-усилителями.

Традиционно формирование меток происходит в областях на длинах волн вблизи основных рабочих окон прозрачности ВОЛС 1330 нм; 1480 нм; 1550 нм.

Для построения процесса моделирования внутридоменного λ -MPLS необходимо представить результирующую функцию амплитудного сигнала на разных длинах волн λ_i и λ_{i+1} :

$$A_m(t) = [A_{m\lambda_i}(t) \text{Sin}(w_{\lambda_i} t + \tau(\lambda_i))] \cup [A_{m\lambda_{i+1}}(t) \text{Sin}(w_{\lambda_{i+1}} t + \tau(\lambda_{i+1}))] . \quad (9)$$

Учитывают фактор хроматической дисперсии [5], которая является суммарной из материальной τ_{mat} и волновой τ_w составляющих и проявляется во всех типах оптического волокна (ОВ). Материальная составляющая τ_{mat} обусловлена зависимостью показателя преломления волокна $M(\lambda)$ от длин волн λ [6, 7] как:

$$\tau_{mat}(\Delta\lambda, L) = \Delta\lambda \times L \times \frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_1}{d\lambda^2} = \Delta\lambda \times L \times M(\lambda).$$

На рис. 6 для моделирования процесса были приведены основные аналитические оценки (моделирование в среде моделирования ВОЛС – OptiSim R-Soft TM Trial) влияния дисперсии в λ -MPLS внутридоменных иерархических сетях (канал по модели домена λ -MPLS изображен на рис. 3, рис. 5).

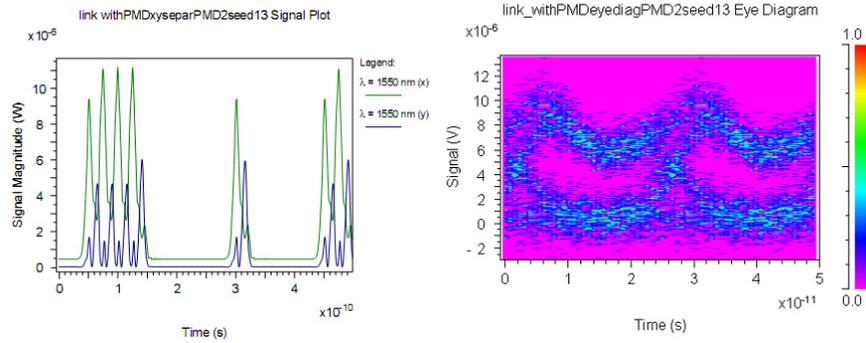


Рис. 6. Основные аналитические оценки влияния дисперсии в λ -MPLS – внутридоменных ИВС

В данной работе проведены основные аналитические оценки внутридоменной модели ИВС (рис. 7) на базе λ -MPLS – по математической модели (4), (5) с учетом (11) в программе MathCAD 14 были получены аналитические выражения для выигрыша в производительности (рис. 7).

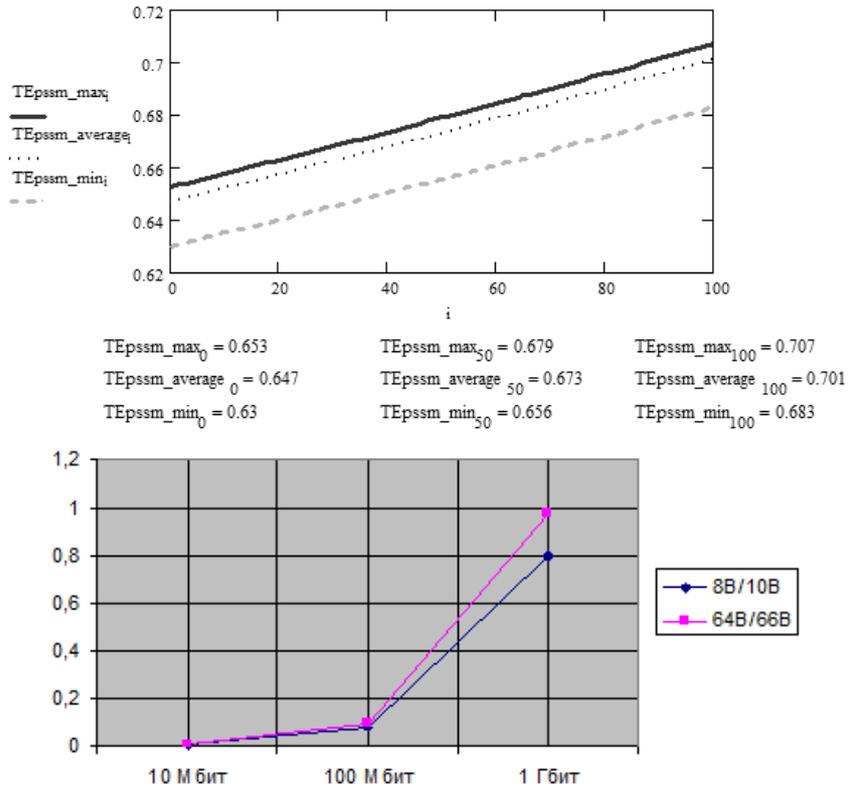


Рис. 7. Результаты моделирования зависимости времени передачи и пропускной способности в сетях IP и в внутридоменной ИВС λ -MPLS при разных параметрах загрузки сети на основе стандарта Optical Gigabit Ethernet

Сама компьютерная модель показана на рис. 8.

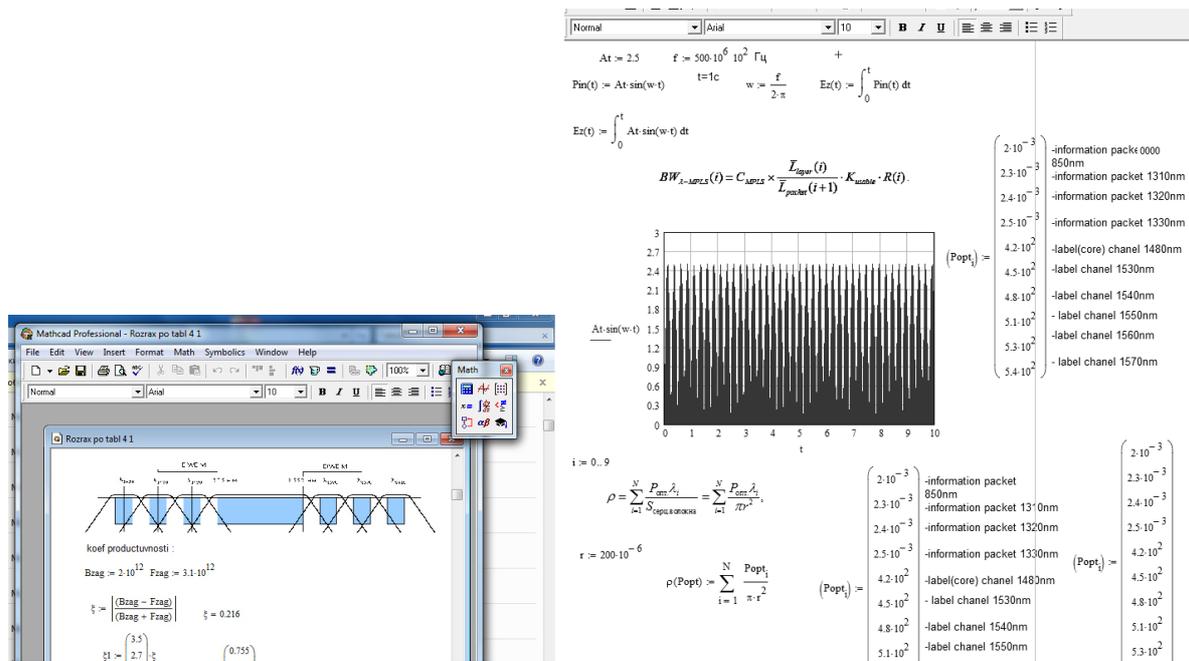


Рис. 8. Компьютерная модель процесса передачи данных в домене ИВС на базе λ-MPLS

На рис. 8 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 внутридоменной модели сети и пропускной способности при передаче неравномерного смешанного трафика и соответственно значения загрузки можно получить при использовании многоуровневой технологии иерархии. Предположим, что по сети λ-MPLS, расположенной поверх ATM или FrameRelay, передают IP-пакеты. Средняя временная загрузка тракт-канала показана на рис. 8.

Средний размер Internet-пакета (IP-пакета) на данный момент составляет 1500 бит. Каждый пакет содержит сервисную информацию протоколов IP (20 байт), TCP (20 байт), HDLC (6 байт), причем последняя опускается при коммутации по λ-MPLS (1500-битный пакет IPv4 содержит 320 бит служебной информации $L_{service}$ на уровнях 3-5 и 2032 бита данных V_{data}). Кроме этого, перед передачей на AAL5 к каждому пакету присоединяется дополнительно 8 байт фрейма AAL5 и 8 байт LLC/SNAP, то есть $L_{aal5} = 8 \cdot 8 + 8 \cdot 8 = 128(бит)$.

Результаты моделирования показывают, что больше всего при высоких скоростях, степени загрузки сети и передачи большого количества трафика на величину пакетной задержки во внутридоменном λ-MPLS влияют размер пакета и количество возможных каналов коммутации (IP-пакеты малых размеров несут большое количество служебной информации) и максимальную загрузку, которая может быть поддержана соответствующим λ-ESR-маршрутизатором или коммутатором (L3). Если размер нагрузки увеличить до значения 90 – 95%, то для кадра 1514 байт (IP-пакета) в описанной модели значение загрузки составит 3,57.

Преимуществом помехоустойчивого кодирования в λ-ESR-маршрутизаторах является:

- возможность обработки (агрегации) многоядерных заголовков;
- более быстрое время включения;
- увеличение коэффициента передачи коммутирующего узла;
- отсутствие необходимости иметь порт по умолчанию;
- легкость интеграции во внутридоменную сеть, которая может быть расширена.

Но одним из основных недостатков являются существенная потеря мощности, сложность

схем организации кодирования меток и высокая стоимость оборудования λ_k -ESR. Общим недостатком всех схем λ -MPLS в иерархических сетях является ограничение по максимальной частоте передачи заголовка (до 1000 МГц) [1, 3], хотя этого достаточно для большинства задач внутридоменного использования технологии оптической коммутации λ -MPLS.

Выводы

В статье проанализированы основные проблемы в современных иерархических оптических сетях с λ -MPLS-маршрутизацией. В ходе проведения исследований было выявлено, что основными недостатками являются низкая скорость и пропускная способность внутридоменной передачи в сетях на базе λ -MPLS-метода. В работе предложен способ повышения пропускной способности иерархической сети, основанный на использовании универсальной модели распределенных λ -MPLS-цепочек специализированных маршрутизаторов и коммутаторов.

Проведен сравнительный анализ технологии λ -MPLS на разных уровнях сетевой иерархии по сравнению с существующей технологией IP-маршрутизации, который показал, что при высоких скоростях передачи данных и большой степени загрузки сети на величину задержки пакета существенно влияют малоразмерные IP-пакеты.

Предложены пути оптимизации повышения пропускной способности иерархических сетей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. On Architecture and Limitation of Optical Multiprotocol Label Switching (MPLS) Networks Using Optical-Orthogonal-Code (OOC) / Wavelength Label [Электронный ресурс] / Y. G. Wen, Y. Zhang, 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. – P. 201 – 212. – Режим доступа: <http://www.ntu.edu.sg/home/ygwen/Paper/WZC-OFT-02.pdf>.
2. Олифер В. Г. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы / В. Г. Олифер, Н. А. Олифер. – СПб : Издательство “Питер”, 1999. – 672 с.
3. Бахаревский А. Решения и продукты компании CiscoSystems по построению оптических сетей. Могущество сетевых технологий сегодня: [Электронный ресурс] / Материалы компании Ciscosystems. – ССІЕ. – Режим доступа: <http://www.cisco.com/go/optical>.
4. Убайдуллаев Р. Р. Волоконно-оптические сети / Р. Р. Убайдуллаев. – М. : Эко-Тренз, 1998. – 268 с.
5. Цирульник С. М. Розробка принципів побудови і структурної організації динамічної пам'яті на волоконно-оптичних лініях: автореф. дис. канд. техн. наук. 05.13.05 «Комп'ютерні системи та компоненти» / С. М. Цирульник. – Вінниця, 2007. – 18 с.
6. Лисенко Г. Л. Волоконна та інтегральна оптика. Ч. 1. ; [навчал. посіб.] / Г. Л. Лисенко. – Вінниця: ВДТУ, 1998. – 127 с.
7. Снайдер А. Теорія оптических волноводов / Снайдер А., Дж. Лав ; пер. с англ. под ред. Е. М. Дианова, В. В. Шевченко. – М. : Радио и связь, 1987. – 655 с.

Ашраф И. М. Алькейси – аспирант кафедры лазерной и оптоэлектронной техники. Винницкий национальный технический университет.