

Ашраф І. М. Алькейсі

РОЗРОБКА І ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНИХ ВНУТРІШНЬОДОМЕННИХ МОДЕЛЕЙ І СТРУКТУР ОПТИЧНИХ ІЄРАРХІЧНИХ МЕРЕЖ НА ОСНОВІ МЕТОДУ λ -MPLS

У роботі проаналізовані основні проблеми в сучасних ієрархічних оптичних мережах із λ -MPLS-маршрутизацією. Проведено дослідження основних характеристик швидкості і пропускної здатності внутрішньодоменної моделі мереж на основі λ -MPLS-методу. На основі досліджень визначено їх основні переваги та недоліки, а також наведено шляхи покращення основних характеристик. Запропоновано підхід підвищення інформаційної пропускної здатності, заснований на використанні універсальної моделі розподілених λ -MPLS-ланцюжків спеціалізованих маршрутизаторів, комутаторів. Проведено порівняльний аналіз технології λ -MPLS на різних рівнях мережевої ієрархії з традиційними технологіями із IP-маршрутизацією, визначено основні оптимальні шляхи підвищення інформаційної пропускної здатності.

Ключові слова: канали передачі інформації, λ -MPLS-модель, мережева топологія, вузли мережі, трафік.

Вступ та постановка проблеми

Сучасні методи комутації й маршрутизації OSPF і IGRP / EIGRP на основі IP в сучасних оптичних інформаційно-обчислювальних мережах із SDH / SONET / ATM ієрархією не завжди дають необхідні технічні характеристики з продуктивності ІТТ, часу латентності (затримки під час передачі), а також з числа втрачених пакетів у результаті неправильних таблиць побудови маршрутів. На зміну традиційним технологіям маршрутизації й комутації в оптичних мережах приходять нові методи й моделі, які ґрунтуються на оптичній комутації й маршрутизації по мітках, це – λ -MPLS-протоколи й архітектури (або optical-MPLS), які будуються поверх IP-оптичних мереж (рис. 1) з обов'язковим WDM-мультиплексуванням опорних мереж на 1-му рівні моделі OSI [2].

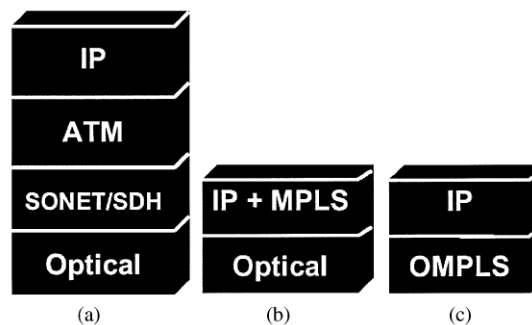


Рис. 1. Схема стека протоколів TCP/IP в IP-мережах із WDM опорних мереж: а) традиційний підхід; б) підхід побудови мережі на основі IP/MPLS; в) підхід побудови мережі з IP/OMPLS [1]

Технологія швидкої комутації пакетів λ -MPLS у багатопротокольних інформаційно-обчислювальних мережах переважно заснована на використанні оптичних міток. Optical MPLS або λ -MPLS поєднує в собі перевагу швидкості комутації й широкі функціональні можливості управління трафіком, властиві технологіям канального рівня (L2) – комутація моделі OSI з масштабуванням і гнучкістю протоколів, характерних для мережевого рівня (L3) – маршрутизація. Архітектура MPLS забезпечує побудову мереж передачі даних, що мають практично необмежені можливості масштабування мереж, підвищену швидкість агрегації (обробки) трафіку й можливість адаптації для організації різних видів додаткових сервісів.

У традиційних мережах IP загалом маршрутизація пакетів здійснюється на основі IP-адреси призначень за протоколами EGRP або OSPF. Кожен маршрутизатор у традиційних IP-мережах володіє інформацією про те, через який інтерфейс необхідно відправити IP-пакет, і приймає незалежне рішення про передачу. У протоколах MPLS розглядають інший підхід, коли інформаційний пакет асоціюється з тим чи іншим класом мережевого рівня, кожен з яких ідентифікується певною міткою. В оптичному MPLS ці мітки представлені довжинами хвиль, які ідентифікуються WDM / DWDM-інфраструктурою мережі, і виконується відповідна агрегація пакетів по мітках λ -LSR-маршрутизаторами.

За значенням мітки пакета визначають його належність до кадру на кожній із ділянок комутованого маршруту. Значення мітки унікальне лише для ділянки шляху між сусідніми вузлами оптичної мережі λ -MPLS. Оптичну мітку, закодовану конкретною довжиною хвилі λ_i , передають у складі будь-якого пакету, причому спосіб її прив'язки до пакету залежить від використовуваної технології канального рівня IP (L3). Маршрутизатори приймають рішення про передачу пакету наступному пристрою на підставі значення мітки. λ -MPLS створює модель установалення оптичного з'єднання, що використовує WDM-технологію накладену на традиційну структуру ІОС. Технологія побудови ІОС на основі λ -MPLS будується поверх технології IP на основі Optical Ethernet (OE), об'єднуючи можливості фундаментального процесу маршрутизації з високою продуктивністю і швидкістю процесу комутації.

Найбільш значущі можливості λ -MPLS: висока швидкість комутації пакетів за рахунок використання оптичних трактів уведення / виведення; поділ і багатоцільове управління IP-трафіком у багатофункціональних мережах; створення безпеки VPN-з'єднань між різними вузлами; незалежність стеків IP- і MAC-адрес для просторів операторської і клієнтських мереж.

У загальних випадках технологія IP / λ -MPLS є основою для реалізації цілого спектру послуг, таких як:

- створення віртуальних приватних мереж λ -MPLS L1, L2, L3 і VPN;
- організація каналів типу точка-точка (P2P) «Віртуальна виділена лінія» (VPWS, Virtual Private Wire Service,) або «MPLS TRANSPORT» (різновид Any transport over MPLS, AoMPLS);
- емуляція розподілених ІОС і ЛОС;
- ефективне управління пакетами / потоками IP-трафіку по VPN каналам MPLS.

За показниками часу латентності (затримки) і комутації, за рахунок відсутності агрегації вмісту пакету даних та його заголовка технологія λ -MPLS дозволяє значно підвищити продуктивність ІОС завдяки: 1) розвантаженню процесорних ресурсів комутаторів, маршрутизаторів L2/L3 (E-LSR); 2) зменшенню часу комутації / маршрутизації $t_{L2/L3}$ за рахунок використання швидших оптичних потоків і апаратно-програмних засобів їхньої обробки в оптичних WDM-мережах і каналах з різновидом технологій WDM: SWDM / (HDWDM) / DWDM / CWDM; 3) мультипротоковності оптичної λ -MPLS архітектури (дозволяє накладати λ -MPLS поверх великої кількості наявних оптичних ІОС на основі IP, що робить таку конфігурацію масштабованою, гнучкою і прозорою в більшості внутрішньодомених структур).

У літературі з відносно нового інноваційного методу λ -MPLS добре вивчені питання внутрішньодомени організації ІОС і ЛОС на основі λ -MPLS [3], проте погано вивчені технології зовнішньодомени й зовнішньомережевої організації λ -MPLS оптичних мереж, що становить великий інтерес і велику актуальність для галузі сучасних мереж, серед яких і Internet.

Сучасні виклики й вимоги до інформаційних мереж формують необхідність розробки нових підходів до організації λ -MPLS архітектури на основі гнучких моделей, які можна з успіхом застосовувати на всіх рівнях ієрархії оптичних мереж із метою підвищення їхньої

продуктивності й простоти масштабованості.

Мета роботи підвищення інформаційної пропускної здатності в ієрархічних оптичних мережах із використанням λ -MPLS-маршрутизації.

Технології оптичних ієрархічних мереж і технології організації їх каналів, досить швидко розвиваються в наш час. Параметри продуктивності сучасних обчислювальних мереж на основі внутрішньодомених λ -MPLS (MPLS – мережі IP / MPLS) становлять до 10-100TFlops при швидкості передачі інформації до 200 Гбіт/с на канал [2, 3].

За рахунок переваги використання волоконно-оптичних мереж і механізмів у якості середовища передачі інформації застосовують оптику з дуже високою пропускною спроможністю до десятків і до 300 Тбіт / канал (широка смуга пропускання $1.5-2 \times 10^{14}$ Гц і мале загасання $<0.01-0.02$ Дб/км).

Дослідження традиційних моделей і процесів внутрішньодоменої оптичної λ -MPLS комутації

Традиційна модель внутрішньодоменої λ -MPLS-архітектури оптичної ієрархічної ІОС (рис. 2, рис. 3) будується на основі організації взаємозв'язків із λ -LSR-маршрутизаторами (роутерами). У такому випадку домен будують на основі оптичних маршрутизаторів (роутерів) із комутацією по мітках Label Switch Router (λ -LSR), які організують помічені шляхи – Label Switched Path (LSP).

У такому випадку маршрутизатор λ -LSR, який пропоставляє мітки в MPLS-пакетах і видаляє мітки або перехоплює пакети з мітками, організовує гілку шляху в межах λ -MPLS-домени.

Протокол, який використовують у LSR-маршрутизаторах називають Label Distribution Protocol (LDP), його використовують для обміну інформацією (описаний у специфікації IEEE RFC +3036).

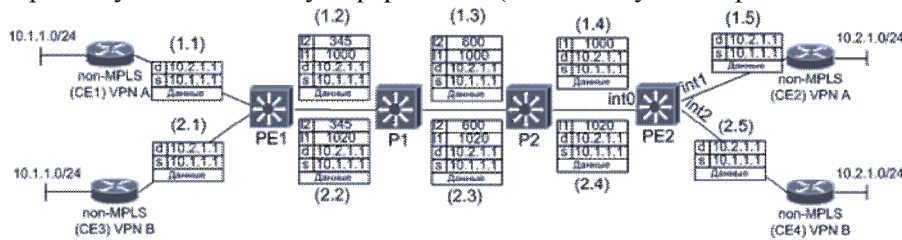


Рис. 2. Модель організації Label Switched Path (LSP) в межах домену на основі λ -MPLS і процес проходження пакета VPN через MPLS-шлях

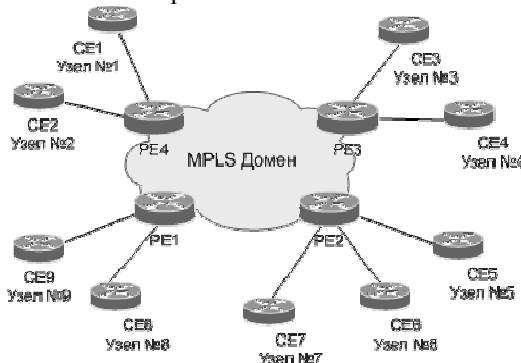


Рис. 3. Модель організації λ -MPLS домену (внутрішньодоменої λ -MPLS) із внутрішнім VPN

Типи сучасних λ -LSR:

- оптичний λ -EDGE λ -LSR (E-LSR) – λ -LSR-маршрутизатор на межі мережі λ -MPLS обробляє IP-пакети в стеці протоколів TCP / IP з мітками і без міток. Також його називають Optical Label Edge Router (LER);

- INGRESS λ -E-LSR – маршрутизатор конкретного пакета, який виконує агрегацію пакетів без мітки, перш ніж помістити мітку в пакет;

- λ -EGRESS (λ -E-LSR) – маршрутизатор конкретного пакета, який виконує агрегацію

пакетів із міткою і потім прибирає всі мітки MPLS і передає IP-пакет далі в мережі TCP-IP іншим маршрутизаторам.

Очевидно, що така модель внутрішньодоменної організації оптичної ІОС на основі λ -MPLS за рахунок більшої спектральної ефективності F_S буде більш вигідною порівняно з традиційною структурою IP-мереж, з огляду на критерій межі інформаційної пропускної здатності ІОС і комунікаційних мереж – критерій Хартлі – Шеннона [4]:

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

де W – спектральна ширина каналу (смуга пропускання), $\frac{S}{N}$ – співвідношення сигнал-шум, F_S – спектральна ефективність системи; τ_z – величина загальної дисперсії системи каналу передачі даних; V – кількість рівнів сигналу для цифрових систем $V = 2$.

Загальну величину трафіку, що передається у внутрішньодоменній ієрархічній ІОС, визначають кількістю активних наявних каналів у домені – n_{ch} і з урахуванням (1) виражають як:

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

Виграш з продуктивності в традиційних внутрішньодоменних λ -MPLS-мережах можна оцінити мінімальним часом передачі заголовка пакета $T_{заєMPLS}$, яке визначають таким співвідношенням:

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

У такому разі пропускну здатність однієї вітки λ -MPLS-домени визначатимуть як:

$$C_{MPLS} = W \times F_S = \frac{1}{T_Z} \times F_S = \frac{1}{T_{IP} + T_{AGREG} + k_i T_{заєMPLS}} \times F_S, \quad (4)$$

де k_i – коефіцієнт пропорційності впливу часу заголовка на ширину імпульсів пакета (може мати знак \pm); T_{IP} – час латентності пакета IP; T_{AGREG} – час агрегації пакета в мережах TCP/IP і в роутерах λ -EGRESS (λ -E-LSR).

Очевидно, що, порівнюючи традиційні мережі TCP / IP на основі OSPF або EIGRP-маршрутизаторами, λ -MPLS ІОС матимуть значно менший загальний час латентності $T_{Z\text{ TCP/IP}} \gg T_{Z\text{ } \lambda\text{-MPLS}}$ за рахунок відсутності агрегації вмісту IP-пакетів із середини домену і швидшої комутації.

Пропускну здатність магістралі із комутацією пакетів і статистичними мультиплексуванням і λ -MPLS визначають як:

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

де $\bar{L}_{layer}(i)$ і $\bar{L}_{packet}(i+1)$ – шар ієрархії мережі ІВС на основі λ -MPLS; K_{usable} – коефіцієнт використання шару; $R(i)$ – функція розподілення пакетами навантаження мережі по шарам.

Модель побудови одиничного ланцюжка внутрішньодоменної ієрархічної ІОС на основі λ -MPLS (показана на рис. 4) із кодуванням кожної мітки пакетами на кожній із довжини хвиль λ_c із загального діапазону $\lambda_1 \dots \lambda_k$ (λ_i і $\lambda_1 \dots \lambda_k$) представлена графом кодування міток (табл. 1). Причому: $M_{\lambda_i} = \text{SUM } \lambda_i$ ($\lambda_i=1$ для λ_k).

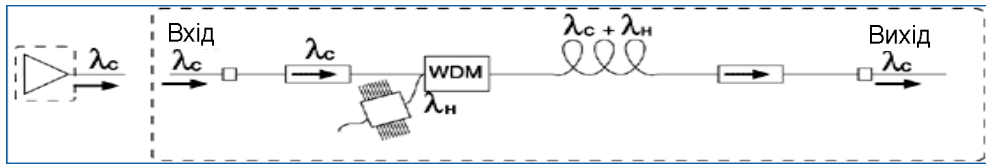


Рис. 4. Модель побудови одиничного ланцюга внутрішньодоменої ієрархічної ІОС на основі λ -MPLS

Рознесення за довжиною хвилі $\Delta\lambda$ визначають мінімальним значенням розпізнавання міток схемами оптичної комутації

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

де $S_0(\lambda_i)$ – спектральне розподілення потужності центральної довжини хвилі відносно мітки λ_i .

Таблиця 1

Граф кодування міток λ_c із загального числа M для $M_{\lambda_i} = 5$

λ_l (мітка 1)	λ_k (мітка 2)	Сумарна кількість міток $M_{\lambda_i}(\lambda_l)$ і λ_k (біт 2)
1310	1510	1
1320	1520	2
1330	1530	2
1340	1540	2
1350	1550	1

Реально сформовані мітки λ_i мають не дискретний спектр, а деяку сформовану спектральну смугу $\Delta\lambda_i$ за рахунок неідеальності лазерних джерел живлення й розподілу потужності випромінювання в деякій спектральній області $S(\lambda_i)$. У такому випадку кінцева ширина мітки в оптичному λ -MPLS буде набагато ширше і цей чинник потрібно теж урахувати.

У системах передачі інформації без зворотного зв'язку реалізується спосіб завадостійкого кодування у вигляді повторної передачі [4]. Але для високопродуктивних мереж зі швидкодіючими каналами цей спосіб не підходить, оскільки сприятиме зменшенню швидкості і зниженню продуктивності ієрархічних оптичних ІОС.

Мітки під час WDM-мультиплексування у волоконно-оптичних каналах мереж λ -MPLS визначають сумою інтегралів (ураховуючи формулу для загальної кількості спектрів довжин хвиль у таких каналах під час WDM-мультиплексування):

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

де $\lambda_{\text{ниж}} - \lambda_{\text{верх}}$ – межі спектрів $S(\lambda_i)$ для одиничної мітки інформаційного каналу; $\lambda_{\text{ниж}} - \lambda_{\text{верх}}$ – межі спектру $S(\lambda_i)$ для одиничного біта інформаційного пакета; N, M – кількість міток і відповідно бітів в інформаційному пакеті мультиплексованих каналів.

У загальному вигляді графік розподілення міток в ІОС та ієрархічних системах λ -MPLS матиме спектральну область, показану на рис. 5.

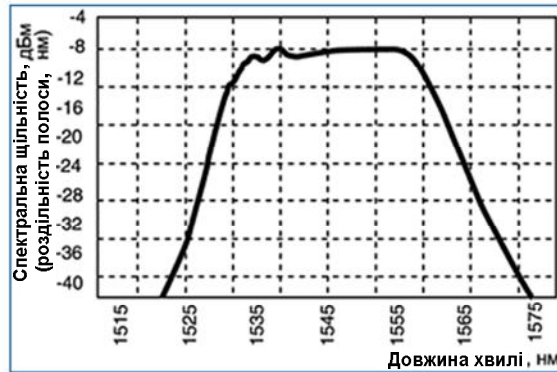


Рис. 5. Робоча спектральна область формування міток λ -ESR-маршрутизаторами в оптичних λ -MPLS ієрархічних мережах

Ця залежність добре адаптована в стандартних компонентах ВОЛЗ, серед яких і в системах WDM, які працюють у складі з EDFA-підсилювачами.

Традиційно формування міток відбувається в областях на довжинах хвиль поблизу основних робочих вікон прозорості ВОЛЗ 1330 нм; 1480 нм; 1550 нм.

Для побудови процесу моделювання внутрішньодоменого λ -MPLS необхідно представити результівну функцію амплітудного сигналу на різних довжинах хвиль λ_i і λ_{i+1} :

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

Ураховують фактор хроматичної дисперсії [5], яка є суммарною із матеріального τ_{mat} та хвильового τ_w складників і проявляється в усіх типах оптичного волокна (ОВ). Матеріальний складник τ_{mat} зумовлений залежністю показника заломлення волокна $M(\lambda)$ від довжини хвиль λ [6, 7] як:

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

На рис. 6 для моделювання процесу були наведені основні аналітичні оцінки (моделювання в середовищі моделювання ВОЛЗ – OptiSim R-Soft TMTrial) впливу дисперсії в λ -MPLS внутрішньодомених ієрархічних мережах (канал по моделі домену λ -MPLS зображений на рис. 3, рис. 5).

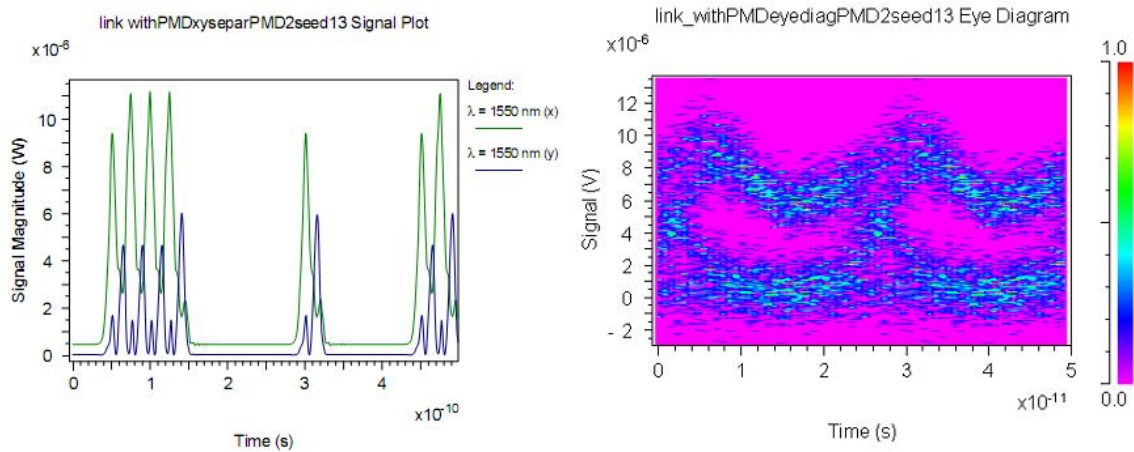


Рис. 6. Загальні аналітичні оцінки впливу дисперсії в λ -MPLS – внутрішньодомених ІОС

У цій роботі проведені основні аналітичні оцінки внутрішньодоменної моделі ІОС (рис. 7) на основі λ -MPLS по математичній моделі (4), (5) з урахуванням (11) в програмі MathCAD 14 були отримані аналітичні вирази для виграшу в продуктивності (рис. 7).

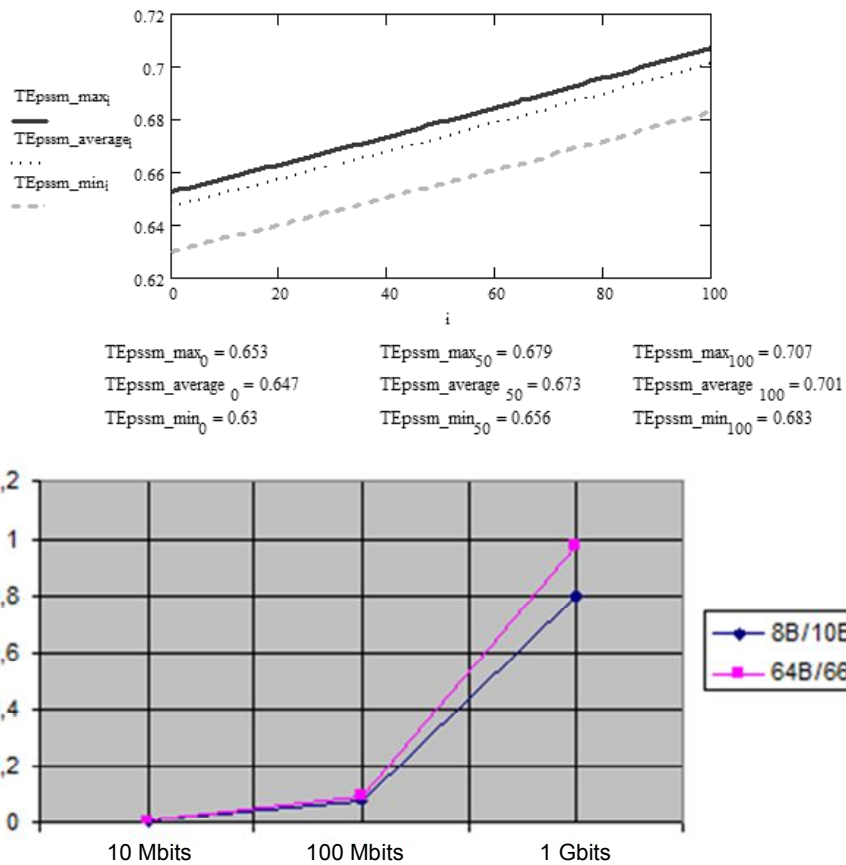


Рис. 7. Результати моделювання залежності часу передачі та пропускної здатності в мережах IP і у внутрішньодоменній ІОС λ -MPLS за різних параметрів завантаження мережі на основі стандарту Optical Gigabit Ethernet

Сама комп'ютерна модель показана на рис. 8.

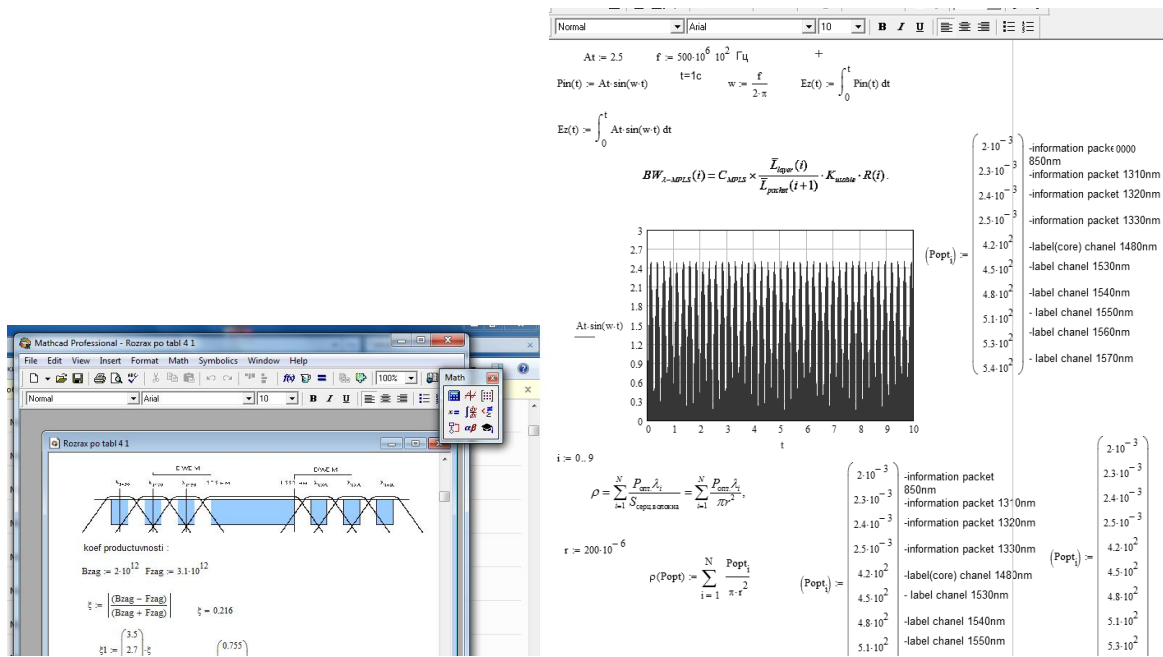


Рис. 8. Комп'ютерна модель процесу передачі даних у домені ІОС на основі λ -MPLS

На рис. 8 функція розподілу пакетного завантаження мережі по шарам задана залежно від ступеня нерівномірності трафіку під час використання тракту комутації λ -MPLS. Значне поліпшення ступеня оптимізації роботи внутрішньодоменної моделі мережі і пропускної здатності під час передачі нерівномірного змішаного трафіку і відповідно значення завантаження можна отримати під час використання багаторівневої технології ієрархії. Припустимо, що по мережі λ -MPLS, розташованої поверх ATM або FrameRelay, передають IP-пакети. Середнє часове завантаження тракт-каналу показано на рис. 8.

Середній розмір Internet-пакету (IP-пакету) на цей момент складає 1500 біт. Кожен пакет містить сервісну інформацію протоколів IP (20 байт), TCP (20 байт), HDLC (6 байт), причому остання опускається під час комутації по λ -MPLS (1500-бітний пакет IPv4 містить 320 біт службової інформації L_{service} на рівнях 3 5 і 2032 біта даних). Крім цього, перед передачею на AAL5 до кожного пакету приєднується додатково 8 байт фрейма AAL5 і 8 байт LLC / SNAP, тобто $L_{\text{aal5}} = 8 \cdot 8 + 8 \cdot 8 = 128$ (біт).

Результати моделювання показують, що найбільше за високих швидкостей, ступеня завантаження мережі й передачі великої кількості трафіку на величину пакетної затримки у внутрішньодоменному λ -MPLS впливають розмір пакету й кількість можливих каналів комутації (IP-пакети малих розмірів несуть велику кількість службової інформації) і максимальне завантаження, яке може бути підтримане відповідним λ -ESR маршрутизатором або комутатором (L3). Якщо розмір навантаження збільшити до значення 90 – 95%, то для кадру 1514 байт (IP-пакета) у описаній моделі значення завантаження складе 3,57.

Перевагою завадостійкого кодування в λ -ESR-маршрутизаторах є:

- можливість обробки (агрегації) багатоядерних заголовків;
- швидший час увімкнення;
- збільшення коефіцієнта передачі коммутувального вузла;
- відсутність необхідності мати порт за замовчуванням;
- легкість інтеграції у внутрішньодоменну мережу, яка може бути розширена.

Але одними з основних недоліків є суттєва втрата потужності, складність схем організації кодування міток і висока вартість обладнання λ -ESR. Загальним недоліком усіх схем λ -MPLS в ієрархічних мережах є обмеження по максимальній частоті передачі заголовка (до

1000 МГц) [1, 3], хоча цього достатньо для більшості завдань внутрішньодоменого використання технології оптичної комутації λ -MPLS.

Висновки

У статті проаналізовано основні проблеми в сучасних ієрархічних оптичних мережах з λ -MPLS маршрутизацією. В ході проведення досліджень було виявлено, що основними недоліками є низька швидкість і пропускна здатність внутрішньодоменої передачі в мережах на базі λ -MPLS методу. В роботі запропоновано спосіб підвищення пропускної спроможності ієрархічної мережі, заснований на використанні універсальної моделі розподілених λ -MPLS ланцюжків спеціалізованих маршрутизаторів і комутаторів.

Проведено порівняльний аналіз технології λ -MPLS на різних рівнях мережевої ієрархії в порівнянні з існуючою технологією IP-маршрутизації, який показав, що при високих швидкостях передачі даних і великій мірі завантаження мережі на величину затримки пакету суттєво впливають IP- пакети малих розмірів.

Запропоновано шляхи оптимізації підвищення пропускної спроможності ієрархічних мереж.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. On Architecture and Limitation of Optical Multiprotocol Label Switching (MPLS) Networks Using Optical-Orthogonal-Code (OOC) / Wavelength Label [Електронний 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 доступу: <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: [Електронний ресурс] / Материалы компании Ciscosystems. – CCIE. – Режим доступу: <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. Теория 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 І. М. Алькейсі – аспірант кафедри лазерної і оптоелектронної техніки.
Вінницький національний технічний університет.