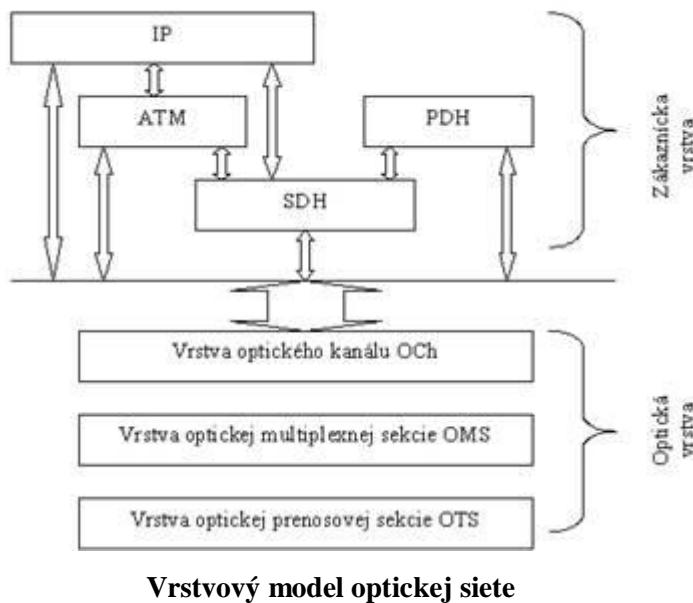


1 Optické siete

1.1 Vrstvový model optickej siete

Model optickej siete je na nasledovnom obrázku. Skladá sa z optickej a zákazníckej vrstvy.



Optická vrstva má za úlohu zabezpečiť transparentný prenos všetkým existujúcim protokolom a transportným technikám, vystupujúcim ako zákaznícke vrstvy. Optická vrstva siete je ďalej členená na nasledujúce podvrstvy:

- Optická prenosová sekcia OTS (Optical Transport Section), ktorá má za úlohu adaptáciu skupinového optického signálu na optické vlákno
- Optická multiplexná sekcia OMS (Optical Multiplex Section), má na starosti transport skupinových optických signálov, ktoré sú tvorené niekoľkými vlnovými dĺžkami; využíva sa systém WDM
- Optický kanál OCh (Optical Channel), ktorý reprezentuje všetky prostriedky zúčastnené na transparentnom prenose zákazníckeho signálu optickým prostredím (vrátane smerovania a dohľadu nad celistvosťou a kvalitou Och), zákaznícky signál sa musí prispôsobiť:
 - prevod signálu na sériový tok dát, pokiaľ signál nemá túto štruktúru
 - skramblovat a deskramblovat signál

- kódovať na optický signál NRZ konkrétnej vlnovej dĺžky

Pod týmito vrstvami OTN sa predpokladá vrstva fyzického optického média, tvoreného jednotlivými typmi optických vlákien ako pasívnym prenosovým prostredím.

Najrozšírenejšími protokolmi a transportnými technikami, ktoré predstavujú zákaznícku vrstvu pre optickú vrstvu siete, sú v súčasnej dobe ATM a IP pre dátové služby a SDH pre hlasové služby. Z modelu je zrejmé, že všetky signály zákazníckej vrstvy môžu priamo vstupovať do optickej vrstvy. V súčasnosti je preferovaný priamy prenos IP zákazníckej vrstvy prostredníctvom optickej vrstvy.

1.2 Komponenty optickej siete

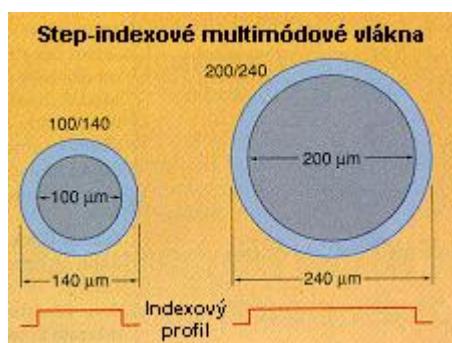
1.2.1 Optické vlákna

Všetky telekomunikačné siete sa v súčasnosti budujú na báze jednomódových vláken (SM). Tieto vlákna majú najväčšiu prenosovú kapacitu. Ich tlmenie je nízke a majú nulovú módovú disperziu. Majú veľkú šírku pásma, vďaka čomu sú vhodné pre vysokorýchlosťný prenos.

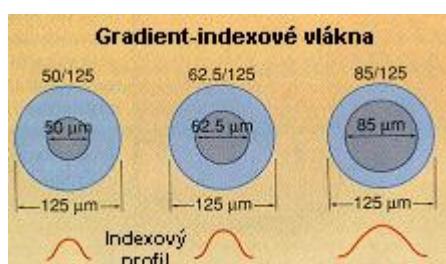
Optické vlákna sú bežne rozdelené podľa ich vlnovodových vlastností. Základné typy sú rozdelené podľa počtu módov, ktoré vlákno prenáša a podľa charakteristiky v oblasti hranice medzi jadrom a plášťom vlnovodu.

Existujú 3 základné skupiny vláken, každá s vlastnými charakteristikami a použitím:

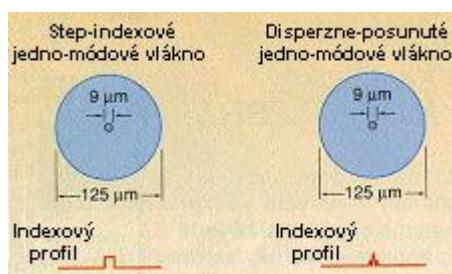
- *Step-indexové multimódové vlákna* majú strmý prechod medzi jadrom (vnútrom) a plášťom vlnovodu a relatívne veľké jadro, ktoré umožňuje viacero prenosových módov.



- *Gradient-indexové vlákna* majú postupný (pozvoľný) prechod medzi jadrom a plášťom vlnovodu, s indexom lomu jadra klesajúcim plynulo k dolnej hranici v plášti.



- *Jednomódové vlákna* majú malé vlnovodové jadrá, ktoré prenášajú len jeden mód svetla.



1.2.2 Optické vysielače

Tieto bloky realizujú elektricko-optický prevod signálu. Sú súčasťami klientských systémov TDM. Na vysielače sú kladené vysoké požiadavky, hlavne na zdroj optického žiarenia. Zdrojmi optického žiarenia pre prenosovú techniku WDM bývajú predovšetkým lasery DBF (Distributed Feed-Back) – laser s distribuovanou spätnou väzbou pre potlačenie nežiadúcich vlnových dĺžok. Pri pokročilejších systémoch sa používajú aj laditeľné lasery s aktívnou spätnoväzbovou stabilizáciou vlnovej dĺžky. Úlohou budiacich elektrických obvodov týchto vysielačov je okrem modulácie signálu aj stabilizácia výstupného výkonu vysielača. Stabilizačná spätná väzba býva typicky realizovaná priamo z optického výstupu laseru monitorovacou diódou.

1.2.3 Optické prijímače

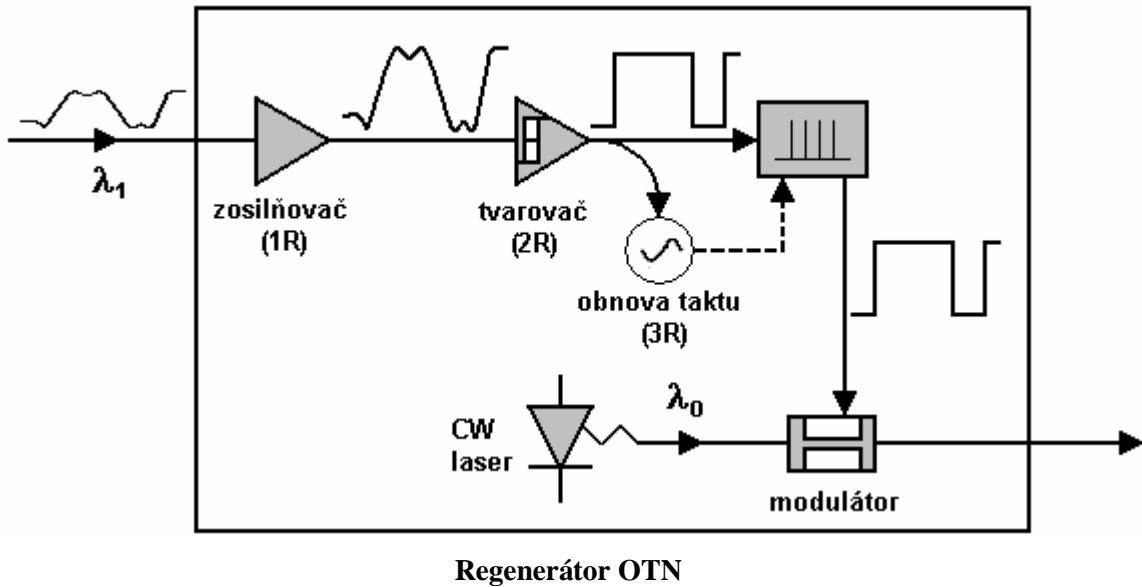
Rovnako ako optické vysielače ani optické prijímače sa v systémoch WDM samostatne nevyskytujú. Prevodníkom optického signálu na elektrický môže byť fotodióda PIN, lavínová dióda APD (Avalanche Photo Diode) alebo fototranzistor riadený elektrickým poľom. Najčastejšími materiálmi pre fotodiódy sú Ge, Si, InGaAs.

1.2.4 Optický regenerátor

Je to sietový prvok, v ktorom dochádza k obnove všetkých alebo niektorých parametrov optického signálu. Je použiteľných viacero typov regenerátorov v závislosti od rozsahu obnovy signálu:

- regenerátory 1 R (Regeneration) – obnovia len stredný výkon a tvar spektra signálu
- regenerátory 2 R (Regeneration, Reshaping) – navyše obnovujú amplitúdu optických impulzov
- regenerátory 3 R (Regeneration, Reshaping, Retiming) – obnovia časové pomery impulzov ich prevzorkovaním taktom odvodeným z prijímaného signálu

Spracovanie optického signálu v regenerátoroch je znázornnené na obrázku.

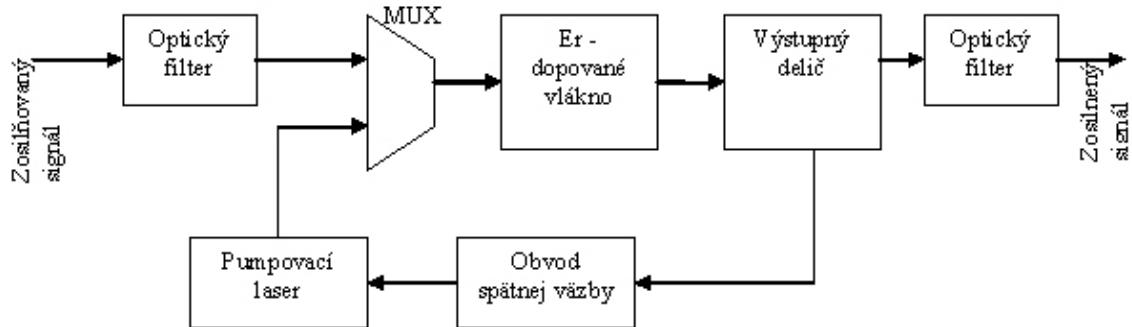


1.2.5 Optické zosilňovače

V optických prenosových systémoch zohrávajú významnú úlohu. Ich funkciou je priame zosilnenie optického signálu bez jeho premeny na elektrický.

EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier)

Pri prenosoch na vlnovej dĺžke 1550 nm sa používa v optických zosilňovačoch vlákno dopované erbiom. Jeho dĺžka je 10 m. Bloková schéma zosilňovača je na obrázku. Optický signál s nízkou úrovňou, ktorý sa má zosilniť, prechádza cez optický filter do vlnového multiplexora, do ktorého sa privádzajú aj budiace žiarenie vlnovej dĺžky 980 až 1480 nm. Pracovný signál vlnovej dĺžky 1550 nm je privedený spolu s budiacim signálom do vlákna dopovaného erbiom, dĺžky 10 až 30 m. Budiace žiarenie je absorbované erbiom, čím sa stimuluje emisia fotónov a dochádza k zosilneniu signálu 1550 nm. Energia z vlákna sa viedie do deliča, z ktorého 95% energie odchádza do filtra a 5% sa vracia do obvodu spätej väzby na reguláciu zosilnenia. Filter bráni, aby sa budiace žiarenie nedostalo do výstupného optického vlákna. Zosilnenie signálu je 20 až 30 dB.



Erbiom dopovaný zosilňovač

1.2.6 Optické vlnové multiplexory a demultiplexory

Predstavujú kľúčové súčiastky WDM techniky. Sú to pasívne komponenty, ktoré slúžia ako rozdeľovacie a zlučovacie zariadenie.

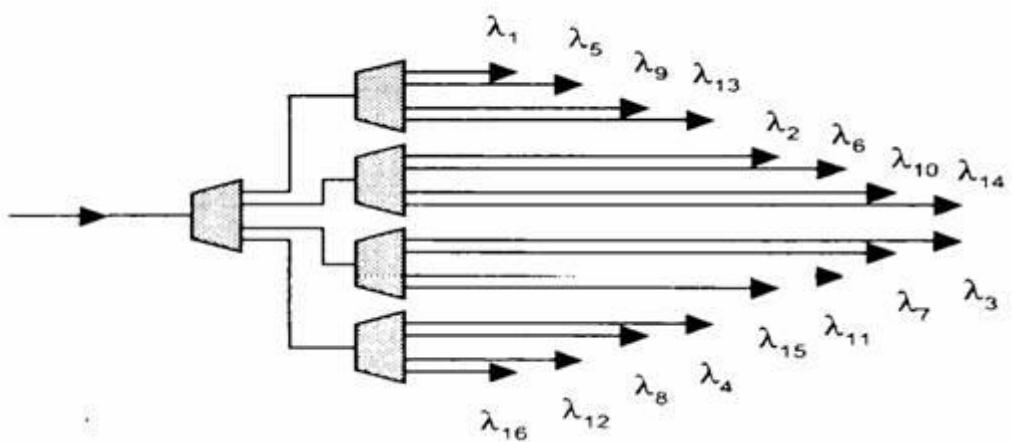
Vlnový multiplexor

- zlučovacie zariadenie s dvoma alebo viacerými vstupmi a jedným výstupom
- svetelné žiarenie každého vstupu má vopred definovaný rozsah vlnovej dĺžky a výstup je kombináciou svetelného žiarenia zo vstupov

Vlnový demultiplexor

- rozdeľovacie zariadenie s jedným vstupom a dvoma alebo viacerými výstupmi
- vstupný signál pozostáva z kombinácie vlnových dĺžok a každý výstup má iný, vopred určený rozsah vlnovej dĺžky

Konštrukčne sú tieto súčiastky vyrábané ako výmenné moduly s multiplexnými pomermi 1 : 4 až 1 : 16, ktoré sú v prípade väčšieho počtu kanálov zaradené do kaskád. Príklad usporiadania vlnového demultiplexora 1 : 16 zloženého z kaskády demultiplexorov 1 : 4 je na obrázku.



Usporiadanie demultiplexoru 1 : 16

1.3 Typy optických sietí

1.3.1 Optické siete

Čo je to siet?

Siet' je skupina bodov (uzlov) spojených komunikačnými kanálmi. Uzlami sú jednotlivé sietové zariadenia. Siete môžu byť navzájom prepojene s inými sietami a taktiež môžu obsahovať podsiete.

Siete sa delia o.i. podľa nasledujúcich kritérií:

- priestor ktorý siet' pokrýva
 - *LAN (Local Area Network)* - lokálne siete
 - *MAN (Metropolitan Area Network)* - mestské siete
 - *WAN (Wide Area Network)* - rozsiahle siete
- sietová topológia - vzájomné usporiadanie uzlov a spojov
- typ informácie, ktorý sa v sieti prenáša
- na súkromné a verejne
- typ spojov použitých v infraštruktúre siete
- ...

Veľkosť správy posielanej po sieti je obmedzená. Ak je sprava väčšia musí sa rozdeliť na niekoľko časti, ktoré sa pošlú jednotlivo. Takéto jednotky nazývame *dátové pakety*.

1.3.2 Lokálne siete (LAN)

Lokálna siet' prepája rôzne zariadenia na krátku vzdialenosť. Do siete sú zapojene aj zariadenia, ktoré prepájajú jednotlivé časti sieti:

- *HUB(rozbočovače)* - zariadenie v ktorom dochádza k vetveniu dátového spoja - dátu prichádzajúce z jedného alebo viacerých smerov sa posielajú do jedného, alebo viacerých smerov.
- *switches(prepínače)* - prepája dátu do určitého spoja, ktorý vedie k cieľovému zariadeniu
- *LAN routers(smerovače LAN)* - zariadenie, ktoré určuje ďalší uzol, do ktorého majú byť predane údaje. Funkciu smerovala LAN niekedy plní počítač s viacerými sietovými adaptérmi a k tomu určeným programom.
- *routing switches(smerovacie prepínače)* - zaistujú funkciu smerovačov aj prepínačov.

1.3.3 Mestské siete (MAN)

Tento typ siete pokrýva stredne veľké územie. Spravidla ide o prepojenie určitého počtu lokálnych sieti spoločnou sieťou (*backbone*), ktorá ma znaky rozľahlých sieti.

1.3.4 Rozľahlé siete (WAN)

Rozsiahle siete zaistujú prepojenie lokálnych a mestských sieti na siete celoštátne resp. medzinárodné. Prepojenie sa realizuje pomocou smerovačov WAN, ku ktorým sú pripojene smerovače pripojených LAN a MAN. Siete WAN sa vyznačujú najmä vysokou rýchlosťou prenosu a prieplustnosťou. Na prenos informácií sa používa najmä dva princípy s príslušnými protokolmi

- *prepínanie prenosových spojov* (najmä súkromné siete)
- *prepínanie dátových paketov* (najmä verejne siete)

Na WAN prenosy sa používajú najmä nasledujúce technológie:

- *ISDN (Integrated Service Digital Network)*

ISDN je sada štandardov pre digitálny prenos cez telefónnu sieť. Umožňuje vysokú prenosovú rýchlosť a možnosť nedátového prenosu (hlas, video...)

- *Frame Relay*

Protokol založený na technike prepínania paketov s vytváraním virtuálnych okruhov. Možno dosiahnuť rýchlosť od 64kbps do 2Mbps.

- *ATM(Asynchronous Transfer Mode)*

Využíva vytváranie pevných alebo prepínaných virtuálnych okruhov, ktoré sa zachovajú po celu dobu prenosu údajov. Pakety majú pevnú dĺžku 53B nazývajú sa bunky(cells). ATM siete sa vyskytujú najčastejšie ako siete WAN.

- *Gigabit Ethernet*

Vyznačuje sa vysokou prenosovou rýchlosťou (1Gbps) a povoľuje pomerne veľké vzdialenosť medzi uzlami (do 10km), preto ho možno zaradiť k technológiám WAN sieti. Sieťové komponenty Gigabit Ethernet sú zlučiteľné s komponentmi Ethernet, ktoré sa často používajú v infraštruktúre lokálnych sieti. Preto je pripojenie lokálnych sieti na Gigabit Ethernet po technickej stránke bezproblémové.

- *Sieť pre mobilnú komunikáciu - GSM(Global System for Mobile Communication)*

Telefónna sieť, ktorá poskytuje ak prenos dátových údajov. Jedna sa o bezdrôtový prenosný systém. Používa technológiu TDMA(Time Division Multiply Acces), ktorá je založená na zdieľaní určitej frekvencie ôsmimi účastníkmi.

1.3.5 Topológia sietí

Je to spôsob prepojenia jednotlivých uzlov.

- Topológie, ktoré využívajú jeden kábel na komunikáciu medzi každými dvoma uzlami - *point-to-point*
 - *fully connected* - každý bod je spojený s každým
 - *partially connected* - dvojbodové spoje, ale všetky uzly nemusia byť navzájom prepojene
- Topológie využívajúce násobný prístup k médiu (jedno médium sa využíva na komunikáciu medzi rôznymi uzlami):
 - *zbernicová topológia (bus topology)* - tvorí ju lineárny segment na oboch koncoch zakončený terminátormi, ktoré absorbujú signály. Signál sa šíri oboma smermi. Uzly sú pripojene k médiu priamo pomocou siet'ového adaptéra.
 - *-stromová topológia (tree topology)* - zovšeobecnenie zbernicovej topológie. Prenosové médium tvorí vetviaci sa kábel, v ktorom nie je kružnica. Každý koniec je zakončený terminátorom.
 - *kruhová topológia (ring topology)* - siet'ové uzly vytvárajú kružnicu. K médiu sa pripája pomocou opakovača. Opakovač prijíma signál, zosiluje a znova vyšle v smere prenosu. Prenos dát prebieha iba v jednom smere.
 - *hviezdicovitá topológia (star topology)* - každý uzol je pripojený k centrálnemu uzlu pomocou dvojice káblor. Centrálnym uzlom ktorým môže byť HUB, alebo switch.

1.3.6 Metódy prístupu k médiu

Prístupová technika je významná najmä u sieti lokálnych, pretože najmä na nich sa používajú topológie s násobným prístupom k prenosovému médiu (pri rozľahlých sietach sa používa najmä topológia point-to-point).

Na riadenie prístupu k spoločnému médiu sa používajú rôzne štandardy. Najznámejšie sú

- *Ethernet/IEEE 802.3* - Používa prístupovú techniku CSMA/CD(Carrier-Sense Multyplex Access with Collision Detection), ktorá je založená na náhodnom prístupe uzlov k médiu v čase, keď chcú vysielať. Kolízie, ktoré môžu nastat', ak sa vysielajú v dvoch uzloch súčasne sú riešené postupmi CSMA/CD.
- *Ethernet/IEEE 802.3 LAN* - Štandardami je určená aj topológia, rýchlosť prenosu signálu, limity pre dĺžku kábla, ... Takýmito štandardami sú napr. 10Base5, 10Base2, 100BaseTX, 1000BaseTX/SX/LX(Gigabit Ethernet)
- *Token Ring* - Využíva sa kruhová topológia. Používa metódu riadeného prístupu k prenosovému médiu. Na to slúži dátový pakt zvaný token. Vysiela iba uzol, ktorý zostal token. Ak nemá v záujme vysielať, pošle token susedovi. Tým je zaistene, že nedojde ku kolízii.
- *FDDI* - Ma topológia dvojitého kruhu. Prebieha protismerný prenos údajov. Na bežný prenos je určený okruh primárny. V prípade poruchy na využije sekundárny segment na preklenutie nepriechodného miesta. Takáto sieť je teda veľmi spoľahlivá, a odolná voči poruchám.

1.3.7 Bezdrôtové lokálne siete (WLAN - Wireless LAN)

Riešia prípady, keď na niektorých miestach nemožno inštalovať kálový sieťový rozvod, resp. sa vyžaduje flexibilita a mobilnosť. Existujú dve možnosti konfigurácie siete

- nezávislá konfigurácia - Jedna sa o sadu počítačov vybavených modulom pre bezdrôtovú signalizáciu. Pri takýchto sieťach môže dôjsť ku kolíziám, keď sa viacero stanúc pokúša vysielat odrazu. Taktiež vzniká neželaná schéma priorít v závislosti od vzdialenosť od cieľovej stanice.
- konfigurácia s distributívnym systémom - Sada počítačov je doplnená zariadením starajúcim sa o distribúciu signálu, ktorý je obdobou prepínača v drôtových sieťach. Nazýva sa aj prístupový uzol (Access Point) a umožňuje pripojiť bezdrôtovú sieť do inej siete. Možno takto tiež vytvoriť siet bezdrôtových sieti s tým, že stanice môžu prechádzať medzi oblastami jednotlivých podneti.

Používajú sa tri možnosti vysielania signálu

- rádiové vlny 2,4-2,883GHz s fázovou moduláciou (DBPSK technika)
- rádiové vlny 2,4-2,883GHz s frekvenčnou moduláciou (FHSS technika)
- v infračervenom spektri 850-950nm s pulzovou moduláciou. Tento spôsob možno použiť iba v rámci jednej miestnosti.

Prenosová rýchlosť WLAN je radovo v jednotkách Mbps. Preto sa používajú iba na zvláštne účely.

1.4 Triedy optických sietí

V prípade optických sietí možno definovať podľa použitých optických komponentov štyri základné typy sietí. Predpokladáme, že všetky skupiny používajú na prenos optické linky a obsahujú neprepájacie optické komponenty.

Triedy optických sietí				
Typy optických komunikačných komponentov	Siete optických liniek	B&S siete	WR siete	Fot. paketovo-prepájané siete
<i>Neprepájacie opt. komponenty</i>	X	X	X	X
<i>Laditeľné vysielače a/alebo laditeľné prijímače</i>	--	X	X/ --	X/ --
<i>Optické obvodové prepínače (OADM a OXC)</i>	--	--	X	X/ --
<i>Optické paketové prepínače</i>	--	--	--	X

1.4.1 Siete optických liniek (Optical link networks)

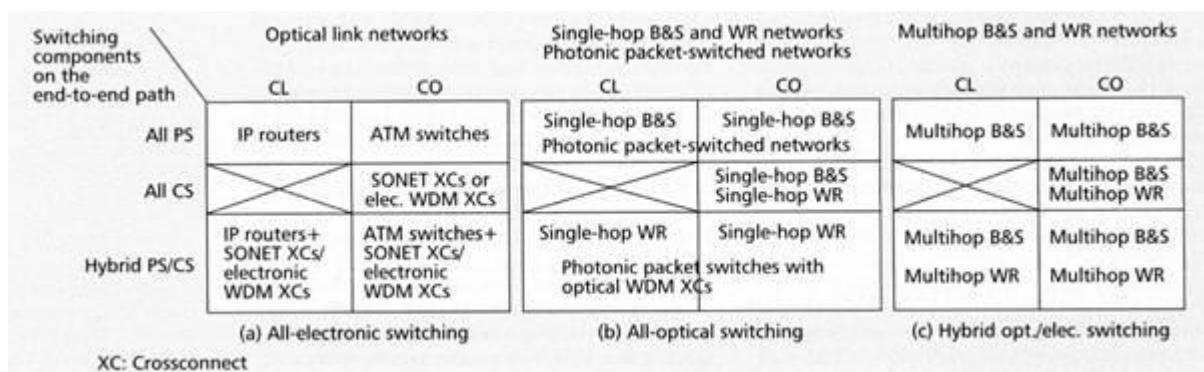
Skladajú sa z celoelektrických prepínačov navzájom prepojených optickými linkami. Optické linky môžu byť jednokanálové alebo viackanálové bod-bod linky alebo médium zdieľajúce broadcastové linky. Bod-bod viackanálové linky sú realizované umiestnením WDM multiplexorov na oba konca optického vlákna. Médium zdieľajúce broadcastové linky sú vytvorené použitím WDM passive star couplers. Nakoľko tieto komponenty nie sú programovateľné, neexistuje v týchto sieťach možnosť ich rekonfigurácie. Obrázok ukazuje rozdielne podtriedy optických sietí založených na elektrických prepínačoch. Môžu byť výhradne paketové (spojové alebo bez spojovej orientácie), výhradne okruhové alebo hybridné.

1.4.2 Broadcast a select siete (Broadcast-and-Select networks - B&S)

Tu sú použité, ako jediné komponenty s optickým prepájaním, laditeľné vysielače a/alebo prijímače. Ako už názov prezrádza, dátu sú vysielané na všetky linky (napr. použitím WDM passive star coupler) a prijímač je programovaný tak, aby si zvolil kanál, ktorý obsahuje jemu určené informácie. B&S siete sa rozdeľujú na single-hop a multi-hop.

V single-hop sietach užívateľské dátá len prechádzajú optickými smerovacími komponentmi na ceste, zatiaľ čo v multi-hop sietach dátá idú cez kombináciu optických a elektrických prepájacích komponentov. Celo-optické siete majú hlavnú výhodu v transparentnosti prenosovej rýchlosťi. V single-hop sietach vysielač a prijímač môžu meniť kanály po každom prijatom pakete (paket-by-paket) alebo až po prijatí výzvy na ukončenie komunikácie (call-by-call). Preto je možné realizovať paketové prepájanie spojovo orientované, nespojovo orientované a tiež okuhové spojovo orientované prepájanie. Hybridné prepájanie nie je možné, lebo jedinými použitými prepájacími komponentmi sú laditeľné vysielače/prijímače a preto oba konca prenosovej cesty musia pracovať súčasne v rovnakom móde.

V multi-hop sietach sú dátá vysielané broadcastom na všetky linky, ale elektronické prepínače (efektívne) zabezpečia, aby sa dátá smerujúce po spoločnej ceste od zdroja do cieľa prenášali len jednou vlnovou dĺžkou, čím nie všetky uzly prijímajú všetky vlnové dĺžky. Nakol'ko ide o B&S siete, tak jedinými optickými prepájacími zariadeniami sú laditeľné prijímače/vysielače. Tiež platí podpora prepájania okruhov ako aj paketov a tiež kombinácie oboch typov prepájania.



Podtryedy optických sietí

1.4.3 Siete s vlnovodlžkovým smerovaním (Wavelength-routed networks - WR)

V týchto sietach nesmú chýbať optické okruhové prepínače (OADM/OXC) a môžu ale aj nemusia sa tu nachádzať laditeľné prijímače/vysielače. WR siete môžu byť tiež typu single-hop a multi-hop.

Single-hop siete využívajú výhradne optické prepájacie komponenty a ak obsahujú vysielače a prijímače bez možnosti zmeny vlnovej dĺžky, potom ide výhradne o siete s prepájaním okruhov.

Použitie laditeľných vysielačov/prijímačov umožňuje realizovať okruhové alebo hybridné prepájanie.

Multi-hop WR siete pozostávajú z optických okruhových prepínačov, elektronických prepínačov, prípadne aj laditeľných vysielačov/prijímačov. Elektronické prepínače môžu pracovať v režime prepájania okruhov ako aj prepájania paketov (spojový aj nespojový mód).

1.4.4 Fotonické paketovo prepájané siete (Photonic packet-switched networks)

Tento typ sietí obsahuje nevyhnutne optické paketové prepínače, naviac môžu mať aj optické okruhové prepínače a laditeľné vysielače/prijímače. Nakol'ko optické prepájanie okruhov nemusí byť realizované, tieto siete pracujú bud' v optickom paketovom alebo zmiešanom (hybridnom) prepájacom režime. Optické prepájacie obvody sú realizované vo forme OADM/OXC alebo laditeľnými vysielačmi/prijímačmi pracujúcimi v režime call-by-call. Prípadná kombinácia celo-optických paketových s elektronickými okruhovými prepínačmi je síce možná, ale málo pravdepodobná, lebo namiesto elektrických sa pravdepodobne použijú celo-optické obvodové prepínače.

1.4.5 Siete založené na optickom burstovom prepájaní (Optical burst-switched networks)

Burstové prepájanie kombinuje koncept okruhového a paketového prepájania. V týchto sietiach ide tiež o spojovo orientovaný prenos. Spojenie sa vytvorí zaslaním kontrolného paketu do cieľa cesty. Dátové bursty sú potom zasielané po určitom časovom intervale za kontrolným, pričom sa nevyžaduje potvrdenie o úspešnosti alokácie zdrojov pre takto vytvorenú cestu. Tým sa odstraňuje round-trip oneskorenie, potrebné na vytvorenie komunikačného okruhu v klasických sietiach s prepájaním okruhov. Aby sa predišlo možnosti, že bursty prídu skôr než prepínač stihne alokovať zdroje, musia byť v prepínačoch vyrovnávacie pamäte.

1.4.6 Súčasný stav sietí

Z vyššie menovaných sietí sa v súčasnej dobe kommerčne využívajú len siete optických liniek. Zo zvyšných troch (B&S, WR, fotonické paketovo-prepájané siete) sa najväčšia pozornosť sústredí na WR siete. Je to spôsobené vysokou finančnou náročnosťou ladielínnych vysielačov/prijímačov pre B&S a optických pamäti pre optické paketové prepínače. Z WR sietí majú najväčšiu perspektívu multi-hop WR siete s elektronickým paketovým prepájaním, napr. IP smerovače navzájom prepojené cez optické okruhové prepínače OADM/OXC.

1.5 Programovo riadený OADM

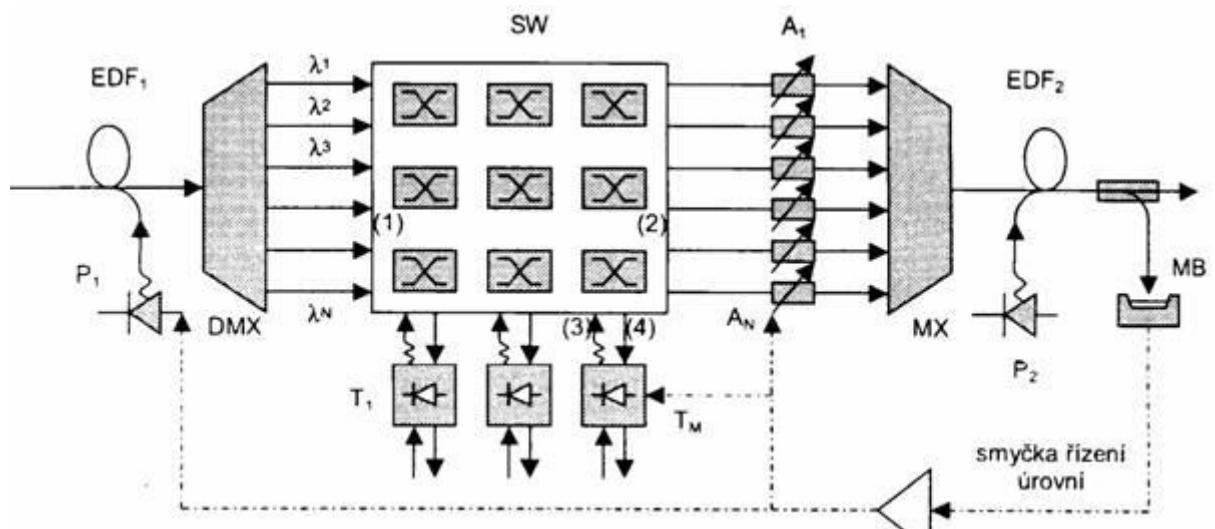
Optický add/drop (vydeľovací) multiplex OADM umožňuje flexibilné, diaľkovo riadené prepojovanie jednotlivých kanálov optického spektra za účelom za účelom prevádzky a ochranného prepínania. Vyznačuje sa dvoma rozhraniami skupinového optického signálu rovnakej kapacity (s rovnakým počtom pracovných vlnových dĺžok) a blokom pre programové vydeľovanie alebo začleňovanie určitého počtu signálov jednotlivých vlnových dĺžok. Umožňuje tranzit všetkých nevydelených a pridaných vlnových dĺžok, ale neumožňuje zmenu vlnových dĺžok prenášaných optických kanálov.

Všeobecná bloková schéma OADM pre jeden smer prenosu je na obrázku. Vstupným predzosiľovačom EDF₁ je skupinový optický signál zosinený na úroveň potrebnú k ďalšiemu spracovaniu. V demultiplexore DMX je kompletne rozložený na jednotlivé pracovné vlnové dĺžky. Takto priestorovo oddelené optické kanály sú privedené na priestorové spojovacie pole SW, ktoré je zložené z vlnovo nezávislých optických prepínačov 2x2. Tieto sa môžu nachádzať v jednom zo štyroch stavov:

- prepojenie vstupného signálu na výstup k vlnovému multiplexoru MX
- prepojenie vstupného signálu na vydeľovací výstup k transpondéru
- prepojenie začleňovaného signálu z transpondéru na výstup k vlnovému multiplexoru MX
- obe prepojenia podľa a) aj b)

Úlohou optických transpondérov je zaistiť optickému signálu vstupujúcemu prostredníctvom OADM do siete WDM konkrétnu pracovnú vlnovú dĺžku prostredníctvom ktorej bude kanál transportovaný. Ďalej musí vytvoriť zakončenie kanálu z hľadiska služobnej a riadiacej informácie.

Na výstupe SW sú obvykle zaradené tlmiace články A_i, ktorých úlohou je vyrovnať rozdiely v úrovniach jednotlivých vlnových dĺžok. Za multiplexorom MX nasleduje výstupný zosilňovač EDF₂. Na záver je použitý monitorovací blok MB, ktorý analyzuje výstupný signál ako celok aj po jednotlivých vlnových dĺžkach.



Bloková schéma OADM

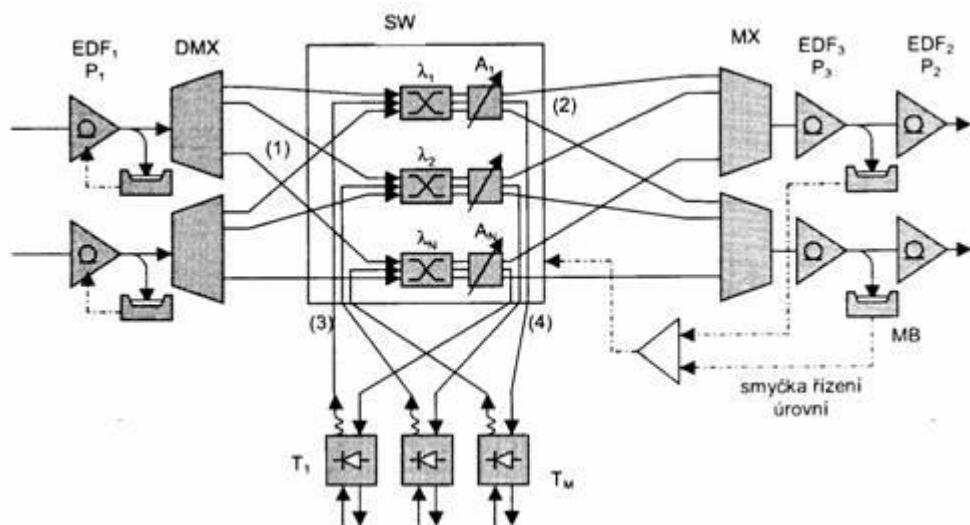
1.6 Optické spojovacie polia OXC

Optický cross-connect (spojovacie pole) OXC je najkomplexnejším sietovým prvkom optickej siete. Jeho štruktúra je rozšírením princípu programovateľného OADM na N rozhraní skupinového optického signálu. Používajú sa dva typy OXC:

1.6.1 OXC s priestorovým spojovacím pol'om

Je zobrazený na obrázku. Nie je schopný konvertovať vlnovú dĺžku prenášaného optického kanálu. Priestorové prepájanie sa obmedzuje na prepojenie jednotlivých pracovných vlnových dĺžok medzi rozhraniami skupinových signálov alebo príspevkovými rozhraniami. Prepájanie sa realizuje v N nezávislých spojovacích poliach.

Za multiplexormi MX nasleduje kaskáda výstupných zosilňovačov, ked'že tlmenie spojovacích polí je relatívne veľké (5 až 20 dB). Medzi zosilňovacími stupňami je odbočenie signálu pre monitorovací blok MB, ktorý opäť analyzuje výstupný signál a riadi tlmiace články A_i .



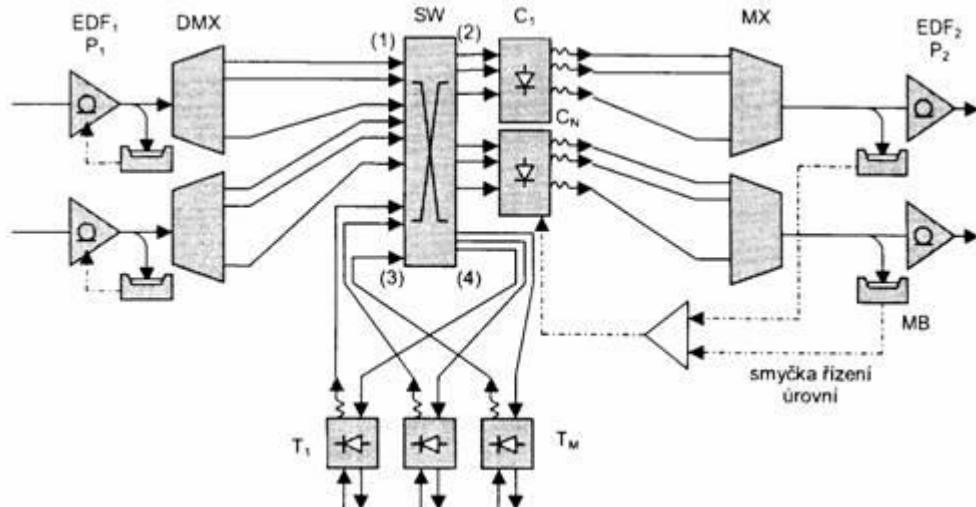
OXC s priestorovým spojovacím pol'om

1.6.2 OXC s priestorovo-vlnovým spojovacím pol'om

Je zobrazený na obrázku. Obsahuje spojovacie pole KxK s úplnou dostupnosťou a programovateľnými konvertormi vlnových dĺžok, ktoré umožňujú prideliť optickému kanálu vlnovú dĺžku potrebnú pre začlenenie do skupinového signálu bez blokovania.

Vstupným predzosilňovačom EDF₁ je skupinový optický signál zosilnený na úroveň potrebnú k ďalšiemu spracovaniu. V demultiplexore DMX je kompletne rozložený na jednotlivé pracovné vlnové dĺžky. Zosilnenie je regulované spätnou väzbou, ktorej úlohou je stabilizovať úrovne vstupujúcich optických kanálov nezávisle na spektri vstupného skupinového signálu.

Tieto oddelené optické kanály vstupujú na priestorové spojovacie pole SW. Je zložené z kaskádovo radených optických prepínacích prvkov. Potom nasleduje blok konvertorov C_i. Prispôsobenie vlnovej dĺžky býva realizované medziprevodom na elektrický signál.



OXC s priestorovo-vlnovým spojovacím pol'om

2 Optické prepájanie

2.1 Metódy optického prepájanie

Podľa použitých spojovacích zariadení možno optické prenosové siete rozdeliť na niekoľko typov, ktoré sa navzájom od seba líšia mierou spracovania signálov v optickej doméne. Rozdelenie sietí nám prehľadne popisuje nasledujúca tabuľka.

Triedy optických sietí				
Typy optických komunikačných komponentov	Siete optických liniek	B&S siete	WR siete	Fot. paketovo-prepájané siete
Neprepájacie opt. komponenty	X	X	X	X
Laditeľné vysielače a/alebo laditeľné prijímače	--	X	X/ --	X/ --
Optické obvodové prepínače (OADM a OXC)	--	--	X	X/ --
Optické paketové prepínače	--	--	--	X

Použitie optických komunikačných komponentov v optických sietiach

2.1.1 Siete optických liniek (Optical Line Networks)

Siete optických liniek sa skladajú z celo-elektrických prepínačov navzájom prepojených optickými linkami. Optické linky môžu byť jednokanálové alebo viackanálové bod-bod linky alebo broadcastové linky. Bod-bod viackanálové linky sú realizované umiestnením WDM multiplexorov na oba konce optického vlákna a broadcastové linky sú vytvorené použitím hviezdicových väzobných členov (zabezpečujú prenos optického signálu z jedného vstupu na viacero výstupov) . Nakoľko tieto komponenty nie sú programovateľné, neexistuje možnosť ich rekonfigurácie.

2.1.2 Broadcast & Select siete

V prípade B&S sietí sa už dá hovoriť o optickom prepájaní, aj keď len vo veľmi obmedzenom slova zmysle. Sú tu použité, ako jediné komponenty s optickým prepájaním, laditeľné vysielače a/alebo prijímače. Ako už názov prezrádza, dátá sú vysielané na všetky linky (napr. použitím hviezdicových väzobných členov) a prijímač je programovaný tak, aby si zvolil kanál, ktorý obsahuje jemu určené informácie. B&S siete sa rozdeľujú na single-hop a multi-hop. V single-hop sietiach užívateľské dátá len prechádzajú optickými smerovacími komponentami na

zdroj-cieľ ceste, zatiaľ čo v multi-hop sietiach sú dátá navyše aj elektronicky prepájané. Single-hop sú v podstate celo-optické siete, s veľmi jednoduchým prepájaním. Ich hlavná výhoda je v transparentnosti prenosovej rýchlosťi.

2.1.3 Siete s vlnovodlžkovým smerovaním (Wavelength-routed networks - WR)

V týchto sietiach nesmú chýbať optické okruhové prepínače (optické Add/Drop multiplexory a optické krížové prepínače) a môžu ale aj nemusia sa tu nachádzať ladielne prijímače/vysielače. WR siete môžu byť opäť typu single-hop a multi-hop, pričom multi-hop siete obsahujú oproti single-hop naviac elektronické prepínače. Preto potom môžu pracovať v režime prepájania paketov. Pre WR siete je vo všeobecnosti typický spojovo orientovaný prenos, čiže prepájanie okruhov. Tento typ sietí má najväčšie predpoklady na rozšírenie sa v najbližšej budúcnosti.

2.1.4 Fotonické paketovo prepájané siete (Photonic packet-switched networks)

Najvyšší stupeň vo vývoji optických sietí predstavujú fotonické paketovo prepájané siete. Ich charakteristickou črtou je, že sú založené na prepájaní dátových jednotiek (paketov, burstov) a pritom neobsahujú žiadne elektronické prepájacie komponenty. Tým, že nedochádza ku konverzii do elektrickej oblasti, dosahuje tento typ sietí najvyššie prenosové rýchlosťi a kapacity. Problémom je zatiaľ technologická realizácia celo-optických paketových prepínačov.

Fotonické paketovo prepájané siete môžeme ešte ďalej rozdeliť na siete založené na:

- **Optickom paketovom prepájaní** – V tomto prípade je najmenšou, sietou smerovanou dátovou jednotkou paket, ktorý môže mať konštantnú alebo variabilnú dĺžku. Paket je smerovaný metódou hop-by-hop a to na základe riadiacej informácie uloženej v jeho hlavičke. Tá sa opticky spracúva v smerovačoch.
- **Optickom burstovom prepájaní** – Tentoraz najmenšiu dátovú jednotku predstavuje burst, obsahujúci pakety z rôznych zdrojov a od rôznych klientov. Riadiaca informácia je spoločná pre celý burst a prenáša sa na špeciálnych kanáloch a do prepínača dorazí ešte pred samotným burstom. To umožňuje alokovať spojovacie prostriedky v predstihu a čiastočne obmedziť výskyt kolízií.
- **Fotonickom slotovom smerovaní** – Ako už z názvu vyplýva, dátovú jednotku tvoria tzv. fotonické sloty. Tie zahrňujú pakety, ktoré sú v danom časovom intervale prenášané na všetkých vlnových dĺžkach. Takéto pakety sú v uzloch smerované rovnakým spôsobom, nezávisle od ich príslušnosti k vlnovej dĺžke. Podmienkou efektívneho využitia tejto metódy prepájania je častý výskyt paketov s rovnakou cieľovou adresou.

Po doriešení viacerých technologických problémov majú z fotonických paketovo prepájaných sietí najväčšie možnosti presadenia sa siete, založené na optickom burstovom prepájaní, a to z dôvodu nižších nárokov na rýchlosť zmeny spojovacieho poľa prepínača, na veľkosť vyrovnavacích pamäťí a nižšej pravdepodobnosti výskytu kolízií.

2.2 Technológie pre optické prepájanie

2.4.1 Úvod

S využívaním prenosových technológií založených na optickej báze súvisí potreba použitia zariadení umožňujúcich prepájanie a smerovanie optických signálov medzi viacerými uzlami. Informačný signál pri prechode cez smerovací uzol je presmerovaný na cestu, ktorá je určená vzdialenosťou, nákladmi a spoľahlivosťou danej cesty. Takéto požiadavky spĺňajú optické krízové prepínače (optical crossconnect - OXC). OXC sú základné elementy pre smerovanie optických signálov v optických sietiach. Tieto zariadenia musia byť bez blokády, teda každý vstup môže byť prepojený na ľubovoľný výstup bez ovplyvnenia existujúcich spojení.

Väčšina súčasných OXC je v skutočnosti založená na elektrickej báze. Na výstupe optického vlákna je detekovaný optický signál, ktorý sa konvertuje na elektrický signál. Tento signál je konvenčným spôsobom prepojený na požadovaný výstup a následne je opäť konvertovaný na optický signál. Tieto zariadenia sa označujú ako opto-elektro-optické systémy (OEO). Pri potrebných prenosových rýchlosťach 10 až 40 Gbit/s je prepájanie technicky náročné a finančne nákladné. V sietovom prostredí s viacerými protokolmi pracujúcimi s rozdielnymi prenosovými rýchlosťami je použitie takýchto zariadení neefektívne. Pri analýze rôznych paketov môže vznikať variabilné oneskorenie, neprípustné pre prenos signálov a službách pracujúcich v reálnom čase. So zvyšovaním prenosovej rýchlosťi je taktiež potrebné existujúce systémy nahradíť rýchlejšími, čo je finančne neefektívne riešenie.

Pre nevýhody systémov OEO sa počíta s nasadením systémov s prepájaním na čisto optickom základe, označovaných ako OOO. Tieto zariadenia sú omnoho efektívnejšie, pretože umožňujú prepínanie bez potreby konverzie na elektrický signál. Prepájanie je nezávislé od prenosovej rýchlosťi a použitého dátového protokolu, systémy sú teda odolné voči upgrade siete v budúcnosti. K výhodám možno zaradiť omnoho menšiu finančnú náročnosť a vyššiu spoľahlivosť oproti systémom OEO.

Kompromis medzi systémami OEO a OOO predstavujú systémy označované ako OEOEO (opaque optical crossconnect). Optický signál je konvertovaný na elektrický a následne späť na optický. Na optickej úrovni je signál prepojený, konvertovaný na elektrický a napokon späť na optický signál. Takýto spôsob umožňuje monitorovanie výkonu siete a regeneráciu signálu v jedinom zariadení.

V súčasnosti existuje niekoľko systémov umožňujúcich optické prepínanie. K uvažovaným technológiám patria systémy MEMS založených na tenkých pohyblivých zrkadlách, rôzne polovodičové zariadenia a zariadenia na báze tekutých kryštálov, prípadne holografických kryštálov.

2.3 Hľadanie transparentných sietí

V posledných rokoch sa prenosová technológia vyvíjala omnoho rýchlejšie než optické prepínanie, čo má za následok, že limitujúcim faktorom rýchlosťi prenosu dát v sieti sa stali práve prepínacie zariadenia.

Zariadenia schopné prepínať optický signál sú v súčasnosti takmer výhradne hybridného opticko-elektronicko-optického (O-E-O) charakteru, čím sú značne nákladne na konštrukciu, integráciu a riadenie. Výsledkom toho je nízke rozšírenie takýchto prepínačov.

E-O-E prepínače rozdeľujú prichádzajúci optický signál na samostatné signály rôznych vlnových dĺžok, tie potom konvertujú do vysoko-rýchlostnej elektrickej podoby a demultiplexujú na pomalšie signály v elektrickej podobe. Takéto kanály sa potom samostatne smerujú a následne opäťovne multiplexujú do vysoko-rýchlostných dátových tokov elektrického a optického charakteru. Optický signál sa na záver ešte vlnovo-dĺžkovo multiplexuje.

Výhodou takého riešenia sú široké možnosti smerovania, nakoľko elektrický dátový tok je možné monitorovať a dynamicky, nezávisle od ostatných kánálov, smerovať. Nevýhodou je vysoká cena a energetická náročnosť E-O-E prepínačov. Tiež nie sú schopné spracovať signály s neštandardnými rýchlosťami a formátmi, vyžadujú variabilný čas na spracovanie hlavičky paketu a jeho smerovanie, výsledkom čoho je oneskorenie signálu pohybujúce sa od mikrosekúnd až po stovky milisekúnd.

Z toho dôvodu sa v súčasnosti pozornosť obracia na lacnejšie, rýchlejšie celo-optické (fotonické, transparentné, O-O-O) prepínače. Tie by mali byť založené na poliach z tenkých pohyblivých zrkadiel, známych pod pojmom mikro-elektromechanické systémy (MEMS) a jednotkách založených na holografických kryštáloch, tekutých kryštáloch a materiáloch s úplnou vnútornou a polarizačne závislou odrazivosťou. Na rozdiel od E-O-E prepínačov, súčasné O-O-O prepínače nie sú schopné nezávislého smerovania dátových tokov multiplexovaných v optickom signáli. Našťastie pre väčšinu súčasných aplikácií nie je takéto smerovanie požadované. Naopak ich schopnosti smerovať optický signál s jednou vlnovou dĺžkou alebo skupinu signálov sa využívajú pri zotavovaní sa z porúch na sieti (ak treba automaticky presmerovať prevádzku z chybného na korektné optické vlákno) alebo pri zmenách v prevádzke v závislosti od dennej doby alebo ročného obdobia.

2.4 Optické paketové prepájanie

2.4.1 Úvod do optického paketového prepájania

Základnou charakteristikou optického paketového prepájania (OPS) je, že pakety sú priamo prepájané cez OPS uzol/router v optickej doméne z ľubovoľného vstupného portu na ľubovoľný výstupný port. Tým sa odstraňuje rýchlosťné obmedzenie v podobe elektronického prepájania a umožňuje sa paketovo založené optické prepájanie, ktoré dosahuje prenosové kapacity WDM. Zároveň sa znižuje energetická spotreba smerovača.

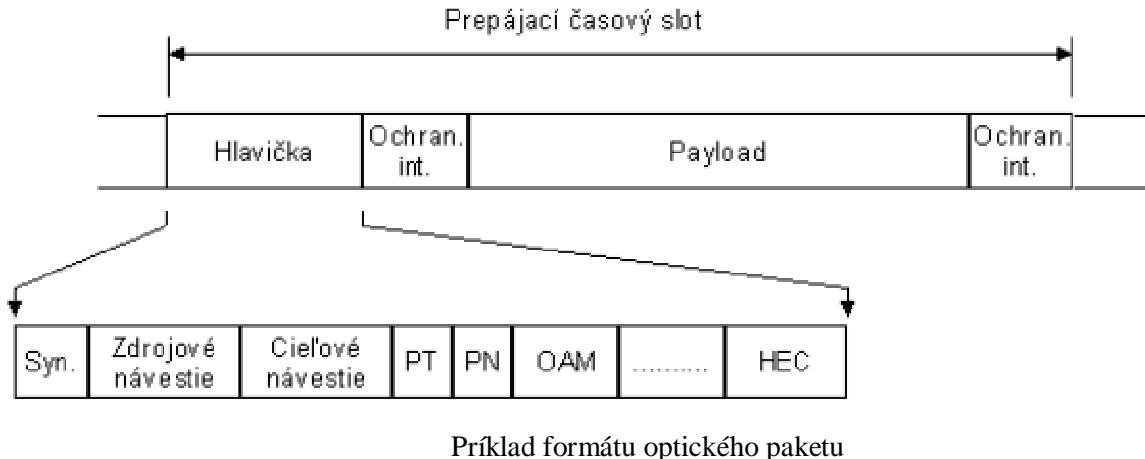
Prepájací proces v OPS môže mať jednu z dvoch foriem: Môže ísť o prepájanie synchrónne resp. slotové (time slotted) s paketmi konštantnej dĺžky, alebo asynchrónne teda neslotové (nonslotted) s paketmi variabilnej dĺžky. Výhodou slotového OPS je nižšia pravdepodobnosť výskytu kolízií a vyššia prieplustnosť, neslotové paketové prepájanie je zase lacnejšie a jednoduchšie implementovateľné (nevyžaduje synchronizačné obvody, segmentáciu a znovuposkladanie paketov na rozhraniach siete). Súčasný výskum v tejto oblasti sa zameriava predovšetkým na prepájanie paketov s konštantnou dĺžkou.

Aj keď technológie, ktoré by umožnili nasadenie OPS v praxi ešte nie sú na dostatočnej úrovni, už teraz sa predpokladá, že hardvérové riešenie OPS prepínačov sa bude opierať o mikro-elektromechanické systémy, systémy s tekutými kryštálmi a tepelno-optické prepínače.

Zároveň sa tiež uvažuje, že najväčší priestor na nasadenie dostane OPS v oblasti MAN sietí. Práve tento typ sietí sa vyznačuje potrebou flexibilnosti a pohotovej reakcie na zmeny lokálnych pomerov siete, ďalej musí byť schopný poskytovať širokú škálu služieb s rozličnými prenosovými rýchlosťami a odlišnou kvalitou. OPS v plnej miere splňa tieto požiadavky.

2.4.2 Formát paketu pre OPS

Pri paketoch pre OPS definovaných v projekte KEOPS (KEys to Optical Packet Switching) sa predpokladá, že čas je rozdelený do ekvivalentných časových slotov a každý slot obsahuje práve jeden paket. Prenosová rýchlosť paketov sa pohybuje od 622 Mbit/s do 10 Gbit/s. Bližšie situáciu vykresluje nasledujúci obrázok.



Samotný paket sa skladá z dvoch základných častí, navzájom oddelených ochranným intervalom, a sice z hlavičky a užívateľskej informácie. Obe časti obsahujú tzv. synchronizačné vzorky, ktoré sa využívajú v procese delineácie a synchronizácie paketov.

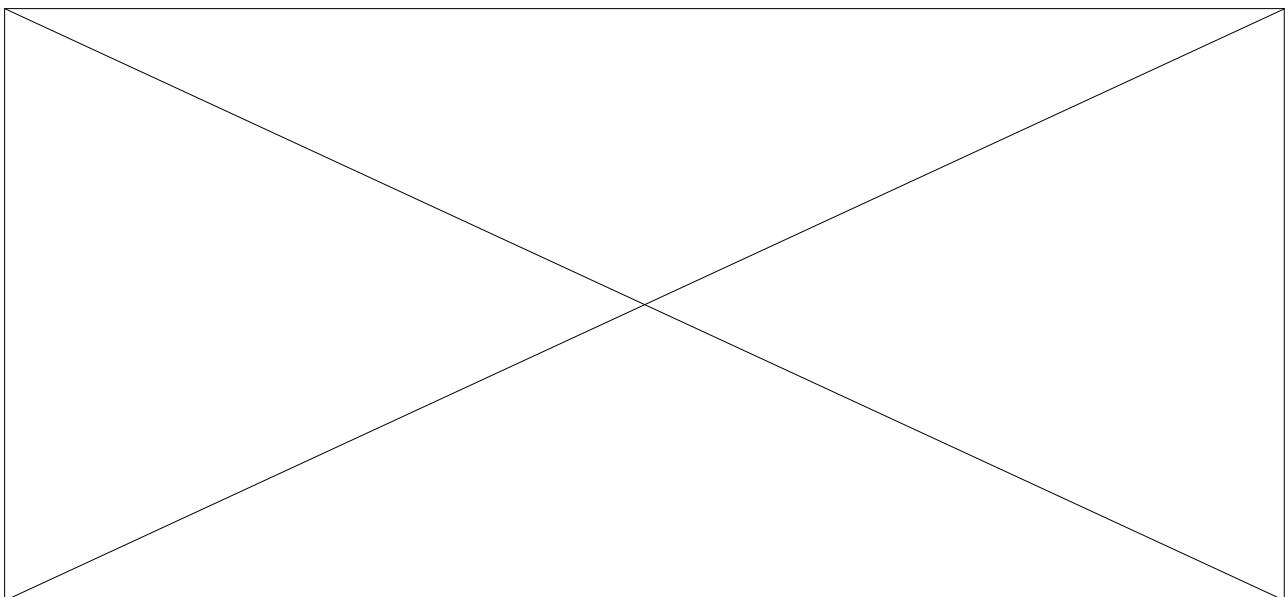
Hlavička paketu naviac obsahuje smerovacie informácie (zdrojové a cieľové návestie), pole PT (payload type) s informáciou o obsahu poľa Payload. Číslo paketu je uložené v poli PN (packet number) a pole OAM slúži na zabezpečenie kontroly toku. Pomocou HEC poľa sa realizuje zabezpečenie informácie prenášanej v hlavičke paketu. Okrem toho je tu ponechané miesto pre ďalšie riadiace dátá.

Delineáciu a synchronizáciu realizujú obvody v rozhraniach uzla (vstupnom i výstupnom). Ich úlohou je zabezpečiť, aby paket pri vstupe do prepínača mal svoj začiatok a koniec (hranice) zarovnaný k jemu prislúchajúcemu časovému slotu.

Pre proces delineácie (rozpoznávania hraníc paketov) sú potrebné dva pomocné byty ako tag-y identifikujúce začiatok užitočnej informácie. Čas trvania ochranného pásma zodpovedá času potrebnému na proces prepínania optoelektronického zariadenia spolu s kolísaním dĺžky samotnej užitočnej informácie. Dĺžka trvania užitočnej informácie je potom výsledkom kompromisu medzi prenosovou efektívnosťou (rýchlosť) a praktickým ohraničením dĺžky optických vyrovnávacích pamäti.

2.4.3 Štruktúra optického paketového prepínača

Optický uzol pre chrbticovú siet' je tvorený multiplexormi/demultiplexormi, vstupným rozhraním s regenerátorom, spojovacím poľom, výstupným rozhraním a riadiacou jednotkou. Rozloženie jednotlivých prvkov a väzby medzi nimi znázorňuje nasledujúci obrázok.



Optický paketový prepínač

Jednotlivé bloky zabezpečujú nasledovné činnosti:

- Vstupné rozhranie
 - Výkonovú, tvarovú a časovú regeneráciu (reamplification, reshaping, retiming)
 - Odstránenie wanderu/jitteru
 - Delineáciu paketov na identifikáciu začiatku a konca každého paketu
 - Synchronizáciu a zarovnanie paketov do slotov na prepájanie
 - Oddelenie hlavičky a jej smerovanie do riadiacej jednotky, kde je spracovaná
 - Ak je potrebné, tak aj konverziu externých vlnových dĺžok na také, ktoré sa používajú v prepájacom poli
- Spojovacie pole
 - Zabezpečuje presmerovanie paketov z vstupov na požadované výstupy
 - Podieľa sa na riešení blokád
- Riadiaca jednotka
 - Spracováva informácie z hlavičky paketu a podľa nej nastavuje spojovacie pole
 - Kontroluje možný výskyt blokády
 - Generuje novú hlavičku paketu
- Výstupné rozhranie

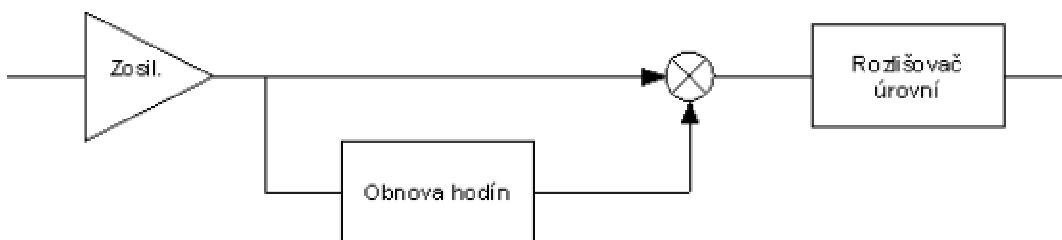
- Výkonovú, tvarovú a časovú regeneráciu, s cieľom získať požadovanú kvalitu signálu, znehodnoteného v dôsledku nedokonalosti prepájacích komponentov, presluchov
- Pridanie novej hlavičky k príslušnej informačnej časti paketu
- Delineáciu paketov a resynchronizáciu
- Ak je potrebné, tak aj spätnú konverzia z interných na externé vlnové dĺžky
- Normalizáciu výstupného výkonu (rôzne signály môžu mať rôznu výkonovú úroveň v dôsledku prechodu cez rozličné cesty s rôznou úrovňou tlmenia)

Niektoré z uvedených operácií sa v súčasnej dobe dajú realizovať už aj v optickej oblasti, iné súce v optickej oblasti, ale len v laboratórnych podmienkach a niektoré je možné realizovať len elektronicky. V nasledujúcej kapitole si niektoré, pre rozšírenie OPS kľúčové operácie, bližšie popíšeme a uvedieme aj ich možnosti implementácie v optickej oblasti.

2.4.4 Vstupné a výstupné rozhranie

Regenerátory

Základným elementom vstupného aj výstupného rozhrania je 3R regenerátor (reamplification, reshaping, retiming), ktorý odstraňuje tlmenie amplitúdy signálu, deformáciu tvaru impulzov a časový posun. Amplitúda sa upravuje optickým zosilnením, zmeny v šírke impulzov sa odstraňujú tzv. kompenzáciou rozptylu. Regenerácia v časovej oblasti sa realizuje extrakciou hodinového signálu a následnou synchronizáciou (paketovou synch. pre synchrónne siete a bitovou pre asynchrónne siete). Pritom je ale nevyhnutná znalosť prenosovej rýchlosťi a formátu paketu na strane regenerátora a tiež jeho schopnosť pracovať viacerými bitovými rýchlosťami. Na nasledujúcom obrázku sú zobrazené funkčné bloky takéhoto regenerátora. Princíp činnosti je nasledovný: hodinový signál je extrahovaný zo zosilneného vstupného signálu, s ktorým je následne násobený. Regenerovaný signál sa objaví na výstupe rozhodovacieho obvodu.



Bloková schéma 3R regenerátora

V súčasnosti sa 3R regenerátory realizujú elektronicky, nakoľko niektoré z ich operácií, ako napr. časová ekvalizácia sa nedajú na terajšej technologickej úrovni v optickej doméne realizovať. Operácia zosilnenia signálu je možná s použitím polovodičových optických zosilňovačov (SOA) pracujúcich na princípe Mach-Zehnder interferometrov (MZI), ktoré poskytujú vysokú rýchlosť a nízku spotrebu energie. Systém obnovy hodinového signálu musí byť schopný rýchleho závesu na prichádzajúci optický signál a práce pri rozličných rýchlosťach signálu. Tieto požiadavky sú v laboratórnych podmienkach uspokojené použitím samopulzujúcich laserov s distribuovanými spätnými väzbami ako optických oscilátorov. Podľa nastavenia jednosmerného prúdu privádzaného do laseru, je realizovaná obnova hodinového signálu v rozmedzí od 6 do 46 Ghz pri 1 ns potrebnej na záves.

Vlnovodlžková konverzia

Vlnovodlžková konverzia je dôležitý nástroj na riešenie kolízií. Vlnovodlžkové konvertory sa nachádzajú vo vstupných a výstupných rozhraniach, v bufferovacích systémoch, v 3R regenerátoroch a v detektoroch hlavičiek paketov.

Výskum v tejto oblasti je založený na SOA, využitím cross-gain modulácie (XGM) alebo cross-phase modulácie (XPM). V prípade XGM schémy, je silný vstupný signál použitý na saturáciu zisku SOA, čo vedie k modulácii trvalo sa vlniaceho signálu na novú vlnovú dĺžku. Doteraz bola demonštrovaná konverzia do 100 Gb/s. Výhodou tejto schémy je jednoduchá implementácia, nevýhodou je zase poškodzovanie impulzov a zhoršenie odstupu signál – šum. V prípade XPM je potrebná presná kontrola predpäťia (bias) v SOA. V súčasnosti XPM konvertor tvorený SOA a oneskorovacou interferečnou slučkou je schopný dosiahnuť vlnovú dĺžku menej než 100 Gb/s.

Vlnovodlžková konverzia je tiež možná prostredníctvom technológií založených na miešaní vln. Tento princíp sľubuje transparentnú formátovú a bitovú rýchlosť, ale vyžaduje riadenie polarizácie. Aj keď sa v oblasti celo-optickej konverzie dosiahol výrazný pokrok, stále, ale zostáva tento typ konverzie predmetom vedeckého výskumu, pričom sa sledujú hlavne možnosti zvýšenia spoľahlivosti a zníženia výrobných nákladov.

Synchronizácia a delineácia paketov

Nakoľko pakety prichádzajú do OPS uzla z rozličných zdrojov, rozličnými cestami a rôznymi vlnovými dĺžkami, dochádza k ich vzájomnému rôznemu oneskoreniu, ktoré naviac je v čase variabilné. Preto sú potrebné na vstupe a výstupe z OPS prepínača delineačné a synchronizačné obvody.

V praxi sa uvažuje o prispôsobení štandardného hlavičku kontrolujúceho mechanizmu, používaného v ATM prepínačoch. Delineácia sa vykonáva v elektronickej podobe, pričom sa aplikuje korelácia CRC kódu medzi prvými štyrmi bajtami hlavičky bunky a HEC bajtom (klasickej CRC). Iná elektronická metóda je založená na použití dvoch striedajúcich sa, navzájom odlišných kľúčových slov v hlavičke paketu. Najprv sa časť energie optického signálu skonvertuje do elektrickej podoby a ten je potom spracovaný dvoma rozpoznávačmi slov (word recognizers). Začiatok paketu je rozpoznaný, ak je špecifickou rýchlosťou detekovaná meniac sa sekvencia kódových slov.

Vstupná synchronizácia je realizovaná prostredníctvom spínača, oneskorovacích liniek a riadiacej jednotky. Výstupná synchronizácia sa využíva laditeľné vlnovodlžkové konvertory a disperzné vlákna.

Spracovanie hlavičky paketu

V blízkej budúcnosti sa uvažuje o spracovávaní hlavičiek v elektronickej podobe, kde sú možné viaceré techniky. Jednoduchšia, ale aj pomalšia technika, využívajúca sériové spracovanie hlavičiek, by sa mala nahradíť metódou založenou na multiplexovaní pomocných nosných vln (subcarrier multiplexing-SCM). V podstate ide o prenos hlavičky paketu vo vyššom frekvenčnom

pásme než informačnej časti. Hlavička sa prekonvertuje do elektronickej podoby, spracuje sa a podľa smerovacej informácie v nej obsiahnutej sa nastaví cesta cez optické spojovacie pole pre informačnú časť paketu. Tá je prepájaná potom bez konverzie. Obe časti paketu sú spracovávané počas jedného časového slotu. Rýchlosť je v tomto prípade limitovaná rýchlosťou elektronických obvodov a tá umožňuje prenos rádovo v desiatkach Gb/s.

Na celo-optické spracovanie hlavičiek sú potrebné optické korelátori. V súčasnosti sa uvažuje o ich realizácii v podobe skupiny oneskorovacích liniek usporiadaných tak, aby vytvárali v časovej oblasti signatúru zodpovedajúcu adresu uzla. Ak prichodzie bity z hlavičky optického signálu dosiahnu signatúru, vygeneruje sa výrazný autokorelačný impulz. V opačnom prípade krížové korelácie budú produkovať nízko-úrovňové impulzy. Použitím porovnávača úrovní na výstupe korelátorov sa budú dať navzájom odlišiť jednotlivé adresy.

Ďalší pokrok je potrebný v oblasti optickej zmeny návestí (pri použití smerovacieho protokolu GMPLS). Aktualizovanie informácie v hlavičke je možné realizovať využitím tzv. crossgain modulácie v SOA obvodoch alebo prostredníctvom XOR logických členov založených na SOA v podobe Michelsonových interferometrov.

Optické spojovacie pole

V prípade OPS má byť prepájacia sieť schopná smerovať pakety z ľubovolného vstupného portu na ľubovolný výstupný port. Pritom sa požaduje promptná rekonfigurácia siete a veľmi vysoké prepájacie rýchlosťi. Napríklad, paket dĺžky 1 kb sa v 10 Gb/s systéme zdrží pri prepájaní okolo 100 ns. Tiež interval medzi za sebou nasledujúcimi paketmi je veľmi krátky. Prepájacie pole sa musí nakonfigurovať počas zmeny časového slotu, čo by nemalo trvať dlhšie ako rádovo nanosekundy. Tieto podmienky v súčasnej dobe spĺňa viacero technológií, napríklad SOA alebo LiNbO₃ prepínače. SOA majú prepájaciu rýchlosť okolo niekoľko nanosekúnd, a môžu byť integrované v relatívne veľkej mierke. Tiež majú výhodu v kompenzácií tlmenia z dôvodu ich prirodzenej zosilňovacej schopnosti. Jednou z ich nevýhod je šum, ktorý pridávajú k užitočnému signálu.

Elektro-optické LiNbO₃ prepínače dosahujú prepájaci čas pod 1 nanosekundu, zato však spôsobujú relatívne vysoké tlmenie, čo limituje ich škálovatelnosť. Obe uvedené technológie majú rovinnú vlnovodovú štruktúru, čo ich robí citlivé na polarizáciu.

2.4.5 Kolízie a možnosti ich odstránenia

Kľúčovou podmienkou nasadenia OPS v praxi je vyriešenie problému kolízii. Tie môžu nastať buď pri spracovávaní riadiacej časti, alebo dátovej časti paketu.

V prvom prípade ide o blokádu v riadiacej jednotke, čo vedie k zahodeniu hlavičky alebo jej oneskoreniu do takej miery, že informačná časť predstihne v spracovávaní hlavičku. V oboch prípadoch potom dochádza k zahodeniu celého paketu.

V druhom prípade blokáda nastáva počas spracovávania informačnej časti a sice, keď pakety z navzájom odlišných vstupných portov je potrebné prepojiť na ten istý výstupný port súčasne, alebo v dôsledku zahľtenia spojovacieho poľa.

Na odstránenie blokád v optickej doméne sa uvažuje o využití vyrovnávacích pamäti, vlnovodlžkového smerovania alebo deflekčného smerovania.

Intuitívnym riešením je použitie vyrovnávacích pamäti, avšak ich implementácia v optickej oblasti nie je jednoduchá. Možno ich realizovať ako:

- **Oneskorovacie linky prepojené cez optické prepájacie pole.** Počet liniek je v tomto prípade obmedzený na niekoľko desiatok z dôvodu ich rozmerov.
- **Aplikáciou recirkulačných bufferov.** Oneskorenie nimi dosiahnuté by bolo závislé od dĺžky slučky a počtu obehov signálu slučkou.
- **Využitie skupín vlnovodlžkových konvertorov a priestorových spínačov typu AWG v jednej vláknovej slučke.** Čas o ktorý sa má paket oneskoríť je určený podľa vlnovej dĺžky, na ktorú je prekonvertovaná jeho inicializačná vlnová dĺžka (ktorú mal na vstupe do oneskorovacieho bloku).

Nevýhodou všetkých dosiaľ spomínaných implementácií je potreba zosilnenia takto oneskoreného signálu z dôvodu jeho tlmenia pri obehoch vláknami.

Druhým prístupom k riešeniu problému kolízii je využitie viacerých vlnových dĺžok pri smerovaní. To znamená, že ak majú byť dva pakety prepájané na rovnaký výstup v tom istom okamihu, tak sa prekonvertujú na navzájom odlišné vlnové dĺžky a takto sa potom prepoja na rovnaký výstup. Značne komplikované je v tomto prípade riadenie procesu konverzií, ktoré okrem toho, že musia byť vykonané vo veľkom počte v krátkom čase, musia byť aj optimálne, aby sa zbytočne nekonvertovali pakety, ktoré to nevyžadujú.

Posledným známejším postupom riešenia kolízii je využitie deflekčného smerovania. Princíp je nasledovný: v prípade, že dva pakety sa chcú dostať na rovnaký výstup, jeden z nich je na tento výstup aj prepojený, zatiaľ čo druhý paket je smerovaný na ľubovoľný iný (najbližší volný) výstup. Tým pádom nie sú potrebné prakticky žiadne vyrovnávacie pamäte. Problémom je, že niektoré pakety sa výrazne oneskoria pri prechode spojovacím uzlom a môžu prísť do cieľa v zmenenom poradí. Okrem oneskorenia sa takýmto spôsobom zvyšuje aj tlmenie signálu.

Každá z uvedených metód riešenia kolízií má svoje výhody aj nevýhody. V súčasnosti sa ako najperspektívnejšie riešenie javí využitie vyrovnávacích pamäti v podobe oneskorovacích liniek v kombinácii s prepájaním signálov s viacerými vlnovými dĺžkami.

2.4.6 Architektúry optických paketových prepínačov

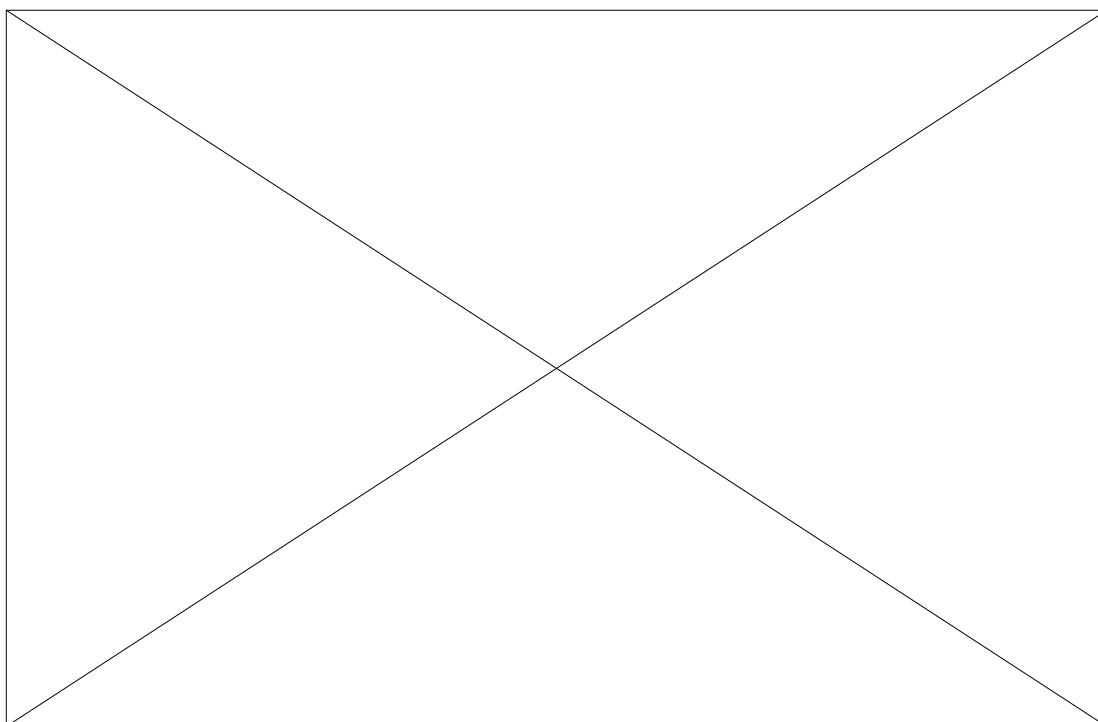
V súčasnej dobe je známych viacero architektúr určených pre optické paketové prepájanie, ktoré sa navzájom odlišujú typom paketov, ktoré prepájajú (s konštantnou alebo premenlivou dĺžkou), spôsobmi riešenia kolízii alebo rýchlosťou prepájania, resp. možnosťami jej ďalšieho rastu. Ich spoločnou vlastnosťou je, že ide len o experimentálne realizácie, bez doterajšieho nasadenia v praxi.

Podľa toho, s akou dĺžkou paketov pracujú dané prepínače, ich potom rozdeľujeme na zariadenia prepájajúce pakety s konštantnou dĺžkou (architektúry KEOPS a WASPNET) alebo zariadenia prepájajúce pakety s variabilnou dĺžkou.

KEOPS broadcastový a triediaci prepínač (broadcast and select switch)

Štruktúra prepínača KEOPS (KEys to Optical Packet Switching) typu $N \times N$ je znázornená na nasledujúcim obrázku. Obsahuje tri základné sekcie:

- vlnovodlžkový kóder
- vyrovnávacie pamäte a broadcastovú sekciu
- blok vlnovodlžkových selektorov



KEOPS broadcastový a triediaci prepínač

Vlnovodlžkový kóder obsahuje N vlnovodlžkových konvertorov, jeden pre každý vstup. Každý z konvertorov kóduje prichádzajúce pakety pomocou rozdielnych (jedinečných vzhľadom na ostatné vstupy) vlnových dĺžok. Paketová vyrovnávacia pamäť obsahuje viacero navzájom odlišných oneskorovacích liniek, za ktorými nasleduje stupeň s priestorovým prepínačom. Kontrolná elektronická logika potom vyberie pakety z jednotlivých oneskorovacích liniek a pošle ich na odpovedajúce výstupy. Posledný blok je vlnovodlžkový selektor a obsahuje N demultiplexorov, ktoré majú za úlohu rozložiť vstupný signál na samostatné vlnové dĺžky, aby

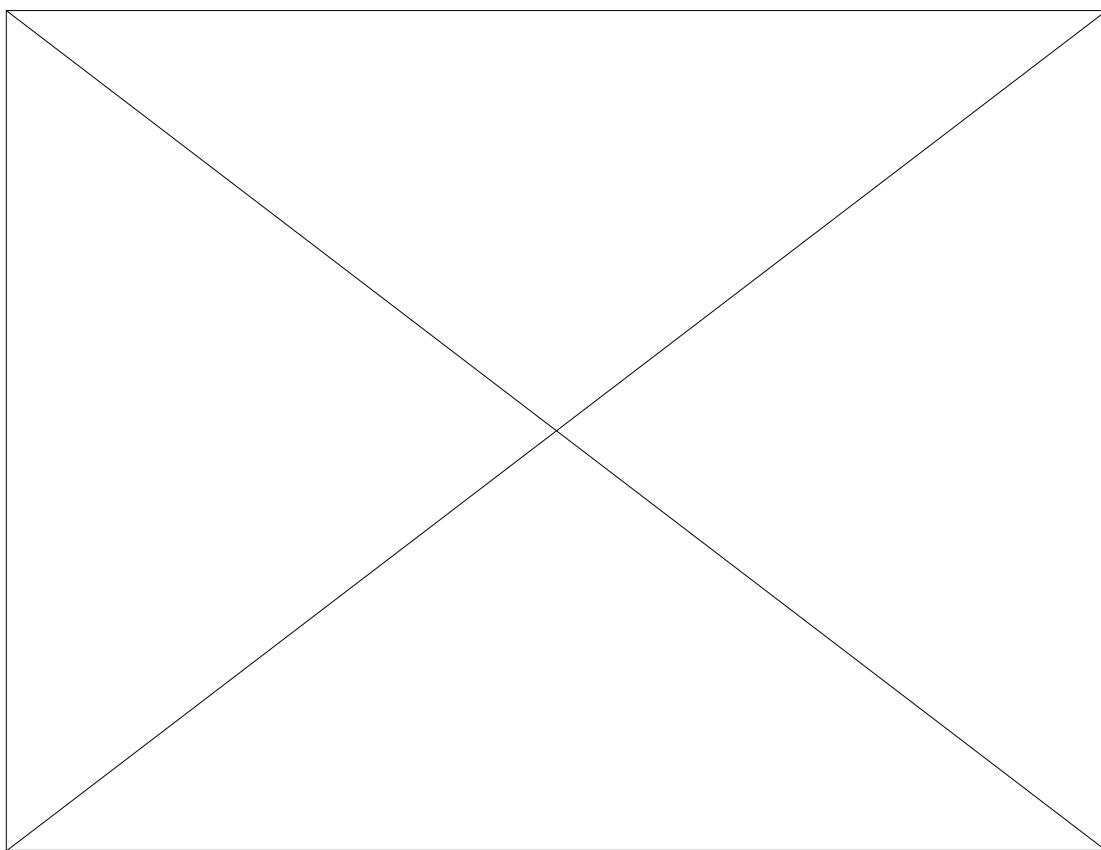
mohla byť následne vykonaná selekcia jednej z nich. Signál so zvolenou vlnovou dĺžkou je potom prekonvertovaný na výstupnú vlnovú dĺžku a tak je privedený na výstup uzla.

Nevýhodou takého riešenia je relatívne vysoká náročnosť na kontrolnú logiku v dôsledku potreby netransparentného prepájania.

WASPNET spätnovázobný optický prepínač

Hlavným cieľom WASPNET (WAvelength Switched Packet NETwork) realizácie optického prepínača bolo zjednodušenie procesu prepájania paketov. Jadrom celého prepínača sú preladiteľné vlnovodlžkové konvertory (tunable wavelength converters TWCs) a špeciálne priestorové spínače označované ako AWG (arrayed waveguide gratings). Princíp AWG je nasledovný: vstupný signál obsahujúci viacero vlnových dĺžok sa rozšíri na viacero vlnovodov, ktoré sa navzájom líšia odlišnou fyzickou dĺžkou. Optický signál sa tým pádom rôzne oneskorí, čo vyvolá rôznu zmenu fázy na jednotlivých vlnovodoch. Na výstupe sa vlnovody opäť spájajú, optické signály navzájom interferujú a to tak, že na požadovaných výstupoch AWG sú požadované vlnové dĺžky.

Nasledujúci obrázok znázorňuje spätnovázobnú konfiguráciu s oneskorovacími linkami, plniacimi funkciu vyrovnávacích pamäti. Takáto štruktúra umožňuje prioritné smerovanie za cenu väčšieho AWG (2Nx2N).



WASPNET spätnovázobný optický paketový prepínač

Na každom vstupe sú pakety konvertované na pridelené vlnové dĺžky tak, aby boli v AWG prepnuté na správny výstup. Ak viacero paketov súčasne požaduje prepnutie na ten istý výstup, umožní sa prepnutie len jedného z paketov, ostatné sa pošlú cez spätnovázobnú slučku, ktorá plní funkciu vyrovnávacej pamäte. V samotnej slučke môže v danom okamihu z každého multiplexoru odísť len jeden paket, čo sa zabezpečuje pomocou FIFO algoritmu. Ak to nie je možné dosiahnuť,

paket je smerovaný na alternatívne AWG výstupy, ale ak je potrebné na dlhšie oneskorovacie linky.

Ak paket s vyššou prioritou požaduje rovnaký výstup ako paket vo vyrovnávacej pamäti, tak ten vo vyrovnávacej pamäti je opäťovne presmerovaný na spätnovázobnú oneskorovaciu slučku a paket s vyššou prioritou je prepnutý na výstup.

Táto architektúra je určená pre jednu vlnovú dĺžku na vstupe a výstupe, ale pokial' je doplnená aj o vlnovodlžkové multiplexory/demultiplexory a obsahuje viacero rovín, umožňuje pracovať aj s WDM vstupom/výstupom.

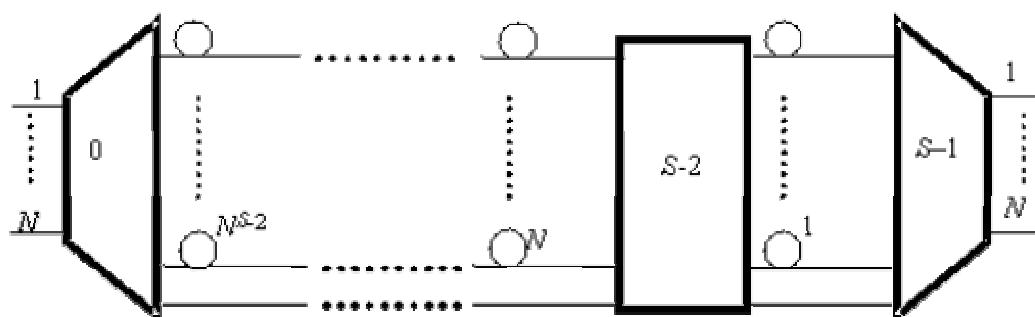
Výhodou WASPNET architektúry je možnosť prioritného smerovania, jednoduchšie prepájanie, odstránenie tlmenia a presluchov v bufferovaní dát, nevýhodou môže byť väčšia veľkosť AWG pola.

Prepínanie paketov s premenlivou dĺžkou

Pri návrhu optických prepínačov, ktoré umožňujú prepínať pakety s rôznou dĺžkou treba dodržiavať nasledovné zásady:

- Na vstupoch sú povolené asynchronné operácie, už nie je potrebné synchronizovať vstupy s časovými slotmi, ako to bolo v prepínačoch s paketmi konštantnej dĺžky.
- Ak najnižší dovolený prírastok oneskorenia je menší než najmenšia veľkosť paketu, pakety môžu byť radené pomocou FIFO algoritmu na odpovedajúce výstupy. V opačnom prípade je možné použiť tzv. prázdnú výplň (void filling). Jedná sa o medzery, ktoré sa vkladajú medzi susedné pakety na danom výstupe.
- Použitie viacnásobných stupňov s vyrovnávacími pamäťami limituje rýchlosť prepínania v porovnaní s jediným stupňom s veľmi veľkým počtom oneskorovacích článkov (SLOB - switch with large optical buffers). SLOB obsahuje kaskádu existujúcich optických prepínačov (rovnakých ako KEOPS prepínač) a každý zo stupňov má svoje vlastné oneskorovacie linky pre riešenie kolízií paketov. Dĺžka oneskorovacích liniek v každom stupni sa zvyšuje exponenciálne (v rámci štruktúry zľava do prava), kým počet stupňov sa zvyšuje s logaritmom veľkosti vyrovnávacej pamäte. Tým SLOB dokáže emulovať prepínač s extrémne veľkými vyrovnávacími pamäťami.

Jedno z možných riešení optického prepínača pre pakety s premenlivou dĺžkou je nasledujúcim obrázku.



Bloková schéma optického paketového prepínača pre prepájanie a smerovanie paketov s rôznymi veľkosťami.

Obsahuje S stupňov (0 až S-1). Každý zo stupňov má rôzny počet vstupov a výstupov:

- stupeň 0: N vstupov a D výstupov
- stupeň S-1: D vstupov a N výstupov
- všetky ostatné stupne: D vstupov a D výstupov

kde N je počet vstupov a výstupov samotného prepínača a D je počet oneskorovacích liniek a liniek pripojených na nasledujúce stupne.

Stupne sú navzájom medzi sebou prepojené pomocou oneskorovacích liniek. Každá z liniek je schopná prenášať WDM pakety. Oneskorovacie linky majú za úlohu podržať paket vstupujúci do daného stupňa spojovacieho pola po dobu potrebnú na analýzu hlavičky a nastavenie vhodnej cesty v poli. Paket, ktorý vstupuje do konkrétneho stupňa, môže tento stupeň opustiť z iného výstupu a na inej vlnovej dĺžke. Je to vlastne prepájacie pole s vlnovodlžkovou konverziou. Celkový počet vlnovodlžkových kanálov medzi susednými stupňami musí byť prinajmenšom taký veľký, ako počet vstupujúcich a vystupujúcich kanálov, aby sa predišlo zahľteniu.

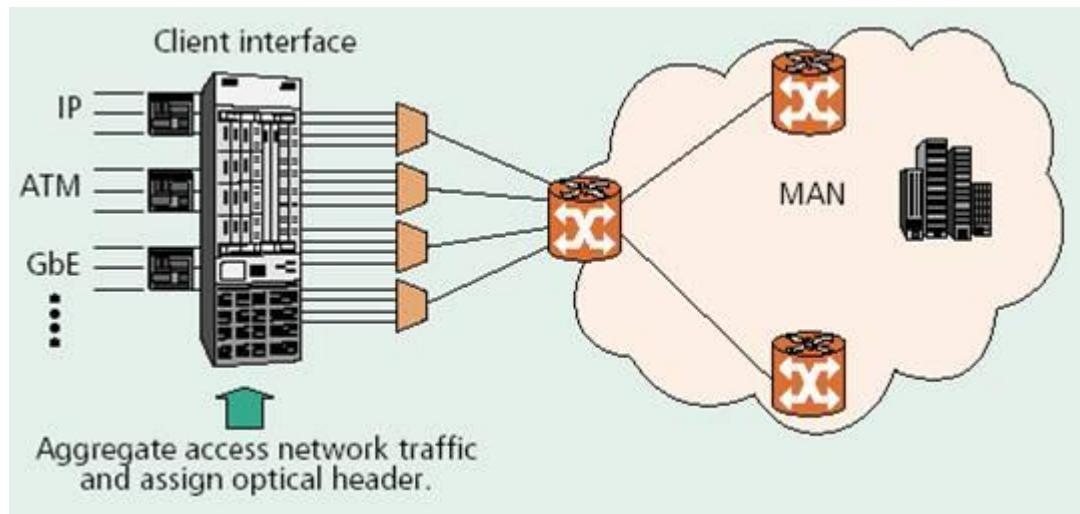
2.4.7 MAN siete – najperspektívnejša oblast' nasadenia OPS

Budúce MAN siete sa budú vyznačovať vysokým stupňom dynamickosti, nakoľko budú zložené z množstva rozličných užívateľov s odlišnými požiadavkami na služby. Napríklad, podnikoví klienti budú požadovať prevádzku založenú na širokopásmovom IP spojení ich hlavných pobočiek, finančné inštitúcie budú pravdepodobne žiadať spoločné spojovo-orientované spojenie. Kampusové siete a lokálne siete poskytovateľov internetových služieb budú generovať IP prevádzku pozostávajúcu predovšetkým z Web-ovej prevádzky, a preto budú požadovať spojenie založené na slabej garancii QoS (služby najlepšej ponuky). Z tejto charakteristiky budúcich sietí vyplýva potreba prepájania rôznych dátových tokov a poskytovania rôzne kvalitných dátových služieb. Pritom náročnosť na prevádzkovú kapacitu v sieti by bola závislá nielen od priestorového rozloženia zákazníkov, ale aj od doby prevádzky (v priemyselných a obchodných štvrtiach by bola silná prevádzka cez pracovnú dobu, v bytových štvrtiach po pracovnej dobe).

Na základe vyššie uvedenej charakteristiky je OPS, vďaka svojej schopnosti efektívne využívať zdroje a vysokej prenosovej rýchlosťi, ideálnym riešením pre MAN siete. Tu ale naviac od problému smerovania a prepájania dát vo vnútri homogénnej siete, treba riešiť aj problém agregácie a konverzie dátových tokov na vstupných a výstupných rozhraniach siete.

Klientske rozhranie

Klientske rozhranie realizuje pripojenie prístupových sietí do MAN siete. Znázornené je na nasledujúcom obrázku.



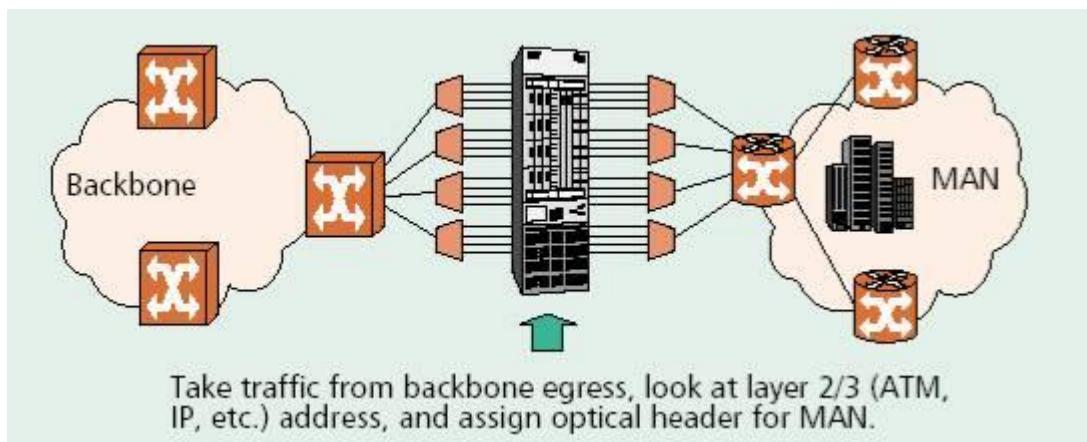
Obr. č. 1 Klientská strana OPS uzlu

Klientské rozhranie by malo byť schopné realizovať požiadavky na spojenie a pridelenie vlnovej dĺžky, spracovať prevádzku na 2 alebo 3 vrstve OSI modelu, založenú na protokoloch ako IP, SONET, ATM. Napríklad v prípade IP paketov by sa rozhranie najprv pozrelo na hlavičku IP paketu, podľa nej by potom zo smerovacej tabuľky priradilo paketu optickú hlavičku a odoslalo takýto paket k ďalšiemu OPS uzlu. Aby sa využila kapacita OPS prepínania, malo byť toto rozhranie založené na princípe LSR smerovača a schopné spracovať prevádzku rýchlosťou približujúcou sa prenosovej rýchlosťi na optických linkách.

Rozhranie MAN - WAN

Na strane pripojenia k WAN sieti (obr. č. 2) , sú dve možnosti, ako posielat' pakety z OPS MAN siete do chrbticovej WAN:

- Prevest' konverziu do elektrickej podoby, prečítať smerovaciu informáciu z 2 alebo 3 vrstvy a podľa nej smerovať paket už opäť v optickej podobe na vytvorenú optickú cestu cez WAN sieť.
- Využiť uchovávanie návestí (label stacking) na doručenie paketov k požadovanému OPS uzlu alebo LSR (label switched router) smerovaču na druhej strane WAN siete. V tomto prípade bude potrebné, aby sa návestná informácia z rozličných sietových segmentov prešírla celou prenosovou cestou počas LSP (label switched path) nastavovacej períody. Pritom sa v chrbticových sietach uvažuje o nasadení GMPLS protokolu, v ktorom by sa návestná informácia prenášala v podobe špecifickej vlnovej dĺžky.



Obr. č.2 Opticko-elektricko-optické rozhranie MAN a WAN siete

2.4.8 Perspektívy rozšírenia optického paketového prepájania

Ďalší vývoj chrbticovej siete je založený na rozvoji IP vrstvy, ktorá bude pracovať predovšetkým na vrchole optickej okruhovo orientovanej siete. Na to, aby sa súčasne popri tomto trende presadilo aj OPS, bude potrebné realizovať ešte množstvo technologických vylepšení, nakoľko väčšina, pre OPS nevyhnutných technológií, je stále v štádiu výskumu a testovania v laboratórnych podmienkach.

Druhou podmienkou rozšírenia je predpoklad vhodného rozvoja sietí, od ktorého sa odvíja presvedčenie investorov o opodstatnenosti investícií venovaných výskumu zariadení podporujúcich OPS. Podľa súčasných odhadov je OPS technológia reálna o 5 až 10 rokov, ale ani tento odhad nie je veľmi spôsobilivý. Rozvoj OPS by mal byť spojený spolu s rozvojom OXC (optical cross-connect) vrstvy. Šance na jej rast sú po obnove upadnutého telekomunikačného trhu relatívne vysoké. Najväčšími obmedzeniami OPS sú hlavne malá prepájacia granularita a problematické optické čítanie a zapisovanie do hlavičky paketu. Aj to je dôvod, prečo sa stále väčší význam pripisuje technológií optického burstového prepájania (OBS), ktorá predstavuje kompromis v tejto oblasti (spracúva sa len hlavička burstu, ktorá je spoločná pre viacero paketov a preto postačuje na dosiahnutie požadovanej rýchlosťi aj elektronické spracovanie, znižuje sa náročnosť synchronizácie a kontroly paketov).

Treťou podmienkou rozšírenia OPS sietí je presvedčenie investorov o skutočnej potrebe paketovo založeného riešenia optického prepájania, nakoľko v súčasnosti, poprední výrobcovia sietových komponentov nejavia výraznejší záujem o takéto riešenia. Potrebným impulzom na prehĺbenie záujmu by mohlo byť prekonanie technologických bariér, príslušná návratnosť investícií, pokračujúci rozvoj Internetu, prípadne obnova telekomunikačného trhu.

3 Optické prepínanie

3.1 Existujúce technológie pre optické prepínanie

Technológia vlnovodĺžkového multiplexu (WDM – wavelength division multiplexing) poskytuje praktický spôsob využitia šírky pásma pri prenose optickými vláknami, pri ktorom je celá šírka pásma rozdelená do separátnych kanálov. Každý kanál pracuje s rozdielnou vlnovou dĺžkou, ktorého prenosová rýchlosť je kompatibilná s rýchlosťou dostupnej elektroniky. Okrem vysokej prenosovej kapacity (rádovo Tbit/s) a extrémne nízkej bitovej chybovosti BER ($10^{-12} - 10^{-16}$) celo-optické siete poskytujú transparentnosť, ktorá umožňuje analógový aj digitálny prenos s rôznymi formátmi, prenosovými rýchlosťami a QoS v rovnakej sieti.

Spomedzi existujúcich celo-optických sietových prístupov umožňuje OTDM s paketovým prekladaním jemnú a flexibilnú granularitu šírky pásma. Štatistické OTDM, známe ako optické paketové prepínanie (OPS – optical packet switching), okrem toho poskytuje okamžitú realokáciu sietových prostriedkov, aby sa prispôsobila náhlym zmenám prevádzky. Typický uzol OPS má schopnosť nezávisle prepínať pakety na individuálne vlnovodĺžkové kanály, preto sa označujú ako uzly IWS (individual wavelength switching). Uzly IWS vyžadujú „wavelength-sensitive“ zariadenia, teda zariadenia, ktorých efekt na signál je závislý od vlnovej dĺžky signálu.

Rozsírenie sietí založených na optickom paketovom prepínaní však komplikujú dve skutočnosti:

1. Kedže optická technológia je stále na začiatku etapy vývoja, spracovanie na optickej úrovni ešte nie je prepracovaná alternatíva k elektronickému spracovaniu hlavičky paketu. Preto v prvých verziach budú uzly IWS vyžadovať detekciu a spracovanie hlavičky paketu elektronickým spôsobom, čo vytvára režiu pre elektronické riadenie uzla, ktoré musí individuálne spracovať každú hlavičku paketu.
2. Aj keď je WDM prepracovaná technológia, hardware vyžadovaný pre efektívne paketové prepínanie je ťažkopádny, pretože jednotlivé vlnové dĺžky musia byť demultiplexované a multiplexované v IWS uzle a každá vlnová dĺžka musí byť individuálne prepínaná príslušným hardwarom a riadiacou elektronikou.

Takéto riešenie je finančne náročné, nakoľko vyžaduje veľký počet diskrétnych (neintegrovateľných) zariadení spojených do jedného celku a optické zosilňovače na kompenzáciu strát pochádzajúcich z týchto zariadení a ich vzájomných prepojení. Z toho vyplýva skutočnosť, že

prvotné IWS uzly budú finančne nákladné a cenovo priateľné v chrbitcových sietach, kde milióny používateľov zdieľajú šírku pásma a vysoké náklady. V prístupových a MAN sietach však takéto riešenie nie je finančne efektívne.

3.2 Optické prepínanie pre rozlišovanie služby v ďalšej generácii optického internetu

V snahe eliminovania elektrických dier v optických sietach sú nové optické prepínače a smerovače založené na technológií úplného optického prepínania.

Obrovský nárast internetovej prevádzky poskytuje obrovskú stimuláciu na rozvoj širokého pásma optických sietí, ktoré môžu dramaticky zvýšiť prenosové kapacity vďaka výhodám vo vlnovo dĺžkovom multiplexovaní. Na druhej strane treba poznamenať, že ak informácie budú v uzloch spracovávané nadalej v elektronickej podobe, tak celkový nárast prenosovej rýchlosťi nebude až tak rapídny, lebo rýchlosť spracovávania informácií v elektrickej podobe je oveľa menšia ako v optickej podobe. Z toho vyplýva, že je úplne prirodzené, že sa hľadajú cesty na vytvorenie novej generácie informačnej infraštruktúry, ktorá bude schopná prenášať IP pakety cez optickú vrstvu bez potreby O/E/O konverzie. Z tohoto dôvodu sa vytvára snaha na vytvorenie technológií, ktoré by boli schopné eliminovať O/E/O konverziu. Tieto technológie musia byť schopné rýchlo poskytovať zdroje, prenášať asynchronné signály a poskytovať vysoký stupeň zdieľania zdrojov pre efektívne využívanie prenosových ciest. Pritom by nemali vyžadovať žiadne vyrovnávacie pamäte vo WDM vrstve, pretože v súčasnosti nie sú známe žiadne formy optických pamäťí založených na princípe náhodného prístupu do pamäte (*RAM*). Z toho dôvodu akékoľvek optické prenosové metódy sa musia vyvarovať použitiu vyrovnávacím pamätiam tak ako je to len možné.

Ďalšou problematikou je ako zabezpečiť kvalitu služieb (*QoS*) v ďalšej generácii optického internetu. Treba zabezpečiť, aby aplikácie pracujúce v reálnom čase mali zabezpečený vysoký stupeň *QoS*. Existujúce schémy na riadenie kvality služieb (alebo plánovacie algoritmy) využívajú vyrovnávacie pamäte na dosiahnutie diferencovania služieb. Kedže ako sme spomenuli, optické RAM pamäte nie sú v súčasnosti dostupné. To spôsobuje, že nemôžeme aplikovať žiadne existujúce schémy *QoS* v optickej WDM vrstve.

OBS je spôsob zhlukovania viacerých IP paketov do jedného zhluku, ktorý je potom prenášaný bez nutnosti žiadneho ukladania do vyrovnávacej pamäti vo vnútorných uzloch pozdĺž prenosovej cesty. OBS je jedna z možností, ktoré dokážu prenášať informácie v optickej podobe.

3.3 Optické zhlukové prepínanie

Momentálne sú dostupné tri prepínacie techniky v optických sietiach:

- vlnovo dĺžkové smerovanie
- optické paketové/bunkové prepínanie
- optické zhlukové prepínanie

Pri vlnovo dĺžkovom prepínaniu je vytvorená optická cesta medzi zdrojovými uzlami (*ingress nodes*) a cieľovými uzlami (*egress nodes*) cez uzly, ktoré sú vybavené optickými WDM krížovými prepínačmi (alebo vlnovo dĺžkovými smerovačmi). Pri tomto spôsobe prepínania je prichádzajúci signál zo vstupného portu okamžite prepnutý na výstupný port v každom smerovači (prepínači). Vlnovo dĺžkové smerovanie je určitou formou prepájania okruhov. Je teda potrebné rezervovať obojsmerné optické prenosové cesty. To sa vykonáva poslaním kontrolného paketu, v ktorom zdrojový uzol žiada o rezervovanie prenosovej kapacity na danej linke. Následne musí počkať na potvrdenie, a až po akceptovaní môže začať samotný prenos informácií. Jednou výhodou vlnovo dĺžkového smerovania je, že nevyžaduje žiadnu optickú vyrovnávaciu pamäť (a ani O/E/O konverziu) v jednotlivých medziuzloch pozdĺž prenosovej cesty. Je to výhodná forma smerovania v súčasnej dobe, lebo v súčasnosti dostupné technológie založené na opticko-mechanických, zvukovo optických alebo tepelno-optických princípoch sú príliš pomalé pre efektívne paketové prepínanie.

Jedným z limitujúcim obmedzením vlnovo dĺžkového smerovania je, že potrebuje rezervovať linky pozdĺž celej prenosovej cesty, čo znamená, že pri zhlukovom prenose informácií (prenose IP paketov) nastáva nízke využitie prenosovej kapacity, pretože spojenie si môže rezervovať len celú šírku prenosového pásma a nemôžu ju zdieľať s inými spojeniami. V takomto prípade môže vzniknúť situácia, že nie je dostupný dostatočný počet volných optických ciest na vytvorenie všetkých požadovaných spojení medzi uzlami. Vytvorenie a zrušenie prenosovej cesty môže trvať rádovo niekoľko desiatok milisekúnd. Za toto časové kvantum by sme boli schopní preniesť rádovo niekoľko MB informácií na vysoko rýchlosných linkách. Z toho vyplýva, že dynamické vytváranie a rušenie optických spojení je pri zhlukovom prenose veľmi neefektívne.

V prípade, že by boli už dostupné technológie, ktoré by boli schopné prepínať pakety v optickej forme, tak by sa využitie prenosových kapacít značne zvýšili.

Pri optickom paketovom/bunkovom prepínaní sú dátá prenášané spolu s hlavičkou bez toho, aby bola predtým vytvorené prenosová cesta. Časový rozdiel medzi príchodom hlavičky

a samotných dát je veľmi malý. Čas spracovania jednotlivých hlavičiek paketov pri smerovaní môže byť rozličná, takže riadenie smerovania v uzloch je komplikované, pričom sa samozrejme musí zabezpečiť prísna časová synchronizácia. Iný problém s paketovým prepínaním je, že veľkosť dátovej časti paketu (bunky) je zvyčajne príliš malý na to, aby bol posielaný samostatne do vysoko rýchlosného prenosového kanála

OBS kombinuje výhody kruhového a paketového prepínania, a pritom odstraňuje ich najväčšie nedostatky. OBS je založené na jednocestnom rezervačnom protokole. Pri OBS informácie nasledujú zodpovedajúci kontrolný paket bez čakania na jeho potvrdenie. Výhodou toho je, že sa zabezpečí menšie oneskorenie medzi zdrojom a cieľom, ako u prepínania okruhov. Aplikovanie na ďalšiu generáciu optického internetu by vyzeralo asi nasledovne: vyslaný kontrolný paket by bol spracovaný v každom medziuzle. Každý uzol by po prijatí kontrolného paketu nastavil svoje WDM prepínače. Zhluk informácií nasledujúci kontrolný paket by bol prenesený cez nastavené WDM prepínače pozdĺž celej prenosovej cesty bez akéhokoľvek spracovania.

OBS taktiež umožňuje integrovať IP cez WDM pomocou MPLS protokolu. Odvtedy, čo MPLS dokáže oddeliť smerovanie dát od podporných funkcií riadenia prevádzky, hrá MPLS významnú úlohu v ďalšej generácii optického internetu. MPLS je využívané na kontrolu OBS WDM vrstvy. Je veľmi výhodné mať dve rozdielne vrstvy:

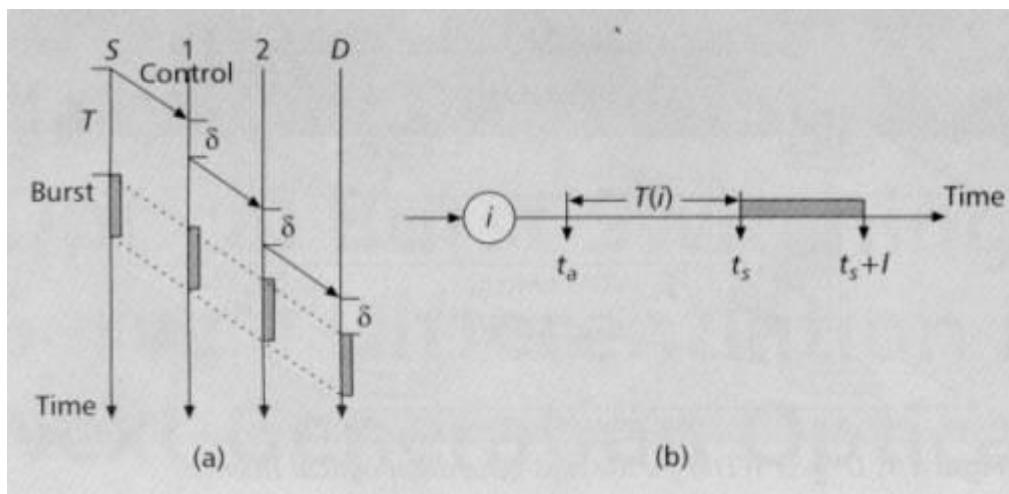
- samostatnú optickú WDM vrstvu
- samostatnú IP vrstvu

každú s jej vlastnými mechanizmami pre adresovanie, smerovania a poskytovanie zdrojov a pod. Kontrola smerovania a riadenie prevádzky môže byť vykonávané elektricky pomocou MPLS, ale samotné dáta už môžu byť smerované opticky.

IP a WDM vrstva

OBS protokol

OBS protokol je nazývaný Just-Enough-Time (JET) a pracuje tak ako znázornené na nasledujúcom obrázku. Zdrojový uzol vyšle kontrolný paket, ktorý je nasledovaný zhlukom dát, ktorý je oneskorený o určitý čas (*offset time*). Tento čas sa určí z predpokladaného oneskorenia, ktoré kontrolný paket pravdepodobne dosiahne pozdĺž celej prenosovej cesty do cieľového uzla. Zhluk dát je uložený vo vyrovnávacej pamäti v zdrojovom uzle v elektrickej podobe. Po vyslaní je zhluk dát prenášaný len v optickej podobe pozdĺž celej prenosovej cesty. Pretože zhluk dát je uložený vo zdroji nie sú potrebné žiadne oneskorovacie linky (*FLD - Fiber Delay Lines*) v spojovacích uzloch.



Princíp Just-Enough-Time

OBS môže dosiahnuť efektívne využitie šírky pásma použitím oneskoreného rezervovania (*delayed reservation*). Šírka pásma je rezervovaná pre zhluk dát od času t_s až po čas t_s+l kde l je dĺžka zhluku dát. Pokial požadovaná šírka pásma nie je dostupná, zhluk dát je zablokovaný a uložený vo vyrovnávacej pamäti alebo bude zahodený, pokial nie je možné jeho uloženie do žiadnej vyrovnávacej pamäte. Zahodený zhluk dát môže byť neskôr znova prenesený.

Kvalita služieb – QoS (Quality of Services)

Problém kvality služieb sa najviac prejavuje pri vstupe do siete, kde sa viacero tokov spojuje do jedného zhluku tzv. „super paketu“. Informačné toky sa zhlukujú podľa svojich cieľových adres a parametrov požadovaných kvalít služieb. Z tohto pohľadu je možné použiť len jednoduchý a stupňovitý manažment QoS vo WDM vrstve. Oveľa viac komplexné tvarovanie prevádzky a plánovanie QoS, ktoré vyžadujú veľký počet vyrovnávacích pamäťí je možné dosiahnuť v IP vrstve.

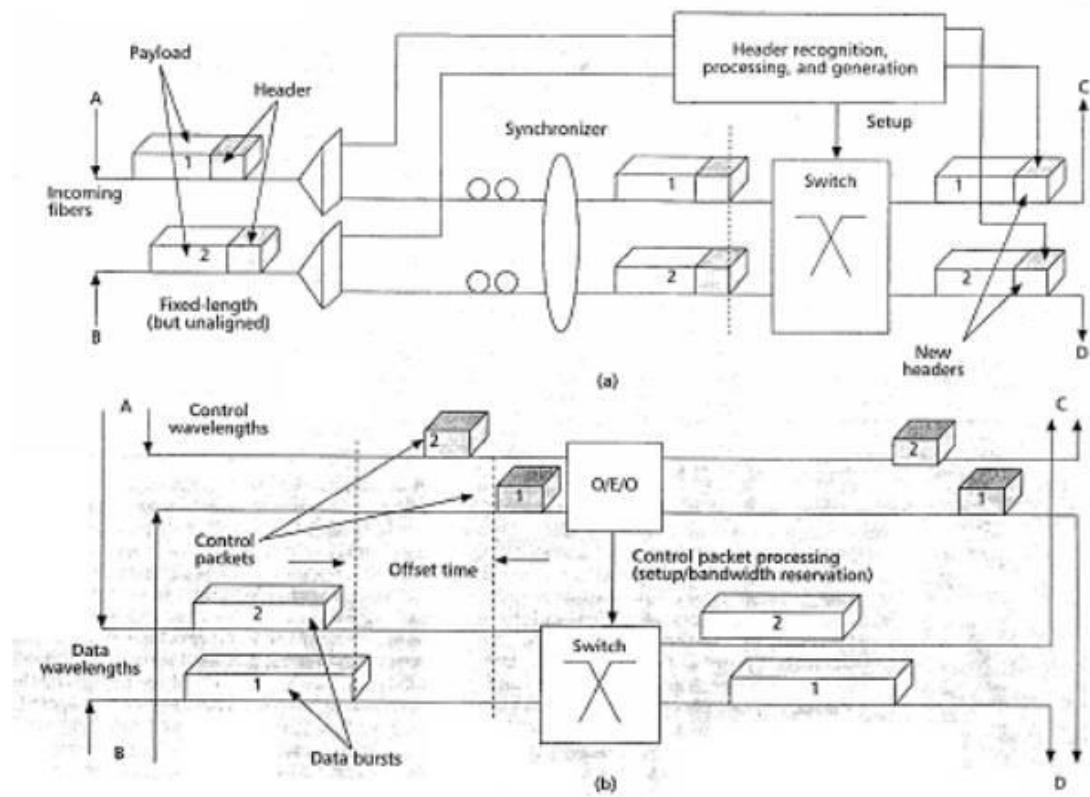
Jedným z hlavných cieľom riadenia prevádzky je minimalizovanie preťaženia, ktoré môže typicky nastať z dvoch dôvodov:

- siet'ové zdroje nie sú schopné uspokojiť okamžitú vysokú prevádzku v sieti
- siet'ové zdroje sú neefektívne využité nerovnomernou prevádzkou v sieti.

Riešenie prvého typu preťaženia je možné pomocou *Offset-time-based* schémy *QoS*. Táto schéma kvality služieb definuje niekoľko prioritných skupín od 0 až po n . Princíp spočíva v tom, že vyššia prioritná skupina dostane skorej požadovanú šírku prenosového pásma ako skupina s nižšou prioritou. Inak povedané, šírka pásma v danom čase je hierarchicky rozdelená od najvyššej priority až po najnižšiu. Druhý spôsob preťaženia siete súvisí so smerovacími algoritmami a rozdeľovaním záťaže v sieti, ktorú pracujú nezávislé od *QoS*.

3.4 Návest'ové optické zhlukové prepínanie (LOBS) pre prenos IP cez vlnovodlžkový multiplex (WDM)

Na nasledujúcim obrázku je porovnanie OPS a OBS uzla. Je tu znázornený typický OPS uzol s FDL na oneskorenie prichádzajúcich paketov, z dôvodu pomalého spracovania hlavičky paketu (OEO konverzia) a takisto s FDL potrebnými na riešenie súbehu paketov vo vnútri prepínača.



Ilustrácia a) optického paketového prepínania OPS b) optického zhlukového prepínania OBS

3.4.1 OBS kombinuje viaceré výhody prepájania okruhov a prepájania paketov:

- pred vyslaním samotného zhluku sa vytvorí spojenie pomocou kontrolného paketu, ktorý nesie smerovaciu informáciu a je prenášaný na samostatnej vlnovej dĺžke
- eliminujú sa požiadavky na použitie optických oneskorovacích liniek, ktoré sú potrebné pri optickom paketovom prepínaniu
- znižujú sa aj požiadavky na synchronizáciu, ktorá je veľmi dôležitá pri paketovom prepínaní

OBS je jedným z riešení integrácie siete IP cez vlnovodlžkový multiplex (wavelength division multiplex - WDM), ktoré zvyšuje celkovú efektivitu siete. OBS umožňuje pomocou MPLS protokolu rozšírenie na návestové optické zhlukové prepínanie (labeled optical burst switching - LOBS). Dá sa to dosiahnuť najmä pomocou IP/MPLS kontrolóra, ktorým sa doplní každý OBS uzol. Počas vytvárania LOBS spojenia sa kontorlný paket pošle ako IP paket obsahujúci návestie ako časť svojej kontrolnej informácie – návestovo prepínaná cesta (label switched path LSP).

3.4.2 Rozdiely medzi zhlukovým prepínaním a prepínaním okruhov a paketov:

- OBS sa čo sa týka nespojitosti pri prenose informácií nachádza niekde medzi prepínaním okruhov a prepínaním paketov (to sa týka základných jednotiek).
- Šírka pásma je rezervovaná v jednosmernom procese, to znamená, že zhluk dát môže byť poslaný bez toho, aby bolo potrebné potvrdenie zostavenia cesty (ACK rámc). Na rozdiel od prepájania okruhov, kde je potrebný obojsmerný proces na zostavenie cesty (len vtedy môžu byť dátá vyslané).
- Pri OBS prechádza zhluk dát cez uzol bez toho aby podliehal nejakému procesingu alebo bol uložený do vyrovnavacej pamäte, na rozdiel od paketového prepínania, kde každý paket je uložený do vyrovnavacej pamäte a samostatne smerovaný v každom uzle.

3.4.3 Techniky rezervácie pásma použité pri OBS

IBT OBS

Jedná sa o zhlukové prepínanie s koncovým znakom v rámci pásma (in band terminator - IBT). kontrolná informácia je poslaná ako hlavička kontrolného paketu. Po ňom nasleduje samotný zhluk dát, ktorý okrem iného obsahuje aj IBT na indikáciu konca zhluku. Používané pásmo sa rezervuje hned' ako je spracovaná kontrolná informácia a pásmo sa uvoľní bezprostredne potom ako je detekovaný IBT.

Rozdiel medzi IBT zhlukovým prepínaním a prepínaní správ je v to, že pri prepínaní správ sa správa uloží do vyrovňávacej pamäte v každom uzle predtým ako sa prepne, na rozdiel od IBT zhlukového prepínania, kde sa prvé bity zhluku už prepínajú na výstup, zatiaľ čo ostatné bity ešte len prichádzajú do uzla. Táto technika je známa pod pojmom *cut-through*.

TAG OBS

Skratka TAG znamená **Tell & Go** a je to optické zhlukové prepínanie, v ktorom sa v podstate jedná o rýchle prepájanie okruhov (fast circuit switching FCS). Zdrojový uzol pošle kontrolný paket na rezerváciu pásma a bez toho aby sa čakalo na potvrdenie o pridelení pásma (ACK) pre daný okruh sa posiela príslušný zhluk dát. Po vyslaní zhluku dát posiela zdrojový uzol paket na uvolnenie pásma (release paket). Iným spôsobom riešenia je automatické uvoľňovanie pásma po uplynutí stanoveného času (timeout period), pri ktorom sa neposiela uvoľňovací paket ale posiela sa paket na udržanie obvodu (refresh paket). Ak sa nevyšle tento paket, pásma bude automaticky uvoľnené, a môžu si ho rezervovať iné uzly.

RFD OBS

RFD OBS je založené na rezervácii pásma na pevne stanovený čas (reserve a fixed duration). Pri tomto zhlukovom prepínaní je rezervácia pásma „close ended“ a v každom prepínači je pásma rezervované na čas (trvanie) špecifikovaný každým kontrolným paketom. Tento spôsob prepínania nielen eliminuje réžiu spojení so signalizáciou ale zabezpečuje aj inteligentné alokovanie a dealokovanie pásma a vyrovňávacích pamäti a takisto aj ich efektívnejšie využitie než ako je to pri IBT OBS a TAG OBS.

Pri vzájomných porovnaniach celkovo vychádza ako najefektívnejšie RFD OBS.

3.4.4 Vlastnosti a výhody OBS

Tabuľka zobrazuje porovnanie troch najpoužívanejších techník pri optickom prepínaní.

Druh optického prepínania	Využitie pásma	Oneskorenie – latencia (zahrnutý je aj proces inicializácie)	Zložitosť implementácie	Schopnosť prispôsobiť sa pri rôznom zaťažení
vlnová dĺžka (prepínanie okruhov)	nízke	vysoké	nízka	nízka
pakety / bunky (OPS)	vysoké	nízke	vysoká	vysoká
zhluky (OBS)	vysoké	nízke	stredná	vysoká

Z tabuľky je zrejmé, že cesta pri prepínaní okruhov je zostavená v obojsmernom procese (nastavenia a potvrdenie). OBS dosahuje lepšie využitie pásma, pretože na rozdiel od prepínania okruhov umožňuje štatistické zdieľanie každej vlnovej dĺžky. Celkové trvanie zhluku dát od zdroja až po adresáta (end to end) je pri OBS kratšie ako pri prepínaní okruhov v tom prípade, ak použitý čas offsetu je omnoho kratší ako čas potrebný na nastavenie vlnovodlžkovej cesty pri sietach so smerovaním na základe vlnovej dĺžky.

V porovnaní s OPS, kde má každý paket rovnakú dĺžku a obsahuje hlavičku, má OBS menší procesing a kontrolu hlavičky, čo súvisí s tým, že zhluky sú zväčša dlhšie ako pakety. S kontrolným paketom a jeho príslušným zhlukom sa ľahšie narába ako s paketmi, pretože požiadavky na spracovanie kontrolného paketu a jeho synchronizácie so svojím zhlukom sú oveľa menšie ako pri OPS .

Navýše pri RFD OBS je možné vo WDM vrstve špecifikovať rôzne druhy služieb pre rôzne triedy zhlukov a to aj bez použitia oneskorovacích liniek. (Pod pojmom triedy zhlukov treba rozumieť jednotlivé priority.). Základnou ideou je použitie extra offsetového času (extra offset time EOT) pre zhluk na zabezpečenie vyššej priority. Je to kvôli tomu, že čím je dlhší EOT je priradený k zhluku, tým väčšiu šancu má kontrolný paket rezervovať pre seba a svoj zhluk príslušné pásmo. Zhluk dát s dlhším EOT potom nebude blokovaný zhlukom, ktorý má kratší EOT. Treba poznamenať, že pri použití EOT na zabezpečenie priority môže vyústiť v konečnom dôsledku na vysoké oneskorenie medzi koncovými uzlami ako pri samotnom paketovom prepínaní alebo pri zhlukovom prepínaní založenom na TAG alebo IBT. Štúdie však ukázali, že extra offsetový čas je potrebný použiť len pri veľmi malom množstve zhlukov a preto tento čas bude mať takmer nulový vplyv na oneskorenie pri prenose medzi koncovými uzlami.

Na koniec, keď kontrolný paket príde do uzla a zistí, že odchádzajúca (výstupná) linka z daného uzla zlyhala, môže byť tento paket presmerovaný na inú výstupnú linku, ktorá ešte nie je obsadená. Takáto situácia môže nastáť vo viacerých uzloch, a výsledné oneskorenie je potom veľmi veľké. V takýchto prípadoch prichádza na rad MPLS.

3.4.5 Návestové optické zhlukové prepínanie (labeled optical burst switching LOBS)

Výskumy v oblasti MPLS otvorili mnohé možnosti integrácie IP transportných sietí a linkových vrstiev. MPLS vzniklo z IP/TAG prepínania, kde boli k IP paketom priradené návestia (tagy), ktoré zvyšovali rýchlosť smerovania v optických sietach. V štandardných IP sietach sa

používajú protokoly založené na smerovaní v každom uzle (*hop-by-hop*) a teda vyžadovali značne dlhú adresu. V MPLS sietiach musí byť každý IP paket uzavretý do MPLS formátu, ktorý obsahuje svoju hlavičku. O MPLS je pojednávané v inej kapitole. Tu sa zameriame na rozdiely medzi MPLS a LOBS.

V MPLS sú definované smerovacie triedy (forward equivalence classes - FECs) slúžiace na mapovanie IP adries na cesty prepájané pomocou návestí (labeled switched path - LSP). Smerovanie pomocou LSPs može byť definované pomocou dvoch základných metód. Jedna je explicitné smerovanie (explicit routing - ER), kde môžu byť špecifikované viaceré politiky smerovania a prevádzky. Druhá je smerovanie po krokoch (hops) tak, ako je to pri IP smerovacích protokoloch.

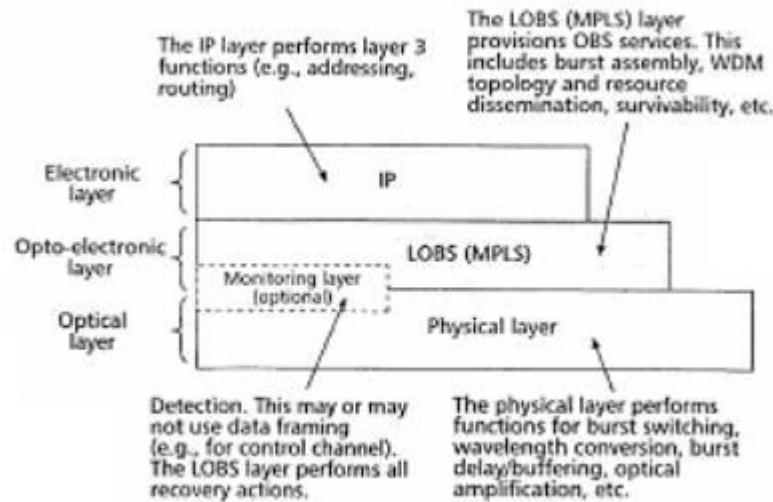
MPLS definuje tri základné operácie s návestiami na zabezpečenie LSP entít pri prechode cez sieť – *push*, *pop* a *swap*. Operácie push a pop sa používajú pre vkladanie a výber návestí do a zo zásobníka a môžu sa použiť pre LSP na podporu virtuálnych ciest a virtuálnych spojení podobne ako je tomu v ATM. Operácia swap vymení prichádzajúce a odchádzajúce návestia. V MPλS každé návestie je reprezentované vlnovou dĺžkou, resp. každé LSP je vlnovodlžková cesta.

V každom LOBS uzle je možné vykonávať výmenu spomínaných návestí, pretože každý uzol obsahuje OEO konverziu, kvôli spracovaniu kontrolného paketu, ktorý obsahuje návestie. V LOBS každý kontrolný paket podlieha procesingu, ktorý je však odlišný ako pri MPLS v elektronickom LSR. Napríklad spracovávané je nielen návestie nesené kontrolným paketom pre daný zhluk, ale takisto je spracovávaná aj informácia o vlnovej dĺžke, na ktorej je daný zhluk prenášaný. Tiež sa spracováva aj informácia o čase offsetu, ktorý je medzi zhlukom a kontrolným paketom. Toto všetko sa zabezpečuje v LOBS uzle.

V LOBS uzle, ktorý je schopný vlnovodlžkovej konverzie, môže prísť zhluk na dvoch odlišných LSP, ktoré však majú rovnakú vlnovú dĺžku. Tieto zhluky môžu splynúť do jednej LSP na rovnakej vlnovej dĺžke na tak dlho, kým nevznikne blokáda (použitie rovnakej vlnovej dĺžky v rovnakom čase). Pokial vznikne blokáda, jeden zo zhlukov je oneskorený (FDL). Ak oneskorenie nie je možné, musí sa zhluk presmerovať na alternatívny výstup (deflection routing – vychylňovacie smerovanie).

Dva zhluky patriace rovnakéj LSP môžu byť vyslané pomocou dvoch rôznych vlnových dĺžok. Veľmi dôležité je, že zhluky patriace rozdielnym LSP, môžu byť vkladané na rovnakej vlnovej dĺžke pripustením alokácie vlnovodlžkového podpásma (subwavelength bandwidth) pre každý LSP. Vysoký stupeň flexibility spolu s lepším využitím pásma je dôsledkom asociácie medzi

vlnovou dĺžkou a návestími. Je to len jedna z mnohých výhod štatistického multiplexovania zhlukov v LOBS.



Architektúra integrácie IP cez WDM založená na LOBS (MPLS)

3.4.6 Zabezpečenie cesty v LOBS

Tak ako v MPLS a v MPλS, aj v LOBS môžu byť uzly klasifikované do dvoch skupín a to: jadro (core) a okraje(hranice) (edge).

Jadro v LOBS uzle zabezpečuje samotné prepínanie zhlukov. V tomto jadre príde zhluk na určitej vlnovej dĺžke na vstup a je prepnutý na niektorý výstupný port (vlnovodlžkový kanál). Toto je transparentná operácia, čo sa týka užitočných dát, pretože zhluk nepodlieha žiadnemu procesingu. LOBS uzly sú v tomto smere rovnaké ako LSR uzly, ktoré vykonávajú operácie s návestiami.

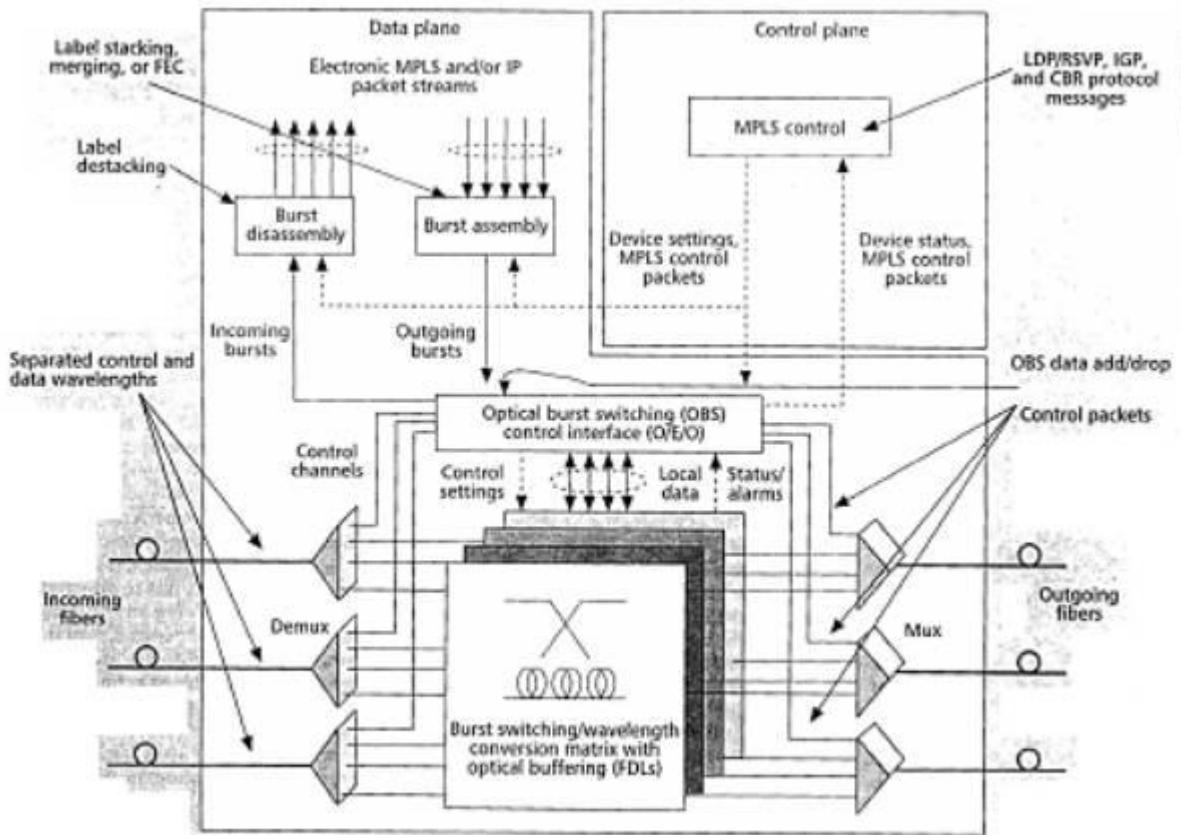
Hranice LOBS uzlov vykonávajú všetky návestové operácie, preto aj sú doplnené OEO funkčnosťou podobne ako to je v rozhraní IP smerovačov. Veľmi dôležitou funkciovou hranicou LOBS je skladanie zhlukov, práca so zásobníkom a LSP spájacie funkcie. Počas skladania zhlukov sú IP pakety zlúčené do zhluku a je zostrojený aj zodpovedajúci kontrolný paket. Pri konštrukcii tohto paketu je determinované aj korešpondujúce návestie/linka. Priradenie návestia môže byť realizované použitím MPLS.

Pomocou MPLS môžu byť k LSP ceste priradené viaceré základné atribúty. Avšak okrem týchto atribútov sa môže použiť aj niekoľko ďalších parametrov. Napr. na zabezpečenie diferenčných služieb (DiffServ) sa môže k LOBS ceste resp. ku kontrolnému paketu priradiť pole CoS (Class of Service) ponúkané MPLS. Toto pole môže byť použité spolu s EOT (extra offset time) na rozlišovanie priorít jednotlivých kontrolných paketov vo fyzickej a WDM vrstve.

Ako ďalší príklad použitia MPLS na zabezpečenie LOBS cesty sa môžu použiť rozdielne hodnoty typu dĺžky (type length values - TLV), v MPLS signalizačnom protokole a používajú sa na špecifikovanie vlastností LSP. TLV sa používa v súvislosti s definíciou LSP požiadaviek súvisiacich s manažmentom prenosu (traffic management).

Niekoľko najčastejšie používaných parametrov:

- špičková dátová rýchlosť PDR – peak data rate
- angažovaná dátová rýchlosť CDR – committed data rate
- špičková veľkosť zhluku PBS – peak burst size
- angažovaná veľkosť zhluku CBS – committed burst size
- nadbytková veľosť zhluku EBS – excess burst size



Štruktúra LOBS uzla založeného na MPLS

Kým LOBS uzly prenášajú dátové zhluky na oddelenej vlnovej dĺžke , parameter PDR môže byť jednoducho nastavený na pásmo pre príslušný vlnovodlžkový kanál. Parameter CDR by mal byť nastavený oveľa pozornejšie pretože priamo odráža priemernú rýchlosť zhluku, ktorú môže siet udržiavať.

PBS, CBS a EBS sú veľmi užitočné najmä na implementáciu prioritnej schémy spolu s EOT. Ich hodnoty závisia na type prevádzky, ktorá je použitá na okrajoch LOBS podsiete. Treba poznamenať, že nie všetky MPLS funkcie môžu byť priamo vykonávané v LOBS uzloch. Napríklad funkcia životnosti paketu (time to leave - TTL) sa nedá implementovať, pretože pakety sa nachádzajú v zhluku ako užitočná informácia, a tá v jednotlivých uzloch nepodlieha procesingu.

3.4.7 Prenos a riadenie zdrojov

V súčasnosti môžu byť LOBS cesty počítané pomocou protokolov, ktoré riadia zdroje. Pre riadenie prenosu v LOBS sieti musíme brať do úvahy viaceru faktorov a to napríklad, či máme k dispozícii oneskorovacie linky (FDL) v LOBS uzle. S výhodou sa tu dá opäť použiť MPLS, ktoré ponúka centrálnu, distribuovanú alebo hybridnú kontrolu. Pri ER môžu byť LOBS cesty špecifikované použitím IP adres LOBS uzlov a to s využitím TLV poľa, ktoré poskytuje ER.

ER môže byť použité nielen na determináciu cesty pre LSP, ale tiež na výber jednej alebo viacerých vlnových dĺžok. Okrem iného potrebuje ER na svoju efektívnu funkčnosť aj informácie o aktuálnych dostupných sietových zdrojoch. Tieto informácie môžu poskytovať modifikované LSA správy, ako sú napríklad variabilné IGP protokoly, medzi ktoré patrí OSPF (open shortet path first), IS-IS (intermediate system to intermediate system) a RIP (routing information protocol). Takisto by mali LSA správy prenášať informáciu o profile zhluku spolu s množstvom alokovaných a voľných oneskorovacích liniek (FDLs). Profil zhluku môže byť doplnený informáciou o počte a veľkosti zhlukov. To v podstate slúži na úspešnú rezerváciu pásma, na rezerváciu oneskorovacích liniek a pre extra offsetový čas (EOT).

3.5 Optické prepínanie založené na iných technológiach

Okrem zariadení MEMS existuje niekoľko ďalších koncepcíí systémov pre optické prepínanie. Prvými komerčne dostupnými systémami boli systémy založené na opto-mechanickej technológií. Ich základom sú kolimátory vyrovňávajúce svetelný lúč, zrkadlá, prípadne optické hranoly ovládané elektromagneticky, teda krovkovým motorom alebo solenoidom. V súčasnosti sú dostupné tieto systémy s veľmi malou vloženou stratou $< 1\text{dB}$. Konfigurácia zariadení je limitovaná na veľkosti 1×2 a 2×2 portov. Systémy s väčším počtom portov možno získať kombináciou viacerých elementov, avšak so zvýšenými nákladmi a degradáciou výkonu. Využívajú sa väčšinou vo vlnovodlžkových add-drop aplikáciach s malým počtom portov.

Optické prepínače vyrobené s vlnovodom (silica-on-silicon), označované ako fotonické svetlovodné obvody (Photonic Lightwave Circuit - PLC), sú založené na princípe termálne indukovaných zmenách indexu odrazu na vlnovodoch. Lokálne zahrievanie sa získava tenkofilmovými zahrievacími elektródami nad vlnovodom. Táto technológia má niektoré nevýhody, napr. limitovaná hustota integrácie a vysoké vákonové straty. Komerčne dostupné obvody PLC 8×8 prepínačov vykazujú straty okolo 4W a vyžadujú vzduchové chladenie pre spoľahlivosť operácií. Optické výkonnostné parametre ako presluch a vložené straty pre niektoré aplikácie môžu byť neakceptovateľné. Pozitívou vlastnosťou tejto technológie je možnosť integrácie rôznorodých optických útlmových článkov a elementov založených na výbere vlnovej dĺžky (maticové vlnovodlžkové mriežky) na jednom čipe s jednou technológiou.

Lítium-nióbová technológia je založená taktiež na lokálnych zmenách indexu odrazu dielektrických vlnovodov. V tomto prípade sa zmena indexu získava elektro-optickým efektom (podobne ako pri externých modulátoroch pre vysokorýchlosné optické modulácie). Táto technológia je špecifická tým, že umožňuje veľmi rýchle spínacie časy rádovo v nanosekundách umožňujúce optické paketové prepájanie. Má podobné nevýhody ako iné vlnovodové prepínače: limitovaná škálovateľnosť, vysoké vložené straty a vysoká hodnota presluchu.

Prepínače založené na tekutých kryštáloch (liquid crystal optical switches) sú založené na zmene polarizačného stavu svetla dopadajúceho na tekutý kryštál aplikáciou elektrického poľa na tekutý kryštál. Zmena polarizácie v kombinácii s rozdeľovačmi, ktoré vyberajú lúč na základe polarizácie, umožňujú optické prepínanie. Aby sa zariadenie stalo polarizačne necitlivé, musia byť implementované niektoré druhy výberu polarizácie, čím robia túto technológiu komplexnejšiu. Viacerí výrobcovia boli schopní vyrobiť nízkoportové optické prepínače (1×2 , 2×2) založené na

tekutých kryštáloch. Táto technológia zároveň umožňuje prepínanie založené na výbere vlnovej dĺžky.

Okrem už spomenutých technológií boli vyvinuté ďalšie technológie, ktoré však zatiaľ nie sú komerčne dostupné. Patra k nim prepínače založené na polovodičových vlnovodoch, prepínače založené na polymérnych termo-optických vlnovodoch a hradlové prepínače založené na polovodičových optických zosilňovačoch.

3.5.1 Tekuté kryštály

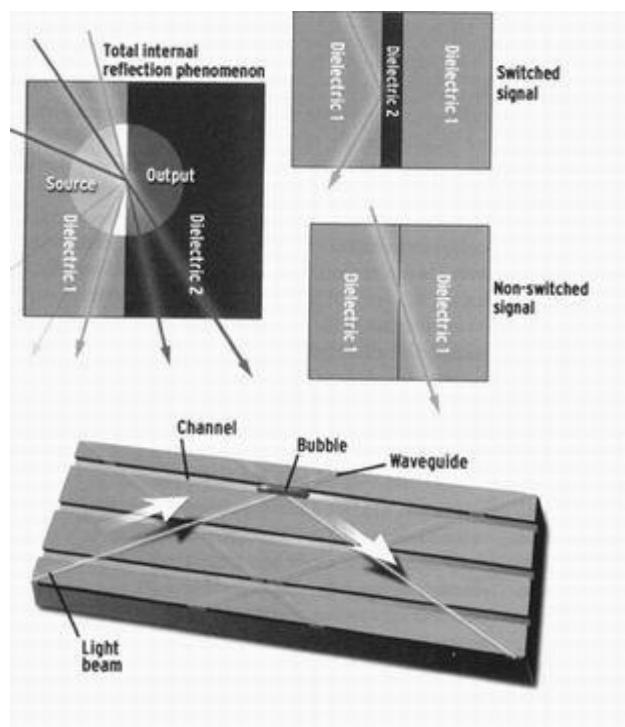
Použitie tekutých kryštálov, na kontrolu polarizácie svetelného lúča, predstavuje ďalšiu možnosť dosiahnutia celo-optického prepínania. Tekuté kryštály (TK) sa aplikujú v spojení s na polarizáciu citlivými materiálmi, ktoré absorbujú alebo odrážajú svetlo so špecifickou polarizáciou. Ak sa nechá pôsobiť napäťie na TK zariadenie, jednotlivé kryštály sa usporiadajú podľa polarity elektrického poľa. V prípade, že sú natočené kolmo k polarite lúča, dôjde k jeho odrazu inak lúč prejde cez kryštály. Napriek dokonale zvládnutej technológií a mnogým poznatkom o TK, má toto riešenie tri výrazné nevýhody: TK sú veľmi pomalé (hlavne pri nízkych teplotách), obtiažne sa integrujú s inými optickými komponentmi a majú relatívne vysoké straty pri odrazoch. Ďalším problémom je samotná polarizácia optického signálu, ktorá je v prípade vstupného signálu absolútne nekontrolovaná. Preto musí byť signál rozdelený na dve zložky so známymi polaritami použitím polarizačných filtrov, následne samostatne prepínaný a nakoniec skombinovaný do spoločného výstupu. Tento postup je obtiažny a drahý a môže vyvolať neočakávanú disperziu polarity (PMD-polarization mode dispersion), kedy sú krátke impulzy rozptýlené v čase, z dôvodu závislosti rýchlosťi šírenia impulzu od jeho polarity. Vysoké náklady sú aj na kompenzáciu teplotnej závislosti TK.

3.5.2 Úplný vnútorný odraz

Využitie tohto javu v prepínačoch vychádza z poznatku, že ak sa svetlo pokúsi prejsť z média s vyšším indexom lomu do média s nižším pod malým uhlom, tak všetko svetlo je odrazené naspäť do média s vyšším indexom lomu (Obr. č. 1). Ak je index lomu oboch médií rovnaký, svetlo prechádza cez zlom bezo zmeny. Spôsob ako to využiť spočíva v nahradzovaní druhého média iným, podľa toho či je odraz potrebný alebo nie. Najznámejším produkтом, založeným na tomto princípe je Agilent Champagne prepínač, v ktorom sú časti vlnovodu križované kanálikmi naplnenými kvapalinou, ktorá má rovnaký index lomu ako vlnovod a umožňuje tým optickému lúču prechod zlomu s minimálnou stratou. V prípade, že je kvapalina v danom bode nahradená plynom s nízkym indexom lomu, dôjde k odrazu resp. presmerovaniu na iný vlnovod. Problémy spojené s týmto riešením spočívajú v nedokonalom vyplnení zlomového bodu kvapalinou, čím dochádza k stratám, ktoré sú naviac kumulatívneho charakteru, nakoľko svetelný lúč prechádza viacerými takýmito bodmi zlomu. Tiež je možný vznik presluchov. V prípade prítomnosti plynovej bubliny v bode zlomu (t. j. pri potrebe odrazu lúča) je problém opačný. V dôsledku prirodzenej vlastnosti TIR sa lúč neodráža len priamo na zlome, ale aj vnútri plynovej bubliny. Tá by mala byť preto čo najširšia, aby sa predišlo presluchom. Táto požiadavka ale odporuje potrebe znižovania strát.

Ďalším problémom je na vlnovej dĺžke závislá zmena fázy pri odraze, zmeny amplitúdy a skreslenie výstupného signálu.

Samotné naplnenie a vyprázdenie kvapaliny z bodu zlomu sa dá realizovať doma spôsobmi: odprením kvapaliny a vytvorením bubliny a spätnou kondenzáciou, alebo priamym napúštaním a vypúštaním kvapaliny. Druhé riešenie je rýchlejšie, ale obtiažnejšie na realizáciu. Použitie TIR na prepínanie je limitované stratami a presluchmi, ktoré sú kumulatívneho charakteru a neumožňujú vytváranie prepínačov s viac ako 100 portami.



Obr. č. 1 Princíp prepájania založený na úplnom vnútornom odraze

3.5.3 Elektroholografia

Jedná sa o najnovšiu celo-optickú technológiu prepínania, ktorej základom je pevná matica, ktorej riadky a stĺpce sú tvorené ferroelektrickými kryštálmi. Riadky korešpondujú s jednotlivými vláknami a každý je určený pre svetlo s odlišnou vlnovou dĺžkou. Každý kryštál je vybudený laserom aby vytvoril hologram, v ktorom sa jeho optické vlastnosti menia v závislosti od pôsobenia elektrického poľa. Ak na kryštál nepôsobí elektrické pole, svetlo prechádza cez neho, inak sa odráža do príslušného vlákna . Výhodou holografických kryštálov je ich rýchla reakcia na zmeny elektrického poľa, nízka spotreba energie, možnosť elektrostatického riadenia. Holografické prepínanie je preto možné ľahko integrovať s inými sieťovými funkciami ako napr. monitoring siete. Výraznejšou nevýhodou tejto technológie je obmedzená škálovateľnosť podobne ako tomu bolo v prípade 2-D MEMS prepínačov. Počet prvkov prepínacej matice rastie súčinom vstupných a výstupných portov. Tiež samotné hologramy sú difrakčné prvky, ktoré sú sami o sebe citlivé na zmeny vlnovej dĺžky a polarizácie svetla, čo vedie k stratám, závislých od týchto parametrov.

Ked' zvážime všetky možnosti sa ako najideálnejším riešením pre chrbticové a MAN siete v súčasnej dobe zdajú zrkadlové MEMS prepínače a to pre ich nízke straty, dostatočnú rýchlosť, možnosť spájania do dostatočne veľkých celkov a vysokú spoľahlivosť.

3.5.4 Porovnanie technológií

V súčasnosti je snaha využiť mnoho nových technológií na vytvorenie optického prepínacieho systému. Fakticky každý proces, ktorý ovplyvňuje niektoré vlastnosti svetla (napr.: rýchlosť šírenia, polarizácia, smer) a pritom nevyvoláva silnejší útlm, sa dá použiť na zmenu smeru svetelného lúča. Najviac preskúmanou metódou je použitie presnej optiky, vytvárajúcej robustné spojenia. Táto technológia má mnoho foriem napr. využitie motorického pohybu presných zrkadiel na smerovanie svetelného lúča zo vstupu na výstup (technológia od Lucent Technologies). Tieto prepínače majú výnimočný optický výkon (nízke tlmenie, odrazy, presluchy), lebo sú založené na dobre zvládnutých výrobných technikách. Rozmachu však bránia tri nevýhody: vysoké náklady, veľké rozmery, nízka rýchlosť.

Ďalšiu O-O-O prepínaciu technológiu predstavujú Mach-Zehnder interferometre (MZIs). Princíp MZI metódy spočíva v rozdelení prichádzajúceho svetla na dva lúče, ich smerovania odlišnou cestou a potom opäťovnej rekombinácií do dvoch výstupov. Zmenou rýchlosťi svetla na jednej z ciest sa mení jeho fáza, čo umožňuje kontrolovať frakcie svetla posielané do každého z výstupov. Zmenou fáze od 0 do 180° sa posunie svetlo z jedného výstupu na druhý.

Rýchlosť svetla možno meniť použitím materiálu v ktorom je rýchlosť svetla funkciou teploty alebo intenzity elektrického poľa. Prepínače, ktoré majú smerovanie založené na princípe zmien teploty, alebo elektrického poľa sa nazývajú thermo-optické a elektro-optické smerovače.

Použitie MZI prepínačov predstavuje niekoľko výhod. Je spoľahlivé, elektro-optická verzia je aj pomerne rýchla a integruje viacero ďalších funkcií. Nevýhodou je limitovanie v počte možných vstupných a výstupných portov (max. 40). Je to spôsobené potrebou dlhej spomalovacej dráhy (rádovo centimetre) po ktorej lúč prechádza, nakoľko zmena teploty alebo elektrického poľa zmení rýchlosť svetla veľmi slabo. Ďalšia limitácia spočíva v probléme izolácie a potlačenia presluchov, ktoré sú tým výraznejšie, čím je širšie spektrum signálu, t. j. čím je vyššia modulačná frekvencia nosnej vlny (vyššia prenosová rýchlosť). Tiež treba zabezpečiť reguláciu teploty v prepínači, čo vedie k zvýšeným nákladom, rozmerom a energetickej spotrebe prepínača.

Na trhu je v súčasnosti veľa dvoj-vstupových a dvoj-výstupových prepínačov založených na MZI technológií, ktoré slúžia ako stavebné elementy na vytvorenie väčších viacportových prepínačov.

4 Smerovanie v optických siet'ach

4.1 Princípy smerovacích protokolov

Vo vlnovo smerovaných sieťach je potrebný mechanizmus na zostavenie a zrušenie spojenia. Keď príde požiadavka na vytvorenie spojenia, mechanizmus musí byť schopný vybrať vhodnú cestu, priradiť vlnovú dĺžku spojeniu a nastaviť všetky smerovače na danej ceste. Zároveň musí byť mechanizmus schopný dynamicky obnovovať informácie o sieti (napríklad informácie o alokovaných vlnových dĺžkach na jednotlivých spojeniach). S postupným vývojom technológie v oblasti WDM sietí vzniká možnosť vytvárať spojenia s veľkou šírkou pásma. S nástupom optických vlnovo dĺžkových prepínačov (WRSS) a fotonickými krížovými prepínačmi (PXCs) je možné údaje prepínať priamo v optickom pásme bez potreby prevodu na elektrickú reprezentáciu optického signálu. Konfiguráciou jednotlivých prepínačov v sieti je možné zostaviť pre jedného účastníka spojenie na všetkých vlnových dĺžkach v sieti. Keďže ešte nie sme schopní meniť vlnovú dĺžku v sieti, musí byť každé spojenie cez sieť na jednotlivých linkách realizované na rovnakej vlnovej dĺžke. Z toho vyplýva nutnosť evidovať údaje o zostavenej ceste daného spojenia a vlnovej dĺžke, na ktorej je spojenie zostavené.

V sietach WDM môžu byť dva typy prevádzky: statická alebo dynamická. Pri statickom spôsobe prevádzky sa alokujú cesty na jednotlivých vlnových dĺžkach a ostávajú takto nastavené dlhší čas. V prípade dynamickej prevádzky sa vlnová dĺžka alokuje pre každé nové spojenie a po skončení výmeny dát sa táto vlnová dĺžka znova uvoľní. Snahou je vytvoriť efektívny protokol na výber optimálnej cesty, vhodné pridelenie vlnovej dĺžky pre danú cestu a zníženie blokády v sieti.

4.2 Dynamické smerovanie a pridelovanie optických vlnových dĺžok

V prípade dynamického zostavovania spojení je potrebný proces na pridelovanie optických vlnových dĺžok v sieti a na výber vhodnej cesty sietou. Proces je zároveň schopný dané spojenie v sieti realizovať. Je možné, že pre požadované spojenie na určitej vlnovej dĺžke svetla nebude možné vytvoriť prenosovú cestu sietou. Toto spojenie môže byť blokované z viacerých dôvodov. Napríklad v niektorom z uzlov nie je voľná požadovaná vlnová dĺžka na výstupnej linke do ďalšieho uzla. Protokol musí byť schopný realizovať spojenie na inej vlnovej dĺžke inou cestou. Protokol by to však mal realizovať tak, aby v sieti nevznikala blokáda pre ďalšie spojenia.

4.3 Fixné smerovanie a fixne alternatívne smerovanie

V prípade fixného smerovania je vytvorená jediná cesta medzi každým zdrojovým a cieľovým uzlom v sieti. Fixne alternatívne smerovanie má vytvorenú tabuľku s viacerými možnými cestami medzi všetkými dvojicami zdrojových a cieľových uzlov uloženú v smerovači ako smerovaciu tabuľku. Požiadanim o vytvorenie spojenia sa vyberie jedna z cest medzi zdrojovým a cieľovým uzlom. Nevýhodou takéhoto spojovania je veľká blokáda v sieti.

4.4 Adaptívne smerovanie založené na globálnej informácii

Toto smerovanie je založené na globálnej informácii o sieti. Ak poznáme úplnú informáciu o sieti (ako sú obsadené vlnové dĺžky na jednotlivých linkách), tak vieme na základe týchto informácií zvoliť cestu a vlnovú dĺžku, ktorú použijeme na zostavenie spojenia danou sieťou. Adaptívne smerovanie založené na globálnej informácii o sieti môže byť realizované s centralizovaným alebo decentralizovaným riadením.

V prípade centralizovaného riadenia existuje jeden sieťový manažér, ktorý udržuje kompletné informácie o stave sieti a zodpovedá za nájdenie cesty sieťou, pridelenie vlnových dĺžok jednotlivým spojeniam a ich následné zostavenie v sieti. Pri centralizovanom riadení nie je potrebná veľká koordinácia medzi jednotlivými uzlami v sieti. Nevýhodou centralizovaného riadenia je v prípade zlyhania riadiaceho manažéra zlyhá celá siet.

Decentralizovaný algoritmus riadenia siete, založený na globálnej informácii, môže byť realizovaný viacerými spôsobmi. Pri použití link state smerovania eviduje každý uzol siete informácie o celej sieti. Každý z uzlov si vie nájsť na základe týchto informácií požadovanú cestu. V prípade zmeny stavu sieti je potrebné o tejto zmene informovať všetky uzly. Rieši sa to zaslaním broadcastu všetkým uzlom v sieti. So zväčšovaním sa počtu požiadaviek na spojenie rastie aj počet broadcastov a tým aj zahľatie siete. Uvedené dôvody môžu viest' k situácií, kedy niektorý z uzlov nedostal informáciu o zmene stavu v sieti a rozhodne sa na základe neaktuálnej informácie.

Použitím algoritmu distance-vector routing odpadá potreba evidovať kompletnú informáciu o sieti v každom uzle. Uzol si uchováva tabuľku s informáciou pre každý cieľ na danej vlnovej dĺžke, informáciu o nasledujúcim uzle a vzdialenosť do tohto uzla. Distribuované informácie v tabuľkách sa udržujú pomocou Bellman – Ford algoritmu. Podobne ako v predošлом prípade potrebujú uzly obnoviť tabuľku pri každej zmene v sieti. Toto obnovenie je robené rozoslaním smerovacích aktualizácií medzi susednými uzlami. Aktualizácie sa môžu rozposielat' pravidelne, alebo pri zmene stavu výstupných liniek v uzle.

Iným adaptívnym smerovacím algoritmom je least-congested path (LCP). Algoritmus je založený na evidencii preťaženia výstupných liniek z uzla. Preťaženie linky je vypočítané ako počet voľných vlnových dĺžok na danej linke. Linky, ktoré majú menej voľných vlnových dĺžok sa berú ako viac preťažené. Celková hodnota preťaženia cesty je daná ako najviac preťažená linka v danej ceste. Pre každú dvojicu zdroj cieľ je zostavená tabuľka s hodnotami preťaženia pre všetky možné cesty a táto je zatriedená podľa najmenšieho preťaženia. Pri potrebe vytvorenia spojenia sa vyberá najmenej preťažená cesta. Bolo dokázané, že použitím najprv algoritmu shortest-path first a potom LCP získame lepšie výsledky ako pri samotnom LCP.

Smerovania založené na globálnej informácii o sieti je výhodné využívať v sieťach, v ktorých sa spojenia nevytvárajú veľmi často. S rastúcimi požiadavkami na počet vytváraných nových spojení rastie aj potreba obnovovať globálne informácie o sieti.

4.5 Adaptívne smerovanie založené na susednej informácii

V prípade smerovania založeného na globálnej informácii musel byť každý uzol informovaný o stave v celej sieti. Tieto informácie museli byť aktualizované v reálnom čase. Modifikáciou LCP vieme získať algoritmus využívajúci len údaje poskytnuté susednými uzlami. Modifikácia spočíva v nájdení najmenej preťaženej cesty len na základe informácie o najmenej vyťažených linkách z prvých k uzlov v ceste. Parametrom algoritmu je k a pre $k=2$ sa dosahujú výsledky podobné ako pri fixed-alternate routing.

Iná cesta k adaptívnemu smerovaniu s lokálnou informáciou môže byť deflection smerovanie alebo smerovanie založené na alternate link routing. Táto smerovacia schéma je založená na výbere z alternatívnych liniek, častejšie na hop by hop ako na end to end. Pri tomto smerovaní si každý uzol siete vytvára tabuľku, v ktorej pre každý cieľ eviduje jednu alebo viac výstupných liniek, ktorými dosiahne daný cieľ. Tieto výstupné linky sa prepočítajú a môžu sa zoradiť tak, že niektoré linky majú vyššiu prioritu pre danú vlnovú dĺžku na danej výstupnej linke. Ak je preferovaná výstupná linka obsadená, tak sa vyberie náhradná. Inou možnosťou je, ak si uzol eviduje informácie len o svojich výstupných linkách. V tomto prípade nieje potrebné zasielať aktualizačné správy. Týmto spôsobom sa zúži pásmo potrebné na prenos riadiacich informácií.

Pridel'ovanie vlnových dĺžok

V prípade, že medzi zdrojovým a cieľovým uzlom existuje viacero vlnových dĺžok na danej ceste je potrebný algoritmus na ich pridel'ovanie. Algoritmus vyberie vlnovú dĺžku svetla, na ktorej sa potom zostaví požadovaná optická cesta.

4.6 Fotonické slotové smerovanie

V chrbiticových sieťach je vysoká úroveň prevádzky riadená v zmysle riešení založených na prepínaní optických okruhov – prístup založený na vlnovodlžkovom smerovaní. V prístupových a MAN sieťach, kde je naopak redukovaná úroveň prevádzky, je tento prístup neefektívny. V týchto sieťach je vhodnejšie použitie jemnej a viac dynamickej alokácie šírky pásma pri paketovo-prekladanom (packet-interleaved) optickom časovo delenom multiplexe (OTDM – optical time-division multiplexing). Jedným z riešení OTDM je fotonické slotové smerovanie (PSR – photonic slot routing), ktoré poskytuje finančne efektívne riešenie pri nasadení celo-optických sietí s využitím dnes využívanej technológie.

4.6.1 Fotonické slotové smerovanie

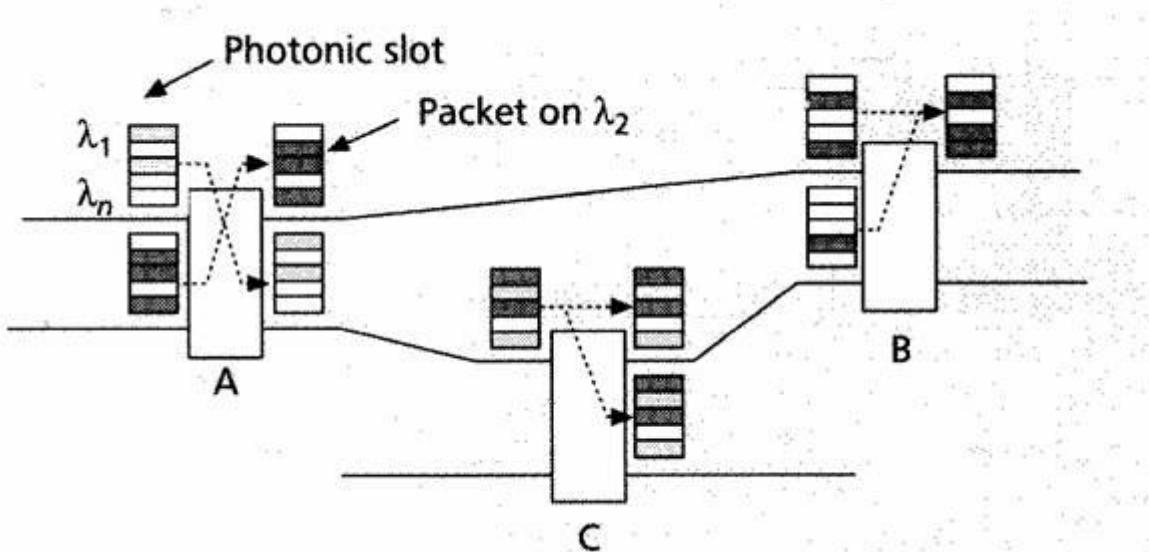
Posledný prístup, nazvaný fotonické slotové smerovanie (PSR), má potenciál obísť spomenuté technologické obmedzenia a prispieť k rozšíreniu finančne efektívnych technológií založených na OTDM a OPS s využitím dnes dostupných optických a elektronických technológiach. Fotonické slotové smerovanie je prístup k WDM založenom na časových slotoch, kde informačné toky na rozdielnych vlnovodlžkových kanáloch sú organizované tak, aby vytvorili časové sloty, kde sú usporiadane všetky vlnovodlžkové kanály (tvoria tzv. fotonické sloty). Fotonické sloty sú považované ako nedeliteľné entity a sú prepínané ako jednotlivé vlnovodlžkovo-transparentné jednotky pri prechode sietou. Siete založené na fotonickom slotovom smerovaní tak môžu spracovať „wavelength-sensitive“ dátové toky s použitím „wavelength-insensitive“ rýchlych optických prepínačov založených na súčasných technológiach. Výsledkom je presunutie technologických problémov na problém nájdenia efektívneho riešenia organizácie informačných tokov do formy fotonických slotov.

V protiklade s vlnovodlžkovým spracovaním v IWS uzle riešenie, ktoré spočíva v slotovom spracovaní v PSR uzle, zmierňuje réžiu kladenú na elektronické riadenie o faktor rovný počtu vlnových dĺžok. Ďalšou zaujímavou vlastnosťou fotonického slotového smerovania je rozšíriteľnosť na IWS technológiu, čiže uzly PSR a IWS môžu byť navrhované s ohľadom na plnú kompatibilitu.

Postupne môžu byť jednotlivé časti PSR uzlov nahradzované IWS uzlami kvôli zlepšeniu sieťovej výkonnosti s ohľadom na rastúcu sietovú prevádzku.

4.6.2 Koncepcia fotonického optického smerovania

Koncepcia fotonického optického smerovania bola navrhnutá s ohľadom na nasadenie optického paketového prepínania vo WDM sietiach bez toho, aby vyžadovali zložité „wavelength-sensitive“ zariadení. Ako je naznačené na obr. č. 1, PSR siet pozostáva z PSR uzlov prepojených optickými vláknenami. V sieti je diskrétny čas rozdelený na časové sloty rovnakej dĺžky. Časový slot sa môže prispôsobiť na prenos jedného paketu konštantnej dĺžky pre každú vlnovú dĺžku. Sloty sú synchronizované pre všetky vlnové dĺžky, aby vytvorili skupinu usporiadaných paketov, t.j. fotonických slotov, ktoré sa šíria optickým vláknom ako jeden celok.



Obr. č. 1 PSR siet pozostávajúca z PSR uzlov

Funkcia uzla PSR je smerovať každý fotonický slot ako nedeliteľnú informačnú jednotku cez siet.

Klúčový komponent PSR uzla je neblokujúci priestorový fotonický prepínač riadený elektronickou logikou pre každý slot. Ukladanie slotov do vyrovnávacích pamäti nie je potrebné, avšak môže zlepšiť výkonnosť uzla. PSR uzol A, znázornený na obr. 1, reprezentuje najjednoduchší prípad PSR uzla. Prichádzajúce fotonické sloty sú detekované PSR uzlom a individuálne smerované cez uzol, pričom je vyžadovaná signalizácia na určenie slotu a jeho cieľa. Fotonické sloty, ktoré opúšťajú uzol v rovnakom čase, musia vybrať rozdielny výstupný port, aby sa vyhli zahľteniu výstupu. Pakety prenášané v jednom fotonickom slote teda musia prejsť sieťou po rovnakej ceste. Tento fakt vyžaduje, aby riadiaci protokol v sieti usporiadal pakety do fotonických slotov tak, aby všetky pakety prenášané v jednom slote použili rovnakú cieľovú adresu.

PSR uzol A môže byť modifikovaný tak, aby sa čiastočne zmiernili spomenuté obmedzenia pridaním dvoch ďalších funkcií, ktoré navyžadujú „wavelength-sensitive“ zariadenia. Sú to nasledovné funkcie:

- *Zlučovanie slotov* (PSR uzol B na obr. 1): Sloty, ktoré súčasne prichádzajú na vstupné porty môžu byť prepínané na rovnaký výstupný port, teda prekrývajúce sa sloty vytvoria nový slot, ktorý opustí uzol. Táto operácia je prípustná len v prípade, keď zlučované sloty sú kompatibilné, teda nenesú pakety na rovnakej vlnovej dĺžke. Táto funkcia umožňuje paketom prichádzajúcim z rozdielnych vstupných portov, aby boli smerované na spoločný cieľ.
- *Kopírovanie slotov* (PSR uzol C na obr. 1): Slot prichádzajúci na vstupný port je duplikovaný a prepínaný na dva alebo viacero výstupných portov. Táto funkcia umožňuje paketom, aby boli prenášané spoločne, aj keď nemajú rovnaký cieľ.

Funkcie pre zlučovanie a kopírovanie slotov zlepšujú využitie fotonických slotov aj v prípade nerovnomernej prevádzky. Doteraztieto funkcie vyžadovali použitie pasívnych väzobných blokov a splitterov (t.j. len „wavelength-insensitive“ zariadení).

4.6.3 Výhody a obmedzenia PSR sietí

Kvôli relatívne jednoduchej architektúre môže byť PSR uzol vybudovaný s použitím niekoľkých optických zariadení založených na osvedčených technológiach. Hardwarová a riadiaca zložitosť PSR uzlov nie je závislá od počtu vlnových dĺžok, pokiaľ vybrané vlnové dĺžky spadajú do frekvenčného pásma optického hardwaru. Kapacitné rozšírenie siete je preto možné pridaním ďalších vlnových dĺžok (t.j. redukovaním odstupu medzi jednotlivými vlnovými dĺžkami), nie je potrebný žiadny upgrade hardwaru ani riadenia PSR uzla. Teda siet využívajúca 100 vlnových dĺžok je riadená použitím tej istej riadiacej logiky ako siet využívajúca jednu vlnovú dĺžku. Keďže vlnové dĺžky v PSR uzle nie sú separované, presluch medzi susednými vlnovými dĺžkami sa tu nevyskytuje.

Výhody poskytované fotonickým slotovým smerovaním majú niekoľko obmedzení. Fotonické slotové smerovanie vyžaduje, aby sloty prichádzali do PSR uzlu synchronizované a pakety v slote boli usporiadané s požadovanou toleranciou. Jeden spôsob, ako dosiahnuť slotovú synchronizáciu, je požiadavka, aby dĺžka každého optického vlákna bola celočíselný násobok veľkosti fotonického slotu. Dĺžky vlákiens sa môžu prispôsobiť zapojením elementov s premenlivým oneskorením na vstupné porty každého uzla a časová synchronizácia sa dá zabezpečiť použitím synchronizačnej metódy založenej na princípe master-slave. Disperzia, ktorá zapríčinuje dilatáciu (roztiahnutie) fotonického slotu pri prenose cez dlhší úsek optického vlákna, môže byť kompenzovaná vložením časovej ochrany medzi nasledujúcimi slotmi, následkom čoho však je redukované využitie šírky pásma. Maximálne dĺžka medzi jednotlivými uzlami PSR siete je preto

limitovaná na niekoľko sto kilometrov, čo je postačujúce pre prístupové a MAN siete. Alternatívne môže byť navrhnutý prenosový systém s nulovou disperziou s použitím vláken s nenulovou disperziou na prekrytie vzdialenosí v kombinácii so sekciami tvorenými vláknami kompenzujúcimi disperziu rozmiestnenými v prepínacích uzloch a linkovými zosilňovačmi.

Na periférii siete je potrebné dodatočné spracovanie, pri ktorom pakety musia byť utriedené pre prenos v špecifickom fotonickom slote. Na vstupných portov PSR uzlov sa vyžaduje zaradenie oneskorovacích liniek, aby oneskorili prichádzajúce sloty, a tak poskytli riadiacej elektronike dostatočný čas na výber paketu, ktorý bude prenášaný v danom slote. Keďže pakety prenášané vo fotonickom slote sa môžu dostať do neželaného cieľa, na vyšších elektronických vrstvách musí byť zabezpečený bezpečnostný mechanizmus, podobný iným známym protokolom, napr. v Ethernete, Fiber Distributed Data Interface (FDDI). Existujú aj riešenia priamo na optickej vrstve, vyžadujú však prídavné optické komponenty.

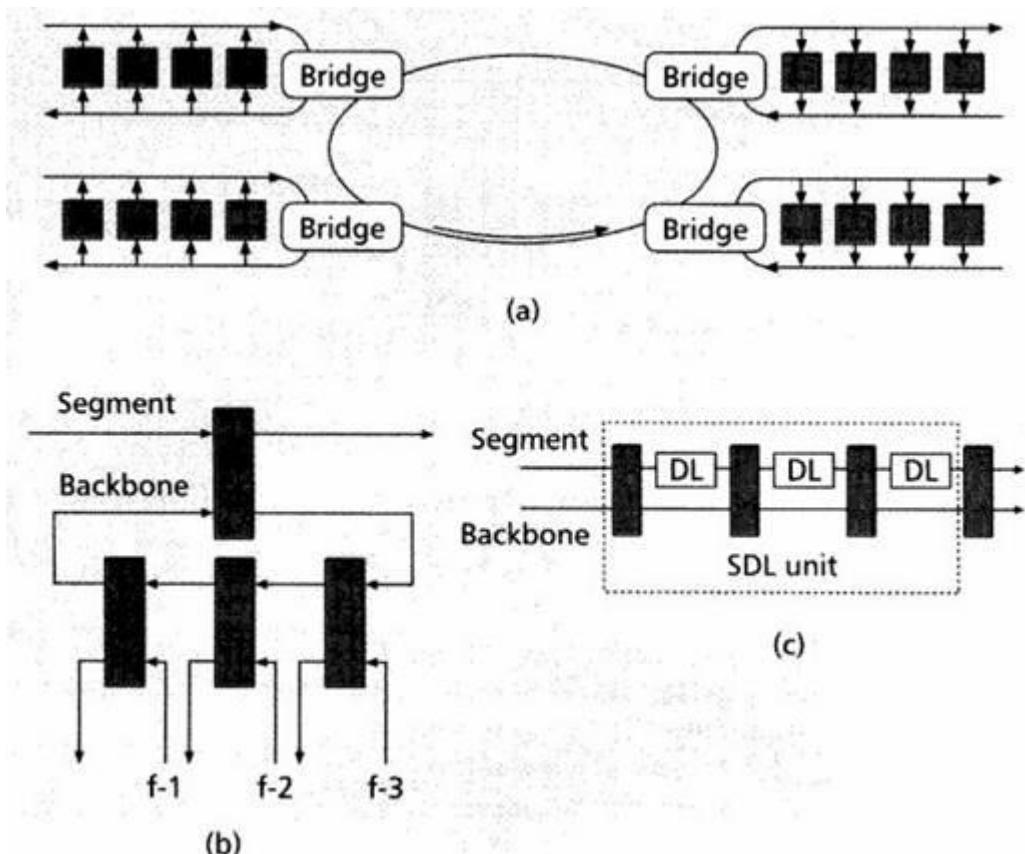
Škálovateľnosť PSR sietí je limitovaná niekoľkými faktormi, ktoré zahŕňajú získanie a udržiavanie slotovej synchronizácie, limitovanú degradáciu optického signálu, limitovanú zložitosť riadenia prenosu a garancia postačujúcej sieťovej prieplustnosti. Väčšie veľkosti siete možno dosiahnuť prepojením viacerých PSR podsietí, ktorých veľkosť je akceptovateľná s ohľadom na spomenuté limitujúce faktory. Prepojenia medzi jednotlivými PSR subsietami sa realizujú pomocou elektronických uzlov, ktoré izolujú každú PSR podsieť od ostatných podsietí.

4.6.4 Aplikácie PSR v prístupových sietiach s pravidelnou topológiou

Možnosti optického paketového prepínania vo WDM prístupových sietiach založených na princípe „broadcast-and-select“ sú obmedzené niektorými vlastnosťami. Kvôli konečnému počtu dostupných vlnových dĺžok a charakteru siete tento prístup limituje maximálny počet uzlov, ktoré môžu byť prepojené.

Premostenie viacerých podsietí je riešenie, ktoré poskytuje škálovateľnosť v prístupových a LAN sietiach, modularitu, bezpečnosť a zvýšenú sieťovú kapacitu. Existuje niekoľko spôsobov prepojenia. Prvým z nich je hierarchický prístup, kde chranticový jednosmerný okruh prepája niekoľko subsietí alebo sieťových segmentov (obr. 1a). Fotonické sloty sú zaplnené počas šírenia segmentom tak, že cielový segment pre všetky pakety umiestnené v slote je identický. Každý segment je pripojený k chranticovému okruhu cez PSR most (PSR bridge). Výsledná sieť poskytuje celo-optické paketové prepínanie medzi každou dvojicou uzlov v sieti. Táto architektúra pozostáva z priestorových prepínačov 2×2 a z elektroniky na riadenie prepínačov. Základná architektúra môže byť rožšírená tak, aby prepojila segment s chranticovým multivláknovým okruhom, ktorý

poskytuje zvýšenú kapacitu chrbticovej siete (obr. 1b), prípadne umožňuje optické bufferovanie (použitie vyrovnávacích pamäťí) pre riadenie zahľtenia výstupu, napr. jednotky SDL (switched delay line) (obr. 1c). Sú možné nasledujúce dve realizácie: Zbernicové segmenty s fixným multiplexovaním cieľov jednotlivých slotov, prípadne okruhové segmenty so štatistickým multiplexovaním cieľov jednotlivých slotov.



Obr č. 1: Spôsoby premostenia PSR podsietí

4.6.5 Aplikácie PSR v metropolitných sietach s nepravidelnou topológiou

V tomto prípade sa uvažujú siete s topológiou, kde uzly sú prepojené prostredníctvom optických liniek bez žiadnych obmedzení na topologické rozloženie alebo stupeň siete. Klúčový komponent pre takúto topológiu je PSR prepínač (PSR switch).

PSR prepínač o veľkosti $N \times N$ umožňuje prepínanie fotonických slotov prichádzajúcich na ľubovoľný z N vstupných portov na ľubovoľný z N výstupných portov. Príklad realizácie PSR prepínača je centrálny prepínač, ktorý je zostavený z $N \times N$ reverznej Banyan siete, ktorá pozostáva zo širokopásmových optických prepínačov veľkosti 2×2 . Navyše okrem priestorového prepínania umožňuje PSR prepínač veľkosti $N \times N$ prepnúť fotonické sloty na ľubovoľnú skupinu výstupných

portov (kopírovanie slotov). Keď sú prichádzajúce fotonické sloty prepínané súčasne na rovnaký výstupný port, sú združované tak, aby vytvorili jeden výstupný slot (zlučovanie slotov). PSR prepínače možno realizovať buď na základe fixného slotového multiplexovania, prípadne na základe štatistického slotového multiplexovania.

4.7 Signalizácia a rezervácia zdrojov

Na zostavenie optickej cesty je potrebný signalizačný protokol, slúžiaci na výmenu informácií medzi uzlami a rezerváciu zdrojov na zostavovanej ceste. Signalizačné protokoly môžeme rozdeliť do skupín podľa toho, ako budú zdroje rezervované: paralelné, hop-by-hop s doprednou rezerváciou alebo hop-by-hop so spätnou rezerváciou.

4.7.1 Paralelná rezervácia

Paralelná rezervácia sa využíva v prípade, ak každý uzol pozná globálnu informáciu o sieti a vie si vypočítať najvhodnejšiu cestu a vlnovú dĺžku do cieľa. Zdrojový uzol sa snaží zarezervovať jednotlivé linky na danej vlnovej dĺžke vo všetkých uzloch ležiacich na zostavovanej ceste. Zdrojový uzol rozošle riadiace pakety do všetkých uzlov ležiacich na danej ceste. Tieto sa snažia zarezervovať výstupnú linku na danej vlnovej dĺžke a informujú o tom zdrojový uzol zaslaním potvrdenia. Ak zdrojový uzol dostane od všetkých uzlov v ceste pozitívne potvrdenie, začne komunikovať. Výhodou takejto rezervácie je, že prebieha paralelne vo všetkých uzloch v ceste. Nevýhodou je potreba poznať globálnu informáciu o sieti.

4.7.2 Hop-by-hop rezervácia

Pri rezervácii hop-by-hop sa riadiaca správa posúva postupne zvolenou cestou vždy o jeden skok za časovú jednotku. V každom uzle sa riadiaca správa najprv spracuje, potom sa pošle do ďalšieho uzla. Po dosiahnutí cieľového uzla sa posiela späťne správa zdrojovému uzlu.

4.7.3 Dopredná rezervácia

V prípade, ak má zdrojový uzol globálnu informáciu o sieti, tak vyšle riadiacu správu s požiadavkou, na ktorú vlnovej dĺžke chce cestu zostaviť do nasledujúceho uzla v ceste. Táto správa sa šíri danou cestou až do cieľového uzla. V prípade že zdrojový uzol nepozná globálny stav siete, tak vyšle riadiacu správu s požiadavkou na ktorú, náhodne vybranej, vlnovej dĺžke chce cestu zostaviť do nasledujúceho uzla v ceste. Tento sa snaží rezervovať požadovanú vlnovú dĺžku a späťne o tom informuje zdrojový uzol. Ak sa podarí rezervácia vlnovej dĺžky na danej výstupnej linke, tak riadiacu správu pošle do nasledujúceho uzla. Týmto spôsobom však nie je zaručené, že daná vlnová dĺžka bude k dispozícii na celej ceste. V prípade, že nie je voľná, tak zdroj volí inú vlnovú dĺžku a znova žiada o vytvorenie spojenia. Na urýchlenie vytvorenie spojenia sa dá využiť agresívna rezervácia spojenia. Je založená na tom, že každý uzol v ceste po prijatí riadiacej správy rezervuje všetky voľné vlnové dĺžky a po dosiahnutí cieľa sa vyberie jedna vyhovujúca pre dané spojenie a ostatné sa uvoľnia. Nevýhodou agresívnej rezervácie je, že počas vytvárania spojenia vzniká krátkodobá blokáda v jednotlivých uzloch v zostavovanej ceste.

4.7.4 Spätná rezervácia

Pri spätej rezervácii zdrojový uzol vyšle požiadavku na vytvorenie spojenia. Táto sa šíri sietou smerom k cieľu. Postupne preskakuje medzi uzlami v danej ceste a zbiera informácie o voľných vlnových dĺžkach na výstupných linkách každého uzla v danej ceste. Po príchode požiadavky do cieľového uzla tento vie o voľných zdrojoch na danej ceste a vyberie jednu vlnovú dĺžku. Následne späťne pošle riadiacu správu s informáciou o vybranej vlnovej dĺžke. Riadiaca správa sa späťne šíri smerom k zdrojovému uzlu a jednotlivé uzly v danej ceste rezervujú danú vlnovú dĺžku. Cesta sa nemusí zostaviť v prípade, ak sa vytvára naraz viaceré spojení a niektoré rezervuje danú vlnovú dĺžku skôr.

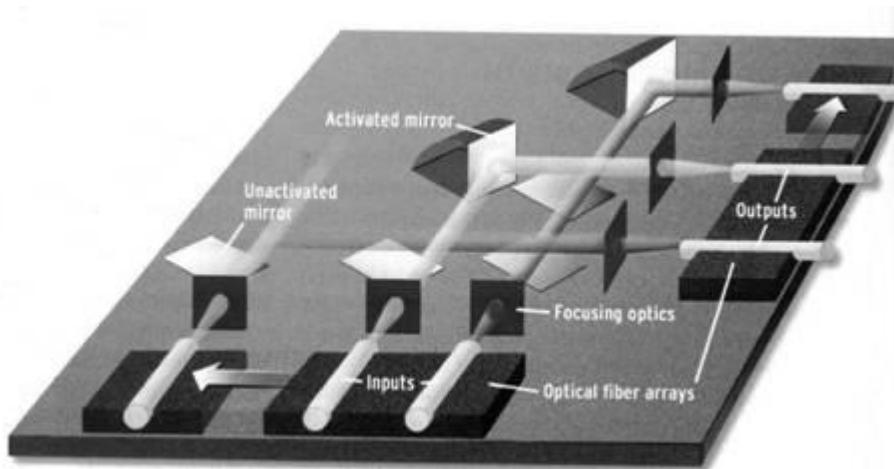
4.8 Záver

Zostavovanie a rušenie spojení vo WDM sietach potrebuje mať implementované algoritmy na riadenie a menežovanie danej siete. Tieto algoritmy zabezpečujú pridelovanie vlnových dĺžok, výber najvhodnejšej cesty sietou a zabezpečujú výmenu riadiacich informácií. V prípade dynamickej alokácie spojení je cieľom minimalizovať blokádu v danej sieti. V prípade ak poznáme globálnu informáciu o sieti, tak pridelenie vlnových dĺžok a určenie jednotlivých ciest pre dané spojenia vieme urobiť skoro optimálne. Nevýhodou je problém s aktualizovaním informácie o sieti. Zníženie potrieb na signalizáciu dosiahneme využitím algoritmov, ktoré nie sú založené na globálnej informácii. Nevýhodou je pri týchto algoritmoch sú dlhšie časové nároky na zostavenie spojenia, prípadne vzniká krátkodobá blokáda, ak použijeme agresívnu doprednú rezerváciu.

5 MEMS

5.1 Mikroelektromechanické systémy (MEMS)

Mikroelektromechanické systémy predstavujú malé mechanické zariadenia vytvorené na báze polovodičových technológií, ktoré poskytujú malé rozmery, presnosť, spoľahlivosť a nízke náklady. Existujú v rôznych konfiguráciách. Najjednoduchšie z nich využívajú samostatné mikroskopické pohyblivé zrkadlá na smerovanie svetelného lúča. Implementácia môže byť realizovaná dvoma spôsobmi: odkrývaním a zakrývaním cesty svetelného lúča prostredníctvom pohyblivého pevne orientovaného zrkadla, alebo otáčaním výkyvného zrkadla medzi dvoma krajnými polohami. Zložitejšie zariadenia používajú dvojrozmerné pole takýchto zrkadiel sformovaných do matice, kde riadky tvoria vstupy a stĺpce výstupy (obr. č. 1). Bežne sú **implementované** prepínače so 8×8 portami, max. so 64×64 portami. Kontrola polohy zrkadiel je realizovaná digitálne a nevyžaduje vysokú presnosť, lebo zrkadlá nadobúdajú len dve krajné polohy.



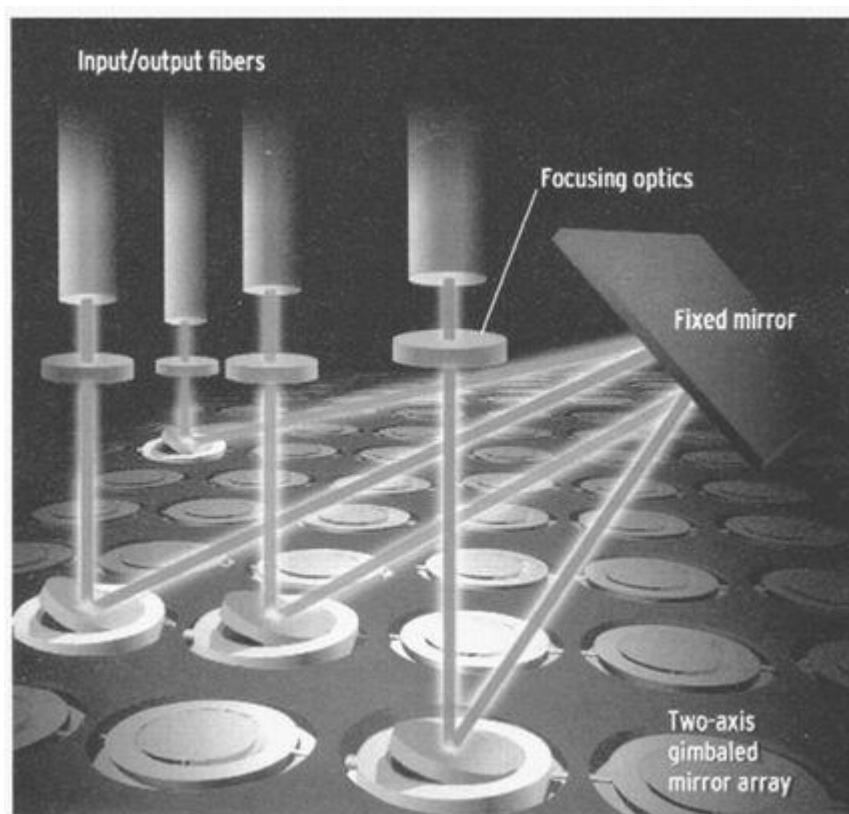
Obr. č. 1 Matica zrkadiel založená na MEMS technológií

Uvedené riešenie má výhodu v nízkych nákladoch na stredne veľké maticové prepínače, nakoľko celé spínacie pole je v jednej rovine. Nevýhodou je ale obmedzená škálovateľnosť, zapríčinená rozličnými dĺžkami optických ciest v spínačoch. Tie môžu byť vedené voľným prostredím alebo vlnovodmi, pričom kombinácia MEMS a vlnovodov predstavuje perspektívne riešenie pre budúcu generáciu stredne veľkých prepínačov.

Podstatne zložitejšie sú 3-D (Obr. č. 2) prepínače vytvorené použitím dvojosových zrkadiel. Tie vyžadujú extrémne presné analógové riadenie na nastavenie optických lúčov, ktoré musia byť

smerované v dvoch rovinách, na konkrétnu strednú polohu a nie len na nastavenie dvoch krajných bodov, ako tomu bolo v predchádzajúcim prípade. Škálovateľnosť takýchto prepínačov je omnoho lepšia, nakoľko počet potrebných zrkadiel je rovný počtu všetkých portov. V súčasnosti sa zdá, že sú dosiahnutelné veľkosti cez 4096×4096 portov. Ďalším faktorom podporujúcim škálovanie je fakt, že cesta optického lúča závisí len minimálne od konkrétnych spájaných portov, čo vedie k rovnomernému prepájaniu prepínača. Obmedzujúcim faktorom je ale priemer zrkadiel a tiež ich maximálny stupeň naklonenia.

Aby sa predišlo rozsiahlym stratám, zrkadlá by mali byť približne 50 krát väčšie než priemer lúča a maximálny stupeň naklonenia je závislý od metódy výstavby prepínača a spôsobu ovládania zrkadiel.



Obr. č. 2 MEMS prepínače s dvojosovými zrkadlami

Ďalšou výzvou je elektrické riadenie zrkadiel, nakoľko každé z nich vyžaduje najmenej 4 elektrické pripojenia. Tým pádom tisíce elektrických spojov musí byť vyvedených von z čipu, pričom adresovacia, riadiaca a pohonná elektronika musí byť integrovaná pod zrkadlami. Integrácia sa musí vysporiadať s potrebou ovládania vysokých napäťí v analógových obvodoch prostredníctvom riadiacich napäťí pohybujúcich sa rádovo v milivoltoch.

V súčasnej dobe sú 3-D prepínače nákladným riešením pre nízkokapacitné prepínače a ich aplikáciu vo veľkých prepínacích poliach bráni nedoriešenie spomínaných technických problémov. Preto

neboli doteraz v telekomunikačnej praxi overené ich vlastnosti aj keď v iných priemyselných a spotrebnych oblastiach sa ukázala vysoká spoľahlivosť bezkontaktných MEMS systémov.

Okrem vyššie uvedených sa v súčasnej dobe venuje rozsiahla pozornosť MEMS založených na pohyblivých vláknach, ohybných vlnovodoch, posuvných klapkách, zakrivených zrkadlách. Každé z takýchto riešení má niektoré jedinečné vlastnosti, ktoré by sa dali využiť v malých alebo stredne veľkých prepínačoch.

5.2 Optické prepínanie založené na systémoch MEMS

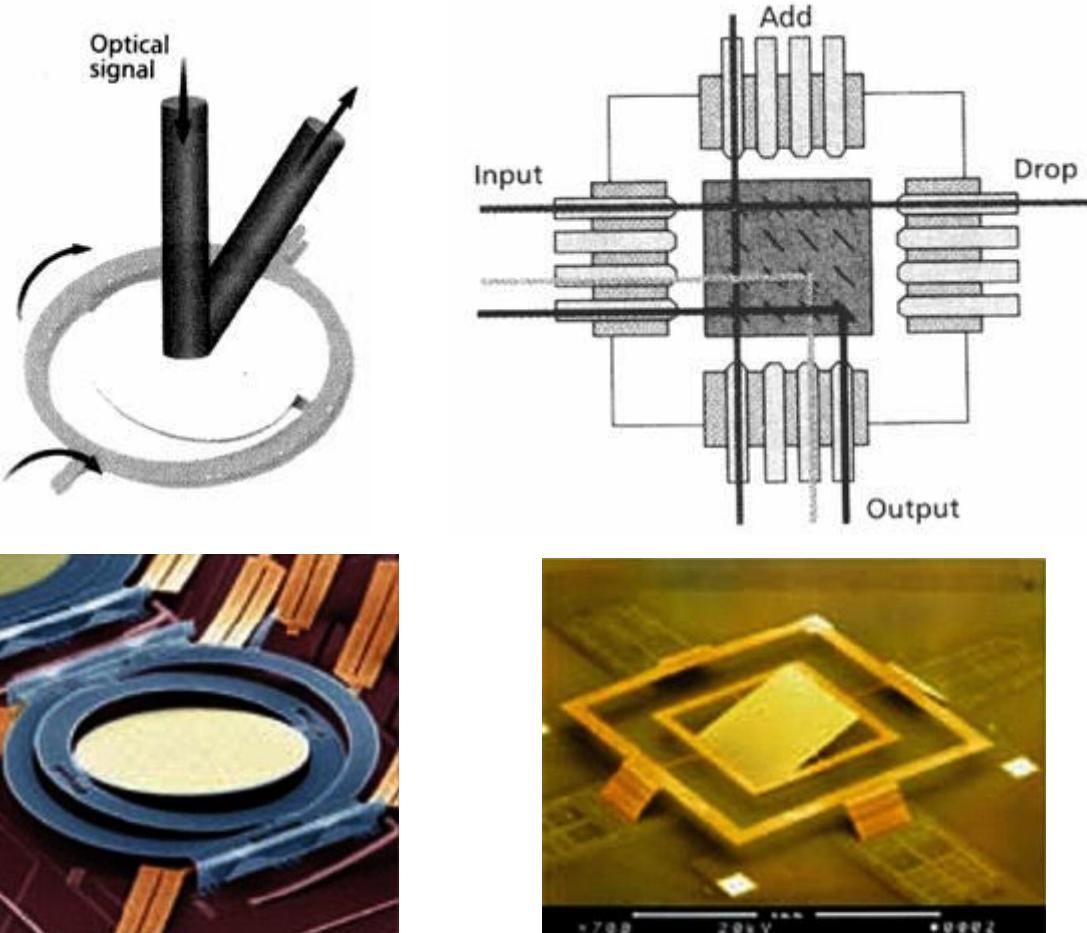
Mikro-elektromechanické systémy (MEMS) sú najperspektívnejšia technológia pre optické prepájanie, nakoľko umožňujú prepínanie vysokého počtu vstupných a výstupných portov s najnižšími nákladmi na jeden port. Fyzikálne sú to mechanické integrované obvody, v ktorých energia požadovaná na pohyb jednotlivých častí môže byť elektrostatického, elektromagnetického alebo termálneho pôvodu. Systémy sú vyrábané rovnakou technológiou ako polovodičové súčiastky s využitím materiálov s výbornými mechanickými a elektrickými vlastnosťami (Si, SiO_x, SiN_x). Charakteristickými vlastnosťami MEMS sú vysoká rýchlosť, škálovateľnosť, nízka energetická náročnosť, nízke straty, zanedbateľný presluch a polarizačné efekty a nezávislosť vlnovej dĺžky od bitovej rýchlosťi. V tejto oblasti možno pozorovať dva prístupy k architektúre MEMS: dvojrozmerné a trojrozmerné (2D a 3D) systémy MEMS.

5.3 Dvojrozmerné polia MEMS

V tejto konfigurácii je použité dvojrozmerné pole N × N zrkadiel (obr. 1), ktoré prepájajú optický signál z lineárneho poľa N optických vláken na druhé pole N vláken na príľahlej strane dvojrozmerného poľa (obr. 2). Konkrétnie zrkadlo na pozícii (i,j) môže presmerovať signál z i-teho vstupného vlákna na j-te výstupné vlákno. Konfigurácia umožnuje aj prechod signálu cez maticu bez presmerovania zrkadlom. Táto prídavná funkciuálnita môže byť využitá na pridanie, prípadne vybranie optických kanálov.

Riadenie matice je binárne, táto jednoduchosť má však nevýhodu v optických stratách systému. S rastúcim počtom vstupných a výstupných portov lineárne rastie dĺžka cesty a zvyšuje

optické straty systému, z čoho vyplýva obmedzenie počtu portov na 32 vstupných a 32 výstupných portov.

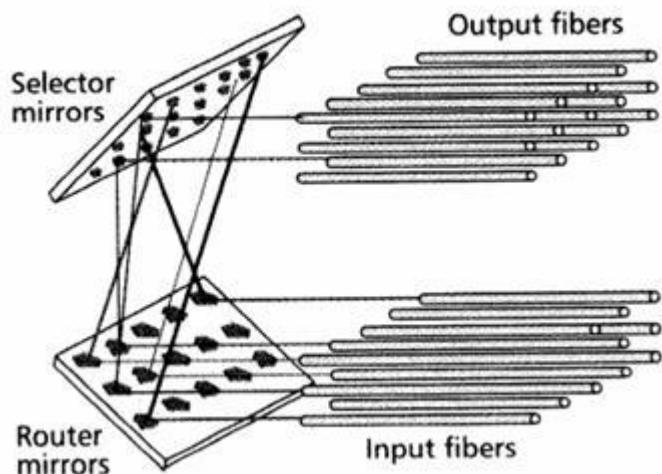


Obr. č. 1: Zrkadlo systému MEMS

Obr. č. 2: Dvojrozmerný (2D) MEMS prepínač

5.4 Trojrozmerné polia MEMS

Konfigurácia trojrozmerných polí odstraňuje hlavnú nevýhodu dvojrozmerných polí – obmedzený počet vstupných a výstupných portov. Táto architektúra obsahuje samostatné zrkadlo pre každý port (obr. 1). Spojovacia cesta je teda tvorená dvomi zrkadlami, ktoré nezávisle od seba presmerujú optický signál zo vstupného portu na výstupný port. Riadenie každého zrkadla je analógové, pohyb zrkadla je možný v 2 osiach. Dĺžka optickej cesty rastie s \sqrt{N} namiesto N, táto architektúra je teda vhodná pre vysoký počet portov, pričom pri niekoľkých tisíc portov sa dosahujú optické straty na úrovni menšej ako 10 dB. Nevýhoda tejto realizácie je potreba spätnoväzobného systému na udržiavanie pozície zrkadiel kvôli stabilizácií vložených strát pri externých rušivých vplyvoch.

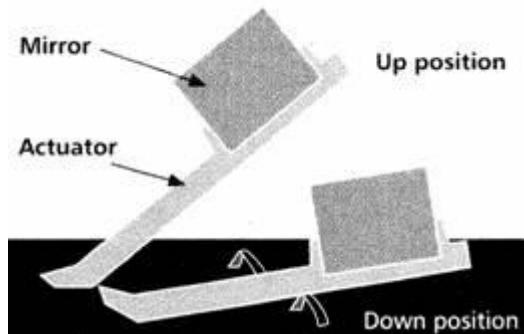


Obr. č. 1: Trojrozmerný (3D) MEMS prepínač

5.5 Riešenie dvojrozmerných polí MEMS

Dvojrozmerné odrazové zrkadlo možno rozdeliť na 3 základné elementy: samotné zrkadlo, mechanické podporné systémy a akčný člen. Základnými parametrami spínacej matice je maximálny počet portov (závislý od uhlu natočenia zrkadla), spínací čas (závisí od rýchlosťi reakcie zrkadla), vložené straty (závislé od veľkosti zrkadla, odrazivosti a maximálneho uhlu natočenia zrkadla) a výkonovej straty (závisí od energie potrebnej na riadenie zrkadla a akčného člena). Pre 1000-portovú spínaciu maticu každé zrkadlo vyžaduje rozmer rádovo 1 mm, polomer zakrivenia zrkadla (*radius of curvature - ROC*) by mal byť väčší ako niekoľko desiatok centimetrov. Požadovaná reflektivita (odrazivosť) zrkadla je minimálne 97 %. Potrebný uhol natočenia sa pohybuje od niekoľkých stupňov do $\pm 10^\circ$.

Pre potreby MEMS je najvhodnejší elektrostatický akčný člen (obr. 1). Vo vypnutom stave je uhol voči substrátu veľmi malý. Po privedení napäťia medzi akčný člen a elektródu umiestnenú na substráte, elektrostatická sila spôsobí pohyb akčného člena, čím sa uhol zväčší na 90° . Počas pohybu sa uhol zrkadla voči substrátu nemení a zostáva kolmý na substrát. Tento spôsob vyžaduje príkon len rádovo niekoľko μW pre prepájaciu maticu 16×16 .



Obr. č. 1: MEMS zrkadlo s elektrostatickým akčným členom

Prepojovacie pole obsahuje taktiež polia tzv. kolinátorov (*collimators*), ktorých účelom je transformovať optický mód jednomódového optického vlákna na svetelný lúč s požadovaným priemerom.

5.6 Výkonnosť dvojrozumných polí MEMS

Kľúčovými parametrami výkonnosti polí MEMS sú vložené straty, hodnota presluchov, spätný odraz, straty závislé od polarizácie, prepínací čas a spätné straty. Vložené straty závisia od dĺžky optickej cesty a nepresnosťí pri zarovnaní zrkadiel a kolinátorov. Kritické sú v prípade, keď každá prídavná strata zvyšuje celkové náklady systému, nakoľko sú potrebné prídavné optické zosilňovače, senzitívnejšie prijímače a je potrebná častejšia regenerácia signálu. Nízke hodnoty straty závislej od polarizácie (*polarization dependent loss - PDL*) sú požadované kvôli minimalizácii požiadaviek na monitoring a dynamickú kompenzáciu.

Prepínací čas je definovaný ako čas, ktorý uplynie od dodania požiadavky na zmenu stavu spínača po okamžik, kedy vložená strata prepojenej cesty dosiahne 90 % finálnej hodnoty. Tento čas zahŕňa aj čas potrebný na nastavenie zrkadla do príslušnej pozície. Opakovateľnosť sa definuje ako rozdiel medzi maximálnou a minimálnou hodnotou vloženej straty optickej cesty, keď príslušné zrkadro prejde nasledujúcim prepínacím cyklom.

Pre pole 8×8 maximálna hodnota vložených strát (pre všetky možné spojovacie cesty) sa pohybuje na úrovni 1,7 dB, pre pole 16×16 na úrovni 3,1 dB. Optický presluch a spätná odrazivosť je na úrovni menší ako -50 dB. Typický prepínací čas je asi 7 ms.

5.7 Spoločnosť systémov MEMS

Spoľahlivosť zariadení MEMS silne závisí od návrhu štruktúry zariadenia, ako aj od technológií použitých pri ich výrobe. Možno identifikovať niekoľko potenciálnych mechanizmov, ktoré zapríčinujú zlyhanie MEMS systému: mechanická opotrebovanosť, mechanické namáhanie, dielektrický prieraz, povrchová oxidácia, migrácia materiálu, strata pružnosti, prípadne kontaminácia rôznymi cudzorodými látkami. Niektoré z týchto mechanizmov môžu byť eliminované vhodným návrhom systémov, alebo umiestnením týchto zariadení vo vhodných podmienkach, zatiaľ čo iné mechanizmy sa musia eliminovať už v procese výroby. Okrem vlastného silikónového čipu MEMS majú veľký dopad na spoľahlivosť systému aj prídavné zariadenia – optické kolimátory. Pre vysokú spoľahlivosť je teda kritický vhodný návrh systému spolu so správnou voľbou materiálov.

Statická spoľahlivosť digitálnych MEMS prepínačov vyjadruje schopnosť prepínača zmeniť stav po tom, čo prepínač zotrval dlhší čas v rovnakom stave (napr. situácia, ktorá môže nastať pri záložných optických prepínačoch). Dynamická spoľahlivosť (trvanlivosť) prepínačov MEMS vyjadruje schopnosť prepínača vykonať mnoho cyklov bez náznakov degradácie. Statická aj dynamická spoľahlivosť taktiež silne závisí od návrhu štruktúry MEMS.

V mechanických prepínačoch sa môže vyskytnúť chyba, pri ktorej sa vytvorí parazitická adhézna sila, ktorá bráni pohybu akčného člena. Adhézne sily môžu byť zapríčinené rôznymi mechanizmami, vrátane kontamináciou cudzími látkami, vlhkostou, van der Waalsovými príťažlivými silami, prípadne mechanickým trením jednotlivých súčastí. V dvojrozmerných MEMS prepínačoch sa takéto chyby dajú eliminovať tým, že kontaktná plocha sa zredukuje na absolútne minimum a taktiež dodržaním prísnych podmienok pri výrobe.

Statická spoľahlivosť opísaných systémov sa verifikovala v priebehu jedného roka na 4000 spojovacích elementoch. Dosiahla sa spoľahlivosť, ktorá sa dá vyjadriť výsledkom < 37 FIT (1 FIT = 1 zlyhanie počas 10^9 prevádzkových hodín). Pre dynamickú spoľahlivosť sa vyžaduje 10^6 bezchybných prepínacích cyklov (ekvivalentných s cyklom každých 10 minút počas períody 20 rokov).

Aby bola táto technológia využiteľná v telekomunikačných systémoch, okrem statickej a dynamickej spoľahlivosti musia byť vykonané ďalšie testy. Ako referenčné testy sa používajú požiadavky stanovené v *Telcordia Generic Requirements*. Tieto testy sú vhodné na demonštrovanie

robustnosti zariadenia za operačných podmienok. Výsledky testov potvrdzujú, že zariadenia MEMS splňajú požiadavky kladené na telekomunikačné systémy.

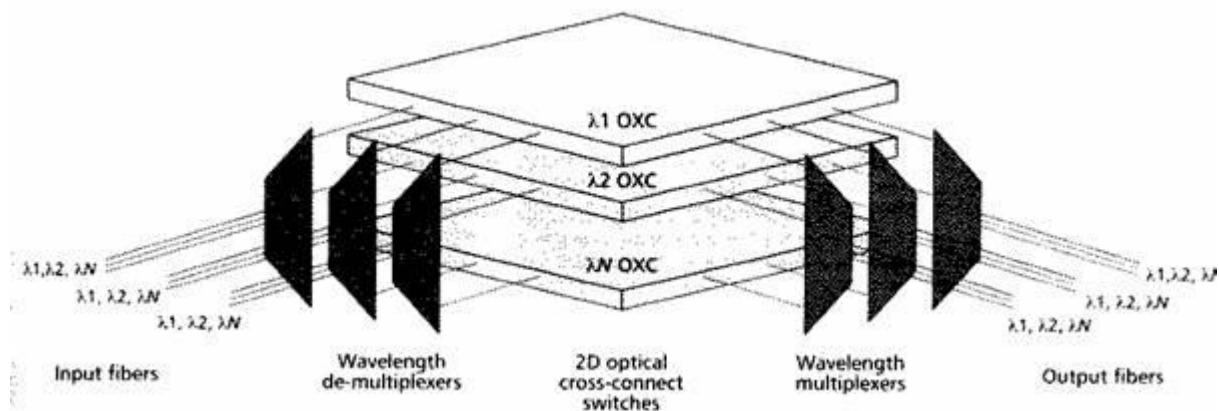
5.8 Aplikácie systémov MEMS v optických prepínačoch

Optické prepínače (OXC) sú základnými elementami pre prepínanie optických signálov v optických sietiach a možno ich rozdeliť do dvoch kategórií: vláknovo prepínané OXC a OXC založené na vlnovodlžkovom výbere.

Vláknovo prepínané OXC (*Fiber Switch Crossconnects - FSXC*) umožňujú prepínanie signálov prenášaných cez optické vlákna bez rozloženia signálu do rôznych vlnových dĺžok. Tento typ OXC prepája celé zväzky signálov a môže byť využitý pre ochranné a smerovacie aplikácie, napr zaradením dvojrozmerných optických prepínačov do closovej siete môžu byť vytvárané veľkorozmerné OXC až do veľkosti 512×512 portov.

Optické prepínače založené na vlnovodlžkovom výbere (*Wavelength-Selective Crossconnect - WSCX*) umožňuje prepínanie vybraných vlnových dĺžok z jedného optického vlákna na druhé (obr. 1). V tejto aplikácii je prepínač kombinovaný s elementami, ktoré vyberajú jednotlivé vlnové dĺžky, ktoré demultiplexujú prichádzajúce optické signály. Každá vlnová dĺžka je prepínaná v osobitnom prepínači $N \times N$. Tento typ prepínača umožňuje zabezpečenie a riadenie služieb založených na určitej vlnovej dĺžke, a tým aj väčšiu flexibilitu než FSCX.

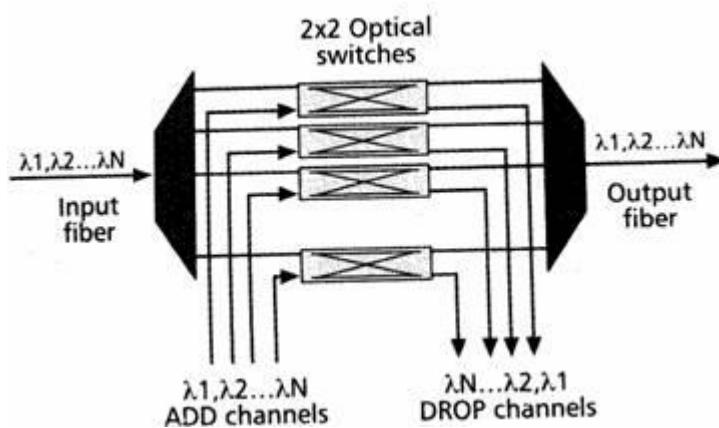
WSCX môžu byť škálované priamočiarym spôsobom: vždy, keď je pridaná nová vlnová dĺžka, je pridaný nový prepínač $N \times N$, to znamená rozšírenie optického prepínača. Optické prepínače veľkosti 640×640 môžu byť dimenzované na konfiguráciu so 40 vlnovými dĺžkami a 16 vstupných optických vlákiem.



Obr. č. 1: Optický prepínač založený na vlnovodlžkovom výbere (WSCX)

Okrem optických prepínačov sa platforma 2D MEMS prepínačov môže využiť na získanie iných funkcionalít rozdielnou úpravou rozmiestnenia zrkadiel a vhodným použitím add-drop portov. Môžu byť vytvorené funkcionality ako napr. $N \times M$, $2 \times N$, $1 \times N$, polia 1×2 , prípadne polia 2×2 . Aplikácie uvedených možností sú v zabezpečení, monitorovaní a multiplexovaní add-drop založenom na vlnovej dĺžke.

Rekonfigurovateľný vlnovodlžkový add-drop multiplexor (obr. 2) je dôležitý prvok v uzloch optických sietí. Skladá sa z vlnovodlžkového demultiplexera rozdeľujúci vlnovodlžkové signály z jedného vstupného vlákna na iné vlákna. Dvojrozmerné pole 2×2 prepínačov umožňuje vyberanie jedného alebo viacerých označených vlnovodlžkových signálov. V tom istom čase môže byť vložený nový signál do dátového toku. Signály sú následne smerované naspäť do vlnovodlžkového multiplexora a združený do výstupného vlákna.

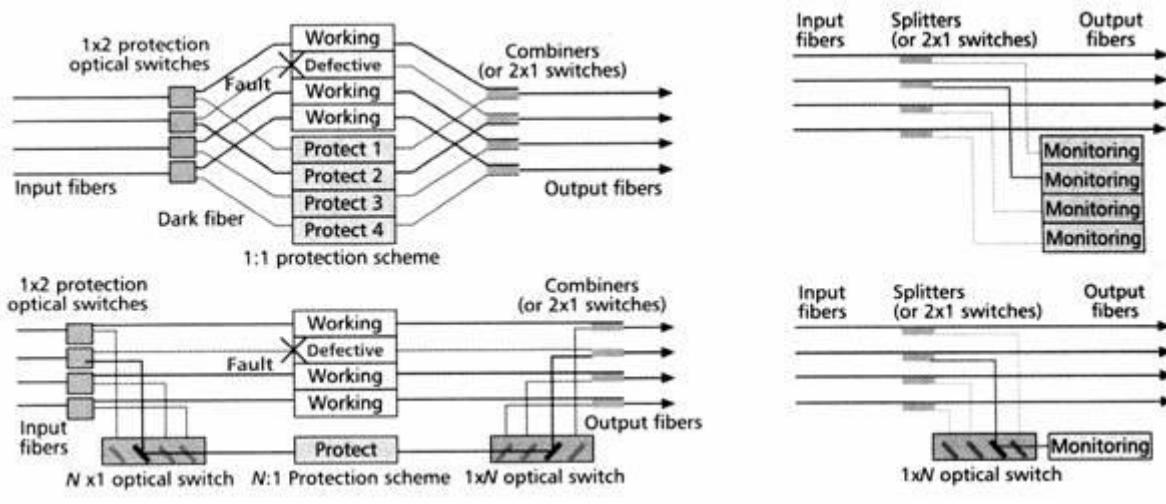


Obr. č. 2: Rekonfigurovateľný vlnovodlžkový add-drop multiplexor

Spoľahlivosť a dostupnosť optických sietí je ich veľmi dôležitá vlastnosť, avšak v optických sietiach je často zabudovaná istá redundancia. Pre určité kľúčové optické sietové prvky je použitá redundancia 1:1, takže pre každý element existuje korešpondujúci záložný element. Prepnutie medzi chybným sietovým prvkom a záložným prvkom možno dosiahnuť použitím poľa 1×2

prepínačov, prípadne poľa 1×2 rozdeľovačov (*splitters*), táto možnosť však vykazuje vyššie straty. Jedna jednotka môže redukovať náklady implementovaním N:1 záložných jednotiek, to znamená, že N pracovných jednotiek zdieľajú jedinú záložnú jednotku (obr. 3a). Na tomto obrázku sú znázornené dva prepínače $1 \times N$, ktoré smerujú signál cez záložné jednotky.

Ďalšou aplikáciou prepínačov $1 \times N$ je zdieľaný monitoring siete. Charakteristické činnosti optickej siete a optických elementov musia byť pravidelne verifikované, čo vyžaduje odbočenie optického signálu z optickej linky a nasmerovanie o diagnostického zariadenia, v ktorom sú testované polia 1×2 prepínačov, prípadne polia 1×2 rozdeľovačov. Použitím poľa $N \times 1$ optických prepínačov počet nákladných testovacích zariadení môže byť zredukovaný na jedno zariadenie (obr. 3b).



Obr. č. 5.2.7: Aplikácie prepínačov $1 \times N$:

a) zdieľané zálohovanie

b) zdieľaný monitoring siete

6 MPLS

6.1 Úvod do MPLS

Protokol MPLS bol primárne vyvinutý pre siete, ktoré používajú IP protokol. Hlavným účelom MPLS protokolu je možnosť implementovania virtuálnych spojení, ktoré sa označujú ako LSPs (Link switched paths). Pakety asociované k priradenému LSP sú identifikované pomocou ich označenia (label), ktoré sú väčšinou sietí prenášané v hlavičke. Aplikácie založené na MPLS zahŕňajú riadenie prevádzky, viruálne privátne spojenia (VPNs), kvalitu spojenia (QoS) pre rôzne druhy služieb a obnovu v IP vrstve.

Smerovací router (LSR – label switcher router) používa smerovaci tabuľku a značenie v každom pakete na prepínanie paketov v rámci jednotlivých virtuálnych okruhov. Na vytvorenie LSP každý LSR musí mať schopnosť upravovať svoje smerovacie tabuľky. Prichádzajúce pakety sú zo zdrojového portu LSP mapované podľa ich značenia na daný výstupný port.

Signálizáčné protokoly sú používané na distribuovanie informácií o vytvorení LSP. Konkrétnie, MPLS používa RSVP protokol s jeho rozšíreniami a LDP protokol aj s jeho rozšíreniami. Tieto protokoly umožňujú vytvoriť LSP vypočítaním cesty zo zdrojového uzla a explicitným routovaním (posielanie *setup* paketov) cez jednotlivé uzly až k cieľovému uzlu.

6.2 Možnosť aplikácie MPLS v optických sietach

MPL(ambda)S všeobecne zahrňuje nasledujúce funkcie:

- Návestia v MPLS môžu byť vnímané ako analogové v optickom kanály v optických sieťach.
- Každý krížový smerovač má procesor, ktorý prenáša správy cez signalizačnú sieť medzi susediacimi krížovými prepínačmi. MLPS vtedy pridáva prídavné informácie internému protokolu OSPF na rozšírenie informácií o topológii optickej siete a možnostiach jednotlivých zdrojov.
- Smerovacie algoritmy používajú informácie o stave siete na vytvorenie nových optických spojení. Ak sa cesta už vyberie, potom MLPS použije jednoduché správy na vybudovanie explicitnej cesty (pomocou RSVP ale LDP protokolu). Pomocu týchto správ sa nastavia krížové smerovače na celej ceste.

V prípade poškodenia optickej siete sa uvažuje s tromi najdôležitejšími klúčovými kategóriami:

1. obnovovací proces (po vzniknutí chyby)
 - a. okamžité presmerovania obojsmerných spojení v optickej sieti
 - b. normalizácia siete po odstránení chyby
2. CAC (Connection Admission Control) – kontrola prevádzky
 - a. výber obnovovacích ciest rozličných od ciest používaných na služby
 - b. stanovanie podmienok, kedy má objektívne nastať proces obnovenia
3. plánovanie kapacity

Obnovenie optickej siete

Vo všeobecnosti existuje veľa spôsobov prístupu k obnove optickej siete. V tejto oblasti sa v súčasnosti snaží vytvoriť určitý spoločný štandard. V tabuľke 1 sú 4 kategórie obnovovacích metód v optických sieťach rozdelené podľa toho, ako vykonávajú 3 základné funkcie: či pred vznikom chyby alebo až po vzniku chyby.

1. vypočítanie cesty (sekvencia OXCC)
2. vypočítanie prevodov porušených spojení v kanáli po vznikutej chybe
3. Krízové prepínané kanály popri obnovenej chybe.

kategória	výpočet cesty	pripradenie kanála	krízové prepínanie
1	pred	Pred	pred
2	pred	pred	po
3	pred	po	po
4	po	po	po

Tabuľka 1: kategórie obnovovacích metód

Pre kategóriu 1 – každé vytvorené spojenie má samostatné spojenie pre službu a obnovovacie spojenie. V prípade vzniku poruchy, obnovenie optického spojenia jednoducho prepojí krízový prepínač tak, že odpojí porušenú cestu a signál prepojí na obnovovaciu cestu zo zdroja do cieľa. Toto je tzv. 1+1 ochrana.

Pre kategóriu 2-4 nepoužívané kanály (t. j. nepoužité pre cesty nesúce služby) musia byť rezervované pre zabezpečenie adekvátnej obnovovacej kapacity, ktorá bude prístupná pri vzniku chyby. Tieto rezervované kanály môžu byť zdieľané medzi viacnásobnými obnovovacími cestami, ale nesmú ich simultánne požadovať.

6.3 Výber cesty vs. výber kanála

Optická transportná sieť multiplexuje viacero optických signálov do spoločného vlákna – tzv. kanála. Spojenie v optickej sieti je zabezpečované krížovým prepínaním kanálov vnútri jednotlivých OTS pozdĺž celej spojovacej cesty. Tento fakt predpokladá, že nulová šírka pásma kanála nemôže byť alokovaná pre neskôršie použitie. V IP sieťach založených na MPLS LSPs môže byť spojenie vytvorené tak, že ak nie sú žiadne pakety prepínané v linke pozdĺž cesty, nespotrebuje sa žiadna šírka pásma. Prepínanie paketov do týchto preddefinovaných ciest je na ich koncoch jednoduché a rýchle. Toto je zásadný rozdiel medzi IP a optickými sieťami a má veľmi rozhodujúci vplyv pri rozhodovaní o alokovaní obnovovacích kapacít.

Iný unikátny aspekt kanálového výberu v optickej sieti je, či kanál z jedného OTS môže byť priradený kanálu s odlišnou vlnovo dĺžkou v susednom OTS (vlnovo dĺžkou konverzia). Ak vlnovo dĺžková konverzia nie je dostupná vnútri OXC, tak spoločná vlnová dĺžka musí byť alokovaná na každej linke pozdĺž celého spojenia, čo môže spôsobiť, že proces výberu kanála nemusí byť až tak triviálny.

6.4 Obojsmerne vs. jednosmerné vytváranie spojenia

Väčšina paketovo orientovaných spojení sú v podstate jednosmerné. Napriek tomu, WDM terminály, ktorého pôvodnou úlohou bolo prenášať vysoko rýchlosťné linky medzi SONET/SDH zariadeniami, boli navrhnuté na obojsmerné spojenia. Každý smer má zvyčajne priradené rovnaké číslo kanála v optickom transportnom systéme (OTS) pre každý smer.

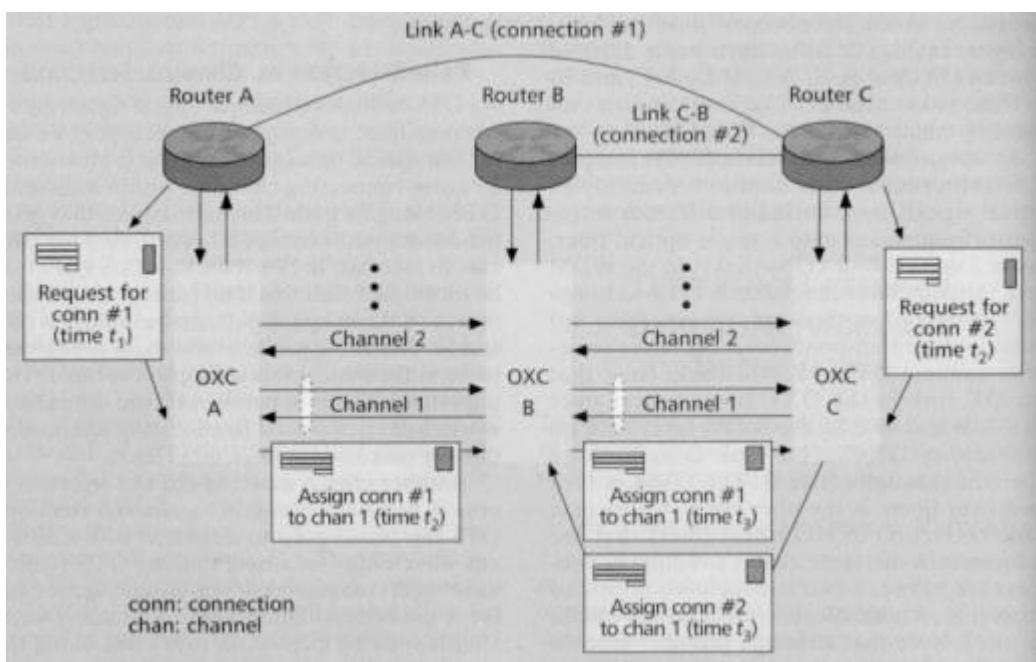
V realite musíme predpokladať, že akékoľvek rozšírenie funkcií MPLS v optických sieťach musí poskytovať možnosť vytvárania obojsmerných spojení.

Veľmi známym problémom pri obojsmerných spojeniach je, keď obidva konce kanála môžu priradiť ten istý obojsmerný kanál rozdielnym spojeniam, ktoré prídu z rôznych spojení. Tento jav sa nazýva *glare*. Táto situácia nemôže vzniknúť pri jednosmerných spojeniach, pretože daný uzol kontroluje všetky kanály, ktoré od neho odchádzajú. Ilustrácia takejto situácie je na obr.

V čase t_1 prijme OXC A požiadavku na vytvorenie spojenia (#1) medzi A-C. Zatiaľ iné spojenie (#2) z C do B je prijaté OXC C, a to v čase t_2 . Následne dve spojenia žiadajú o linku B-C. Požiadavky prídu v rovnakom čase t_3 , ale na opačných stranách kanála, ktorý predtým neboli pridelené žiadnemu obojsmernému spojeniu.

Možným riešením je vybrať jeden uzol ako nadriadený uzol (control node) a druhý ako podriadený (noncontrol node). V takomto prípade sa môže vykonať jedna z nasledujúcich možností:

- Keď vznikne spor, podriadený uzol sa vzdá každej linky a vykoná predchádzajúce spojenie. Toto sa vykoná pomocou spätno-dopredných správ medzi susednými uzelmi.
- Nadriadený uzol vždy hľadá najvyššie možné číslo voľného kanála a podriadený uzol hľadá najnižšie možné číslo voľného kanála. V takomto prípade pravdepodobnosť vzniku konfliktu je minimálna, pokiaľ sa všetky dostupné kanály nepridelia.
- Podriadený uzol žiada o kanál doprednou správou nadriadený uzol.



6.5 Rýchlosť obnovy siete:

Rýchlosť obnovenia poškodenej siete sa môže medzi sieťou IP a optickou sieťou zásadne lísiť. Ak vznikne chyba, optická sieť pomocou protokolu RSVP sa najskôr pokúsi vytvoriť spojenie v doprednom smere a až potom sa pokúsi vytvoriť spojenie v opačnom smere. Tento proces môže byť veľmi zdĺhavý pre obnovenie spojenia.

Zabezpečením spojenia pomocou systému 1+1 sa dá obísť zdĺhavosť obnovy spojenia ale je spojené s vyššími nákladmi takéhoto riešenia. Ekonomicky by takéto riešenie nebolo únosné.

Obnovenie kategórie 2 je niekedy nazývaná ako pre-planned cross-connect maps, ale takéto riešenie by sa ľahko implementovalo.

Obnovenie kategórie 4 je vo všeobecne nazývaná ako úplne dynamické obnovovanie. Jeho výhodami je, že vyžaduje minimálne predplánovanie a dokáže dynamicky riešiť chybové situácie ako napr. chyby viacnásobných liniek alebo uzlov. Jeho nevýhodou je, že je nevyhnutne pomalší.

Z týchto dôvodov sa zdá, že obnovovanie kategórie 3 je najviac ekonomickej a praktickej riešenie pre väčšinu služieb optických sietí. Obnovovanie kategórie 3 používa kapacity efektívnejšie. Ak nie je kvalitne implementovaný, môže byť veľmi pomalý. Aby sa tomuto predišlo, krížové spojenia môžu posielat správy o zostavovaní cesty. Signalizačný protokol nemusí čakať na potvrdenie z OXC pred pokračovaním v zostavovaní spojenia. V takomto prípade sa musí rátat s možnosťou vzniku konfliktu.

6.6 CAC pre obnovenie siete:

CAC slúži na prepočítanie obnovy cesty kde sú chýbajúce dáta požadované. Existujú tri rozdielne alternatívy (pre rozdielne požiadavky spojenia)

- vypočítanie optimálnej obnovovacej cesty
každý uzol má katalóg všetkých dát popísaných a vykonaných operáciách v kroku periodických znovuoptimalizovania obnovovacích ciest na optimalizovanie obnovovacích ciest celej siete na základe každej požiadavky na spojenie. Toto musí byť vykonávané každým uzlom alebo v centrálnom uzle. Všetky dôležité údaje musia byť rozšírené ku všetkým relevantným uzlom v sieti.
- vypočítanie najjednoduchšej obnovovacej cesty

Jednoduchá obnovovacia cesta je vybratá (napr. najkratšia cesta) Takýto systém nemusí zabezpečovať dostatočné obnovovacie kapacity.

- vypočítanie hybridnej obnovovacej cesty

Výpočet obnovacej cesty je zmiešaním dvoch predchádzajúcich metód.

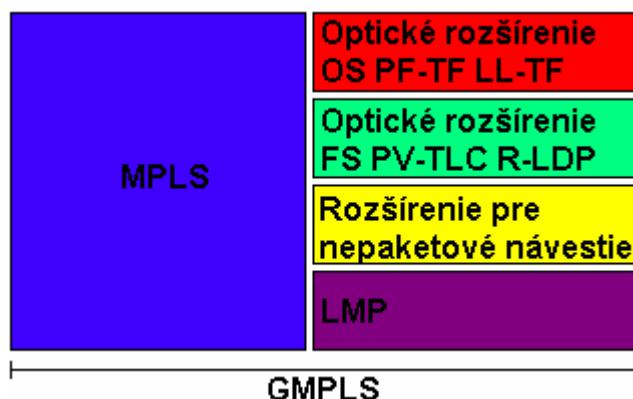
Obnova poškodeného spojenia v optickej sieti je veľmi dôležitou požiadavkou pre koherentnosť siete. Preto sa kladie veľký dôraz na túto oblasť optických sietí, pretože sa uvažuje nad implementáciou MPLS protokolu telekomunikačnými spoločnosťami a práve obnova spojení v optických sietiach musí zabezpečiť rýchlu dostupnosť požadovaných dát aj pri poškodenom spojení.

7 GMPLS

7.1 Úvod do GMPLS

GMPLS (Generalized Multiprotocol Label Switching) je tiež označovaný ako *MPλS* (multiprotocol lambda switching). Podporuje zariadenia vykonávajúce paketové, časové, vlnovo dĺžkové a priestorové prepínanie. Je zovšeobecním protokolu MPLS. Vznikol za účelom použitia v optických sietiach. K protokolu MPLS bolo pridané rozšírenie umožňujúce prepínať optické cesty. Rozšíril sa typ návesti, smerovacie a signalizačné protokoly, aby bolo možné obsiahnuť zvláštnosti optického prepínania. Vytvoril sa nový protokol linkového manažmentu LMP (Link Management Protocol).

GMPLS protokolová sada: používa MPLS ako základnú technológiu

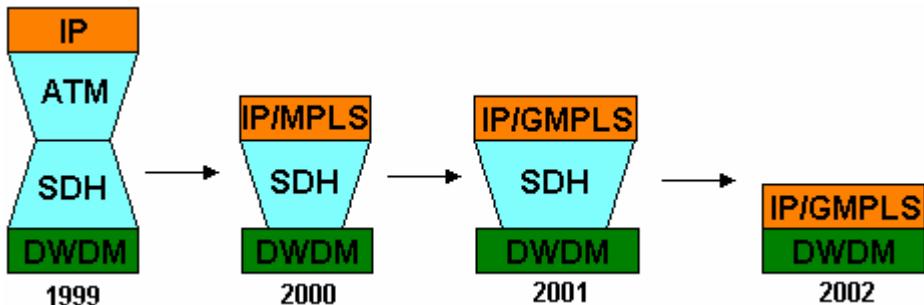


- rozširuje
 - signalizačné protokoly
 - smerovacie protokoly
 - typ návesti
- zavádza nový protokol LMP

7.2 Význam GMPLS

Synchrónna SONET/SDH prenosová sietová infraštruktúra garantuje spoľahlivosť pre hlasovú prevádzku a prenajaté okruhy, čo tvorilo hlavnú prevádzku do roku 1995. Po tomto roku dramaticky vzrástla dátová prevádzka, tahaná hlavne rozvojom Internetu a virtuálnych privátnych sietí (VPN). Snahy o zvýšenie prevádzky a minimalizovanie nákladov vyústili do situácie, kedy poskytovatelia služieb potrebovali riešenia umožňujúce prevádzkovať veľkokapacitné siete čo najefektívnejšie.

Riešenie, ktoré to umožňuje, vychádza z odmietnutia zaužívanej architektúry dátovej siete. Dátové siete majú typicky štyri vrstvy: IP, ATM, SONET/SDH a DWDM. Táto architektúra je pomalá a značne cenovo neefektívna. Mnohovrstvová architektúra typicky trpí efektom pomalosti - nejaká vrstva limituje schopnosti celej siete a zvyšuje náklady.



Mnohovrstvová architektúra siete

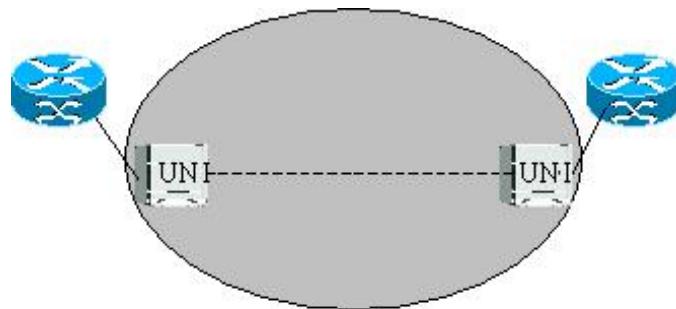
DWDM je cenovo efektívna multiplexná technika, ktorá poskytuje dôležité technické výhody. Zvyšuje kapacitu optického vlákna vytvorením mnohonásobných virtuálnych kanálov, každý s prevádzkou Gbit/s. Toto poskytne mnohonásobné zvýšenie šírky pásma v existujúcej štruktúre optických sietí. Optické krížové prepínače OXC (optical cross-connect) vytlačia elektrické prepínače.

Očakáva sa, že dominantná prevádzka cez dátové siete bude postavená na IP. IP paketové štatistické multiplexovanie je hlavnou multiplexnou technológiou pre dátové toky menšie ako toky pre DWDM. Schopnosti smerovačov a OXC rastú, čo umožňuje vynechať SONET/SDH a ATM vrstvy. Ich funkcie musia prejsť na smerovače, OXC a DWDM. Toto sa prejaví v jednoduchšej, cenovo efektívnejšej sieti, ktorá bude prenášať široký rozsah dátových tokov s veľkou kapacitou. Úlohou protokolu GMPLS je umožniť prenos IP priamo cez optickú vrstvu a tým vynechať všetky ostatné vrstvy, ktoré spôsobujú efekt pomalosti v sieti. GMPLS bude ucelenou časťou rozvíjajúcou dátové siete budúcej generácie, ktorá poskytuje potrebné mosty medzi IP a optickou vrstvou.

7.3 Architektúra optickej siete

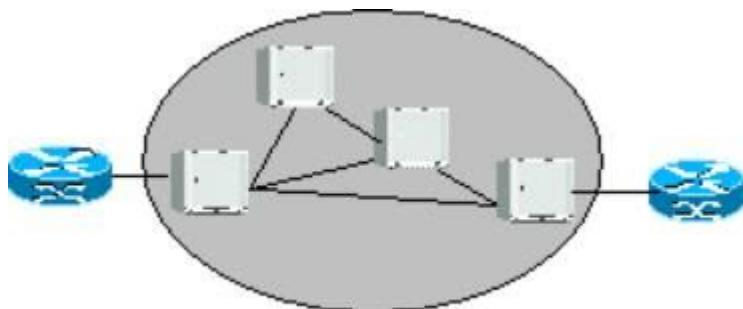
Optické architektúry môžu byť sledované z dvoch hľadísk: ako vrstvový model a peer model.

Vrstvový model skrýva detaile vnútra siete. Je zložený z dvoch samostatných riadiacich rovín s minimálnymi interakciami medzi sebou. Jedna riadiaca rovina operuje vnútri jadra optickej siete a ďalšia medzi jadrom a okolitými koncovými zariadeniami (nazýva sa rozhranie užívateľ – siet', UNI). Vrstvový model zavádzza kontrolu hraníc medzi jadrom a koncovým zariadením tým, že skryje obsah jadra siete.



Vrstvový model siete

Peer model obsahuje jednu riadiacu rovinu, Táto rovina pozostáva z jadra optickej siete a okolitých koncových zariadení. Toto dovoľuje prevádzkovateľovi koncových zariadení vidieť topológiu jadra siete.



Peer model siete

7.4 Smerovanie v optických IP siet'ach

Počas niekoľkých predchádzajúcich rokov, IP smerovanie vývojom zahrnulo nové funkcie a vznikol protokol MPLS (multiprotocol label switching). MPLS bolo vybraté ako riadiaca rovina, ktorá môže byť použitá nielen so smerovačmi, ale aj so zariadeniami ako SONET, ATM a OXC. Toto prináša potrebnú štandardizáciu spoločnej riadiacej roviny ako klúčového komponentu pri vývoji otvorenej optickej siete. Spoločná riadiaca rovina zjednodušuje prevádzku a manažment, čím redukuje cenu prevádzky. GMPLS vyžaduje niektoré modifikácie pre smerovacie a signalizačné protokoly, aby sa prispôsobili zvláštnostiam optického smerovania. Tieto sú štandardizované organizáciou IETF a môžu byť zhrnuté nasledovne:

- vznik nového protokolu linkového manažmentu (LMP), ktorý je navrhnutý pre riešenie otázok súvisiacich s linkovým manažmentom v optických sieťach s optickými prepínačmi
- rozšírenie smerovacieho protokolu (OSPF/IS-IS) o schopnosti označiť vhodnosť optických zdrojov v sieti (všeobecná reprezentácie rôznych typov liniek, šírka pásma na vlnovej dĺžke, typ ochrany linky, identifikátor linky)
- rozšírenie pre signalizačný protokol RSVP/CR-LDP (Constraint-based Routing Label Distribution Protocol) o možnosť explicitne špecifikovať LSP cestu (label switched path) cez jadro optickej siete
- rozšírenie schopností o možnosti, ako sú hierarchická LSP cesta, združovanie liniek a nečíslované linky

MPLS je založené na nasledovných myšlienkach:

- odosielanie návesti oddelene od obsahu IP hlavičky
- jednoduché smerovanie návesti, mnohonásobné smerovanie
- viacnásobné linkovo závislé smerovanie na základe: identifikátor virtuálneho spojenia/cesty, frekvenčný slot (vlnová dĺžka), časový slot
- flexibilné vytváranie prenosových ekvivalentných tried FEC (forwarding equivalence classes)
- prenosová hierarchia cez smerovacie tabuľky

Separácia prenášanej informácie od obsahu IP hlavičky umožňuje využívať protokol MPLS zariadeniami ako napr. OXC, ktorých dátová rovina nemôže rozoznať IP hlavičku. Smerovače LSR (Labels switch routers) prenášajú dátu použijúc návesti okolo dát. Táto návest kombinovaná s portom, na ktorom dátu boli prijaté, sa používa na určovanie výstupného portu a odchádzajúcej návesti pre dátu. Napr. vlnová dĺžka môže byť videná ako implicitná návest. Spôsob prenosovej hierarchie za použitia smerovacej tabuľky umožňuje interakciu so zariadeniami, ktoré môžu podporovať len malú návest. Táto vlastnosť MPLS je podstatná v súvislosti s OXC a DWDM, kde počet vlnových dĺžok (ktoré majú úlohu návesti) nie je veľmi veľký.

MPLS štruktúra zahŕňa tak významné aplikácie ako constraint-based (vynútené) smerovanie. Constraint-based smerovanie je rozšírením existujúceho IP link-state smerovacieho protokolu (napr. OSPF a IS-IS) o RSVP alebo CR-LDP protokol ako MPLS riadiacej roviny a Constrained Shortest Path First (CSPF) ako algoritmu na výpočet cesty. Protokoly OSPF a IS-IS umožnia uzlom vymieňať si informácie o sieťovej topológií, dosiahnuť nosť zdrojov a dokonca bezpečnostné informácie. Tieto informácie sú používané CSPF protokolom na výpočet ciest

závislých od špecifického zdroju a/alebo bezpečnostných obmedzení. Napr. oba protokoly RSVP alebo CR-LDP sa používajú na zriadenie prenosu návestí cez smerovače, ktoré boli nájdené CSPF algoritmom. Takto sa vytvára LSP cesta. MPLS dátová rovina sa používa na prenos dát cez stanovenú LSP cestu.

Constraint-based smerovanie sa v súčasnosti používa na dva hlavné účely: riadenie prevádzky a rýchle presmerovanie. S vhodnou sieťovou architektúrou môže nahradíť ATM ako mechanizmus riadenia prevádzky. Rovnako rýchle presmerovanie ponúka alternatívu pre SDH ako mechanizmu pre ochranu a obnovenie prevádzky. Riadenie prevádzky a rýchle presmerovanie sú príkladom, ako rozšírenie, poskytované MPLS pre IP smerovanie, vytvára možnosti vynechať ATM a SONET/SDH vrstvy presunutím funkčnosti poskytovanej týmito technológiami do IP/MPLS riadiacej roviny.

Budúci rozvoj MPLS technológií, práve tak ako GMPLS stojí na niekoľkých súvislostiach medzi LSR smerovačmi a optickými prepínačmi a medzi LSP cestou a optickou cestou. Optická cesta je end-to-end cesta vytvorená optickými zariadeniami bez opticko-elektrickej konverzie. Analogicky k prepínaniu návestí v LSR smerovači, optické prepínanie prepína vlnovú dĺžku zo vstupného na výstupný port. Vytvorenie LSP cesty zahŕňa konfiguráciu smerovacej tabuľky každého LSR smerovača. Smerovacia tabuľka je priradenie vstupnej návesti a portu k výstupnej návesti a portu. Podobne proces vytvárania optickej cesty zahŕňa konfiguráciu smerovacej tabuľky každého nezávislého optického prepínača. Smerovacia tabuľka je priradenie vstupných dĺžok a portov k výstupnej dĺžke a portu. Ako LSR smerovače, tak aj optické prepínače potrebujú smerovacie protokoly, ako sú OSPF alebo IS-IS, pre vymieňanie informácií o linkách topológie a vhodnosti ďalších optických zdrojoch pre výpočet cesty. Tiež sú potrebné signalizačné protokoly ako RSVP a LDP pre automatický proces vytvorenia cesty.

7.5 Prechod od MPLS ku GMPLS

V optických sietiach nie je možné priamo použiť protokol MPLS. Preto vznikol protokol GMPLS ako rozšírenie základného protokolu MPLS pre potreby smerovania a signalizácie v optických sietiach. Toto rozšírenie zabezpečuje podporu priameho prenosu IP vrstvy cez optickú vrstvu. Odstraňuje niektoré nedostatky MPLS pri riadení optického a SONET/SDH časovo deleného multiplexu.

V GMPLS treba riešiť nasledovné problémy:

1. MPLS návestí je veľa (milión na port), zatiaľ čo vlnové dĺžky a kanály TDM sú limitované (v súčasnosti desiatky až stovky na port, v budúcnosti tisícky).
2. MPLS LSP cesty môžu alokovať prenosové pásmo z kontinuálneho spektra, zatiaľ čo optické/TDM len malú diskrétnu množinu
3. Zriedka je viac ako 10 paralelných liniek medzi dvojicou uzlov. Aby poskytovatelia zvládli vzrastajúcu prevádzku, budú musieť použiť stovky paralelných vláken, každé so stovkami vlnových dĺžok medzi dvojicou sietových uzlov. Preto sa vynárajú tri otázky:
 - a. Celkový počet liniek v optických/TDM sietach môže byť väčší ako v MPLS sietach.
 - b. Priradenie IP adresy každej linke v MPLS sietach nie je obzvlášť ťažké, priradenie IP adresy každému vláknu, vlnovej dĺžke a TDM kanálu je problém, pretože IP adresy je málo a predstavovalo by to problém manažmentu.
 - c. Identifikácia, ktorý port sietového zariadenia je prepojený s ktorým portom susedného sietového zariadenia je tiež veľká záťaž pre manažment a veľmi náchylná na chyby.
4. Je nevyhnutná rýchla detekcia a izolácia porúch a rýchle presmerovanie na alternatívny kanál.
5. Užívateľské dáta prechádzajú optickými doménami prepínané transparentne. Toto vyžaduje prenosovú riadiacu rovinu oddelenú od užívateľských dát.

Predchádzajúce problémy platia tiež pre MPLS siete, avšak sú veľmi dôležité pre optické siete. Nasledujúce časti popisu, ako GMPLS rieši tieto otázky.

7.6 Link-state protokoly

Pre pochopenie rozšírenia smerovacích protokolov je nutný náčrt link-state protokolov ako sú IS-IS a OSPF. Siet' uvažujeme ako orientovaný graf, kde uzly sú sietové elementy (MPLS prepínače, OXC, atď.) a hrany sú linky (vlákna, káble, atď.). Každá hrana grafu má priradené atribúty ako IP adresa, cena a nerezervovaná šírka pásma. Link-state protokol umožňuje uzly dynamicky koordinovať a obnovovať tento graf vrátane atribútov hrán. Tento graf je označovaný ako databáza stavu liniek. Táto databáza je synchronizovaná medzi zúčastnenými smerovačmi, každý smerovač použije databázu na vytvorenie svojej smerovacej tabuľky. Keď príde paket na smerovač, podľa smerovacej tabuľky sa nájde trasa. Ak sa zmení stav linky, vrátane priradenia alebo odstránenia linky, databáza stavu liniek musí byť znova synchronizovaná. Všetky smerovače musia prepočítať svoju smerovaciu tabuľku využijúc aktualizovanú databázu.

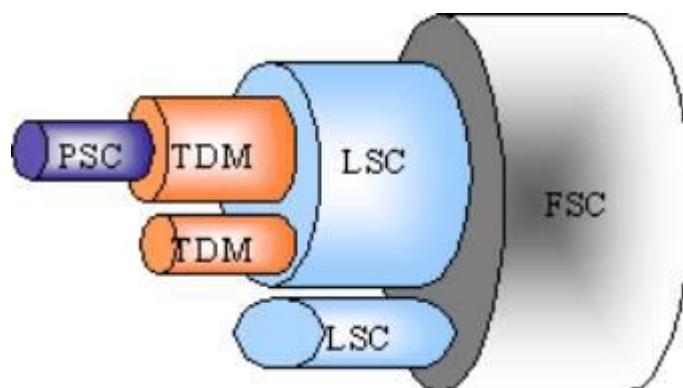
7.7 Hierarchia LSP ciest

Hierarchia LSP cest sa zakladá na predstave, že LSP cesty môžu byť vnorené v ďalších LSP cestách vyššej hierarchie. Toto je dosiahnuté berúc LSP cestu do úvahy ako linku v IS-IS alebo OSPF databáze stavu liniek. Táto jednoduchá predstava prináša riešenie problémov 1 a 2.

LSP cesty, ktoré vstupujú do optickej prenosovej domény v jednom bode a opúšťajú ju v rovnakom bode môžu byť zlúčené a prenášané vnútri jednej optickej LSP cesty. Toto zlúčenie napomáha zachovaniu počtu vlnových dĺžok použitých doménou.

Hierarchia LSP cest tiež napomáha riešeniu problému s diskrétnym charakterom optického prenosového pásma. Ak je optická LSP cesta nastavená, dostane diskrétné pásmo (povedzme 2.488 Gb/s). 100 Mb/s LSP cesta, ktorá prechádza optickou prenosovou doménou, môže byť prenesená cez optickú LSP a zanechá pásmo 2.388 Gb/s pre ďalšie LSP cesty. Alokácia celého 2.488 Gb/s pre každú MPLS LSP cestu, ktorá prechádza optickou doménou, je nepraktická.

Prirodzená hierarchia udáva poradie vkladania LSP ciest. Táto hierarchia je založená na multiplexných schopnostiach LSP cest rôznych typov. LSP cesta vždy štartuje a končí v podobných zariadeniach (napr. vlnovo dĺžková LSP cesta vniká a končí v zariadení poskytujúcom vlnové dĺžky). Na vrchole tejto hierarchie sú uzly, ktoré majú fiber-switch-capable (FSC) rozhrania nasledované uzlami, ktoré majú lambda-switch-capable (LSC) rozhrania, ďalej uzly s TDM rozhraniami a nakoniec uzly s packed-switch-capable (PSC) rozhraniami. V typickej konfigurácii je oblasť jadra s FSC rozhraniami/uzlami pripojená k vonkajšej oblasti s LSC rozhraniami/uzlami. Tie sú pripojené k vonkajšej oblasti s TDM uzlami, ktoré sú na záver pripojené k smerovačom. Cesty vnútri oblasti môžu byť generované automaticky s minimálnou manuálnou konfiguráciou.



LSP cesta, ktorá štartuje a končí na PSC rozhraní, môže byť včlenená (spolu s ďalšou LSP) do LSP typu TDM, ktorá štartuje a končí na TDM rozhraní. Tento TDM-LSP môže byť včlenený (spolu s ďalšími) do LSC-LSP, ktorá štartuje a končí v LSC rozhraní, ktoré môže byť včlenené (spolu s ďalšími) do LSP cesty, ktorá štartuje a končí na FSC rozhraní.

LSP cesty sa javia ako nové typy liniek v IS-IS/OSPF smerovacích databázach. Sú kompatibilné s existujúcimi záplavovými metódami používanými pre zdieľanie bežných linkových informácií. Kvôli týmto záplavám má každý uzol totožnú databázu stavu liniek obsahujúcu informácie o bežných linkách, ale i LSP cestách. Uzol, ktorý uskutočňuje výpočet cesty, je takto schopný použiť nielen bežné linky, ale tiež LSP cesty s pridelenými obmedzeniami (napr. môže byť určené poradie včleňovaných LSP ciest). Toto umožňuje hierarchické rozloženie databázy stavov liniek. Keď je raz cesta vypočítaná, uzol používa RSVP/CR-LDP signalizačný mechanizmus na zriadenie návesti spolu s cestou.

Združovanie liniek

Ako bolo zmienené, databáza stavu liniek pozostáva zo všetkých uzlov a liniek v sieti, spolu s atribútmi pre každú linku. Podľa otázky 3a, databáza pre optimálnu optickú sieť môže veľkosťou ľahko prevýšiť tú pre MPLS sieť.

Pre vyriešenie tohto problému sa zlučujú linkové atribúty z niekoľkých paralelných liniek podobných charakteristík a priradí sa im atribút jednej zlúčenej linky. Týmto sa veľkosť databázy redukuje a zlepší činnosť link-state protokolu.

Zhrnutie atribútov niekoľkých liniek do jednej má za následok stratu niektorých informácií. Napr. zlúčením SDH liniek prepínacie kapacity linkových rozhraní vzrastú. Osoh z tohto zlúčenia vyvážuje hodnotu stratených informácií. Kým link-state protokoly spravujú zlúčenú linku, signalizácia vyžaduje individuálnu identifikáciu liniek. *LMP poskytuje prostriedky pre riešenie tohto problému.*

Nečíslované linky

Všetky linky v MPLS sieti majú typicky priradenú IP adresu. Keď sa vypočítava cesta cez sieť, linky, ktoré tvoria cestu, sú identifikované svojimi IP adresami. Táto informácia je sprostredkovaná signalizačnému protokolu, ktorý potom nastavuje cesty. Avšak problém 3b opisuje obtiažnosť takejto realizácie. Nečíslované linky sú používané ako riešenie. Ak nejaká linka nepoužije IP adresu ako identifikátor, musí byť táto nahradená iným identifikátorom.

Požaduje sa jedinečný spôsob identifikácie linky v sieti. Úloha môže byť rozdelená na dva kroky. Za prvé sa požaduje mechanizmus jedinečnej identity každého uzla v sieti. Každá linka, ktorá vychádza z tohto uzla, je identifikovaná. Každý uzol v sieti je identifikovaný jedinečným smerovacím číslom v sieti. Zostáva ďalší problém identifikácie liniek vychádzajúcich z jednotlivého uzla. Dvojica (ID smerovača, číslo linky) slúži ako identifikátor pre linku. Takáto redukcia manažmentu a šetrenie IP adres je dôležitá hlavne pri optických sieťach s veľkým počtom liniek.

7.8 Protokol manažmentu liniek LMP

Výsledok zovšeobecnenia MPLS zahŕňajúci ne-PSC linky je, že návest' nie je dlhšia ako identifikátor, ale musí byť schopná mapovať časové sloty, vlnové dĺžky a fyzické zdroje ako porty a prepínače. Toto vyžaduje priradenie fyzických návestí medzi príahlými uzlami. Pre účely IGP, viacnásobné linky medzi uzlami môžu byť kombinované do jednej zlúčenej linky. LMP beží medzi príahlými uzlami a používa sa na spoločné poskytnutie liniek a odstránenie chýb. Klúčom poskytnutia LMP služby je vzťah medzi susednými uzlami pre zložku ID linky, ktorá môže byť použitá ako návest' pre fyzické zdroje. Toto nemá byť konfigurované manuálne, čo by bolo zdrojom potenciálnych chýb. Význam zlepšenia možnosti manažmentu rastie, pretože asociácie sú vytvárané samotným protokolom. Toto rieši problém 3c.

Jednotlivé zložkové linky v združenej linke a priradený riadiaci kanál nemusia byť prenášané cez rovnaké fyzické médium. LMP umožňuje odlúčenie riadiaceho kanálu od jednotlivých zložkových liniek. Napr. riadiaci kanál môže byť prenášaný cez samostatnú vlnovú dĺžku na vlákne, alebo cez samostatnú Ethernetovú linku medzi dvoma uzlami. Toto sa týka problému 5. Výsledok tohto je, že porucha riadiaceho kanála nesúvisí s poruchami jednotlivých liniek. Daňou za transparentné optické prepínače je, že tradičné metódy pre monitorovanie a manažment liniek sa nedajú použiť.

LMP je vytvorené na poskytnutie štyroch základných funkcií pre dvojicu uzlov:

- manažment riadenia kanálu
- kontrola prepojenosti linky
- porovnanie kvality liniek
- izolácia chýb

Manažment riadenia kanálu sa používa na zriadenie a udržovanie spojenia medzi príhlálymi uzlami a skladá sa z Hello protokolu, ktorý je prenášaný cez riadiaci kanál. Kontrola liniek sa používa na zistovanie fyzického spojenia jednotlivých liniek, ktoré závisia od ľudských chýb pri procese káblovania. Správa LinkSummary z LMP poskytne porovnanie funkčných vlastností liniek (napr. ID linky, ochranné mechanizmy, priority) medzi príhlálymi uzlami. Toto sa vykonáva, keď je linka prvý krát zapojená a môže sa opakovať po nejakom čase. Zisťuje sa, či je linka aktívna alebo nie. Nakoniec LMP poskytuje mechanizmus pre izoláciu chýb kanálu v prieľahdých aj neprieľahdých sietach v závislosti od formátu dát, čím odpovedá na problém 4.

7.9 Príklad konkrétneho GMPLS smerovača

Potreby na rast Internetovej prevádzky sú uspokojované optickým GMPLS mnohovrstvovým smerovačom, ktorý poskytuje schopnosti IP paketového smerovania a vlnovo dĺžkového smerovania. Jeho názov je *Hikari smerovač*. Vlnovo dĺžkové cesty, ktoré sú nazývané OLSP cesty (Optical Label Switched Path), sú nastavované a rušené distribuovaným spôsobom, ktorý je založený na funkciách poskytovaných protokolom GMPLS. Pretože Hikari smerovač ponúka funkcie prepínania a GMPLS, umožňuje vytvárať optimálne sietové konfigurácie s ohľadom na IP a optické sietové zdroje distribuovaným spôsobom.

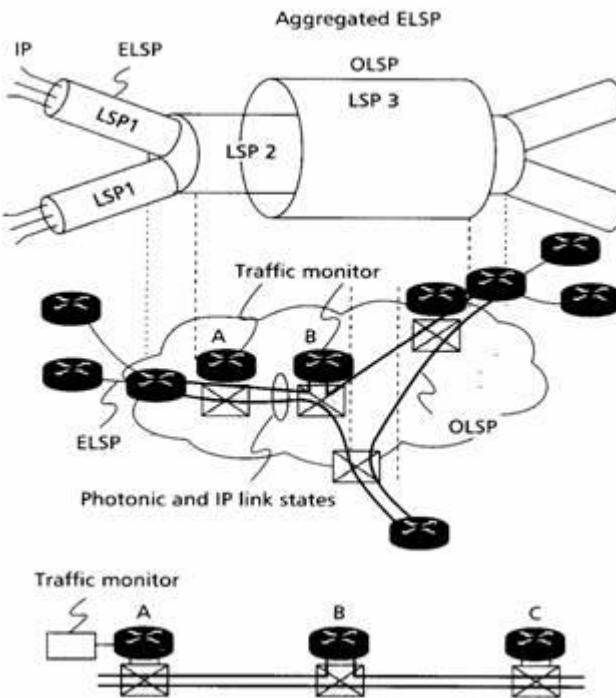
Pre dosielenie efektívneho mnohovrstvového riadenia prevádzky je nutné implementovať prídavné OSPF a RSVP rozšírenia založené na IETF prístupoch. Pri OSPF rozšírení sa zverejňuje celkový počet vlnových dĺžok a počet nepoužitých vlnových dĺžok. Tieto informácie sú odovzdávané cez OSPF pakety všetkým uzlom, takže tieto majú prehľad o stave liniek. Uzly sa pokúšajú zriadiť OLSP optické cesty na základe pravidla najmenších nákladov, pričom používajú RSVP rozšírenie signalizačného protokolu. Signalizačné pakety vyberajú správnu vlnovú dĺžku, ktorá použije najmenší počet konverzií vlnovej dĺžky, pretože konverzia vlnovej dĺžky je veľmi náročná operácia vo všetkých optických sietach.

Mnohovrstvové riadenie prevádzky, ktoré zabezpečuje, že IP a optické vrstvy dynamicky spolupracujú, je nutné kvôli cenovo efektívному poskytovaniu IP služieb. Základným cieľom je snaha minimalizovať náklady siete v súvislosti s kolísaním IP prevádzky.

7.9.1 Prevádzka mnohovrstvovej siete a optické prepájanie

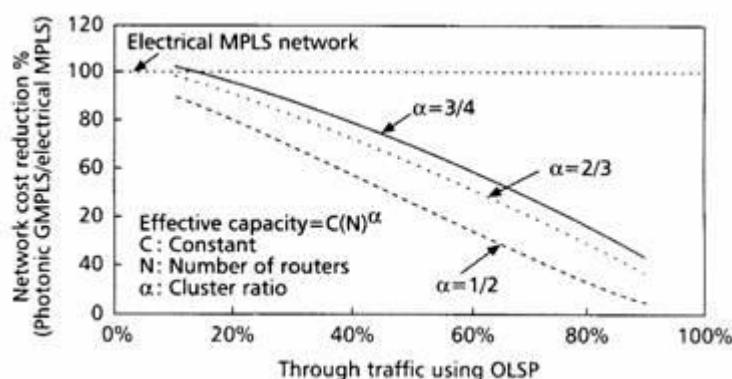
Optický GMPLS mnohovrstvový smerovač ponúka dve prenosové schopnosti. Niektoré koncové páry IP smerovačov používajú tranzitný IP smerovač na prenos svojej IP prevádzky, kým

dľalšie prenášajú svoju IP prevádzku cez OLSP cestu. Všetky elektronické MPLS cesty sú monitorované funkciou IP smerovača a keď prevádzková kapacita zosilnie, prepínaná cesta sa nastaví použitím GMPLS signalizačného protokolu ako je CR-LDP a rozšírenia RSVP, ako to ukazuje obrázok. Všetky ELSP (elektrické LSP cesty) a OLSP (optické LSP) sú kontrolované a riadené rovnakou formou založenou na GMPLS. Toto realizuje jednoduchý sietový manažment ako aj dynamické sietové riadenie pre mnohovrstvové operácie.



Elektrické a optické cesty v smerovači

OLSP cesty sú vysoko výkonné a cenovo efektívne. Pretože OLSP cesty sú prepínané cez vlnovo dĺžkové cesty, nie je nutné spracovanie protokolmi tretej vrstvy. Obrázok ukazuje výsledky detailnej štúdie cenovej efektívnosti dosiahnitej použitím navrhnutého optického GMPLS mnohovrstvového smerovača. Kalkulácia je založená na požiadavkách IP prevádzky v roku 2005 a schopnostiach elektrických smerovačov ako aj optickej technológie.



Cenová efektívnosť smerovača

Podľa výpočtov možno očakávať cenovú redukciu o viac ako 60 % použitím optického GMPLS mnohovrstvového smerovača. S prihliadnutím na dnešnú Internetovú prevádzku chrabticových sietí sa dá očakávať, že optické prepájanie bude používané viac než 60 až 70 % času. Mnohovrstvové operácie môžu redukovať dnešný duplicitný sietový manažment do jednej univerzálnej GMPLS operácie. Toto uľahčenie významne zníži sietové náklady.

7.9.2 Hikari smerovač

Hikari smerovač sa skladá z IP smerovača, vlnovo dĺžkového smerovača a GMPLS smerovacieho manažéra. V tabuľke je špecifikácia Hikari smerovača, ktorá zahŕňa optický prepínač (OXC) a smerovač 2 a 3 vrstvy. OXC vytvára optické spojenia a diaľkové WDM prenosové funkcie. Preto tento prototyp zahŕňa dve voliteľné základné sietové funkcie. Väčšina optických spojovacích systémov vyžaduje WDM prenosový systém.

Položka	Špecifikácia
Architektúra spojovania	<i>DC-SW</i>
Rozsah pracovných vlnových dĺžok	<i>3. pásmo (okolie 1550 nm)</i>
Prenosová rýchlosť optického kanálu	<i>2,5 Gb/s (rozšíriteľná na 10 Gb)</i>
Maximálny počet vlnových dĺžok	<i>32</i>
Počet optických portov	<i>8 (maximálne)</i>
Spojovacie pole	<i>256 kanálov</i>
Priepustnosť systému	<i>640 Gb/s (rozšíriteľná na 2,56 Tb/s)</i>
Modulové celky	<i>8 kanálov</i>
Priradovanie optických kanálov	<i>súmerné na 50 GHz mriežke v okolí 193,1 THz</i>
Typ kábla	<i>SM optický kábel (G.652)</i>
Kontrolný optický kanál (OSC – optical supervisory channel)	<i>OTS/OMS-OH</i>

Hikari smerovač je vybavený všetkými sietovými časťami. Toto napomáha v redukcii funkčných nákladov, nákladov na údržbu, zariadenia, priestor, elektrické opotrebovanie a redukuje počet zlyhaní.

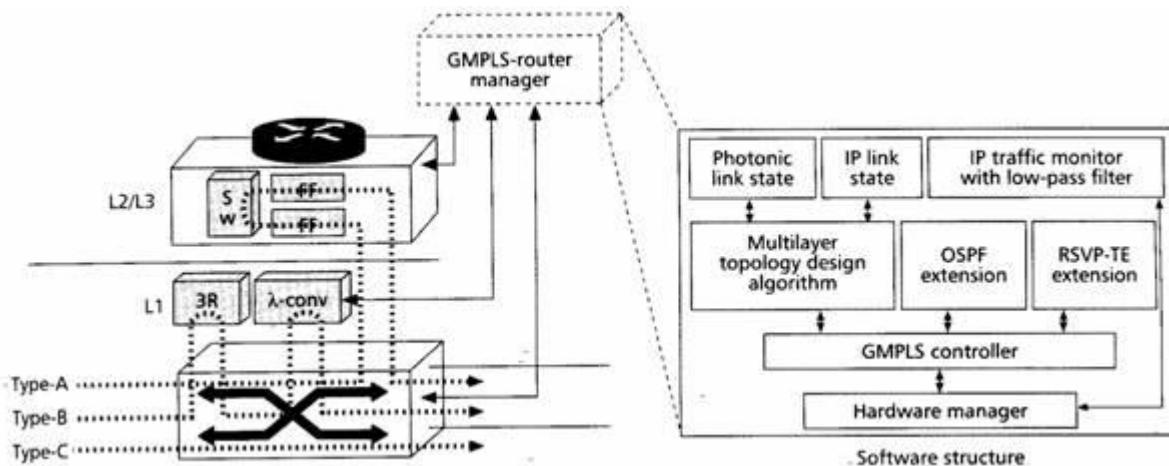
Siete ďalšej generácie budú obrovské a tieto vymoženosť poskytnú vysoký úžitok. OXC majú maximálnu spojovaciu kapacitu 256x256. UNI rozhrania optických ciest prenášajú OC-48c signálmi pakety cez SDH/SONET. Takto je maximálna kapacita 640 Gb/s. Ak budú rozhrania rozšírené na 10 Gb/s, kapacita stúpne na 2,56 Tb/s. V súčasnosti je podporovaný 10 Gb/s optický kanál, pričom je možné rozšírenie.

V Hikari smerovači je OXC založené na architektúre DC-SW (Delivery-and-Coupling Switch), nie na základnej maticovej konfigurácii. DC-SW architektúra dovoľuje zlúčenie niekoľkých signálov. Výstupné porty, ktoré používajú WDM, využívajú základnú mnohostupňovú maticu veľkého rozsahu a úplný systém manažmentu prepínania pre dosiahnutie bezblokádovosti. DC-SW architektúra umožňuje bezblokádovosť jednoduchou konfiguráciou. Tiež umožňuje vysoký stupeň rozšíriteľnosti liniek, pretože môže byť delená do linkových modulárnych jednotiek. Taká vysoká modularita dovoľuje ľahké rozšírenie prepínania a redukciu počiatočných nákladov pre malé inštalácie.

Demonštrovaný Hikari smerovač má paketové spojovacie schopnosti druhej a tretej vrstvy a funkcie vlnovo dĺžkovej konverzie spolu s 3R (synchronizácia, tvarovanie, regenerácia) na všetkých portoch. Prepínacie pole je inštalované v štandardných 19 palcových priečinkoch. Počet priečinkov závisí na veľkosti uzla. Minimálna konfigurácia je tvorená dvoma priečinkami.

7.9.3 Smerovanie a signalizácia Hikari smerovači

Navrhnutý Hikari smerovač je založený na optickej univerzálnej platforme s prídavkom 3R funkcií, konverzie vlnových dĺžok a funkčnosti 3 vrstvy, ako to ukazuje obrázok. Použitie týchto funkčností je voliteľné - na základe potreby. Ak je signál poškodený stratami na vlákne alebo nelineárnymi efektmi, použije sa 3R funkcia. Konverzia vlnových dĺžok sa použije, ak je signál blokovaný obsadením vlnovej dĺžky. Paketové spojovanie 3. vrstvy sa použije na prepájanie paketov.



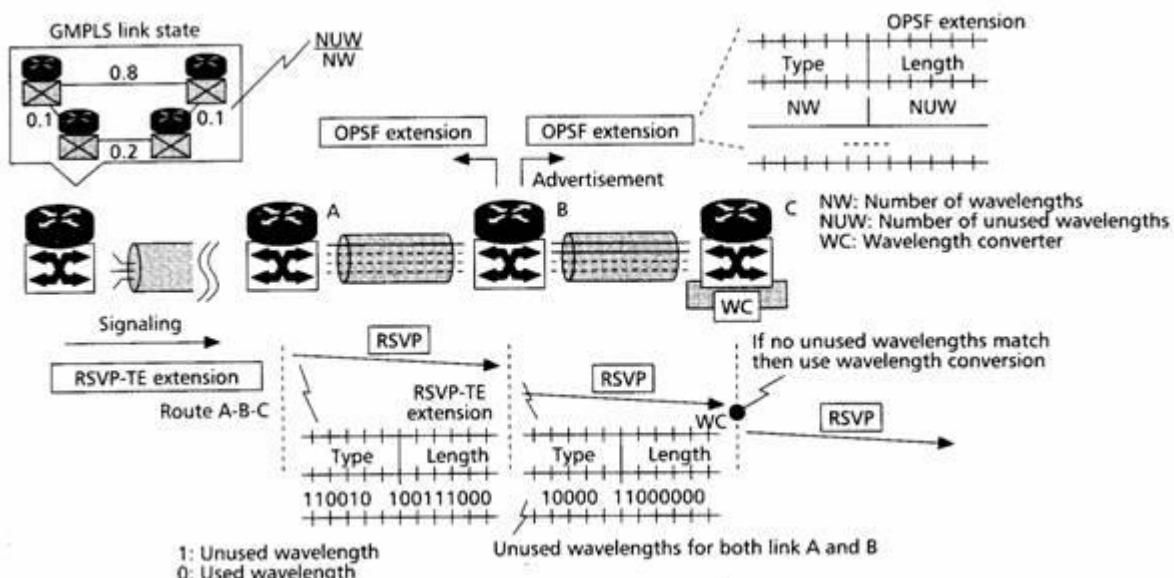
Funkcia Hikari smerovača

Hikari smerovač môže prenášať tri typy signálov. Signály typu A zahŕňajú spojovaciu funkčnosť 3. vrstvy pre operácie ako MPLS zlučovanie ciest a paketové prepájanie na 3. vrstve. Signály typu B sú vlnovo dĺžkové spojenia, ktoré potrebujú konverziu vlnových dĺžok. Tiež podporujú použitie 3R funkčnosti. Signály typu C sú prenášané transparentne alebo s neobmedzenou bitovou rýchlosťou. Hikari smerovač podporuje všetky prenosové schopnosti.

GMPLS radič (controller) v manažéri optického GMPLS smerovača zistuje svoje vlastné IP a optické stavy liniek a zhromažďuje stavy liniek ostatných Hikari smerovačov. IP prevádzka je stále monitorovaná a získané dátá odovzdávané GMPLS radiču cez filter. Algoritmus mnohovrstvovej topológie spracováva nazbierané údaje o stave IP a optických liniek.

Pre podporu voliteľnej konverzie vlnových dĺžok bolo použité rozšírenie smerovacích a signalizačných funkcií pre optické GMPLS. Konverzia je veľmi nákladná a hardvérovo náročná. Transparentný prenos dát je veľmi atraktívny pre nízku cenu a vysokú flexibilitu. Úlohou signalizačných protokolov je dosiahnutie efektívneho výberu cesty na základe minimalizácie potreby vlnovo dĺžkových konverzií.

Pre smerovacie oznámenia je použité rozšírenie OSPF, ktoré je znázornené na obrázku. Každý Hikari smerovač oznamuje svoj celkový počet použitých a nepoužitých vlnových dĺžok. Každý uzol používa túto informáciu na rozlíšenie GMPLS stavu liniek a môže vybrať najlacnejšiu cestu. Rozšírenie zahŕňa informáciu o 3R zdrojoch a štatistické informácie ako využitie každej vlnovej dĺžky, 3R a vlnovo dĺžkových konverzačných zdrojov. Tieto informácie sa použijú pre smerovanie.



Signalizácia v Hikari smerovači

Ako signalizačný protokol sa využíva rozšírenie RSVP. Prvý Hikari smerovač nastaví informáciu o nepoužitých vlnových dĺžkach do bitovej mapy v RSVP signalizácii. Každý tranzitný Hikari smerovač prepíše túto informáciu pomocou AND medzi bitovou mapou nepoužitých vlnových dĺžok v prichádzajúcej signalizácii a svojou vlastnou bitovou mapou nepoužitých vlnových dĺžok. Ak nie je žiadna voľná vlnová dĺžka, je nutná konverzia vlnových dĺžok. Smerovač, ktorý poskytne vlnovo dĺžkovú konverziu vytvorí novú bitovú mapu nepoužitých vlnových dĺžok a pošle ju ďalšiemu smerovaču.

Táto signalizačná a smerovacia technika minimalizuje frekvenciu vlnovo dĺžkovej konverzie v sieti a môže poskytnúť cenovo veľmi efektívnu optickú siet.

7.10 Záver

Súhrn vlastností GMPLS:

- poskytuje novú možnosť manažovania sieťových zdrojov
- poskytuje spoločnú riadiacu rovinu pre všetky vrstvy a pre zariadenia rôznych výrobcov
- rýchle a automatické poskytovanie služieb
- väčšia inteligencia a efektívnosť poskytovaných služieb
- podpora vrstvového aj peer modelu optických sietí

8 40 Gbit/s technológia

Tak ako sa posúva vývoj optických prenosových technológií smerom dopredu, návrhári musia uvažovať v dvoch smeroch, nie len v optickom ale i elektrickom. V optickom smere veci, ktoré ich obmedzujú hlavne sú:

- optický odstup signál šum OSNR,
- rušenie zosilňovača,
- NRZ modulácia,
- elektrický šum pri 40 Gbit/s technológií,
- chromatická disperzia,
- polarizačná módová disperzia PMD.

Pri nasadzovaný takýchto technológií je podstatou rozoznať niekoľko základných vlastností:

- Neexistencia priamych modulátorov, potreba externého modulačného zdroja (predpoklad je, že aj do blízkej budúcnosti sa budú také typy používať).
- Dizajnéri 10 Gbit/s technológií si dali záležať na efektívnom využití vlákna kvôli disperzným problémom. Dovolené straty vplyvom disperzie sa však pri 40 Gbit/s technológií zvyšujú s mocninou bitovej rýchlosi. Preto je pri týchto systémoch 16 krát podstatnejšia ako pri 10 Gbit/s technológiách.
- Kódovacie techniky používané v 10 Gbit/s nie sú použiteľné bez zmeny v 40 Gbit/s.

V elektrickej oblasti sú to materiálové obmedzenia, hlavne optoelektrických komponentov (generátory signálov, modulátory, prijímače).

8.1 Podmienky pre aktívne prvky 40 Gbit/s technológie

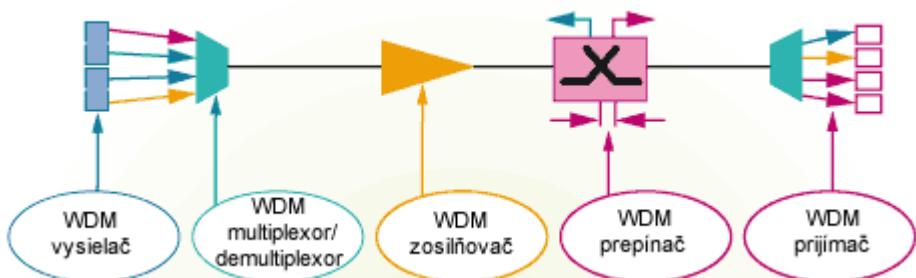
Z hľadiska podmienky fungovania týchto systémov je potrebné si definovať parametre niektorých prvkov. Najmä modulátorov, detektorov a prijímačov.

- *modulačná šírka pásma 3 dB* – tento parameter je podstatný pre vyhodnotenie šírky pásma modulátora. Udáva frekvenciu, na ktorej výstup modulátora poklesne o $\frac{1}{2}$ z hodnoty na nízkych frekvenciách. Upozorňuje nás na kvalitu odozvy modulátora a aký kvalitný optický výstup dokáže vygenerovať,
- „*chirp*“ – otváranie a zatváranie modulátora spôsobuje drobné zmeny frekvencie svetla prechádzajúceho ním, to sa označuje „*chirp*“. Jedná sa často o nastaviteľnú hodnotu,
- *vložené straty* – modulátorom vložené straty, je pomer medzi výkonom vstupujúceho a vystupujúceho svetla,
- *kontrast* – je meranie pri RZ signále, ako pomer medzi maximálnou a minimálnou hodnotou výkonu impulzu,
- *pomer vybudenia* – je pomer medzi svetelným výkonom, ak je modulátor „zatvorený“ a „otvorený“
- *FWHM (Full width at half maximum)* – najčastejšie meraný pri RZ impulze. S tvarom impulzu je tento parameter podstatným parametrom, ktorý hovorí o kvalite,
- *modulačné napätie* – je napätie špička – špička, na otvorenie a zatvorenie modulátora. Pomer vybudenia je závislý od modulačného napäťia,
- *polarizačná citlivosť* – modulátory majú rôzne prenosové charakteristiky, v závislosti od polarizácie svetla. Táto závislosť je týmto parametrom definovaná,
- *3 dB šírka prenosového pásma* – pre detektory a prijímače, 3 dB šírka pásma je šírkou, kedy výstupné napätie, alebo tok máva $\frac{1}{2}$ úrovne nízkych frekvencií. Tento parameter ukazuje frekvenčnú odozvu prijímača a rýchlosť signálu, ktorú môže detektovať,
- *citlivosť* – pri detektoroch je citlivosť definovaná ako minimálny vstupný optický výkon, detekovaný prijímačom pri bitovej chybe a je vyjadrený v dBm,
- „*odpoved*“ – v detektoroch je to pomer fotoelektrického prúdu generovaný na watt optického vstupu. Je vyjadrený v Ampéroch na Watt [A/W].

8.2 Zloženie 40 Gbit/s DWDM systému

Základný konštrukčný princíp DWDM systémov mám ozrejmujeme Obrázok 8.1. Konštrukcia je podobná ako pri „metalických“ technológiách, teda skladajú sa z vysielača/prijímača, multiplexora/demultiplexora a zosilňovačov.

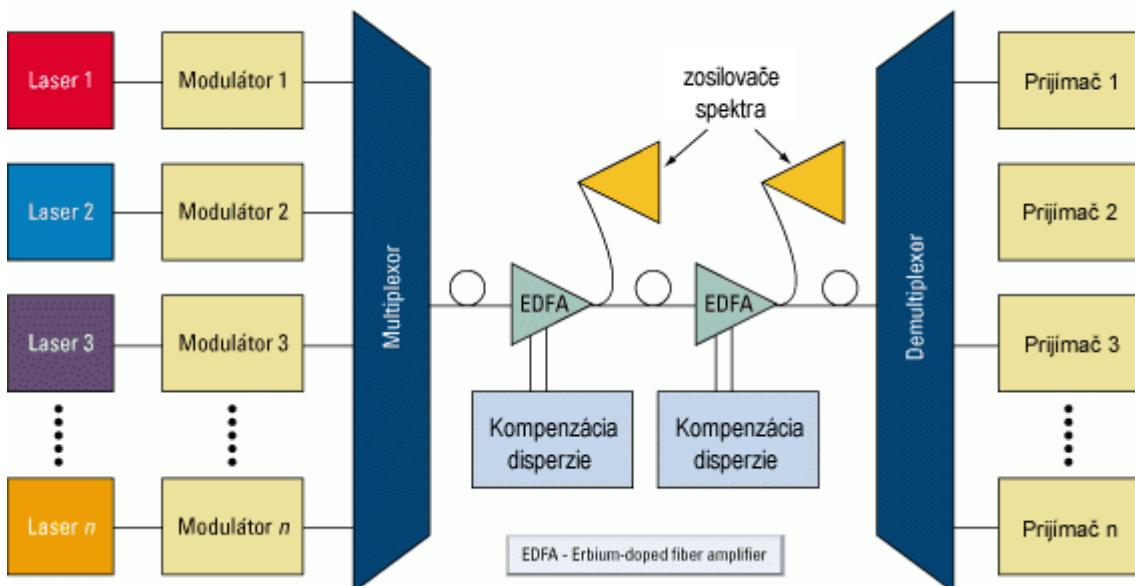
40-Gbit/sec DWDM systémové komponenty



Obrázok 8.1 Základné komponenty DWDM systému

Základom DWDM (WDM) systémov je multiplexor a demultiplexor, ktorý vyplýva už z princípu týchto prenosových systémov, teda potreby prepraviť rôzne vlnové dĺžky jedným optickým vláknom.

DWDM prenosový systém



Obrázok 8.2 Základný princíp DWDM systému

Základné vlastnosti jednotlivých komponentov sú stanovené aj z hľadiska empirických skúseností.

WDM zdroje:

- vysokovýkonné, preladiteľné a nepreladiteľné zdroje (laser),
- modulátory na báze polovodičov, LiNbO₃, polovodičové zosilňovače,
- vlnovodlžkové zámky pre preladiteľné zdroje.

WDM multiplexory a demultiplexory:

- nízko disperzné filtre a premiešavače (interleaves)

WDM zosilňovače:

- dynamické vyrovnávanie zosilnenia,
- monitor optického výkonu,
- integrované EDFA a RAMAN zosilňovače.

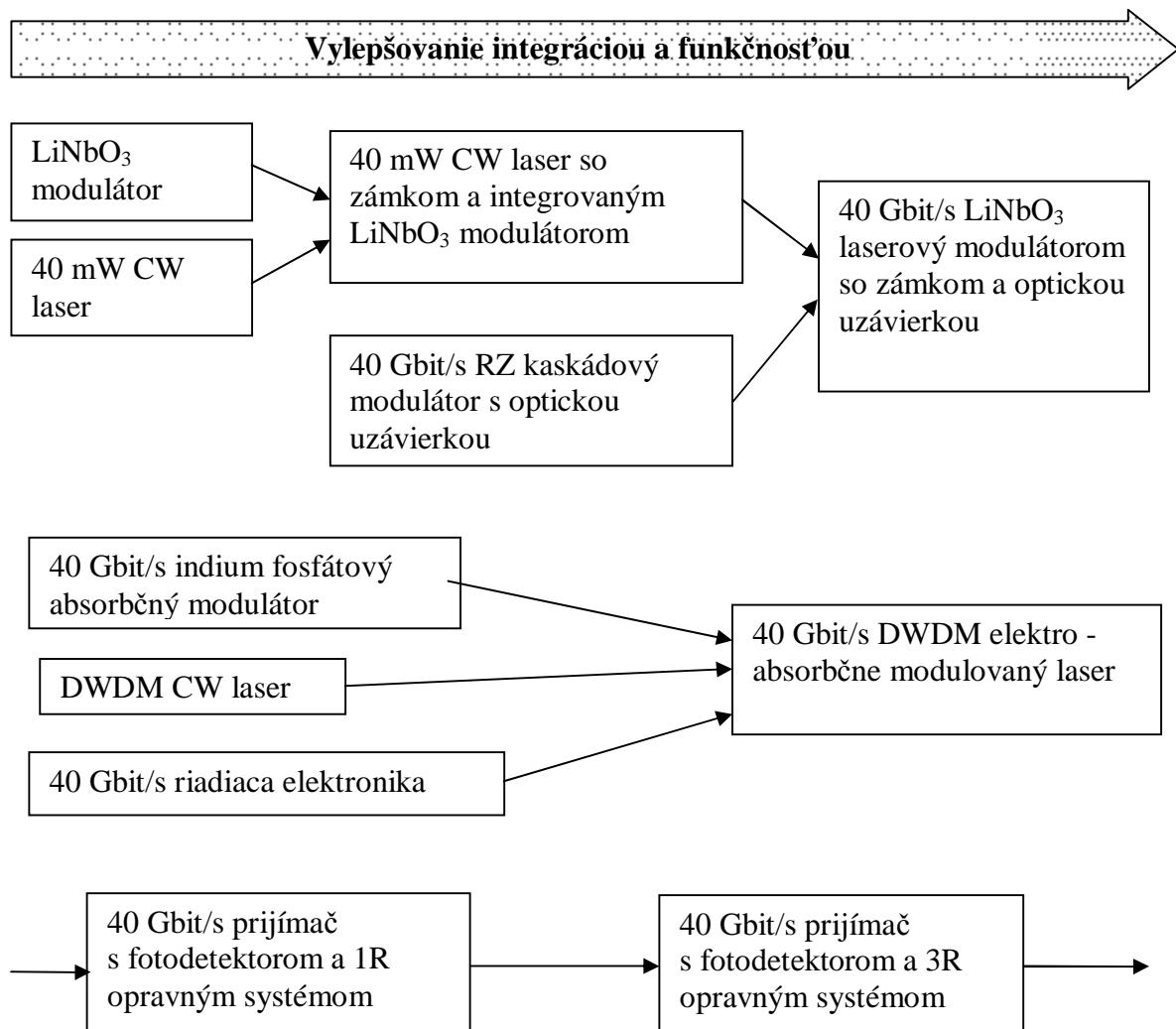
WDM prepínače:

- nízko disperzné optické prepínače,
- nízko disperzné optické add&drop multiplexory.

WDM prijímače:

- 40 Gbit/s PIN diódy a lavínové diódy,
- preladiteľné kompenzátori disperzie,
- kompenzátori polarizačnej disperzie,
- vysokorýchlosťná elektronika.

WDM systémy postupne dospeli vylepšovaním do stavu v akom sú dnes, tento vývoj je ilustrovaný na Obrázok 8.3. Pre 40 Gbit/s technológiu je najčastejšie použitá jedna vlnová dĺžka s časovo deleným multiplexom TDM, pričom sa začína uvažovať o DWDM s oddelením kanálov 200 GHz (prip. 100 GHz verzia). Podstatnou výhodou je to, že DWDM zdroje sú preladiteľné, takže je možné ušetriť na počte laserových zdrojov.

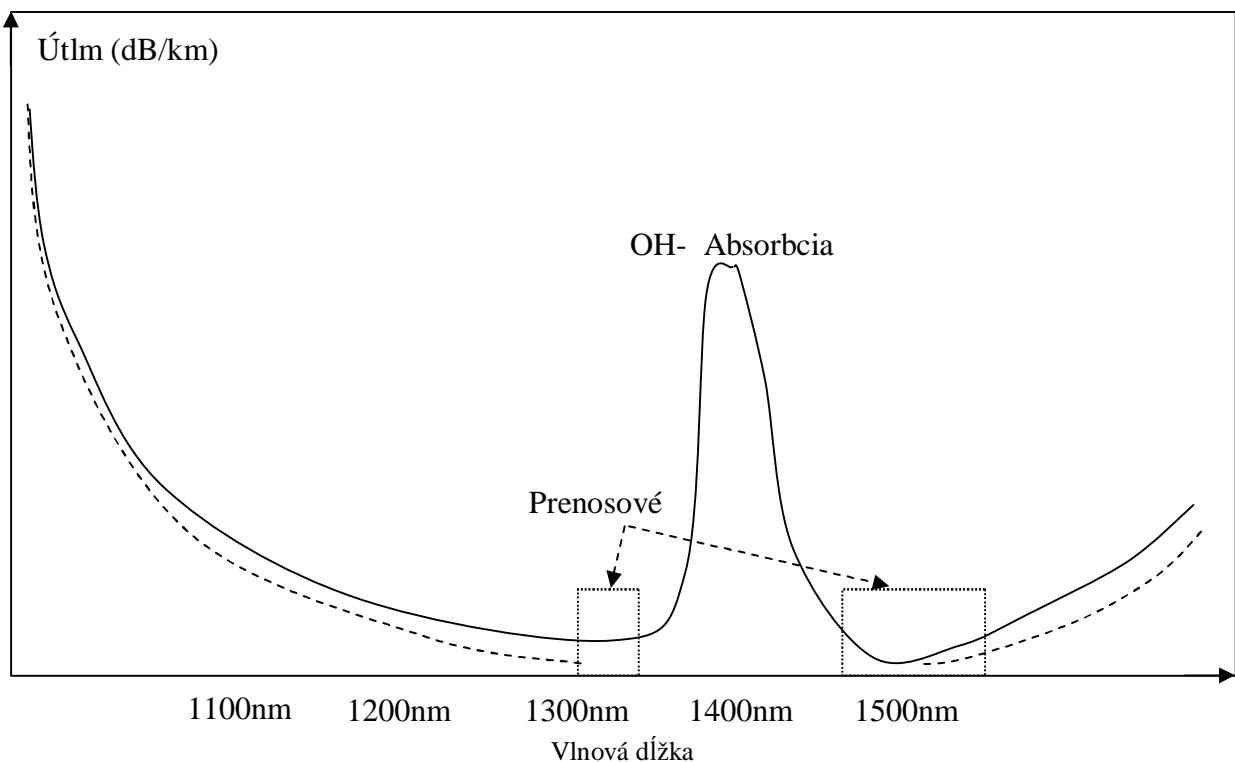


Obrázok 8.3 Vývoj vylepšovania 40 Gbit/s technológie

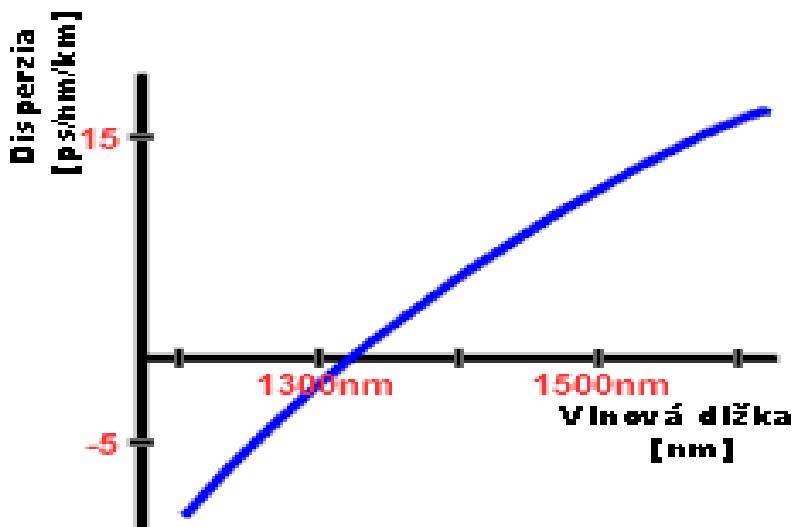
8.3 Typy vylepšujúcich optických vláken

Sú to optické vlákna, ktoré sú určené na použitie s alebo namiesto bežných optických vláken za účelom vylepšenia výkonu celého systému.

Za bežné optické vlákno je zvyčajne považované vlákno s priebehom tlmenia uvedenom na obrázku (Obrázok 8.4). Jeho najmenšie tlmenie je v oblasti 1550 nm. Z pohľadu disperzie má takéto vlákno nulovú chromatickú disperziu v oblasti okolo 1300 nm a v oblasti 1550 nm sa hodnota tejto disperzie pohybuje na úrovni 15 ps/nm/km (Obrázok 8.5). Pod pojmom bežné vlákno taktiež môžeme rozumieť obyčajné jednovidové vlákno alebo neposunuté vlákno.



Obrázok 8.4 Charakteristika vyjadrujúca straty na optickom vlákne



Obrázok 8.5 Chromatická disperzia bežného optického vlákna

Súčasné požiadavky na optické vlákna sú z pohľadu množstva prenášaných vlnových dĺžok, bitovej rýchlosťi pre každú vlnovú dĺžku a požadovaných vzdialenosťí oveľa väčšie ako kedykoľvek predtým. Na optimalizáciu výkonu súčasných systémov môže byť nevyhnutné nahradíť bežné optické vlákna alternatívnymi alebo ich použiť s inými typmi. Výroba optického vlákna je vlastne kombináciou chémie a fyziky - drobnými zmenami v chemickom zložení a rozmeroch jadra a plášťa sa mení správanie vlákna.

Vlákno s posunutou disperziou (DSF)

Moderné systémy využívajúce výhodu nízko-stratovej oblasti 1550 nm optického vlákna môžu mať pri bežnom vlákne veľkú chromatickú disperziu pri danej vlnovej dĺžke. Obzvlášť pri veľkých vzdialenosťach sa môže stať situácia kritickou a vzniká potreba kompenzácie disperzie.

Možnosťou je použitie vlákna s *posunutou disperziou* – **DSF** (Dispersion Shifted Fiber), ktoré má bod nulovej disperzie posunutý do oblasti 1550 nm. Toto je dosiahnuté zmenou materiálovej disperzie, ktorá je zložkou chromatickej disperzie, pridávaním prímesí do kremíkového základu optického vlákna. Hoci pre vlnové dĺžky väčšie a menšie ako vlnová dĺžka nulovej disperzie nie sú rovné nule, ich hodnota je podstatne menšia ako pri bežnom optickom vlákne. Toto sa stáva problematické až pre prenos na veľmi veľké vzdialenosťi – môže sa riešiť tak, že jednotlivé dĺžky sa použijú s malou zápornou disperziou (napr. 1 ps/nm/km), ktorá môže byť zrušená krátkym úsekom obyčajného optického vlákna s pozitívnou disperziou. Tento úsek sa pridáva buď v pravidelných intervaloch na prenosovej trase, alebo v prípade prenosu na nie až tak veľké vzdialenosťi, sa pridáva jeden úsek pred koncovým zariadením.

Vlákno kompenzujúce disperziu (DCF)

Ak je v oblasti 1550 nm použité na preklenutie veľkej vzdialenosťi bežné vlákno, je potrebné kompenzovať veľkú kladnú disperziu spôsobenú týmto vláknom.

Na to sa používa DCF, ktoré je navrhnuté tak, aby malo v oblasti 1550 nm veľkú zápornú chromatickú disperziu. Jej hodnota sa pohybuje rádovo v oblasti -100 ps/nm/km - na každý 6 až 7 dĺžok bežného vlákna s disperziou okolo 15 ps/nm/km je potrebná jedna dĺžka vlákna DCF, aby sa systém vykompenzoval. Táto technológia teda umožňuje použitie aj bežných vláken v oblasti 1550 nm pre vysoko-rýchlosné prenosy na veľké vzdialenosťi. Vzniká však problém so sklonom disperznej krivky (dispersion slope), kedy má každá vlnová dĺžka mierne odlišnú disperziu – DCF vie teda úplne vykompenzovať disperziu len pre jednu vlnovú dĺžku.

Vlákno s nenulovým posunom disperzie (NZ-DSF)

Pri DSF je bod nulovej disperzie v oblasti 1550 nm, čo je želateľný stav aby nedošlo k "nahromadeniu" disperzie ako pri bežných vláknach. Na druhej strane, za určitých podmienok môže byť nevýhodou mať nulovú alebo veľmi malú disperziu – vtedy na radu nastupujú vlákna s určitým posunom disperzie – NZ-DSF.

HLavným dôvodom ich použitia je nelineárny efekt nazývaný 4-vlnové miešanie. Vniká ak v systéme navzájom interferujú 3 signály s tromi vlnovými dĺžkami a produkтом je signál s inou vlnovou dĺžkou. Tento signál berie energiu s ostatných a môže tiež interferovať s ostatnými. Prítomnosť určitej disperzie však odstraňuje 4-vlnové miešanie – znižovaním pravdepodobnosti sfázovania signálov.

Vlákna s vysokou efektívou plochou

Nelineárne efekty sú spôsobené vysokými optickými výkonmi v optickom vlákne. Ich nepriaznivé vplyvy sa čoraz viac dostávajú do popredia, pretože v systémoch sa používa viac a viac vlnových dĺžok a teda rastie aj celkový optický výkon.

Podstata problému je vo vysokej koncentrácií optického výkonu vo vlákne. Riešením je znížiť túto hustotu použitím väčšej plochy, následkom čoho sa výkon vo vlákne viac rozloží. Vlákna s vysokou efektívou plochou majú na rozdiel od bežných vláken väčšiu plochu jadra a plášťa ($100 \mu\text{m}^2$ oproti $50\mu\text{m}^2$ pri bežných vláknach). Tieto vlákna majú zvyčajne malú nenulovú disperziu v oblasti 1550 nm.

Vlákno pre všetky vlnové dĺžky

Zjavným obmedzením bežných vláken je vyššie tlmenie v postranných oblastiach vlnovej dĺžky 1550 nm - je významne vyššie v oblasti 1400 nm. Možným riešením na zvýšenie kapacity systému je zvýšenie počtu vlnových dĺžok vysielajúcich cez optické vlákno. Je prirodzené, že po vyčerpaní vlnových dĺžok z oblasti 1550 nm sa snažíme využiť súbežne aj iné oblasti.

Vlákno pre všetky vlnové dĺžky zjedňuje špičkové tlmenie charakteristické pre bežné vlákno v oblasti 1400 nm - takto umožňuje pre nízko-stratové vysielanie použiť viac vlnových dĺžok. V skutočnosti je výsledná strata v okne 1400 nm menšia ako v okne pri 1300 nm. Toto je dosiahnuté hlavne odstránením vodných prímesí pri výrobe vlákna - pri bežnom vlákne je špička tlmenia v oblasti 1400 nm spôsobená iónmi OH.

Otvorenie nového okna tiež vytvára zopár nových problémov ako napríklad potreba komponentov pracujúcich v tejto novej oblasti. Pre optické zosilňovanie - erbiom dopované zosilňovače pracujú len v oblasti 1550 nm - alternatívou pre okno 1400 nm sú thulium dopované zosilňovače, ktoré sú v súčasnosti objektom intenzívnych výskumov.

8.4 Disperzia a nelinearity optického vlákna

Pri prenose signálu cez optické vlákno pôsobia na signál nelineárne vplyvy ako sú Brillouinov rozptyl, vlastná fázová modulácia, Ramanov rozptyl a štvorvlnové zmiešavanie FWM. Na elimináciu týchto vplyvov treba pri prenose zapojiť rôzne metódy. Brillouinov rozptyl sa dá relatívne jednoducho potlačiť pomocou *frekvenčného kolísania* (frequency dithering) v laserovom zdroji. *Vlastná fázová modulácia* (self-phase modulation) nevplýva významou mierou na degradáciu signálu a môže byť zanedbaná. Vo WDM systémoch však štvorvlnové zmiešavanie môže znižovať energiu WDM signálu a produkovať neželané spektrálne zložky, čo môže vyústíť do úplnej degradácie signálu. Štvorvlnové zmiešavanie nastane v regióne vlnových dĺžok s nulovou chromatickou disperziou kvôli ľahšiemu fázovému prispôsobeniu. Preto sa musí pri projektovaní WDM systému vybrať na prenos región, ktorý má konečnú a *nenulovú chromatickú disperziu*. Avšak voľba regiónu s nenulovou chromatickou disperziou má za následok *zvýšenie medzisymbolovej interferencie ISI* - rozširovanie impulzov. Oproti štvorvlnovému zmiešavaniu však chromatická disperzia spôsobuje oveľa menšie problémy. Navyše si musíme uvedomiť, že **disperzia** je *lineárny efekt*, ktorého účinky sú **reverzibilné**. Štvorvlnové zmiešavanie FWM je naopak nelineárny efekt, kvôli ktorému sa pôvodný signál už obnoviť nedá. Technológia 40Gbit/s je úzko spätá s technológiou vlnovo-dĺžkového deleného multiplexu WDM, preto sa tieto obmedzenia týkajú aj jej nasadenia.

Na druhú stranu, chromatická disperzia nesmie byť natoľko veľká, aby znemožnila diaľkové prenosy. Pri rýchlosťach 40Gbit/s, by veľká disperzia mohla znamenať úplnú degradáciu signálu. Vlákna s nenulovou, posunutou disperziou NZDSF poskytujú konečnú disperziu približne do 4ps/nm.km v regióne od 1540 do 1560 nm. Na tomto mieste treba poznamenať, že pri nižších prenosových rýchlosťach spôsobovala najväčšie problémy práve chromatická disperzia vlákna. Preto sa vo veľkej miere tlačilo na výrobu vlákiem s posunutou disperziou DSF (dispersion shifted fiber), ktoré majú nulovú disperziu pri vlnovej dĺžke 1550 nm. Z tohto dôvodu nie sú tieto vlákna vhodné pre nasadenie WDM systémov s technológiou 40Gbit/s. Toto môže spôsobovať problémy operátorom, ktorí už takéto vlákna inštalovali.

Obmedzenia vplyvom chromatickej disperzie

Svetelné impulzy reprezentujú informáciu a každý z nich má presne definovanú spektrálnu hustotu. Vnútornou vlastnosťou optického vlákna je rozdielna vlnová dĺžka sa bude súrňať rôznymi rýchlosťami, čo má za následok chromatickú disperziu **CD** (Chromatic Dispersion) a polarizačnej disperzie **PMD** (Polarization Mode Dispersion). Keďže v prírode je takýto jav bežný, prišlo sa aj na riešenie CD.

Ku chromatickej disperzii dochádza vtedy, ak rýchlosť svetla v optickom vlákne je závislá od vlnovej dĺžky. Prakticky nepriamo závisí od mocniny prenosovej rýchlosťi. Pri 10 Gbit/s je limit 1200 psec/nm, čo zodpovedá 70 km štandardného jednovidového vlákna. Ale pre 40 Gbit/s je limit 75 psec, čo je 4.4 km vlákna resp. 19 km nedisperzného vlákna **NDZF** (Non-zero Dispersion Shifted Fiber). Pri očakávanej prenosovej vzdialosti 500 km bude celková disperzia 8500 psec/nm pre SMF a okolo 2000 psec/nm NZDF vlákno. Preto môžu nastáť len malé chyby pri kompenzácií a to okolo 1% pre SMF a 4% pre NZDF. Kompenzácia sa uskutočňuje pomocou modulov označovaných **DCM** (Dispersion Compensation Modules). Sú vytvorené z cievky na ktorej je namotané vlákno s negatívnou disperziou. Čo nám na opačnej

strane prináša neopraviteľnú disperziu a disperzné nezrovnalosti v tvare disperznej krivky. Terajšie systémy DCM bola hodnota 170 psec/nm s reziduálnou disperziou ± 85 psec/nm a hodnota nezrovnalostí v tvare disperznej krivky pre SMF 0.05 psec/nm 2 na km, 0.11 psec/nm 2 na km pre NZDF a -0.3 psec/nm 2 pre DCM.

Napriek tomu, že šum siete je priamo kolerovaný s prenosovou rýchlosťou, tak prijímač zozbiera všetok optický aj elektrický šum do **kompenzátoru disperzie DC** (dispersion compensator). Preto podľa skúseností, prijímače pre 40 Gbit/s majú o 6 dB viac šumu ako 10 Gbit/s a o 12 dB viac ako 2.5 Gbit/s prijímače.

Na nasledujúcim krátkom príklade by sme ukázali rôzne vplyvy na OSNR. Tabuľka o veľkosti SNR pre jednotlivé prenosové rýchlosťi, typické 0.1 nm optické pásmo, výsledky obsahujú ≈ 9 dB rezervu pre teplotný šum, starnutie vlákna, šum, ISI – medzisymbolovú interferenciu, prebudenie zosilňovača. Hodnoty sú empirické!

Tabuľka 8.1 Prehľad SNR

SNR pre dané prenosové rýchlosťi s BER 10^{-15}	
Prenosová rýchlosť [Gbit/s]	Požadovaný SNR [dB]
2,5	18
10	24
40	30

Príklad výpočtu OSNR pre 40 Gbit/s:

$$\text{SNR} \approx 58 - 10 \cdot \log_{10}(M \times N) - L_{\text{span}} - NF + P_{\text{tot}} + G_{\text{raman}} - R$$

Poznámky:

- 5×100 km intervalov s 25 dB útlmom na interval (L_{span}),
- počet optických zosilňovačov 6 (N , vrátane predzosilňovača a zosilňovača),
- kanálov 32 (M , L pásmo s 200 GHz odstupom),
- 6 dB šum (NF - Noise Figure),
- 23 dBm výstup optického zosilňovača (P_{tot}),
- 10 dB raman zosilňovač (G_{raman})
- 0.5 dB zvlnenie (R)

Celkový SNR ≈ 33.6 dB.

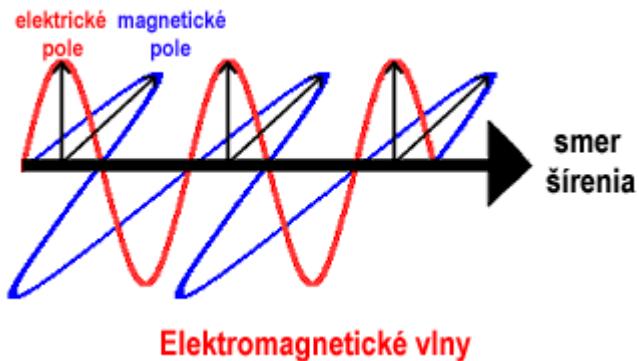
Obmedzenia vplyvom PMD

Pri diskusiách o optickej prenosovej technológií 10Gbit/s v polovici 90-tych rokov prevládal názor, že disperzia prenášaných svetelných impulzov znemožní prenášať dátu vyššími rýchlosťami na existujúcich optických vláknach. Medzi limitujúce faktory, s ktorými sa musia výrobcovia vysoko-rýchlosťnych optických technológií vysporiadať patria:

- chromatická disperzia,
- polarizačná módová disperzia PMD (polarization-mode dispersion),
- tlmenie,
- optický odstup signál-šum,
- nonlinearity vlákna.

Pri riešení jednotlivých problémov narazíme na fakt, že všetky faktory vyžadujú istý kompromis. OEM výrobcovia dodnes diskutujú, ktorý z týchto faktorov je najpálčivejším problémom.

Corvis, Ciena, Nortel, Startups Innovance, Solinet a PhotonEx považujú PMD za hlavnú otázkou v 40-Gbit/s sietiach. Každý svetelný impulz ako súčasť elektromagnetického spektra je spojený s magnetickým a elektrickým poľom. Pre daný svetelný lúč existujú obidve tieto zložky, ktoré sa šíria v kolmých rovinách.



Obrázok 8.6 Šírenie elektromagnetickej vlny

Svetlo emitované z lasera pozostáva z mnohých individuálnych svetelných vĺn, ktoré majú vlastné elektrické a magnetické pole pootočená v rôznych smeroch. Pre každú vlnu však platí, že jej samostatné zložky sú kolmé. Takéto svetlo sa nazýva nepolarizované. Pri ideálnych podmienkach sa obidve zložky prenášajú rovnakou rýchlosťou a prekonávajú rovnako dlhú dráhu. Avšak ak sa jednotlivé zložky (roviny) prenášajú rôznou rýchlosťou, svetelné impulzy sa rozširujú natoľko, že sa môžu prekrývať. Tento efekt sa prejavuje ak sa v jadre optického vlákna často vyskytujú oblasti, ktoré nie sú perfektne valcové. Výsledkom je zvýšená chybovost' v prijímači.

PMD je náhodný jav spôsobený nedokonalou symetriou a premenlivým mechanickým napätiom, ktoré znáša vlákno. Preto sa PMD meria ako priemerná hodnota v časovom intervale. Táto náhodnosť je dôvodom, pre ktorý sa PMD dá kompenzovať len s veľkou obtiažnosťou. PMD sa stala významným problémom pri prenosových rýchlosťach 40Gbit/s.

Vyšie uvedení OEM výrobcovia však považujú za veľmi závažný aj problém chromatickej disperzie. Chromatická disperzia spôsobuje hlavne problémy ak sa vo vlákne využíva viacero kanálov. Mnoho operátorov však ani nevie o existencii dvoch rôznych typov disperzie.

Ďalej je potrebné k tomu prirátať dvojlomnosť konektorov a DWDM komponentov, a tá ešte môže kolísť vplyvom teploty. PMD tolerancia 10 Gbit/s systému v 12.5 GHz pásmi je 16 psec. 40 Gbit/s systému v 50 GHz pásmi je len 4 psec. Citlivosť na PMD sa zvyšuje s mocninou množstva údajov prenesených v čase. Preto je potrebne pre túto technológiu vytvoriť PMD kompenzátor. Momentálne používané metódy kompenzácie chromatickej disperzie nie sú postačujúce a je potrebne vytvoriť dynamické metódy kompenzácie.

Pre jednovidové vlákna - SMF je dvojlomnosť špecifikovaná medzi 0.5 až 2 psec/km a pre nové typy vlákiens max 0.5, ale priemerne 0.1 až 0.2 psec/km. Takže pre 500 km vlákno je to okolo 2 až 4 psec PMD. Čo pre 40 Gbit/s, kde impulz trvá 25 psec pre NRZ, 15 psec pre RZ predstavuje PMD 8 - 16% z NRZ a 13 - 26% pre RZ, preto je aj kompenzácia PMD veľmi podstatná.

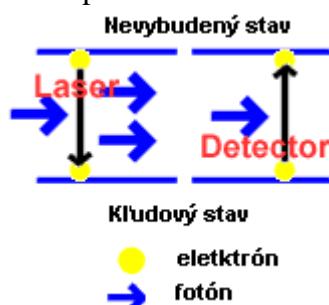
Manažment disperzie

Jednou z najväčších otázok do budúcnosti je, ako poskytnúť manažment disperzie v priateľných cenových reláciách. Jednoduché riešenia sú už dostupné v podobe vlákien kompenzujúcich disperziu DCF dodávané firmami Lucent a Corning. Zariadenia určené na kompenzáciu disperzie sa obmedzujú len na kompenzátoru chromatickej disperzie a kompenzátoru sklonu disperznej krivky. Chromatická disperzia sa typicky rieši pomocou bloku DCF zaradeného za zosilňovačom. PMD disperzia je zmierňovaná jedine pokládkou nových a kvalitnejších vlákien, aj keď na trh sa už dostávajú aj iné riešenia. DCF tak ostáva hlavnou oporou pri riešení problémov disperzie v existujúcich systémoch 2.5Gbit/s a 10Gbit/s.

8.5 Optická regenerácia (3R)

Prenášaná informácia je v optických sietiach konvertovaná podľa rôznych protokолов na záblesky svetla generovaného laserom, putujúce optickým vláknom. Na spätné získavanie tejto informácie (do elektrickej formy) sa v prvom kroku používa fotodetektor – pri vytváraní svetla sa používajú polovodičové prvky a polovodičové prvky sa môžu použiť aj pri reverznom procese.

Zatiaľ, čo pri laseroch sa svetlo vytvára stimulovaním elektrónov na pád z vyšších valenčných vrstiev, v prípade fotodetektorov je kľúčom úspechu zrážka čiastočiek svetla – fotónov – s elektrónmi a ich následné vybudenie do vyššieho stavu (Obrázok 8.7), čím vzniká elektrický prúd prezentujúci informáciu prenášanú svetlom.



Obrázok 8.7 Energetické stavy elektrónov v laseroch a fotodetektoroch

Po tom, ako sa optický signál skonverte do elektrického signálu, je potrebné z tohto získať prenášanú informáciu. Hoci dáta opúšťali zdroj ako jasne zadefinované nuly a jedničky, po „precestovaní“ kilometrami optického vlákna sa presné pulzy význame zmenia – stratia výkon, naberú šumy a tiež sa posunú zo synchronizácie.

Zníženie výkonu sa môže kompenzovať elektronický zosilňovaním elektrického signálu – znova zosilnenie (re-amplification). Na odstránenie vplyvov šumu sa potom používa obnova tvarovania signálu (re-shaping). Obnova tvarovania sa tiež robí v elektrickej oblasti a slúži na „vyčistenie“ zašumeného signálu; výsledkom sú jednoznačné elektrické jednoty a nuly. Nakoniec sa robí proces obnovy časovania (re-timing) – upravenie časov jednotiek a nul a časových medzier medzi nimi do stavu v akom boli vysielané – rovnaké časy bitov a medzier a zachovanie bitovej rýchlosi v systéme.

Súhrne sa tieto procesy nazývajú 3R regenerácia (re-amplification, re-shaping, re-timing) – Obrázok 8.8. Pojem 1R regenerácia zvyčajne popisuje stav, kedy je samostatne urobený proces znova zosilnenia (re-amplification). Pojem optická 1R regenerácia znamená, že celý proces znova zosilnenia prebieha v čisto optickej oblasti (bez konverzie svetla na elektrický prúd). V súčasnosti sa veľká pozornosť venuje vývoju čisto-optických 3R regenerátorov, ktoré by mali plniť všetky funkcie 3R regenerátorov bez potreby konverzie na el. prúd, pri menších nákladoch.



3R regenerácia

Obrázok 8.8 Priebehy signálov pri 3R regenerácii

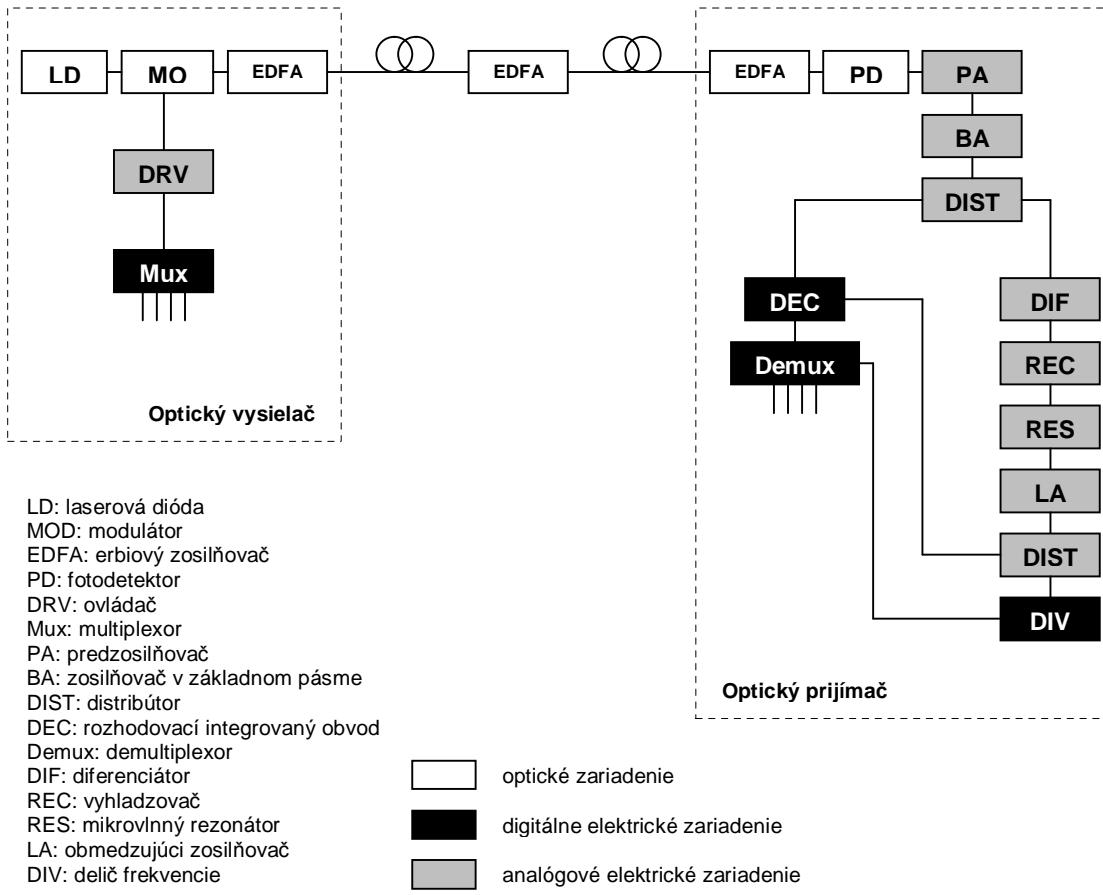
8.6 Detektory – Optické prijímače

Vysokorýchlosné TDM systémy vykonávajú viaceré funkcie. Veľa funkcií ako sú multiplexovanie, demultiplexovanie, synchronizácia, obnovenie tvaru signálu a regenerácia môžu byť spojené vo vysokorýchlostnom integrovanom obvode. Kombinácia 40Gbit/s TDM systémov s WDM technológiou ponúka sľubnú cestu k dosiahnutiu terabitových prenosov cez jediné optické vlákno.

Jednou z hlavných nedoriešených otázok pri vývoji vysokorýchlosných TDM systémov je implementácia vysokorýchlosných elektronických integrovaných obvodov. Momentálne je využívaná kremíková technológia v systémoch 10Gbit/s (STM-64). V nedávnej dobe bol prezentovaný pokrok v triede 40Gbit/s integrovaných obvodov. Tieto obvody využívajú HEMT (high electron mobility transistors) a HBT (Heterojunction Transistors), ktoré sú založené na polovodičoch ako GaAs, InP a SiGe. Integrované obvody musia byť schopné prevádzky pri rýchlosťach 50Gbit/s, ak berieme v úvahu zvýšenú bitovú rýchlosť kvôli doprednému samoopravnému kódovaniu FEC. Teda pred komerčným nasadením technológie 40Gbit/s bol nevyhnutný pokrok v dizajne integrovaných obvodov a vylepšená činnosť tranzistorov.

Na Obrázok 8.9 je zobrazená typická konfigurácia optického vysielača a prijímača. Obnovenie tvaru signálu je v prijímači vykonávané v blokoch: EDFA zosilňovač, fotodetektor, elektrický predzosilňovač, zosilňovač v základnom pásme. Príchod EDFA zosilňovačov zmenil od základov metodológie návrhu elektrického predzosilňovača a zosilňovača v základnom pásme. Minimálny optický výkon na detekciu je určený EDFA šumom namiesto šumu predzosilňovača. Preto nie je vyžadovaná nízka šumová charakteristika predzosilňovača. Zároveň sa znížili aj nároky na zisk elektrických zosilňovačov.

Na druhú stranu treba pripomenúť, že EDFA zosilňovače zoradené do kaskády prispievajú k časovej fluktuácií - **jitter**. Preto sú v prijímači kladené vyššie požiadavky na kvalitu regenerácie signálu. Regenerácia je vykonávaná v rozhodovacom obvode (decision circuit) a obvode obnovy časovania (clock recovery circuit). Všetky integrované obvody vo vysielači a prijímači okrem obvodu obnovy časovania pracujú v širokom pásme od jednosmernej zložky až po maximálnu bitovú rýchlosť. Napríklad ovládač modulátora vo vysielači by mal vytvárať kolísavé napäťové impulzy o veľkosti 3V alebo 2V pre LiNbO₃ alebo elektroabsorbčné modulátory.



Obrázok 8.9 Typická konfigurácia optického vysielača a prijímača

Najznámejším a najjednoduchším fotodetektorom používaným v optokomuni-kačných systémoch je **p-i-n** dióda (surface-illuminated Positive Intrinsic Negative). V prijímači tohto typu vyvolá každý dopadajúci fotón excitáciu jedného elektrónu, čím sa vytvára elektrický prúd. Tento proces je postačujúci pre väčšinu systémov pracujúcich v malých vzdialostiach a s nízkymi bitovými rýchlosťami. Tento typ fotodetektora je nevhodný, ak bol signál značne utlmený. Jednou z možností je použitie *lavínovej fotodiódy APD* (Avalanche Photo Detectors). Od **p-i-n** diódy sa odlišuje hlavne tým, že pri dopade fotónu sa do exitovaného stavu dostanú stovky elektrónov. APD pracuje pri oveľa vyššom napájaní ako p-i-n dióda. Pri excitácii jedného elektrónu dochádza k excitácii okolitých atď. Generovaný elektrický signál týmto lavínovým efektom je oproti p-i-n dióde mnoho krát vyšší. Preto môže APD detektovať optické signály s nízkym výkonom. Inou možnosťou, ktorá sa často využíva je zaradenie EDFA zosilňovača pred vstupom do fotodetektora. Optický signál je zosilnený ešte pred detekciou vo fotodetektore. Tento variant predzosilňovača (pre-amplifier) sa zvyčaje používa v spojení s p-i-n fotodiódou.

Prijatý optický signál je teda transformovaný fotodetektorm do elektrickej podoby. Elektrický signál treba taktiež zosilniť. V klasických prijímačoch je za fotodetektor zaradený elektrický zosilňovač s veľmi nízkym šumom. Treba si uvedomiť, že pri technológii 40Gbit/s sa vyžaduje širokopásmové konštantné zosilnenie analógového signálu od jednosmernej zložky až po približne 50GHz. V týchto zosilňovačoch sa využíva technika spätnej väzby. Avšak šírka pásma zpätnoväzobných zosilňovačov je nepriaznivo ovplyvnená RC časovou konštantou. Pri návrhu analógových obvodov však pokračuje značný pokrok. Teda pri

konštrukcii predzosilňovača nastáva problém zo samotnou konštrukciou takého obvodu. Preto sa niekoľko výrobcov rozhodlo tento blok úplne vynechať a zosilniť optický signál pomocou EDFA zosilňovača natoľko, že elektrický signál generovaný fotodetektorom bude postačujúci pre ďalšie spracovanie. Je zrejmé, že v tomto prípade nemôže byť použitý štandardný fotodetektor, ale musí byť optimalizovaný na vysokovýkonový optický signál. Výsledný elektrický signál z fotodetektora dosahuje porovnateľnú úroveň ako pri elektrickom zosilňovači.

8.7 Optické zosilňovače

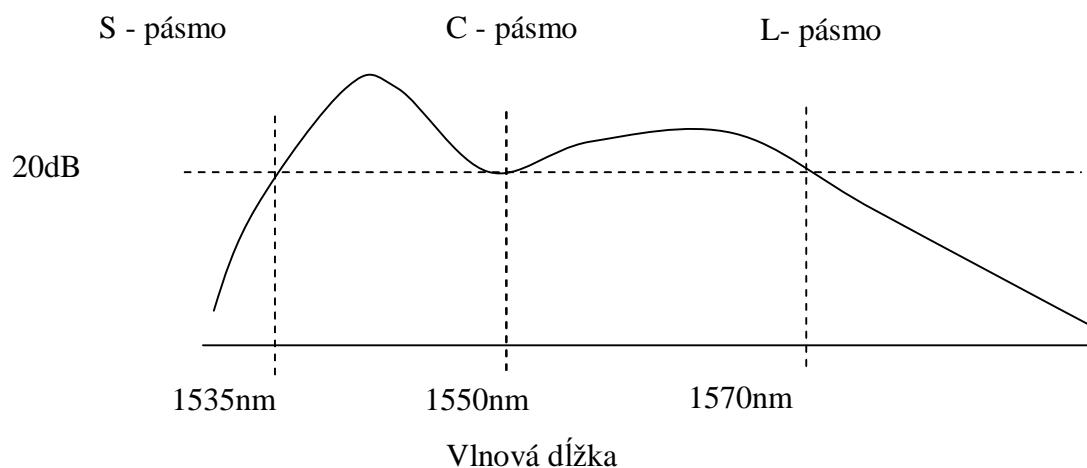
Každý EDFA zosilňovač pridáva šum k optickému vláknu, pokiaľ zosilňovacia úroveň dosahuje veľkých hodnôt, prispieva ku vzniku nelineárnych efektov. Preto sú pre 40 Gbit/s technológiu vyžadované EDFA s nízkou hodnotou šumu. Alternatívnym riešením je spojenie Ramanových a EDFA zosilňovačov. Ale práve vysoké vybudenie jadra optického vlákna spôsobuje „vysadenie“ optického vlákna a to potom už nie je schopné dosahovať väčšie prenosové rýchlosťi. EDFA s nízkym výkonom v spojení s Ramanovými zosilňovačmi dávajú lepší pomer OSNR (Optical Signal to Noise Ratio).

Existencia čisto optických zosilňovačov prináša aj jednu významnú prednosť oproti optoelektrickej regenerácii. Ide o prípad, keď musí byť celé zariadenie prispôsobené používanému priebehu signálu, aby ho mohlo regenerovať. Potom je pri zmene priebehu prenášaného signálu regenerátory vhodne upraviť. Naproti tomu pri regenerácii v čiste optickej oblasti, je jeho priebeh irelevantný.

Ďalším veľmi významným rozdielom je použitie technológie WDM. Pri prenášaní viac „farieb“ svetla súčasne, by si všeobecne každá z nich vyžadovala samostatnú regeneráciu, ale takto môžu byť zosilnené spoločne.

8.8 EDFA (Erbiom dopovaní optický zosilňovač - Erbium Doped Fiber Amplifier)

Existuje niekoľko pásiem (vlnových dĺžok), ktoré sú vhodné pre nasadenie optických zosilňovačov. Označujú sa S, C, L pásmo (Short, Conventional, Long band). Toto nám znázorňuje nasledujúci Obrázok 8.10.



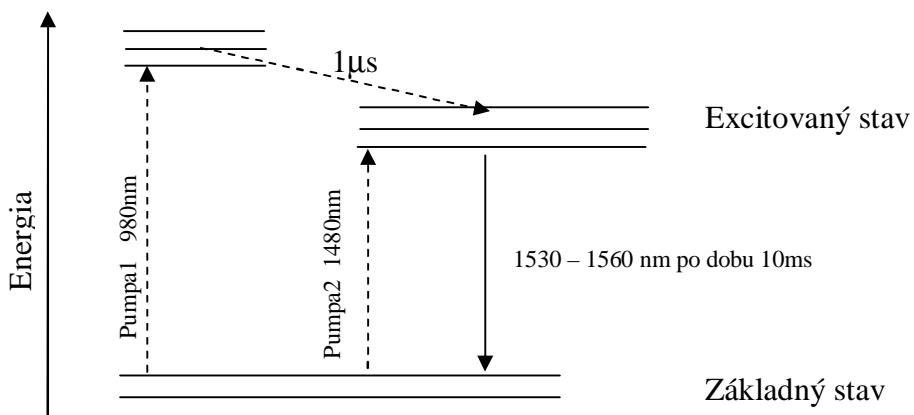
Obrázok 8.10 Využiteľné zosilňovacie pásmo

Koncom osemdesiatych rokov sa začali používať prvé optické riešenia v podobe EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier). EDFA pracuje iba v C pásmе (1530 – 1565 nm).

V novom L pásme (1570 – 1610 nm) dokážeme lepšie využiť EDFA, ale technologicky toto pásmo ešte nie je dostatočne zvládnuté. Laboratórne pokusy sa zatiaľ vykonali len v Bell Labs.

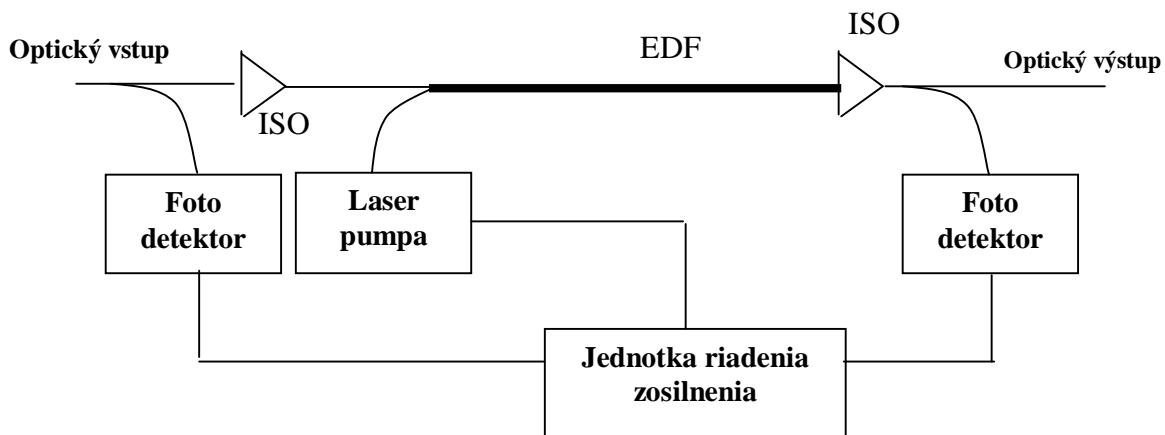
Princíp EDFA zosilňovačov

Ked' ožiarime Erbium intenzívnym svetlom, prejdú niektoré elektróny do metastabilnej pozície s vyššími energetickými hladinami („nabitie“). Ak na takto nadopované Erbium dopadne fotón, dôjde k reťazovej reakcii elektrónov na nestabilných hladinách, pričom sa po vypnutí zdroja vrátia do stabilnej hladiny. Pritom vyžiaľia na akumulovanú energiu vo forme emitovaných fotónov s rovnakou vlnovou dĺžkou a fázou akú mal pôvodný fotón. Tento princíp nám ozrejmuje Obrázok 8.11. Vstupný signál na vlnovej dĺžke 1550 nm je „vylepšený“ nasledovne. Po vybudení prvej pumpou na vlnovej dĺžke $\lambda_1 = 980$ nm a následne (po 1 μ s) druhou na vlnovej dĺžke $\lambda_2 = 1480$ nm dostaneme energiu na vlnovej dĺžke 1530 – 1560 nm po dobu 10ms.



Obrázok 8.11 Trojstavový energetický model optického zosilnenia pre EDFA

Celkový princíp EDFA zosilňovača nám ozrejmuje Obrázok 8.12. Signál vstupujúci do zosilňovača je oddelený pomocou ISO (Optický izolátor - Optical Isolator) na vstupe aj na výstupe. Celý efekt zosilnenia sa deje na špeciálne dopovanom optickom vlákne EDF (Erbium Doped Fiber). Dĺžka tohto vlákna nie je zatiaľ stanovená matematicky. Momentálne sa na určenie dĺžky používajú laboratórne testy.



Obrázok 8.12 Princíp EDFA

Ramanove zosilňovače

Pracujú podobne ako EDFA v C pásmi, aj keď sú schopné pracovať vo všetkých. Využiteľná šírka pásma v tomto okne je RAMAN je 1520 – 1620 nm pri viac ako 0,5dB zosilnení. Hlavne výhodou RAMANOVÝCH zosilňovačov je, že na efekt zosilnenia nepotrebuju používať špeciálne upravené vlákno ako zosilňovací element ako EDFA.

Ramanové zosilňovače majú niekoľko výhod:

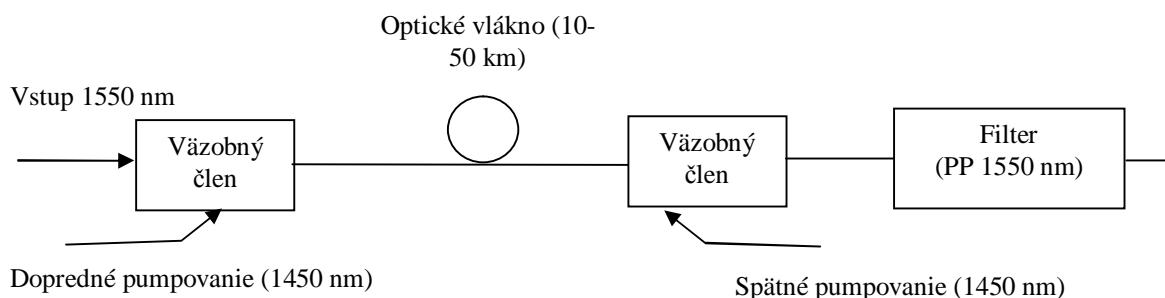
- Nie je potreba vkladania nejakého zosilňovača uprostred vlákna, čo má za následok zníženie celkového šumu,
- Pri implementácii spätej pumpy, sú sice dosiahnutelné nižšie výkonové zisky, čo redukuje silu nelineárnych efektov a umožňuje dosiahnuť maximálne zosilnenie. Pri použití doprednej pumpy, prípadnej kombinácií s EDFA sa silne prejavuje zosilnenie nelineárnych efektov a slabé zosilnenie Ramanovým zosilňovačom,
- Ramanové zosilňovače môžu byť použité aj pre S pásmo, no EDFA nie, kvôli ich zosilňovacím charakteristikám.

Princíp Ramanových zosilňovačov

Využíva SRS efektu (Stimulated Raman Scattering), ktorý bol v roku 1928 objavený Sir Chandrasekhara Ramanom. V kryštáloch, amorfnych keramikách a oxide kremičitom, ktorých štruktúra pozostáva z viac ako jedného atómu, môžu byť vibrácie v kvantovej mriežke rozdelené do dvoch kategórií.

- 1) atómy kremíka a kyslíka kmitajú vo fáze,
- 2) atómy kremíka a kyslíka kmitajú vo fáze posunutej o π - oproti sebe.

Kvantizované vibrácie sa označujú fonóny – sú dva druhy akustické a optické. V materiale, ktorý má iónové väzby (ako kremík), je optický fonón asociovaný s elektrickým polom, ktorého vlnová dĺžka je často vo viditeľnej časti spektra, odtiaľ vyplýva aj názov. Interakcia fotónu a akustického fonónu sa označuje „Brillouin scattering“. V oboch prípadoch ale fotón uvolní energiu, ktorá vytvorí jeden alebo viac fonónov z rozdielnej energiou a rýchlosťou pohybu. Energia fonónu je veľmi veľká v porovnaní s obrovským rozsahom možných vlnových posunutí fotónu. Tento proces je veľmi rýchly, rádovo femto sekundy. Na Obrázok 8.13 je zaznačený princíp práce Ramanovho zosilňovača.



Obrázok 8.13 Princíp práce Ramanovho zosilňovača

Pumpovanie svetla do vlákien je realizované ako zosilňovače na jednotlivých koncoch prenosu. Terajšie merania ukazujú, že je možné dosiahnuť zlepšenia od 600km \Rightarrow 3000 km. Táto dĺžka závisí od technológií (ktoré sú v pozadí), na ktorých je použitý RAMANOV zosilňovač. Čo znamená asi 2.5 násobné predĺženie vzdialenosťi, pri 13dB RAMANOVOM zosilňovači. Na plné využitie vlastností tohto zosilňovača je potrebné zohľadniť ešte dve veci. A to sklon nábehovej (resp. dobežnej) hrany signálu tzv. slope – disperziu a manažment zosilnenia. Pri dodržaní týchto základných predpokladov je možné dosiahnuť na existujúcich vedenia, pri použití DWDM až 40Gbit/s prenosovú rýchlosť. Bez týchto zosilňovačov, nie je možné efektívne a ekonomicky využívať vlákna na väčšie vzdialenosť ako 100km.

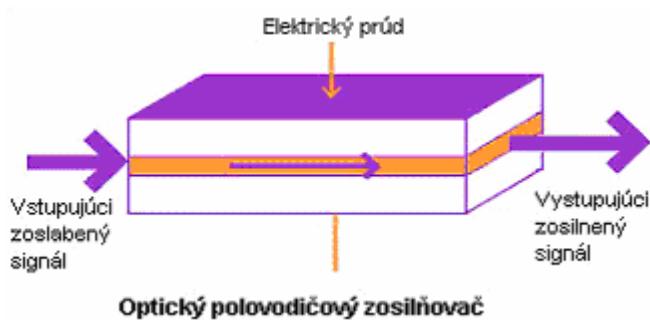
Polovodičové optické zosilňovače (SOA)

Fungujú na podobnom princípe ako obyčajné lasery – optický signál je zosilnený stimulovaným vyžarovaním svetla. Majú viac-menej podobnú štruktúru – skladajú sa z dvoch špeciálne tvarovaných dosiek, na ktorých povrchu je vrstva polovodiča a medzi týmito doskami je materiál, tvoriaci tzv. aktívnu vrstvu. Týmto zariadením preteká elektrický prúd tak, aby vybudil elektróny na vyššiu valenčnú vrstvu a tieto potom pri návrate do nevybudeneho stavu vyžiaria fotón (Obrázok 8.14).

Oproti bežným laserom majú však SOA dva významné rozdiely. Pri laseroch chceme mať konce čo najviac reflexné, aby sa svetlo odrážalo dozadu a dopredu v rámci dutiny. Pri SOA však potrebujeme dostať svetlo priamo do dutiny a hned' potom von - nechceme aby sa svetlo odrážalo späť do dutiny. To znamená, že na koncoch nesmú byť reflexné plochy. Druhý rozdiel je v tom, že pri laseroch chceme, aby sa von dostalo len svetlo jednej vlnovej dĺžky, zatiaľ čo pri SOA sa snažíme zosilniť svetlo pre čo najviacej vlnových dĺžok – signály v optických sieťach môžu mať veľa vlnových dĺžok a všetky potrebujeme zosilniť v rovnakom čase.

Vybudené elektróny v polovodiči sú stimulované prichádzajúcim optickým signálom tak, že sa vracajú do nevybudeneho stavu. Vyžiaria pritom fotón ktorého vlnová dĺžka je rovnaká ako fotónu, ktorý elektrón stimuloval k návratu. Takto sa vlastne signál zosilnil, pretože na začiatku bol jeden fotón, po stimulácii sú už dva. Tieto môžu, počas cesty zosilňovacím zariadením, spôsobiť ďalšie stimulácie, až napokon opustia zariadenie ako zosilnený signál.

Polovodičové zosilňovače v súčasnosti nemajú až také zosilnenie v oblasti 1550 nm ako erbiom dopované zosilňovače (EDFA). Ich využitie je v systémoch pracujúcich v oblasti 1300 nm. V skutočnosti, s rastom dopytu po systémoch pracujúcich s viac vlnovými dĺžkami, novšie systémy môžu používať obe 1300 aj 1550 nm oblasti a tu môžu hrať polovodičové zosilňovače hrať klúčovú úlohu.



Obrázok 8.14 Princíp optického polovodičového zosilňovača

8.9 FEC

Klasickým riešením bezchybných optických prenosov je zabezpečenie bezchybnej prenosovej trasy. Čo je veľmi náročné pre riadenie a kontrolu vysokorýchlosných optických prenosov. Takéto riešenie nie je možné pre 40 Gbit/s technológiu. Výsledkom nášho snaženia je teda povoliť určité množstvo chýb na prenosovej linke a opravovať ich až na druhej strane, teda chyby sú odstránené pokial dát dorazia k užívateľovi. Takáto technika je známa ako **dopredná oprava chýb FEC** (Forward Error Control). Teda problematiku môžeme zhrnúť do dvoch bodov.

- Zabezpečenie neexistencie resp. malého počtu chýb pri prenose, bez ohľadu na fakty zoslabujúce efekt prenosu (tentotýž smer pri 40 Gbit/s technológií prestáva byť reálny vzhládom na rýchlosť a cenu).
- Chyby vzniknuté pri prenose v reálnom čase detektovať a opravovať. Táto metóda je modernejšia a je založená viacej na matematike ako optike. Problém nastane, ak by mali kontrolné súčty prekročiť veľkosť efektívne prenášaných dát. Výsledkom toho môže byť znižovanie ceny súčiastok – vplyv na kvalitu.

Primárne existujú 3 typy chýb:

- *Zhlukové* (burst error) – skupina bitov je poškodených sekvenčne v čase, najčastejšie sú spôsobované PMD,
- *Impulzné* (impulse error) – veľké bloky dát, obsahujúce niekoľko chýb, najčastejšie spôsobených výpadkami systému resp. poruchou vysielača,
- *Náhodné* (random error) – bitové chyby, ktoré vznikajú nezávisle jedna od druhej, pričom môžu byť prisúdené AWGN šumu na optickej linke.

Používané kódy:

RS – Reed Solomon algoritmus, ide o špeciálny prípad BCH kódov (Bose Chaudhuri Hocquenghem), teda oprava chýb založená na oprave bloku dát. Boli navrhnuté na opravu náhodných chýb, ale dokážu opravovať aj zhluky chýb, ide o lineárne blokové kódy.

Príklad: G.709 používa FEC RS(255, 239):

n=255 ... dĺžka kódového slova v byte, pri 8 bit symboloch,
k=239 ... dĺžka prenesených dát v byte, pri 8 bit symboloch,
s=8 dĺžka symbolu v bit,

t=8 môžeme opraviť 8 symbolov s chybou v kódovom slove.

Ich schopnosť sa výrazne zvyšuje pri použití prepletaní (Interleaving).

Sú dostupné dve metódy pre FEC:

- In Band FEC
- Out of Band FEC

Výhody a nevýhody FEC:

Jednou s najväčších výhod je ekonomicosť riešenia. Ďalšou je veľkosť „nadbytočných“ dát potrebných na realizáciu kódu (Tabuľka 8.2).

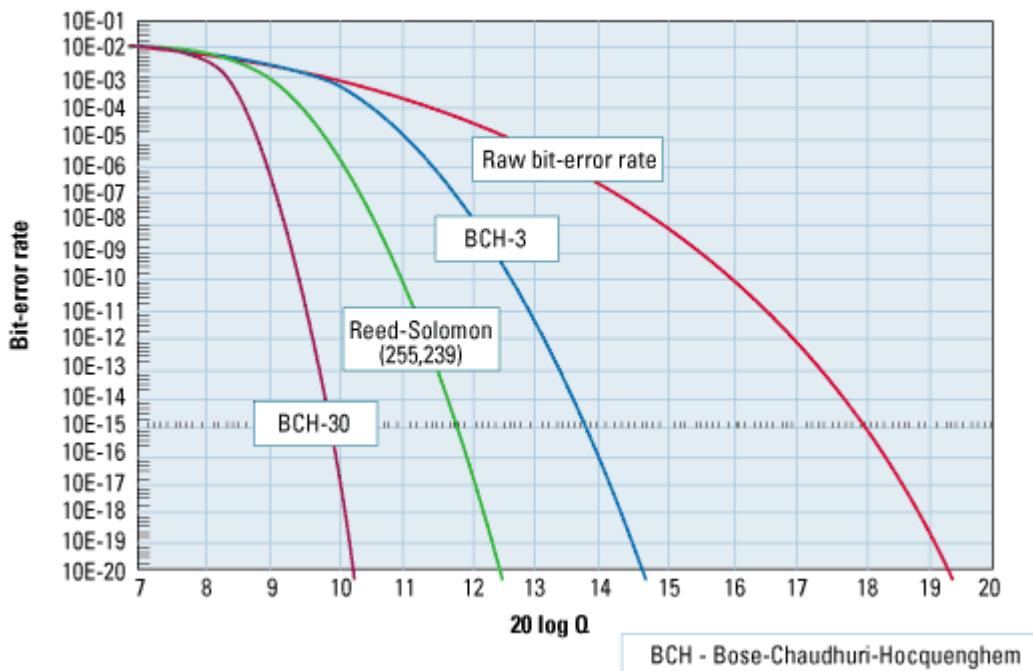
In Band FEC

Generujú FEC kódy do nedefinovaných SONET/SDH overhead byteov zo vstupného bodu do výstupného bodu. Keďže má SONET/SDH dostupný limitovaný počet overhead

byteov, je takáto metóda pre 40 Gbit nedostatočná. Ale výhodou IB FEC môže byť zlúčiteľnosť s „neFEC“ systémami.

Out of Band FEC

Pridáva FEC dátu k originálnym prenášaným bez použitia overhead. Z toho vyplýva zvýšenie linkovej prenosovej rýchlosťi. Voľba FEC je otázkou zisku spracovania a zvýšenia linkovej rýchlosťi. FEC kódovanie založené na BCH 30 vyhŕavia. Keďže existuje priamy vzťah medzi OSNR a BER, nižšie BER smeruje k vyššiemu OSNR a obrátene (vid. Obrázok 8.15). FEC môžeme vylepsiť ešte prekladaním (interleaving). Vylepšuje nám FEC a aj polarizačný rozptyl PMD (Polarization Mode Dispersion).



Obrázok 8.15 Porovnanie FEC kódov

Tabuľka 8.2 Overhead pri out band FEC v [%]

FEC kód	Out band FEC overhead
RS – 8	7,1%
BCH – 20	7.1%
BCH – 30	8.5%

8.10 Riadiaca elektronika

Klasická CMOS technológia je nepoužiteľná. Pokusy so silikón germaniom (SiGe) a gallium arsenidom (GaAs). Pre ICS integrované obvody (Intelligent Circuits) platia rovnaké problémy ako pre optické prijímače/vysielače. Ide skôr o technológie pre mikroelektronikov a mikrotechnikov ako telekomunikačných odborníkov.

Zvyšovanie kapacity

Ak chcú prevádzkovatelia zvýšiť kapacitu, majú na výber dve možnosti: využívať ďalšie vlnové dĺžky v už inštalovaných WDM systémoch, alebo prejsť na systémy novej generácie s rýchlosťami 40-Gbit/sec. Ekonomická situácia však využívanie 40-Gbit/sec sietí posúva za horizont roku 2003.

Medzitým sa technicky náročné úlohy spojené s 40-Gbit/sec sietami budú sústredovať na:

- manažment chromatickej a PMD disperzie.
- externé modulátory, ktoré redukujú laser chirp a disperziu.
- špeciálne modulačné schémy, napr. duo-binary, chirped return-to-zero, quasi solitons, alebo inverse multiplexing.
- nové vlákna s kontrolovanou disperziou ako napr. LEAF od fy. Corning alebo TrueWave od fy. Lucent.
- optický TDM, aby sme sa vyhli limitom elektroniky

V súčasnosti sú však optické komponenty pre 40-Gbit/sec technológiu veľmi drahé. Výkon laserov je v dnešnej dobe už dostatočný, ale LiNbO₃ modulátory a ovládače elektronického modulátora sú skoro nedostupné. Všeobecne je však kompenzácia disperzie vo vysielači jednoducho implementovaná, ale poskytuje len limitovaný stupeň kompenzácie. V prijímači nedosahujú 40-Gbit/sec PIN a lavínové fotodiódy dostatočný zisk. Integrované obvody na regeneráciu signálu a extrahovanie časovania sú taktiež skoro nedostupné.