

VPLYV VLNOVEJ KONVERZIE NA PRIEPUSTNOSŤ WDM SIETÍ

Miroslav Bahleda, Karol Blunár, Ivana Brídová

Katedra telekomunikácií, EF, ŽU v Žiline, Veľký Diel, 010 26 Žilina
e-mail: bahleda@fel.utc.sk, blunar@fel.utc.sk, bridova@fel.utc.sk

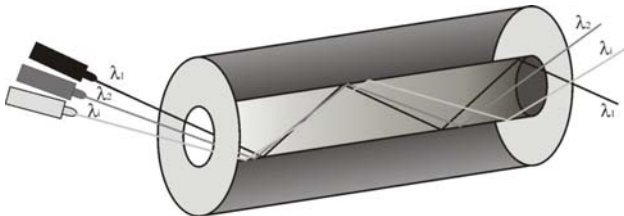
Summary: In this article we deal with problem of wavelength conversion in WDM networks and conversion impact on throughput WDM optical networks, i.e. the most important network parameter- blocking probability.

1 ÚVOD

Pre súčasnú spoločnosť je prenos informácií stále nesmierne dôležitý, pričom ich množstvo neustále rastie. Do popredia sa dostávajú optické siete s veľmi vysokými prenosovými rýchlosťami. Možnosti ako zvýšiť prenosovú rýchlosť, resp. prenosovú kapacitu siete sú vo zvýšení prenosovej rýchlosti, zvýšení počtu optických vlákien alebo použití vlnovo deleného multiplexu (WDM *wavelength division multiplex*).

2 WDM SIETE

WDM siete sú optické siete, ktoré využívajú princíp vlnovo deleného multiplexu, ktorý umožňuje jedným optickým vláknom prenášať niekoľko optických nosných vln, pričom každá je na inej vlnovej dĺžke [1] (obr.1). Prenos na každej vlnovej dĺžke sa môže uskutočniť inou prenosovou (bitovou) rýchlosťou a iným typom modulácie, alebo iným formátom signálu. Dokonca na niektorých optických nosných môže byť prenášaný optický digitálny signál a na iných optický analógový signál.



Obr.1 Princíp WDM

Pomocou vlnového multiplexu sa lepšie využíva obrovská šírka prenosového pásma. Ďalšou výhodou je, že prenosová rýchlosť na jednotlivých vlnových dĺžkach môže byť nižšia. Ale vďaka tomu, že je použitý väčší počet vlnových dĺžok na jednom vlákne, celková prenosová rýchlosť na danom vlákne je podstatne vyššia. Z toho dôvodu, nie sú potrebné až také náročné a drahé elektronické obslužné zariadenia (predovšetkým elektro-optické a opto-elektrické zariadenia). V súčasnosti je snaha prenášať signál od zdrojovej stanice k cieľovej cez transportnú sieť v plne optickej podobe bez optoelektronickej konverzie. Tá sa uskutočňuje len v zdrojovej a cieľovej stanici. Potom nevýhodou tejto technológie je vysoká technologická náročnosť sieťových komponentov ako napr. optické filtre, optické

spínače. V závislosti od dosiahnutej technológie je obmedzený aj počet vlnových dĺžok, ktoré sú na jednom vlákne [2,3].

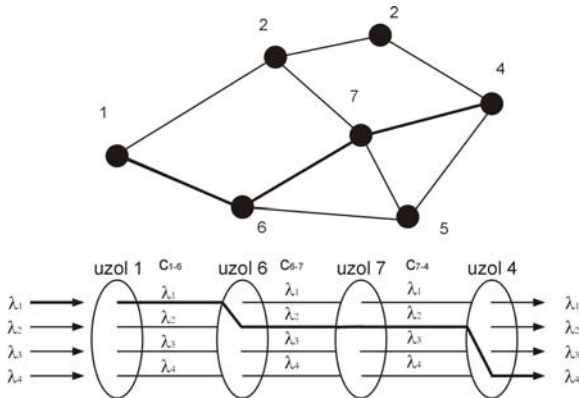
3 PREPOJOVANIE A SMEROVANIE VO WDM SIETACH

Prepojovanie vo WDM sieti sa uskutočňuje v optických kroskonektoroch OXC (*optical cross-connect*). Optické kroskonektory OXC vo všeobecnosti umožňujú prepojovanie v priestore a vo frekvenciách. V prípade WDM sietí sa spínanie uskutočňuje pomocou WSW všeobecnej štruktúry, kde W stupeň demultiplexuje vlnové dĺžky každého kanála, S stupeň vykonáva priestorové spínanie a druhý stupeň W multiplexuje do potrebných vlákien. Preto vo WDM kroskonektoroch sú potrebné dva stupne, priestorový S a frekvenčný W. Frekvenčný stupeň môže obsahovať vlnový konvertor, ktorý vykonáva vlnovú konverziu. Pretože frekvenčný stupeň je stále technologicky náročný, a teda aj nákladný, rozlišujeme kroskonektory so samotným priestorovým stupňom OXC/S (*space*) alebo s priestorovým aj s frekvenčným stupňom WDM OXC/SF (*space and frequency*).

Vo všeobecnosti existujú tri možné koncepcie prepojovania v optických kroskonektoroch [1]:

- **spojovanie optických vlákien:** prepojenie vstupného optického vlákna so všetkými jeho vlnovými dĺžkami na výstup,
- **spojovanie vlnových dĺžok:** prepojenie optických vlnových dĺžok, kedy je možné vlnovú dĺžku z jedného vlákna prepojiť na tú istú vlnovú dĺžku na inom vlákne,
- **spojovanie so zmenou vlnovej dĺžky:** prepojenie optických vlnových dĺžok, kedy je možné vlnovú dĺžku z jedného vlákna prepojiť na tú istú alebo aj inú vlnovú dĺžku na inom vlákne.

Výber spojovacej prenosovej cesty je jednou z hlavných úloh pri prepojení v sieťach. Vo WDM sieťach výber spojovacej cesty pozostáva z dvoch čiastočne samostatných úloh a to smerovania a pridelovania vlnovej dĺžky na danej prenosovej ceste (obr. 2). Môžeme hovoriť o výbere v horizontálnom smere (smerovanie) a o výbere vo vertikálnom smere (pridelovanie vlnových dĺžok). V prípade smerovania ide v podstate o výber fyzickej prenosovej cesty, pozdĺž ktorej sa potom pridelujú vlnové dĺžky pre dané spojenie [4].



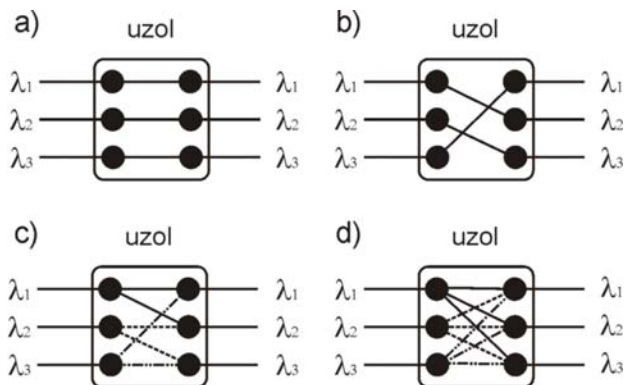
Obr. 2 Smerovanie a pridelovanie vlnových dĺžok

4 VLNOVÁ KONVERZIA VO WDM SIEŤACH

Pri smerovaní v jednotlivých uzloch v sieti je možné optický signál prenášať pozdĺž fyzickej prenosovej cesty vždy na tej istej vlnovej dĺžke. Potom hovoríme o prenose bez vlnovej konverzie. Siete, ktoré neumožňujú vlnovú konverziu, nazývame siete bez vlnovej konverzie. Ak v jednotlivých uzloch siete je vlnová dĺžka konvertovaná na inú, hovoríme o sieťach s vlnovou konverziou [5].

Vo všeobecnosti ľubovoľná prichádzajúca vlnová dĺžka môže byť prepojená na rôzny počet vlnových dĺžok k , pričom počet možných vlnových dĺžok na výstupe je W . V závislosti od toho aká je hodnota k , môžu nastať tieto prípady vlnovej konverzie [4]:

- **žiadna vlnová konverzia** ak $k=1$, kedy daná prichádzajúca vlnová dĺžka je prepojená na takú istú vlnovú dĺžku na výstupe (obr. 3a),
- **pevná vlnová konverzia** ak $k=1$, kde daná prichádzajúca vlnová dĺžka bude konvertovaná na inú vlnovú dĺžku, ktorá je už vopred známa a je vždy tá istá (obr. 3b),
- **obmedzená vlnová konverzia** ak $1 < k < W$, kde prichádzajúca vlnová dĺžka môže byť konvertovaná len na obmedzený počet výstupných vlnových dĺžok (obr. 3c),
- **plná vlnová konverzia** ak $k=W$, čo je prípad, kedy ľubovoľná prichádzajúca vlnová dĺžka môže byť konvertovaná na ľubovoľnú výstupnú (obr. 3d).



Obr. 3 Druhy vlnovej konverzie

4.1 Siete bez vlnovej konverzie

Siete bez vlnovej konverzie neumožňujú v žiadnom uzle vlnovú konverziu. Preto optický signál prechádza od zdroja k cieľu pozdĺž fyzickej prenosovej cesty vždy na tej istej vlnovej dĺžke. Jednotlivé uzly neobsahujú vlnové konvertory a hovoríme aj o obmedzení vlnovej kontinuity.

Pri budovaní spojenia sa najskôr hľadajú vlnové dĺžky, ktoré sú voľné na všetkých linkách. Potom sa určitým algoritmom vyberie rovnaká vlnová dĺžka na všetkých úsekoch. Ak neexistuje taká vlnová dĺžka, ktorá by bola rovnaká na každej prenosovej linke, potom prichádzajúca požiadavka je odmietnutá a následne stratená.

4.2 Siete s plnou vlnovou konverziou

Siete s plnou vlnovou konverziou umožňujú plnú vlnovú konverziu v každom uzle prenosovej siete. Ľubovoľná prichádzajúca vstupná vlnová dĺžka môže byť zmenená na ľubovoľnú odchádzajúcu vlnovú dĺžku v každom uzle danej siete, ktorá nie je obsadená. Optický signál môže na každej inej linke využívať inú vlnovú dĺžku.

V tomto prípade vyberáme vlnovú dĺžku pre prvý úsek náhodne s použitím istého algoritmu z možných neobsadených vlnových dĺžok. To isté robíme pre každý ďalší prenosový úsek. Ak nie je voľná vlnová dĺžka na niektorej linke prenosovej cesty, potom prichádzajúca požiadavka je zamietnutá.

4.3 Siete s obmedzenou vlnovou konverziou

Siete s obmedzenou vlnovou konverziou neumožňujú plnú vlnovú konverziu, ale len s určitým obmedzením. Toto obmedzenie môže byť uskutočnené v samotnom uzle, kedy ľubovoľná vstupná vlnová dĺžka môže byť prepojená len na obmedzený súbor výstupných vlnových dĺžok. Potom hovoríme o **obmedzenej vlnovej konverzii v uzle**. Ďalším obmedzením je ak sa v sieti nachádza len obmedzený počet uzlov, ktoré umožňujú vlnovú konverziu. Ostatné uzly neumožňujú vlnovú konverziu. Potom hovoríme o **riedkej vlnovej konverzii**.

To znamená, že plne optická sieť s obmedzenou vlnovou konverziou, môže vzniknú viacerými spôsobmi:

- obmedzená vlnová konverzia v uzle:**
 - všetky uzly používajú konvertory s obmedzenou vlnovou konverziou
- riedka vlnová konverzia:**
 - len niektoré uzly používajú konvertory s obmedzenou vlnovou konverziou (ostatné sú buď bez, alebo s plnou vlnovou konverziou)
 - sieť je budovaná uzlami bez vlnovej konverzie a malým počtom uzlov s plnou konverziou

- c) v prípade viacvláknových WDM sietí, sieť neumožňuje vlnovú konverziu, ale umožňuje použitie tej siete vlnovej dĺžky na rôznych vláknach danej linky.

5 VPLYV VLNOVEJ KONVERZIE NA PRIEPUSTNOSŤ SIETE

Vplyvom vlnovej konverzie na priepustnosť siete sa zaoberali mnohí autori v rôznych článkoch [5,7]. Vo všeobecnosti môžeme povedať, že vlnová konverzia má výrazný vplyv na priepustnosť siete. Avšak tento vplyv nie je jednoznačný. Všeobecne môžeme povedať, že na priepustnosť siete vplyvajú výrazne tieto faktory:

- vlnová konverzia v sieti,
- algoritmy smerovania a algoritmy pridelovania vlnových dĺžok,
- topológia siete.

Skúmať vplyv jedného z týchto činiteľov je obtiažny, pretože všetky pôsobia súčasne. My sa napriek tomu zameriame predovšetkým na vlnovú konverziu v sieťach. Objasníme si vplyv rôznych činiteľov na pravdepodobnosť blokovania a tiež sa budeme zberať prínosom vlnovej konverzie.

V sieťach, ktoré neumožňujú vlnovú konverziu, musí byť na každej linke prenosovej cesty tá istá vlnová dĺžka. Pravdepodobnosť, že na každej linke bude rovnaká neobsadená vlnová dĺžka je pomerne malá. Táto pravdepodobnosť prudko klesá s počtom úsekov fyzickej prenosovej cesty. Preto v sieťach bez vlnovej konverzie je pravdepodobnosť blokovania najväčšia a výrazne závisí od počtu úsekov. Tento jav sa dal očakávať aj intuitívne, napriek tomu však bol aj experimentálne overený. Barry a Humblet vo svojej práci [6] definovali dosiahnuté využitie pre danú pravdepodobnosť blokovania, ako parameter pre určenie osohu vlnovej konverzie.

Pravdepodobnosť $P_{b,bez}$, že požiadavka na spojenie medzi dvoma stanicami je zablokovaná v sieti bez vlnovej konverzie je daná nasledovne

$$P_{b,bez} = [1 - (1 - \rho)^F]^H \quad (1)$$

kde ρ je pravdepodobnosť, že nejaká vlnová dĺžka je použitá na nejakom prenosovom úseku, F je počet vlnových dĺžok a H je počet úsekov prenosovej cesty. Potom dosiahnuté využitie p pre danú pravdepodobnosť $P_{b,bez}$ v sieťach bez vlnovej konverzie je definované vzťahom

$$p = 1 - (1 - P_{b,bez}^{1/F})^{1/H} \quad (2)$$

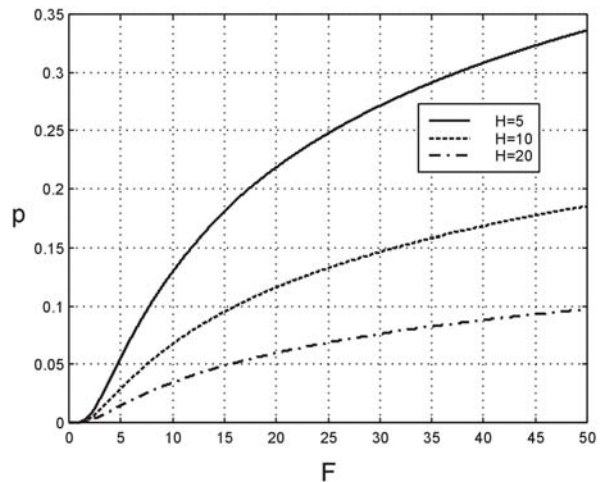
Naopak, v sieťach s vlnovou konverziou, je možné aby na každom úseku prenosovej cesty bola iná vlnová dĺžka. Preto pravdepodobnosť blokovania je nižšia. Barry a Humblet vo svojej práci [6] dokázali, že táto pravdepodobnosť nie je výrazne závislá od počtu úsekov prenosovej cesty. Pravdepodobnosť $P_{b,s}$, že požiadavka na spojenie medzi dvoma stanicami je zablokovaná v sieti s vlnovou konverziou je rovná

$$P_{b,s} = 1 - (1 - \rho^F)^H, \quad (3)$$

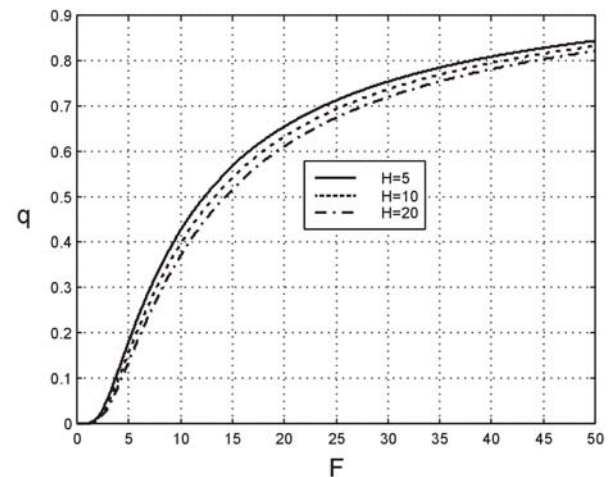
Potom dosiahnuté využitie v sieťach s vlnovou konverziou je definovaná vzťahom

$$q = [1 - (1 - P_{b,s})^{1/H}]^{1/F} \quad (4)$$

Na obrázku 4, resp. 5 je dosiahnuté využitie v závislosti od počtu vlnových dĺžok pre danú pravdepodobnosť $P_{b,bez}$ pre sieť bez vlnovej konverzie, resp. $P_{b,s}$ pre sieť s vlnovou konverziou. Z grafov je vidieť, že v prípade sietí bez vlnovej konverzie dosiahnuté využitie je menšie ako v prípade sietí s vlnovou konverziou. Ďalej je zrejmé, že využitie v sieťach s vlnovou konverziou takmer nezávisí od počtu úsekov prenosovej cesty, na rozdiel od sietí bez vlnovej konverzie.



Obr. 4 Využitie bez vlnovej konverzie pre $P_b=10^{-3}$



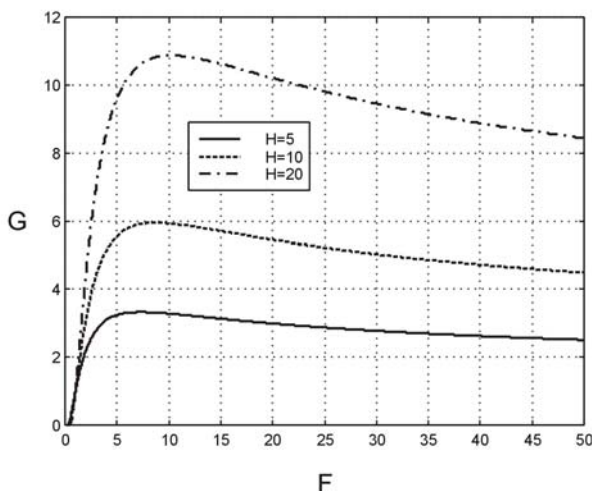
Obr. 5 Využitie s vlnovou konverziou pre $P_b=10^{-3}$

Z tohto dôvodu, je potrebné, aby rozmer siete (resp. počet prenosových úsekov) bez vlnových konvertorov bol malý. Inak využitie vlákna pozdĺž prenosovej cesty bude veľmi malé. V prípade veľkého rozmeru siete, sú preto potrebné zložitejšie adaptívne algoritmy. Ďalšou možnosťou ako zlepšiť činnosť siete bez vlnových konvertorov je starostlivý návrh sieťovej topológie, čo je však v praxi často nemožné, alebo je obtiažne.

Pre číselné vyjadrenie vplyvu vlnovej konverzie sa používa zisk vlnovej konverzie G , ktorý je definovaný ako pomer využitia v sieťach s vlnovou konverziou q k využitiu v sieťach bez vlnovej konverzie p , za podmienky $P_{b,s} = P_{b,bez} = P_b$

$$G = \frac{q}{p} = \frac{\left[1 - (1 - P_b)^{1/H}\right]^{1/F}}{1 - (1 - P_b^{1/F})^{1/H}} \quad (5)$$

Typické charakteristiky sú uvedené v článku [6]. Zisk vlnovej konverzie v závislosti od počtu vlnových dĺžok najskôr prudko rastie až dosiahne vrchol, ktorý je približne v bode $H/2$ (obr. 6). Po dosiahnutí vrcholu zisk pomaly klesá. Z grafu tiež vyplýva, že zisk sa pre F blížiaci k nekonečnu rovná jednej. Ďalším poznatkom je, že zisk G pre veľké F závisí takmer lineárne od počtu úsekov H . Pre stredný počet vlnových dĺžok F osov konverzie rastie s počtom úsekov.



Obr. 6 Zisk vlnovej konverzie pre $P_b=10^{-3}$

Predpokladajme, že každý uzol má Δ vstupných a Δ výstupných vlákien. Nech ρ je vlnová dĺžka je použitá na interferujúcej linke. Linky H potrebné na spojenie z bodu A do bodu B nazývame požadované linky. Potom, interferujúcou linkou budeme nazývať vstupnú alebo výstupnú linku z daného uzla i , ak hociktoré volania na tejto linke pokračuje alebo odchádza z požadovanej linky.

Podľa Barryho a Humbleta pre siete bez vlnovej konverzie platí nasledovný vzťah vyjadrujúci pravdepodobnosť blokovania

$$P_{b,bez} = \left(1 - \left[1 - \left(1 - \frac{1}{\Delta}\right)\rho\right]^H\right)^F \quad (6)$$

Ak $\Delta=1$ neexistujú interferujúce linky a pravdepodobnosť blokovania sa rovná nule. Pokiaľ sa Δ bude blížiť k nekonečnu, použitie vlnovej dĺžky λ na úseku i by bolo nezávislé na použití vlnovej dĺžky na ďalšom úseku $i-1$. Invertovaním rovnice dostávame opäť využitie pre sieť bez vlnových konvertorov

$$p = \frac{\Delta}{\Delta - 1} \left[1 - (1 - P_{b,bez}^{1/F})^{1/H}\right] \quad (7)$$

Porovnaním tohto vzťahu z predošlým je možné vidieť, že p môže byť $\Delta/(\Delta-1)$ väčšie. Vplyv veľkosti spínača Δ v sieťach bez vlnovej konverzie je výrazný.

Pre siete s vlnovou konverziou Barry a Humblet dokázali, že veľkosť spínača Δ nemá výrazný vplyv na využitie q , preto

$$q \approx \left[1 - (1 - P_{b,s})^{1/H}\right]^{1/F} \quad (8)$$

Potom pre zisk vlnovej konverzie môžeme písať

$$G \approx \left(\frac{\Delta - 1}{\Delta}\right) \cdot \frac{\left[1 - (1 - P_b^{1/H})\right]^{1/F}}{1 - (1 - P_b^{1/F})^{1/H}} \quad (9)$$

Pri porovnaní tohoto vzťahu zo vzťahom 5 je vidieť, že zisk je $(\Delta-1)/\Delta$ menší. To znamená, že Δ znižuje zisk vlnového konvertora. Pre stredný, až veľký počet vlnových dĺžok, osov vlnových konvertorov rastie s počtom úsekov H a stupňom uzla Δ . Osov vlnových konvertorov však klesá s počtom vlnových dĺžok. Preto je potrebný kompromis medzi návrhom H , F a Δ .

Môžeme teda povedať, že pridaním vlnových konvertorov do siete je možné zvýšiť využitie vlákna. Pokiaľ šírka pásma je na danej linke nevyužitá a ak volania pomerne dosť navzájom interferujú, potom využitie vlákna pri použití vlnových konvertorov je ešte výraznejšie. V opačnom prípade, by bolo veľa vlnových dĺžok na danej prenosovej ceste voľných.

Literatúra

- [1] K. Blunár, Z. Diviš: „Telekomunikačné siete“, časť II, učebný text, Vydavateľstvo ŽU EDIS, Žilina, 2000
- [2] I. Motková, M. Bahleda: „Optical transmission and optical switching“, Digital Communications, DK' 03, International Workshop, júl 2003, Žilina
- [3] M. Dado a kol.: „Kapitoly z optiky pre technikov“, Vydavateľstvo ŽU EDIS, Žilina, 1998
- [4] M. Bahleda: „Dimenzovanie WDM optických sietí“, Písomná časť dizertačnej skúšky, Žilinská univerzita, Žilina, 2004
- [5] B. Ramamurthy, B. Mukherjee: „Wavelength Conversion in WDM Networking“, Journal of Selected Areas in Communication, Vol. 16, september 1996, str. 1061-1073
- [6] R. A. Barry, P. A. Humblet: „Models of Blocking Probability in All-Optical Networks with and Without Wavelength Changers“, IEEE Journal on Selected Areas in Communication, Vol. 14, No. 5, jún 1996, str. 858-867
- [7] E. Karasan, E. Ayanoglu: „Performance of WDM Transport Networks“, IEEE Journal on Selected Areas in Communication, Vol. 15, No. 7, september, 1998