

**Vedecká rada Elektrotechnickej fakulty
Žilinská univerzita v Žiline**

Ing. Miroslav BAHLEDA

Autoreferát dizertačnej práce

Dimenzovanie optických WDM sietí

Návrh všeobecného analytického modelu pre určenie pravdepodobnosti blokovania vo WDM sieťach a jeho implementácia pri určovaní optimálnej polohy uzlov podporujúcich vlnovú konverziu vo WDM sieťach s riedkou vlnovou konverziou

na získanie vedecko-akademickej hodnosti philosophiae doctor
v odbore doktorandského štúdia
26-27-9 Telekomunikácie

Žilina, December 2006

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Katedre telekomunikácií, Elektrotechnickej fakulty, Žilinskej univerzity v Žiline

Predkladateľ: Ing. Miroslav Bahleda, Katedra telekomunikácií, EF, Žilinská univerzita v Žilina, Žilina

Školiteľ: prof. Ing. Karol Blunárovi, DrSc., Katedra telekomunikácií, EF, Žilinská univerzita v Žilina, Žilina

Oponenti:

Autoreferát bol rozoslaný:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná o hod. pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce v odbore doktorandského štúdia 26-27-9 Telekomunikácie, vymenovanou predsedom spoločnej komisie dňa..... na Elektrotechnickej fakulte, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.

Predseda spoločnej odborovej komisie:

prof. Ing. Karol Blunár, DrSc.
Žilinská univerzita v Žiline
Elektrotechnická fakulta
Katedra telekomunikácií
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

1 Úvod

Vďaka obrovským výhodám technológie vlnovo deleného multiplexu (*Wavelength Division Multiplex* – WDM) sú plne optické WDM siete stále čoraz častejšie nasadzované do infraštruktúry nosných sietí, pričom v budúcnosti sa predpokladá ich rozsiahla aplikácia v praxi. Taktiež sa očakáva, že nová generácia plne optických nosných sietí bude budovaná optickými sieťami s vlnovo deleným multiplexom v kombinácii s optickým časovo deleným multiplexom (*Optical Time Division Multiplex* – OTDM).

V silnom konkurenčnom prostredí pri nasadzovaní WDM sietí do infraštruktúry je potrebné, aby bola zachovaná istá požadovaná kvalita služby (*Quality of Service* – QoS). Z ekonomického hľadiska sa operátori sietí snažia, aby prenosové prostriedky ich sietí boli čo najlepšie využívané a to pri zachovaní požadovanej kvality služby. Z tohto pohľadu je problematika dimenzovania a optimalizácie WDM sietí i v súčasnosti stále vysoko aktuálnou témou.

V teoretickej časti dizertačnej práce som sa venoval problematike smerovania a pridelovania vlnových dĺžok, predovšetkým z pohľadu vplyvu na priepustnosť siete. Taktiež som si dal v tejto časti za cieľ objasniť rôzne mechanizmy a princípy vlnovej konverzie z pohľadu ich vplyvu na blokovanie, resp. na priepustnosť siete. Avšak, hlavným cieľom dizertačnej práce je návrh všeobecného analytického modelu, ktorý slúži pre určenie pravdepodobnosti blokovania ako kvantitatívneho parametra pre určenie kvality služby. Daný model vyjadruje závislosť pravdepodobnosti blokovania od počtu vlnových dĺžok, počtu úsekov prenosovej cesty, počtu vlákien, veľkosti zaťaženia a stupňa vlnovej konverzie.

Jednou z možností implementácie daného modelu je riešenie kompromisu medzi ekonomickými nákladmi na danú sieť a dosiahnutou kvalitou služby, ktorá je určená pomocou pravdepodobnosti blokovania. Definovaním zisku vlnovej konverzie a použitím navrhnutého modelu je možné vzájomne porovnávať jednotlivé siete, ich výkon, a tak určiť vhodnú konfiguráciu siete.

Význam navrhnutého modelu nespočíva len v hodnotení danej siete z pohľadu jej priepustnosti, ale môže byť implementovaný aj pri riešení problematiky optimálneho umiestnenia vlnových konvertorov v sieťach s riedkou vlnovou konverziou. Implementácia navrhnutého modelu viedla k návrhu dvoch optimalizačných metód. V dizertačnej práci je navrhnutá OCP metóda s presným vyhľadávaním a OCP metóda s postupným vyhľadávaním. Súčasťou dizertačnej práce je množstvo simulácií a ich výsledkov, rovnako ako aj príklady implementácie daných OCP algoritmov. Z pozorovania simulácií priamo vyplynuli metódy zlepšenia optimalizačných algoritmov, ktoré sú uvedené spolu s výsledkami ich implementácie v poslednej časti dizertačnej práce.

2 Ciele dizertačnej práce

Podstata dizertačnej práce nadväzuje na potrebu praxe, t.j. snahu efektívne využívať optické prenosové prostriedky WDM sietí. Daná práca však úzko súvisí aj s teoretickým výskumom na Katedre telekomunikácií v rámci riešenia projektov.

Z ekonomického hľadiska sa v súčasnosti javia veľmi perspektívne viacvláknové siete bez vlnovej konverzie, jednovláknové siete s obmedzenou vlnovou konverziou a jednovláknové siete s riedkou vlnovou konverziou. Doteraz uverejnené modely pre hodnotenie výkonnosti WDM sietí sú úzko špecifikované a navrhnuté väčšinou len pre jeden typ WDM siete. Z tohto dôvodu preto nie je možné vzájomne porovnávať jednotlivé architektúry WDM sietí. Tento nedostatok ma viedol k návrhu všeobecne platného modelu a k jeho použitiu pri porovnávaní jednotlivých konfigurácií WDM sietí, ako aj k riešeniu problematiky určenia optimálnej polohy uzlov podporujúcich vlnovú konverziu.

Hlavné ciele práce sú preto definované nasledovne:

- analyzovať súčasný stav danej problematiky (teoretický výskum),

- navrhnuť všeobecný model pre určenie priepustnosti, resp. pravdepodobnosti blokovania v jednovláknových a viacvláknových optických WDM sieťach bez vlnovej konverzie, s obmedzenou a plnou vlnovou konverziou,
- analyzovať jednotlivé typy optických WDM sietí (jednovláknové – viacvláknové, bez vlnovej konverzie – s obmedzenou vlnovou konverziou – s plnou vlnovou konverziou) z pohľadu pravdepodobnosti blokovania,
- prakticky využiť daný model pre analýzu výkonnosti jednotlivých sietí a vyvodiť z toho odporúčania,
- využiť daný model pre optimálne umiestnenie sieťových uzlov podporujúcich vlnovú konverziu,
- navrhnuť heuristickú metódu pre určenie optimálnej polohy uzlov podporujúcich vlnovú konverziu,
- na základe teoretických a získaných experimentálnych výsledkov formulovať závery a odporúčania do telekomunikačnej praxe.

3 Zvolené metódy spravovania – návrh analytického modelu

Pri analýze, dimenzovaní, ako aj optimalizácii telekomunikačných systémov sa telekomunikačná prevádzka modeluje pomocou vhodných matematických modelov.

Siete WDM sú špecifické v tom, že výstavba spojenia pozostáva nie len z výberu fyzickej prenosovej cesty, ale aj z výberu vhodnej vlnovej dĺžky. Ďalšou špecifickou črtou je to či sieť umožňuje vlnovú konverziu a v akom rozsahu. Jednotlivé analytické a štatistické modely WDM sietí sa líšia predovšetkým [1]:

- použitými zjednodušujúcimi predpokladmi (napr. predpoklad linkovej nezávislosti, predpoklad vlnovej nezávislosti),
- metódou výberu prenosovej cesty (napr. pevné smerovanie, pevne alternatívne smerovanie, adaptívne smerovanie),
- metódou výberu vlnovej dĺžky (náhodný výber vlnových dĺžok, pevný výber vlnových dĺžok),
- pre akú topológiu siete sú určené (jednovláknové, viacvláknové siete),
- typom vlnovej konverzie v sieti (bez vlnovej konverzie, s obmedzenou alebo s plnou vlnovou konverziou),
- presnosťou.

Pri niektorých analytických modeloch sa berú do úvahy nasledovné zjednodušujúce predpoklady:

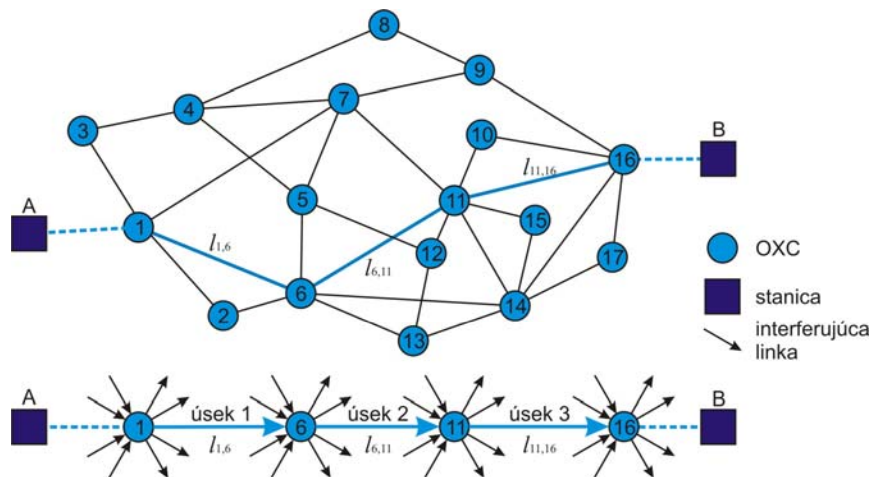
- predpoklad linkovej nezávislosti (*Link Independence Assumption*): stavy na jednotlivých linkách sú navzájom nezávislé, tomu odpovedá linkovo nezávislý model (*Link Load Independence model* - LLI model),
- predpoklad vlnovej nezávislosti (*Wavelength Independence Assumption*): obsadenie ľubovoľnej vlnovej dĺžky je nezávislé od obsadenia ostatných vlnových dĺžok na tej istej linke, tomu odpovedá vlnovo nezávislý model (*Wavelength Load Independence Model* – WLI model).

3.1 Návrh všeobecného analytického modelu

Navrhnutý všeobecný analytický model je rozšírením, resp. zovšeobecnením modelu podľa Barryho a Humbleta a modelu podľa Al-Zahrani. Je určený pre výpočet pravdepodobnosti blokovania P_b medzi dvoma koncovými uzlami v závislosti od počtu vlnových dĺžok W , počtu úsekov prenosovej cesty H , počtu vlákien F , zaťaženia ρ a stupňa vlnovej konverzie k pre jednovláknové ($F=1$) a viacvláknové ($F>1$) plne optické WDM siete bez vlnovej konverzie ($k=1$, *No*), s obmedzenou vlnovou konverziou so stupňom vlnovej konverzie k ($1 < k < W$, *Lim*) a s plnou vlnovou konverziou ($k=W$, *Full*).

Daný model slúži len pre aproximáciu pravdepodobnosti blokovania medzi dvoma koncovými uzlami pozdĺž prenosovej cesty danej siete (obr. 3.1). Avšak, pretože daný model berie do úvahy oba

zjednodušujúce predpoklady (predpoklad linkovej a vlnovej nezávislosti), je možné ho aplikovať pre sieť s ľubovoľnou topológiou. Model je navrhnutý pre ľubovoľné smerovanie, ktoré nie je závislé na výbere vlnových dĺžok. Pridelovanie vlnových dĺžok je uskutočnené pomocou RO (*Random Order*) algoritmu. V modeli sa predpokladá rovnaká pravdepodobnosť použitia jednej z k možných výstupných vlnových dĺžok.



Obr. 3.1 Model WDM siete

Model vychádza z predpokladu, že v sieti je rovnaký počet vlnových dĺžok W na každom vlákne a že každá fyzická linka pozostáva z rovnakého počtu vlákien F . Požiadavky na spojenie prichádzajú ako Poissonov proces s intenzitou požiadaviek na spojenie λ a doba spojenia má exponenciálne rozdelenie s intenzitou doby obsluhy μ (potom pre záťaž platí $a=\lambda/\mu$). Využitie vlnovej dĺžky (záťaž na jednu vlnovú dĺžku) ρ je definované ako pravdepodobnosť, že daná vlnová dĺžka bude obsadená na danej linke:

$$\rho_{i,j} = \frac{\sum_{n,m} a_{n,m}^L}{W}, \forall n, m, \quad 3.1$$

kde suma $\sum_{i,j} a_{n,m}^L$ vyjadruje súčet všetkých záťaží medzi každou dvojicou koncových uzlov n, m v danej sieti prislúchajúcich danej linke $l_{i,j}$ medzi dvomi za sebou idúcimi uzlami i, j .

Pravdepodobnosť blokovania P_b je pravdepodobnosť, že pre všetky vlnové dĺžky existuje prinajmenšom jeden úsek prenosovej cesty, na ktorom sú obsadené všetky vlnové dĺžky zo súboru k vlnových dĺžok, na ktoré môže byť daná vlnová dĺžka konvertovaná na všetkých vláknach F na danom úseku prenosovej cesty [5]. Potom pre rovnomernú záťaž platí:

$$P_{b,WDM} = \left[1 - (1 - \rho^{F \cdot k})^H \right]^{W/k} \quad 3.2$$

a pre nerovnomernú záťaž platí:

$$P'_{b,WDM} = \left[1 - \prod_{i,j \in R; H} (1 - \rho_{i,j}^{F \cdot k}) \right]^{W/k} \quad 3.3$$

Prehľad navrhnutého všeobecného modelu, ako aj modelu podľa Barryho a Humbleta a modelu podľa Al-Zahrani pre rovnomernú prevádzku, je uvedený v tabuľke 3.1. Pre nerovnomernú prevádzku je tento prehľad uvedený len v dizertačnej práci.

Tab. 3.1 Prehľad analytických modelov pre rovnomernú záťaž

Pravdepodobnosť blokovania WDM sietí		
$P_{b,WDM} = \left[1 - (1 - \rho^{F \cdot k})^H\right]^{W/k}$ (všeobecný model)		
	Jednovláknové WDM siete, $F=1$	Viacvláknové WDM siete, $F>1$
Bez konverzie, $k=1$	$P_{b,no} = \left[1 - (1 - \rho)^H\right]^W$ (model podľa Barryho a Humbleta)	$P'_{b,no} = \left[1 - (1 - \rho^F)^H\right]^W$ (model podľa Al-Zahrani a kol.)
Plná vlnová konverzia, $k=W$	$P_{b,full} = 1 - (1 - \rho^W)^H$ (model podľa Barryho a Humbleta)	$P'_{b,full} = 1 - (1 - \rho^{F \cdot W})^H$ (model podľa Al-Zahrani a kol.)
Obmedzená vlnová konverzia, $1 < k < W$	$P_{b,lim} = \left[1 - (1 - \rho^k)^H\right]^{W/k}$ (všeobecný model)	$P'_{b,lim} = \left[1 - (1 - \rho^{F \cdot k})^H\right]^{W/k}$ (všeobecný model)

Výpočet pravdepodobnosti blokovania, podľa daného modelu v prípade sietí s ľubovoľnou topológiou, môžeme určiť rozložením danej siete na príslušný počet prenosových ciest medzi každou dvojicou koncových uzlov. Príslušná záťaž na každej linke l_{ij} medzi ľubovoľnou dvojicou po sebe idúcich uzlov i, j môže byť potom vypočítaná podľa vzťahu 3.1. Potom pre každú prenosovú cestu, resp. pre každú dvojicu koncových platí vzťah 3.2, resp. 3.3. Celková pravdepodobnosť blokovania B v danej sieti môže byť určená pomocou nasledovného vzťahu:

$$B = \frac{\sum_{n,m} a_{n,m} P_b^{n,m}}{\sum_{n,m} a_{n,m}}. \quad 3.4$$

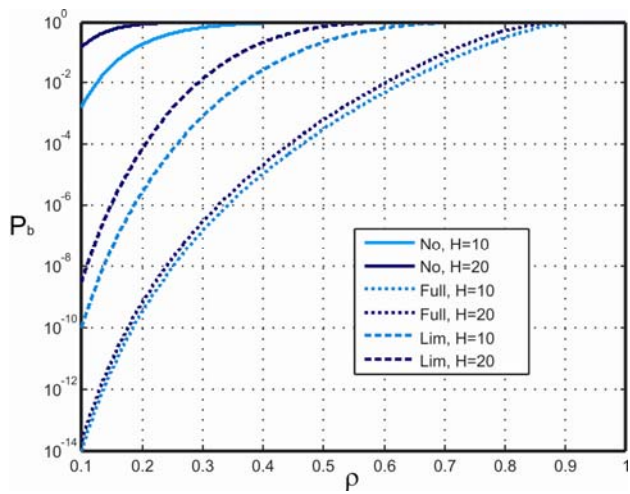
3.2 Simulácie a numerické výsledky navrhnutého analytického modelu

Všetky simulácie navrhnutých modelov sú realizované v programovom prostredí Matlab. V prvej časti stimulačných výsledkov dizertačnej práce je uvedená podrobná analýza všetkých typov sietí (t.j. jednovláknových a viacvláknových sietí bez vlnovej konverzie, s obmedzenou a plnou vlnovou konverziou) z pohľadu pravdepodobnosti blokovania.

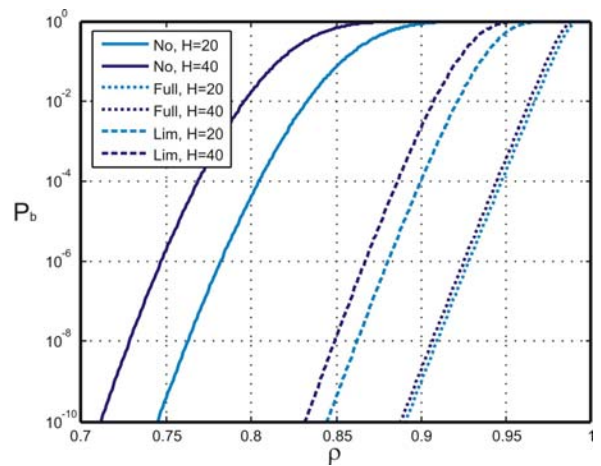
V druhej časti výsledkov dizertačnej práce sú jednotlivé typy siete vzájomne porovnané. Niektoré typické charakteristiky vplyvu zaťaženia ρ , počtu vlnových dĺžok W , počtu úsekov prenosovej cesty H , stupňa vlnovej konverzie k a počtu vlákien F na pravdepodobnosť blokovania sú uvedené na nasledovných obrázkoch (3.2 až 3.10).

Z jednotlivých simulácií, resp. grafov vyplývajú nasledovné všeobecne platné výsledky:

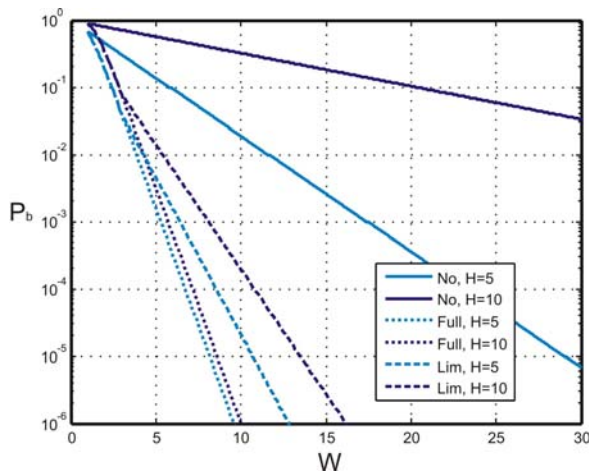
- pravdepodobnosť blokovania vždy rastie so zaťažením ρ (obr. 3.2 a 3.3) a s počtom úsekov prenosovej cesty H (obr. 3.6 a 3.7),
- pravdepodobnosť blokovania klesá s počtom vlnových dĺžok W (obr. 3.4 a 3.5), s počtom vlákien F (obr. 3.10) a so stupňom vlnovej konverzie k (obr. 3.8 a 3.9),
- v sieťach bez vlnovej konverzie pravdepodobnosť blokovania prudko rastie s počtom úsekov prenosovej cesty, na rozdiel od sietí s plnou vlnovou konverziou,
- viacvláknové siete bez vlnovej konverzie sa z pohľadu pravdepodobnosti blokovania správajú ako siete s obmedzenou vlnovou konverziou,
- pre rovnaké parametre siete ρ, H, W najväčšiu pravdepodobnosť blokovania dosahujú jednovláknové siete bez vlnovej konverzie.



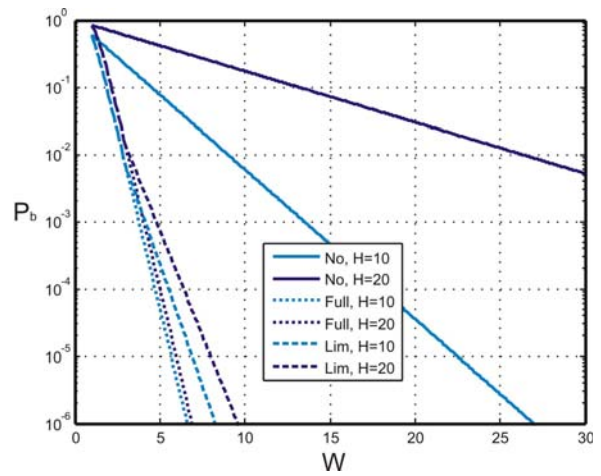
Obr. 3.2 $P_b=f(\rho)$, $W=15$, $k=3$, $F=1$



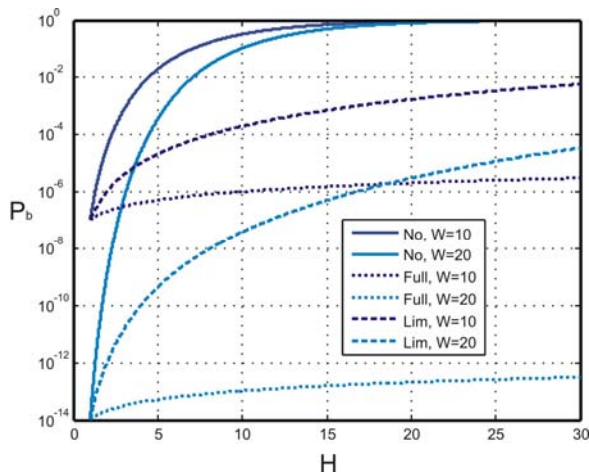
Obr. 3.3 $P_b=f(\rho)$, $W=15$, $k=3$, $F=15$



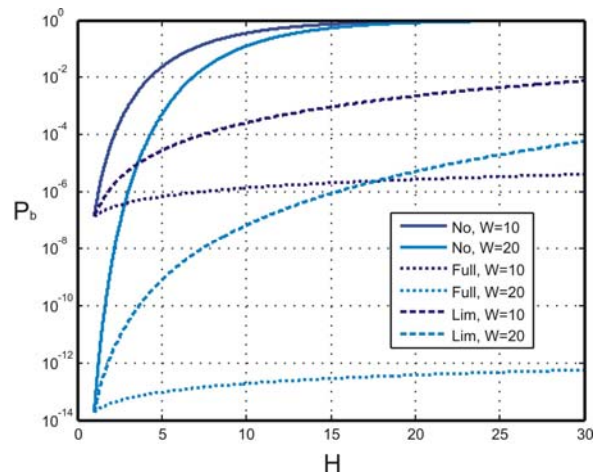
Obr. 3.4 $P_b=f(W)$, $\rho=0,2$, $k=3$, $F=1$



Obr. 3.5 $P_b=f(W)$, $\rho=0,85$, $k=3$, $F=15$



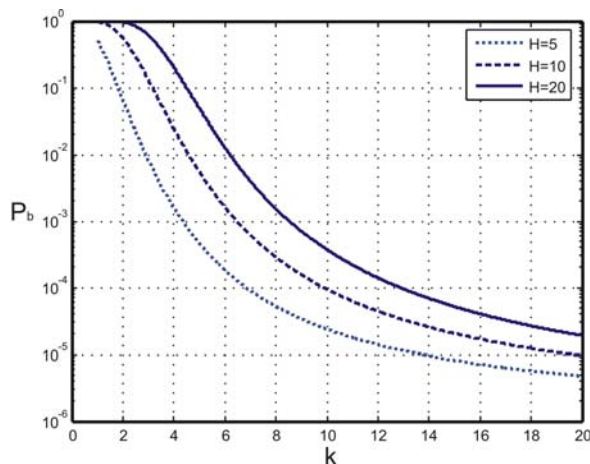
Obr. 3.6 $P_b=f(H)$, $\rho=0,2$, $k=3$, $F=1$



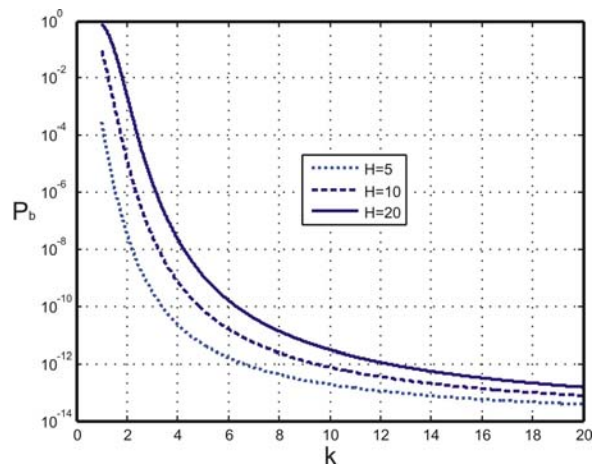
Obr. 3.7 $P_b=f(H)$, $\rho=0,9$, $k=3$, $F=15$

Ďalej môžeme pozorovať, že vo všeobecnosti platí:

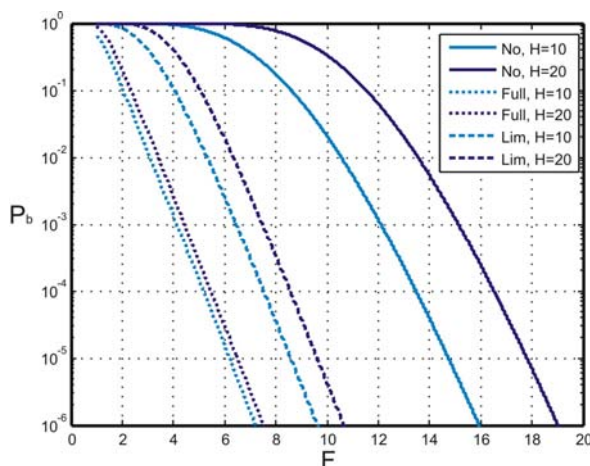
- pre rovnaké parametre siete ρ , H , W najmenšiu pravdepodobnosť blokovania dosahujú viacvláknové siete s plnou vlnovou konverziou,
- siete s obmedzenou vlnovou konverziou sú z pohľadu pravdepodobnosti blokovania plynulým prechodom od sietí bez vlnovej konverzie k sieťam s plnou vlnovou konverziou v závislosti od stupňa vlnovej konverzie ($1 < k < W$),
- siete s obmedzenou vlnovou konverziou s relatívne malým stupňom vlnovej konverzie dosahujú porovnateľnú pravdepodobnosť blokovania ako siete s plnou vlnovou konverziou.



Obr. 3.8 $P_b=f(k)$, $\rho=0,5$, $W=20$, $F=1$



Obr. 3.9 $P_b=f(k)$, $\rho=0,85$, $W=20$, $F=10$



Obr. 3.10 $P_b=f(H)$, $\rho=0,8$, $W=10$, $k=3$

3.3 Zisk vlnovej konverzie a viacvláknových sietí

Definovaním zisku G môžeme porovnávať ľubovoľné dve rôzne siete [2]: jednovláknové a viacvláknové siete bez vlnovej konverzie, s obmedzenou, resp. s plnou vlnovou konverziou. Hoci viacvláknové siete bez vlnovej konverzie neumožňujú vlnovú konverziu, svojím správaním sa javia ako siete s vlnovou konverziou. Z tohto dôvodu môžeme aj v tomto prípade parameter G nazývať zisk vlnovej konverzie, i keď v tomto prípade by bolo správnejšie hovoriť o zisku použitia viacvláknových sietí.

Zisk vlnovej konverzie G je definovaný ako vzájomný pomer využitia vlnovej dĺžky dvoch rôznych sietí (ρ_1, ρ_2) pre rovnakú hodnotu pravdepodobnosti blokovania P_b a konštantné parametre siete H, W , t.j.:

$$G = \frac{\rho_1}{\rho_2} \Big|_{P_b, H, W = \text{konšt}} = \frac{q}{p} \quad 3.5$$

Vo všeobecnosti sa predpokladá, že využitie vlnovej dĺžky $q=\rho_1$ (resp. $p=\rho_2$) odpovedá sieti s väčším (resp. s menším) využitím vlnovej dĺžky. Potom hodnota zisku vlnovej konverzie je rovná alebo väčšia ako jedna. Zo všeobecného vzťahu pre pravdepodobnosť blokovania (rov. 3.2) môžeme odvodiť pre využitie vlnovej dĺžky nasledovný vzťah:

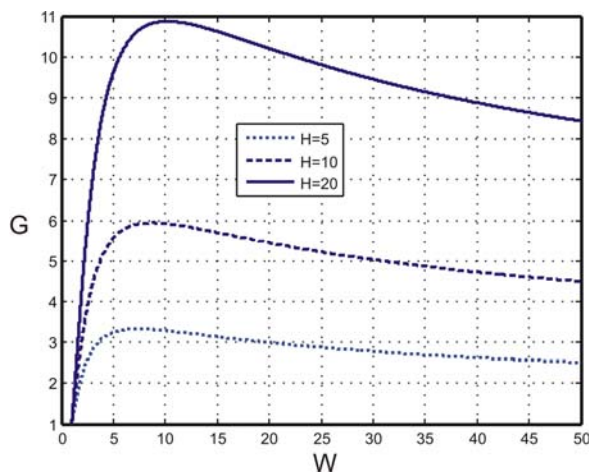
$$\rho = \left[1 - (1 - P_b^{k/W})^{1/H} \right]^{1/(F.k)} \quad 3.6$$

Zisk vlnovej konverzie môže byť určený pre ľubovoľný typ WDM siete, pričom je vzťahnutý voči inému typu WDM siete. Preto existuje až 15 možností. Pre porovnanie sú v dizertačnej práci uvedené číselné hodnoty zisku vlnovej konverzie pre všetky dané možnosti a to pre počet vlnových dĺžok $W=5$ a $W=20$. V nasledovnej tabuľke 3.2 sú uvedené dané výsledky len pre počet vlnových dĺžok $W=20$.

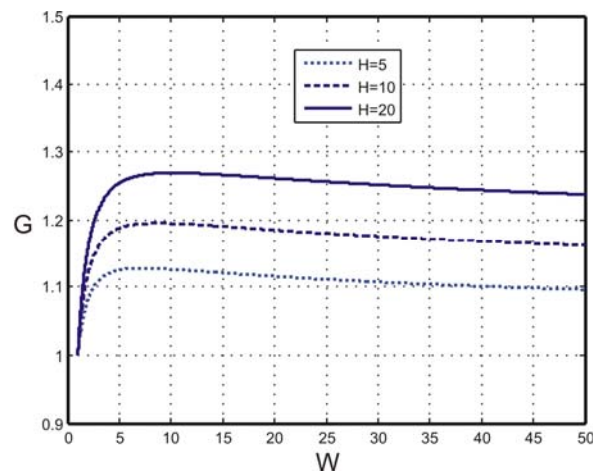
Tab. 3.2 Porovnanie zisku medzi jednotlivými sieťami pre $W=20$

$F=1$	No	1					
	Lim	3,0222	1				
	Full	5,4484	1,8028	1			
$F=10$	No	6,9604	2,3031	1,2775	1		
	Lim	7,7744	2,5724	1,4269	1,1169	1	
	Full	8,2463	2,7286	1,5135	1,1848	1,0607	1
$H=10,$ $W=20,$ $P_b=10^{-3}$	No	Lim	Full	No	Lim	Full	
	F=1			F=10			

Pre všetky významné porovnania sú súčasťou práce aj typické charakteristiky zisku. Tu si pre názornosť ukážeme len niektoré charakteristiky (obr. 3.11 až 3.16).



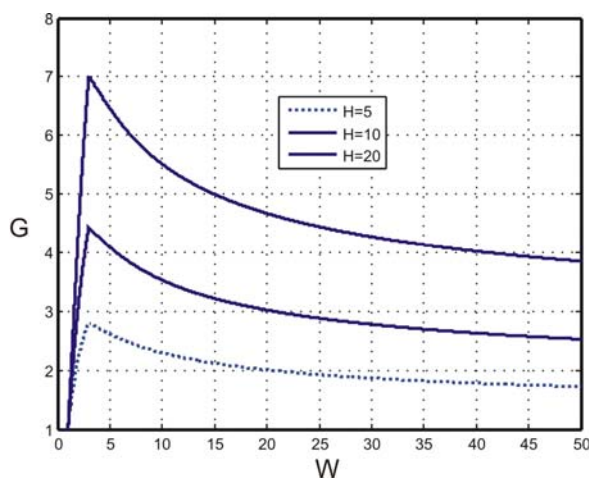
Obr. 3.11 $G=f(W), P_b=10^{-3}, F=1, \text{Full} / \text{No}$



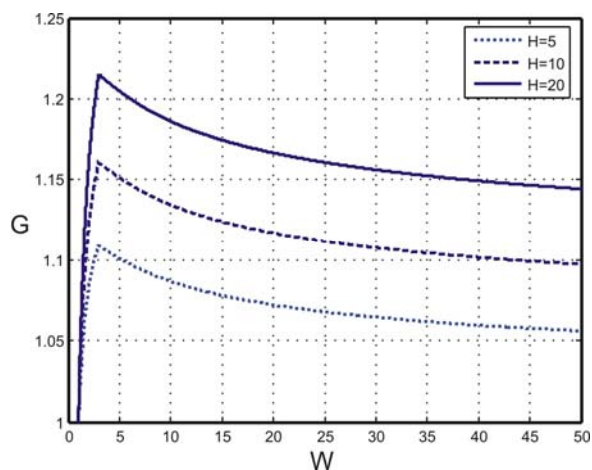
Obr. 3.12 $G=f(W), P_b=10^{-3}, F=10, \text{Full} / \text{No}$

Z daných grafov (obr. 3.11 až 3.16) a zo simulácií, ktoré sú detailne popísané v dizertačnej práci, vyplynulo viacero zaujímavých výsledkov:

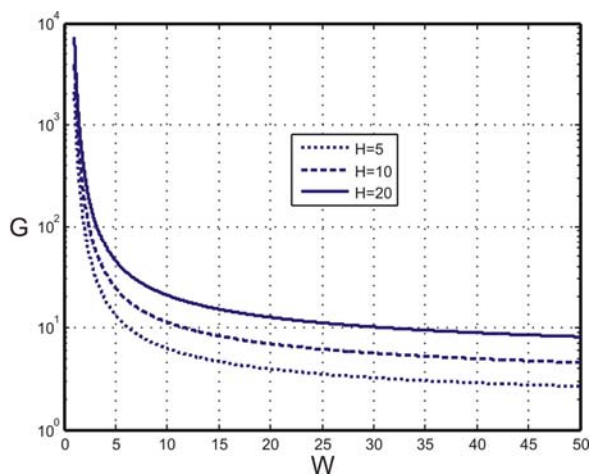
- z pohľadu zisku má zmysel nahradiť jednovláknové siete bez vlnovej konverzie:
 - jednovláknovými sieťami s obmedzenou (obr. 3.11) alebo s plnou vlnovou konverziou (obr. 3.13),
 - viacvláknovými sieťami bez vlnovej konverzie (obr. 3.15), resp. s plnou alebo obmedzenou vlnovou konverziou (obr. 3.16),
- avšak, z pohľadu kompromisu medzi ekonomickými nákladmi a dosiahnutým ziskom, ako aj z praktického hľadiska, má zmysel nahradiť jednovláknové siete bez vlnovej konverzie len:
 - jednovláknovými sieťami s obmedzenou vlnovou konverziou,
 - viacvláknovými sieťami bez vlnovej konverzie,
- z pohľadu zisku nemá význam nahradzovať viacvláknové siete bez vlnovej konverzie viacvláknovými sieťami s plnou alebo obmedzenou vlnovou konverziou.



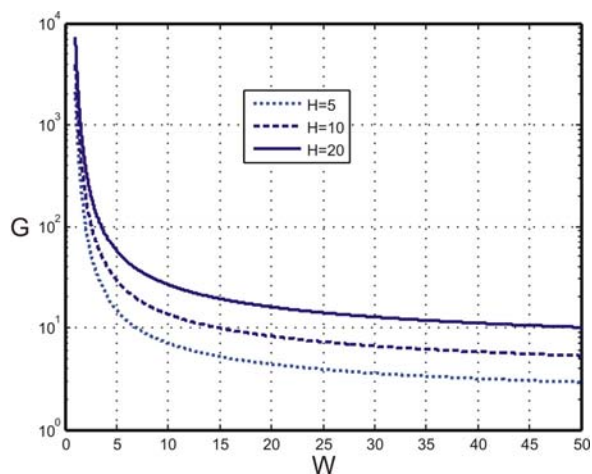
Obr. 3.13 $G=f(W)$, $Pb=10^{-3}$, $F=1$, $k=3$, Lim / No



Obr. 3.14 $G=f(W)$, $Pb=10^{-3}$, $F=10$, $k=3$, Lim / No



Obr. 3.15 $G=f(W)$, $Pb=10^{-3}$, $F=10$ $No / F=1$ No



Obr. 3.16 $G=f(W)$, $Pb=10^{-3}$, $F=10$ $Full / F=1$ No

3.4 Porovnanie a presnosť daného modelu

Treba si uvedomiť, že navrhnutý model je analytický a nie štatistický. Zátťaž v danom modeli je strednou hodnotou obsadenia vlnovej dĺžky na danom úseku prenosovej cesty. Z tohto pohľadu daný model špecificky neodpovedá podstate štatistického vzniku požiadaviek na prevádzku. Preto daný model lepšie popisuje prevádzku vo WDM sieťach, kde doba obsadenia vlnovej dĺžky je relatívne

veľmi veľká. Z toho vyplýva, že tento model je predovšetkým vhodný pre WDM siete s metódou prepojovania kanálov, kde daný kanál je permanentne obsadený a využíva celú šírku prenosového pásma. Pri splnení týchto podmienok môžeme daný model považovať z pohľadu dynamiky prevádzky za vhodný.

V druhom rade si musíme uvedomiť, že pri odvodení daného modelu boli vzaté do úvahy zjednodušujúce predpoklady (predpoklad linkovej nezávislosti – LLI model a predpoklad vlnovej nezávislosti - WLI model). Výskum v tejto oblasti dokázal, že oba zjednodušujúce predpoklady nadhodnocujú pravdepodobnosť blokovania v závislosti od použitých algoritmov pre pridelovanie vlnových dĺžok. Preto navrhnutý všeobecný model nadhodnocuje pravdepodobnosť blokovania.

Ďalej je potrebné vziať do úvahy, že sa predpokladá rovnaká pravdepodobnosť použitia každej vlnovej dĺžky na danom úseku prenosovej cesty. Z tohto pohľadu daný model je najviac vhodný pre RO (*Random Order*) a FO (*Fixed Order*) algoritmus pridelovania vlnových dĺžok. Avšak, ani pri použití spomenutých algoritmov nie je splnená požiadavka rovnakej pravdepodobnosti využitia vlnových dĺžok na danom úseku prenosovej cesty. To má za následok nadhodnotenie pravdepodobnosti blokovania.

Určenie presnosti daného modelu, ako aj jeho overenie, nebolo predmetom tejto práce. Daný model bol odvodený za rovnakých predpokladov ako model podľa Barryho a Humbleta. Časť ich publikovanej práce je venovaná číselnému určaniu presnosti daného modelu. Vo všeobecnosti môžeme považovať ich výsledky za platné aj pre daný všeobecný model.

4 Zvolené metódy spracovania - optimalizácia umiestnenia uzlov podporujúcich vlnovú konverziu pomocou navrhnutého modelu

Pravdepodobnosť blokovania v sieťach s riedkou vlnovou konverziou závisí nie len od celkového počtu uzlov podporujúcich vlnovú konverziu, ale aj od ich samotného umiestnenia v danej sieti. Úlohou optimalizácie umiestnenia uzlov podporujúcich vlnovú konverziu (*Optimal Converter Placement* - OCP) je určiť polohu K uzlov podporujúcich vlnovú konverziu z celkového počtu N uzlov siete tak, aby sa dosiahla najlepšia činnosť siete z pohľadu najväčšej priepustnosti (resp. najmenej pravdepodobnosti blokovania) pre danú prevádzku, parametre a topológiu siete.

V súčasnosti je navrhnutých veľa zaujímavých OCP metód, ktoré sa vzájomne odlišujú:

- porovnávajúcim optimalizačným kritériom (pravdepodobnosť blokovania, priepustnosť, a pod.),
- metódou výpočtu, resp. aproximácie optimalizačného kritéria (analytický, štatistický model),
- spôsobom výberu vhodného umiestnenia uzlov podporujúcich vlnovú konverziu (presná alebo heuristická metóda).

Kvantitatívnym optimalizačným kritériom pre optimálne určenie polohy uzlov podporujúcich vlnovú konverziu môže byť pravdepodobnosť blokovania, resp. celková priepustnosť v danej sieti. Práve implementácia navrhnutého modelu pri problematike určenia optimálnej polohy viedla k návrhu dvoch nových heuristických OCP metód.

Ak daná metóda preveruje všetky možnosti umiestnenia uzlov podporujúcich vlnovú konverziu, potom hovoríme o presnom OCP algoritme. Pomocou ľubovoľného aproximačného modelu sa potom určí celková pravdepodobnosť blokovania v sieti pre každú možnosť umiestnenia. Nakoniec sa vyberie tá poloha, pri ktorej celková pravdepodobnosť blokovania dosahuje najmenšiu hodnotu.

Štatistické modely sú vo väčšine prípadov podstatne presnejšie ako analytické modely, ale na druhej strane sú aj viac náročné. Výpočet pravdepodobnosti blokovania pre každú kombináciu umiestnenia K uzlov podporujúcich vlnovú konverziu je väčšinou pre všetky štatistické a presnejšie analytické aproximačné modely pomerne časovo náročný. Preto presná OCP metóda je tiež výpočtovo veľmi náročná. Náročnosť presného OCP algoritmu prudko rastie s počtom uzlov v danej sieti. Je

prakticky nemožné túto metódu aplikovať pre reálne WDM siete. Z tohto dôvodu bolo navrhnutých niekoľko heuristických algoritmov v dizertačnej práci.

Heuristické algoritmy vychádzajú z poznatkov, že vo všeobecnosti na optimálne umiestnenie vlnových konvertorov vplyvajú predovšetkým nasledovné faktory:

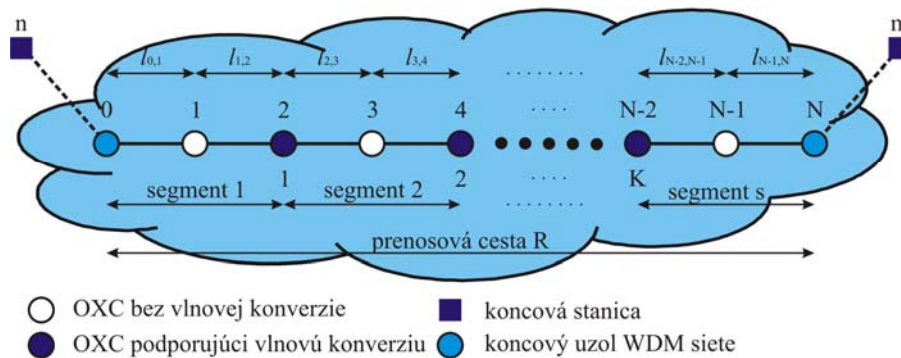
- uzol s vysokou prevádzkovou záťažou je vhodným kandidátom pre umiestnenie vlnového konvertora,
- vzdialenosť medzi dvoma uzlami podporujúcimi vlnovú konverziu je významný faktor pre určenie optimálneho riešenia.

4.1 Výpočet pravdepodobnosti blokovania v sieťach s riedkou vlnovou konverziou

Predpokladajme prenosovú cestu R pozostávajúcu zo za sebou idúcich liniek L medzi dvoma koncovými uzlami n, m siete s ľubovoľnou topológiou s počtom uzlov N . Definujme segment prenosovej cesty S ako súbor po sebe idúcich liniek L medzi dvoma po sebe nasledujúcimi uzlami i, j podporujúcimi vlnovú konverziu, alebo medzi koncovým uzlom n (resp. m) a jeho najbližším uzlom podporujúcim vlnovú konverziu (obr. 4.1).

Vo všeobecnosti od toho, aký typ vlnovej konverzie umožňujú jednotlivé uzly siete, rozoznávame nasledovné prípady WDM sietí s riedkou vlnovou konverziou:

- *No-Full* (uzly bez vlnovej konverzie a s plnou vlnovou konverziou),
- *No-Lim* (uzly bez vlnovej konverzie a s obmedzenou vlnovou konverziou),
- *Lim-Full* (uzly s plnou a obmedzenou vlnovou konverziou).



Obr. 4.1 Definovanie a označovanie segmentov

Pravdepodobnosť blokovania P_b^R pozdĺž prenosovej cesty R medzi dvoma koncovými uzlami n, m siete s riedkou vlnovou konverziou s uzlami podporujúcimi plnú vlnovú konverziu môže byť vypočítaná nasledovne:

$$P_b^R = 1 - \prod_{d=1}^s \{1 - P_b^{seg_d}\}, \quad 4.1$$

kde $P_b^{seg_j}$ je pravdepodobnosť blokovania j -teho segmentu. Daný vzťah platí len pre siete s riedkou vlnovou konverziou, ak v danej sieti sa nachádzajú uzly podporujúce vlnovú konverziu v plnom rozsahu, t.j. siete typu *No-Full* a *Lim-Full*. Daný vzťah teda neplatí pre siete typu *No-Lim*.

No-Full sieť s riedkou vlnovou konverziou

Pravdepodobnosť blokovania každého segmentu, v prípade siete s riedkou vlnovou konverziou typu *No-Full*, je formulovaná ako pravdepodobnosť blokovania bez vlnovej konverzie a môže byť vypočítaná pomocou navrhnutého analytického modelu (3.2, resp. 3.3). Potom platí nasledovný vzťah v prípade rovnomernej prevádzky:

$$P_b^R = 1 - \prod_{d=1}^s \left\{ 1 - \left[1 - (1 - \rho)^{H_d} \right]^W \right\} \quad 4.2$$

a pre nerovnomernú prevádzku platí:

$$P_b^R = 1 - \prod_{d=1}^s \left\{ 1 - \left[1 - \prod_{r=1, i, j \in R; H_r}^{H_d} (1 - \rho_{i,j}) \right]^W \right\}. \quad 4.3$$

Lim-Full sieť s riedkou vlnovou konverziou

Pravdepodobnosť blokovania každého segmentu, v prípade siete s riedkou vlnovou konverziou typu *Lim-Full*, je formulovaná ako pravdepodobnosť blokovania s obmedzenou vlnovou konverziou a môže byť vypočítaná pomocou navrhnutého analytického modelu (rov. 3.2, resp. 3.3). Potom platí nasledovný vzťah v prípade rovnomernej prevádzky:

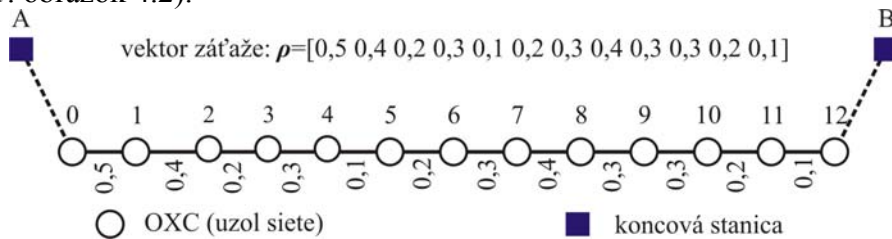
$$P_b^R = 1 - \prod_{d=1}^s \left\{ 1 - \left[1 - (1 - \rho^k)^{H_d} \right]^W \right\} \quad 4.4$$

a pre nerovnomernú prevádzku platí:

$$P_b^R = 1 - \prod_{d=1}^s \left\{ 1 - \left[1 - \prod_{r=1, i, j \in R; H_r}^{H_d} (1 - \rho_{i,j}^k) \right]^W \right\}. \quad 4.5$$

Numerické príklady a výsledky

Simulácie sú uskutočnené pre prenosovú cestu R pozostávajúcu z 12 liniek ($H=12$, $N=12$) s nerovnomernou prevádzkou (obr. 4.2). Vektor záťaže odpovedajúci jednotlivým linkám je $\rho=[0,5 \ 0,4 \ 0,2 \ 0,3 \ 0,1 \ 0,2 \ 0,3 \ 0,4 \ 0,3 \ 0,3 \ 0,2 \ 0,1]$. Počet vlnových dĺžok je $W=10$ a stupeň vlnovej konverzie v prípade obmedzenej vlnovej konverzie je $k=3$. Vo vektore polohy „0“ označuje uzol bez podpory vlnovej konverzie a „1“ označuje uzol podporujúci vlnovú konverziu. Nultý uzol $N=0$ sa neberie pri výpočte do úvahy, pretože pravdepodobnosť blokovania sa nemení v závislosti od toho, či daný uzol podporuje, alebo nepodporuje vlnovú konverziu. Preto nultý uzol 0 nie je zahrnutý ani vo vektore umiestnenia (viď. obrázok 4.2).



Obr. 4.2 Prenosová cesta (príklad)

V tabuľke 4.1 je prehľad pravdepodobnosti blokovania siete s riedkou vlnovou konverziou typu *No-Full* v závislosti od polohy umiestnenia uzlov podporujúcich vlnovú konverziu. V dizertačnej práci je uvedená podobná tabuľka aj pre siete s riedkou vlnovou konverziou typu *Lim-Full*.

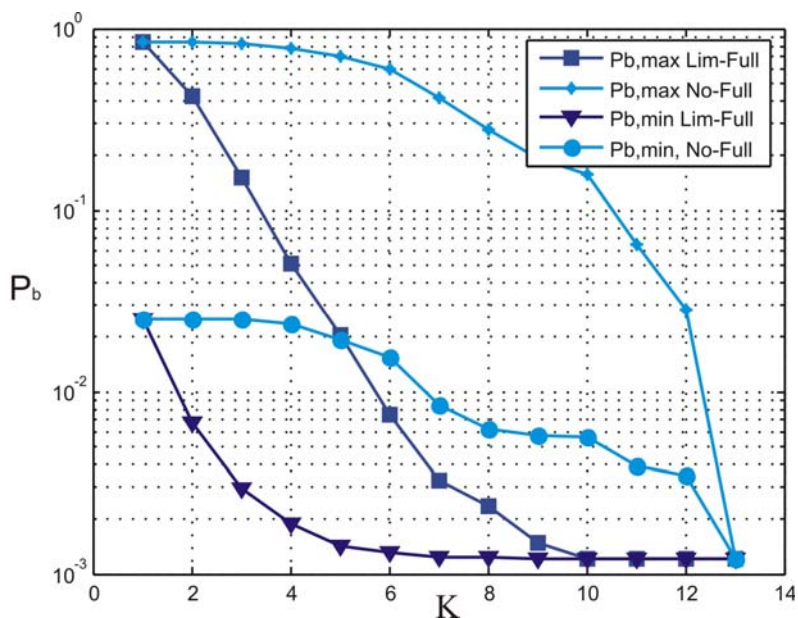
V prípade celkovej analýzy siete s N uzlami existuje M možností ako umiestniť K uzlov podporujúcich vlnovú konverziu, ktoré môžeme určiť pomocou nasledovného vzťahu:

$$M = \binom{N}{K} = \frac{N!}{(N-K)! K!} \quad 4.6$$

Tab. 4.1 Maximálna a minimálna P_b v závislosti od umiestnenia vlnových konvertorov pre sieť s riedkou obmedzenou vlnovou typu *No-Full*

Pravdepodobnosť blokovania P_b , $W=10$, $H=12$, $k=3$, $\rho=[0,5 \ 0,4 \ 0,2 \ 0,3 \ 0,1 \ 0,2 \ 0,3 \ 0,4 \ 0,3 \ 0,3 \ 0,2 \ 0,1]$						
			<i>No-Full</i>			
			minimum		maximum	
K	M	S	$P_{b,min}$	poloha	$P_{b,max}$	poloha
0	1	1			0,83455270	000000000000
1	12	2	0,42120817	000001000000	0,83455270	000000000001
2	66	3	0,15031438	010000100000	0,81778298	000000000011
3	220	4	0,05038395	010001010000	0,77717750	000000000111
4	495	5	0,02040921	101000101000	0,69621471	000000001111
5	792	6	0,00744659	110010101000	0,59369883	000000011111
6	924	7	0,00326254	110010111000	0,41289498	000000111111
7	792	8	0,00237233	110101111000	0,27556653	000001111111
8	495	9	0,00148131	110101111100	0,19421154	000011111111
9	220	10	0,00121567	111101111100	0,15904328	000111111111
10	66	11	0,00121282	111101111110	0,06440930	001111111111
11	12	12	0,00120996	111111111110	0,02837267	011111111111
12	1	12	0,00120996	111111111111		

V ľavej (resp. pravej) časti tabuľky je uvedená len minimálna (resp. maximálna) hodnota pravdepodobnosti blokovania v závislosti od polohy uzlov podporujúcich vlnovú konverziu. V tabuľke je tiež uvedený počet možností M , ktoré museli byť preverované a počet vzniknutých segmentov S . Pre daný počet uzlov podporujúcich vlnovú konverziu K poloha odpovedajúca minimálnej hodnote pravdepodobnosti blokovania P_b je optimálna pre umiestnenie vlnových konvertorov.



Obr. 4.3 $P_b=f(K)$, $W=10$, $k=3$, $H=12$, *No-Full*, *No-Lim*

Grafické zobrazenie minimálnej $P_{b,min}$ (resp. maximálnej $P_{b,max}$) hodnoty pravdepodobnosti blokovania pre daný počet vlnových konvertorov a pre najlepšie - optimálne (resp. najhoršie) umiestnenie uzlov podporujúcich vlnovú konverziu v sieti s riedkou vlnovou konverziou typu *No-Full* a *No-Lim* je na obrázku 4.3.

Z grafu môžeme pozorovať, že pravdepodobnosť blokovania výrazne závisí od počtu a umiestnenia uzlov podporujúcich vlnovú konverziu. Pravdepodobnosť blokovania pre ostatné umiestnenia uzlov podporujúcich plnú vlnovú konverziu sa pohybuje medzi príslušnými krivkami pre maximálnu a minimálnu hodnotu pravdepodobnosti blokovania. Z grafu je tiež vidieť, že v našom prípade je optimálny počet vlnových konvertorov v medziach $2 < K < N/2$ v prípade *No-Full* siete a $2 < K < 4$ v prípade *Lim-Full* siete.

4.2 Návrh presnej a heuristickej metódy pre OCP

Implementácia navrhnutého modelu viedla k návrhu presnej a heuristickej metódy pre riešenie problematiky optimálneho umiestnenia uzlov podporujúcich vlnovú konverziu v sieťach s riedkou vlnovou konverziou.

V prípade presnej OCP metódy sú preverené všetky možné kombinácie M umiestnenia uzlov podporujúcich vlnovú konverziu. Táto metóda je pre jednoduchosť označená ako M1. Heuristická metóda preveruje jednotlivé možnosti umiestnenia uzlov podporujúcich vlnovú konverziu ich postupným pridávaním (v každom kroku je nájdená optimálna poloha len pre jeden uzol podporujúci vlnovú konverziu). Táto metóda je označená ako M2.

Jednotlivým metódam odpovedajú nasledovné algoritmy:

- Algoritmus pre optimalizáciu umiestnenia uzlov podporujúcich vlnovú konverziu v sieťach s riedkou vlnovou konverziou typu *No-Full* s použitím navrhnutého všeobecného modelu s presným vyhľadávaním (Presná OCP metóda),
- Algoritmus pre optimalizáciu umiestnenia uzlov podporujúcich vlnovú konverziu v sieťach s riedkou vlnovou konverziou typu *No-Full* s použitím navrhnutého všeobecného modelu s postupným vyhľadávaním (Heuristická OCP metóda).

Vo všeobecnosti, celkový počet prenosových ciest medzi každou dvojicou koncových uzlov v ľubovoľnej sieti, je $P=N(N-1)$. V prípade algoritmu M1, existuje M_{M1} možností ako umiestniť K uzlov podporujúcich vlnovú konverziu, ktoré môžeme určiť pomocou vzťahu 4.6 ($M_{M1}=M$). Potom podľa daného algoritmu musí byť vypočítaných $M_{M1} \times P$ pravdepodobností prenosových ciest a M_{M1} celkových pravdepodobností danej siete.

V prípade algoritmu M2 existuje M_{M2} možností ako umiestniť K uzlov podporujúcich vlnovú konverziu, ktoré určíme podľa vzťahu

$$M_{M2} = \sum_{l=0}^{K-K'-1} (N - (K' + l)), \quad 4.7$$

kde K' je aktuálny, resp. počiatočný počet uzlov podporujúcich vlnovú konverziu.

Podľa daného algoritmu M2 musí byť vypočítaných $M_{M2} \times P$ pravdepodobností prenosových ciest a M_{M2} celkových pravdepodobností danej siete.

Napriek tomu, že výpočet pravdepodobnosti blokovania pomocou navrhnutého modelu je pomerne nenáročný, algoritmus podľa metódy M1 sa pre veľký počet uzlov N stáva výpočtovo náročný. S ohľadom na optimálny počet uzlov K podporujúcich vlnovú konverziu ($2 < K < N/2$), počet možností M_{M1} umiestnenia uzlov podporujúcich vlnovú konverziu prudko rastie s počtom uzlov N v danej sieti. V prípade algoritmu M2 je celkový počet možností M_{M2} podstatne menší ako celkový počet možností M_{M1} v prípade algoritmu M1 a nerastie tak dynamicky s počtom uzlov v danej sieti. Preto náročnosť algoritmu M2 je podstatne menšia.

Porovnanie obtiažnosti z pohľadu celkových prehl'adávaných M možnosti umiestnenia K uzlov podporujúcich vlnovú konverziu je v nasledovnej tabuľke 4.2.

Tab. 4.2 Porovnanie obtiažnosti navrhnutých algoritmov z pohľadu počtu možností umiestnenia uzlov podporujúcich vlnovú konverziu

Počet uzlov v danej sieti N	Počet uzlov podporujúcich vlnovú konverziu K	Počet možností M	
		Algoritmus M1	Algoritmus M2
20	5	15504	90
20	10	184756	155
40	5	658808	190
40	10	847660528	355

4.3 Príklad implementácie navrhnutých metód M1 a M2

Obe metódy sú implementované pre sieť pozostávajúcu zo za sebou idúcich 15 liniek ($H=15$, $N=15$) s vektorom zaťaženia $\rho=[0,2, 0,05, 0,1, 0,3, 0,35, 0,15, 0,3, 0,4, 0,05, 0,1, 0,2, 0,05, 0,25, 0,3, 0,1]$ a s počtom vlnových dĺžok $W=15$. V tabuľke 4.3 je uvedená nájdená optimálna poloha a príslušná pravdepodobnosť blokovania v závislosti od počtu uzlov podporujúcich vlnovú konverziu K .

Počet možností umiestnenia, resp. náročnosť algoritmu v závislosti od počtu uzlov podporujúcich vlnovú konverziu je výrazne rozdielna. Nevýhodou algoritmu M2 je, že postupným pridávaním je spravidla málo pravdepodobné, že sa dosiahne taká optimálna poloha ako ju určí presný algoritmus M1. Tomu to je tak, pretože algoritmus M2 má recipročnú pamäť (nasledovný stav závisí od predchádzajúceho stavu).

Tab. 4.3 Porovnanie metód M1 a M2 z pohľadu určenia optimálnej polohy a pravdepodobnosti blokovania pre 15 úsekovú prenosovú cestu

K	Metóda M1			Metóda M2		
	Optimálna poloha	P_b	M_{M1}	Optimálna poloha	P_b	M_{M2}
0	0000000000000000	0,594150	1	0000000000000000	0,594150	1
1	0000001000000000	0,091318	15	0000001000000000	0,091318	15
2	0000100010000000	0,008568	105	0000001000100000	0,046810	29
3	0001001000100000	0,001202	455	0000101000100000	0,004218	42
4	0001010100001000	0,000390	1365	0001101000100000	0,000551	54
5	0001101001001000	0,000082	3003	0001101100100000	0,000191	65
6	0011101001001000	0,000026	5005	0001101100101000	0,000060	75

Metóda M2 dosahuje v zmysle pravdepodobnosti blokovanie horšie výsledky v porovnaní s prenosnou metódou M1. Avšak, metóda M2 je podstatne jednoduchšia a rýchlejšie realizovateľná. Kompletnejšie porovnanie výsledkov je uvedené v prílohe dizertačnej práce.

4.4 Metódy zlepšenia optimalizačných algoritmov

Význam navrhnutých heuristických metód, ktoré zlepšujú optimalizačné algoritmy, je v urýchlení a zjednodušení procesu určenia optimálnej polohy. Treba si však uvedomiť, že tieto heuristické návrhy

môžu viesť k tomu, že takto vyhľadaná optimálna poloha nebude rovnaká ako pri použití presného algoritmu. Ďalej si treba tiež uvedomiť, že jednotlivé heuristiky len zjednodušujú náročné OCP algoritmy. To znamená, že dané heuristiky sa vždy musia použiť v kombinácii s nejakým konkrétnym algoritmom pre určenie optimálnej polohy.

Jednotlivé heuristické metódy sú označované písmenom H a príslušným poradovým číslom.

H1: Náhrada siete s nerovnomernou prevádzkou ekvivalentnou sieťou s rovnomernou prevádzkou: Princíp heuristiky spočíva v tom, že optimálna poloha oveľa viac závisí od veľkosti segmentov ako od veľkosti záťaže na jednotlivých úsekoch prenosovej cesty.

Toto však platí len v prípade, že medzi záťažami na jednotlivých linkách nie je výrazný rozdiel (veľkosť jednotlivých záťaží na linkách je primerane úmerný, napr. pohybuje sa v rozmedzí $\rho_{\min}=0,3 \leq \rho \leq \rho_{\max}=0,5$). Potom ak nahradíme sieť s nerovnomernou záťažou ekvivalentnou sieťou (s rovnakou topológiou) s rovnomernou záťažou, určenie optimálnej polohy bude závisieť len od veľkosti segmentov.

V tejto súvislosti môžeme potom celú úlohu optimalizácie riešiť tromi spôsobmi:

- **H1a:** použitím presnej metódy M1, resp. heuristickej metódy M2. V tomto prípade pre výpočet pravdepodobnosti blokovania sa však obmedzíme len na vzťah 4.2. Týmto sa výpočet pravdepodobnosti v oboch prípadoch výrazne zjednoduší (porovnaj vzťahy 4.2 a 4.3).
- **H1b:** použitím ľubovoľnej inej metódy pre určenie optimálnej polohy (napr. jednej z prehľadu, ktorý je uvedený v kapitole 4.4.1 v dizertačnej práci),
- **H1c:** snahou optimalizovať veľkosť segmentov,
 - **H1c1:** aby počet segmentov bol čo najväčší,
 - **H1c2:** aby maximálny diameter jednotlivých segmentov bol čo najmenší,
 - **H1c3:** aby existoval čo najväčší počet úsekov s čo najmenším diameterom.

Súčasťou dizertačnej práce sú simulácie jednotlivých hore uvedených heuristických metód. Časť výsledkov týchto simulácií a jednotlivé porovnania sú v textovej časti dizertačnej práce. Ostatné výsledky a porovnania sú kvôli veľkému rozsahu súčasťou prílohy dizertačnej práce. V nasledovnej časti si pre názornosť uvedieme niektoré výsledky.

Implementácia a výsledky metódy H1a(M1)

V dizertačnej práci je daná metóda použitá pre 12 a 15 úsekovú prenosovú cestu. Tu si ukážeme pre názornosť len výsledky pre 15 úsekovú prenosovú cestu ($H=15, N=15$) s vektorom záťaže $\rho=[0,30, 0,45, 0,32, 0,36, 0,41, 0,32, 0,33, 0,44, 0,39, 0,43, 0,42, 0,31, 0,49, 0,49, 0,45]$ a s počtom vlnových dĺžok $W=10$.

V tabuľke 4.4 je uvedená optimálna poloha a príslušná pravdepodobnosť blokovania danej siete určená pomocou presnej metódy M1 a pomocou heuristickej metódy H1a v kombinácii s metódou M1, t.j. pomocou metódy H1a(M1).

Z tabuľky 4.4 môžeme pozorovať, že optimálna poloha určená pomocou oboch metód je v niektorých prípadoch rozdielna. Treba si všimnúť, že v tomto prípade je výraznejší rozdiel medzi záťažami na jednotlivých linkách.

V prílohe dizertačnej práce sú uvedené aj simulácie pre prípady, keď rozdiel medzi záťažou na jednotlivých linkách je výrazný.

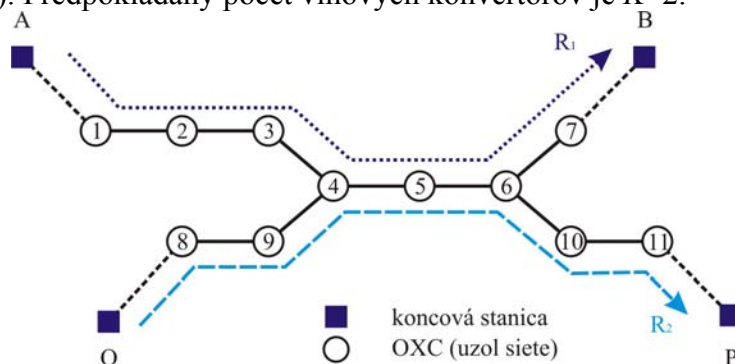
Tab. 4.4 Porovnanie metódy M1 a H1a(M1)

K	Metóda M1 $\rho=[0,30\ 0,45\ 0,32\ 0,36\ 0,41\ 0,32\ 0,33\ 0,44\ 0,39\ 0,43\ 0,42\ 0,31\ 0,49\ 0,49\ 0,45]$, $W=10$		Metóda H1a(M1) $\rho=\text{konst'., } W=10$			
	Optimálna poloha	P_b	Optimálna poloha	P_b	Por	Por1
1	000000010000000	0,9589387889	000000010000000	0,9589387889	1	0,00%
2	000001000010000	0,8235031400	000010000100000	0,8256740780	2	0,26%
3	000100010001000	0,5873008970	000100010010000	0,5873008970	2	0,00%
4	001000100100100	0,3816462368	001001001001000	0,3920129408	3	2,64%
5	001001001010100	0,2200985077	001001001010100	0,2200985077	1	0,00%

Implementácia a výsledky metódy H1c (H1c1, H1c2, H1c3)

V prípade heuristik H1c (H1c1, H1c2, H1c3) sa určenie optimálnej polohy uskutoční len na základe topológie siete a veľkosti jednotlivých segmentov, t.j. bez výpočtu pravdepodobnosti blokovania v danej sieti. Tým sa výrazne zjednoduší celá optimalizácia umiestnenia uzlov podporujúcich vlnovú konverziu.

Pre porozumenie danej problematiky je v dizertačnej práci uvedená implementácia týchto metód pre veľmi jednoduchú sieť pozostávajúcu z dvoch prenosových ciest R1 a R2, ktoré majú spoločné niektoré uzly (obr. 4.4). Predpokladaný počet vlnových konvertorov je $K=2$.



Obr. 4.4 Príklad siete – dve prenosové cesty

Ak počet uzlov podporujúcich vlnovú konverziu je $K=2$, potom na každej prenosovej ceste môžu vzniknúť max. 3 segmenty. Potom celkový maximálny počet segmentov pre obe prenosové cesty je 6. Z toho vyplýva, že podľa heuristiky H1c1 sú optimálnou polohou nasledovné tri možnosti: uzly 4, 5, uzly 4, 6 alebo uzly 5, 6. Podľa heuristiky H1c2 existuje 5 nasledovných optimálnych polôh: uzly 2, 5, uzly 3, 5, uzly 4, 5, uzly 4, 6 a uzly 4, 10. Podľa heuristiky H1c3 existuje len jedna optimálna poloha a to uzly 4, 6. Uvedené výsledky je ľahšie porozumieť z prehľadnej tabuľky s veľkosťami a počtami vzniknutých segmentov, ktorá je uvedená len v dizertačnej práci.

Porovnanie jednotlivých heuristik (H1c1, H1c2, H1c3) je možné pozorovať z nasledovnej tabuľky (tab. 4.5). V danej tabuľke je pre názornosť určená aj pravdepodobnosť blokovania (pre $\rho=0,5$, $W=10$) pre jednotlivé polohy umiestnenia uzlov podporujúcich vlnovú konverziu. Na základe určenej pravdepodobnosti blokovania môžeme pozorovať, že heuristika H1c3 určuje len jediné riešenie, a to optimálne (pravdepodobnosť blokovania je najmenšia). Ostatné heuristiky (H1c1, H1c2) berú do úvahy viacero možností. Z tabuľky je vidieť, že v našom prípade všetky heuristiky (H1c1, H1c2, H1c3) berú do úvahy optimálne riešenia.

Tab. 4.5 Porovnanie heuristik H1c1, H1c2, H1c3

Umiestnenie uzlov podporujúcich vlnovú konverziu	P_b	Algoritmus		
		H1c1	H1c2	H1c3
2, 5	0,381098		✓	
3, 5	0,308274		✓	
4, 5	0,305254	✓	✓	
4, 6	0,232429	✓	✓	✓
4, 10	0,381098		✓	
5, 6	0,415321	✓		

Treba si uvedomiť, že uvedené výsledky odpovedajú implementácii daných heuristik vo veľmi jednoduchej sieti. Rozsah dizertačnej práce neumožňoval implementovať dané heuristiky vo veľkých sieťach a detailne analyzovať výsledky. Spracovanie danej problematiky bude obsahom ďalšej vedeckej činnosti.

H2: Náhrada siete typu *No-Lim* sieťou typu *No-Full* - Optimalizácia siete typu *No-Lim*: Princíp danej metódy spočíva v tom, že ak nejaký uzol v sieti typu *No-Full* je vhodný pre umiestnenie vlnových konvertorov s plným rozsahom vlnovej konverzie (*Full*), tak potom tento istý uzol v ekvivalentnej sieti typu *No-Lim* (sieť s rovnakou topológiou, ale s uzlami podporujúcimi obmedzenú vlnovú konverziu) je tiež vhodný pre umiestnenie konvertorov s obmedzeným rozsahom vlnovej konverzie (*Lim*).

H3: Zanedbanie jedno-úsekových spojení: Princíp metódy spočíva v tom, že pokiaľ rozložíme danú sieť na jednotlivé prenosové cesty, nemá význam brať do úvahy jednoúsekové cesty. Pravdepodobnosť blokovania jednoúsekovej prenosovej cesty sa totiž nemení, ak počiatkový alebo koncový uzol podporuje vlnovú konverziu.

H4: Zanedbanie počiatkového a koncového uzla prenosovej cesty: Princíp metódy spočíva v tom, že pravdepodobnosť prenosovej cesty sa nemení, ak počiatkový alebo koncový uzol podporuje vlnovú konverziu. Preto pri výpočte pravdepodobnosti blokovania môžeme tieto možnosti zanedbať.

5 Prínos pre vedný odbor a telekomunikačnú prax

5.1 Vyhodnotenie a význam navrhnutého modelu

Navrhnutý model vo všeobecnosti vyjadruje vzťah medzi pravdepodobnosťou blokovania vo WDM sieťach v závislosti na takých parametroch ako je počet vlnových dĺžok W , počet vlákien F , počet úsekov prenosovej cesty H , zaťaženie ρ , či stupeň vlnovej konverzie k . Tento model nie je veľmi presný v porovnaní predovšetkým s inými štatistickými modelmi a simuláciami iných autorov. Daný analytický model má vo všeobecnosti tendenciu nadhodnocovať pravdepodobnosť blokovania. Na druhej strane, jeho najväčšou výhodou je jeho jednoduchosť a veľmi ľahká implementácia. Veľkou výhodou modelu je, že platí pre všetky typy sietí (jednovláknové a viacvláknové siete bez vlnovej konverzie, s obmedzenou a s plnou vlnovou konverziou), a teda je všeobecný. Tento model poskytuje zaujímavé výsledky, ktoré môžeme pokladať za všeobecne platné. Definovaním zisku a použitím navrhnutého všeobecného modelu dostávame opäť zaujímavé výsledky, ktoré sú prezentované v dizertačnej práci.

Vďaka navrhnutému modelu môže byť veľmi jednoducho určená pravdepodobnosť blokovania, ktorá môže slúžiť aj ako porovnávajúci parameter pre ekonomickú analýzu jednotlivých typov sietí. Na základe porovnávajúceho kvantitatívneho parametra a príslušných ekonomických nákladov súvisiacich s danou sieťou je potom možné jednoducho určiť či má praktický význam budovať sieť s danou konfiguráciou (napr. viacvláknovú sieť s plnou vlnovou konverziou). Taktiež je možné týmto spôsobom určiť či má význam meniť danú konfiguráciu siete (napr. či je vhodnejšie jednovláknovú sieť bez vlnovej konverzie prebudovať na jednovláknovú sieť s obmedzenou vlnovou konverziou, alebo na viacvláknovú sieť bez vlnovej konverzie a pod.). Jednoduchosť navrhnutého modelu umožňuje rýchle a predovšetkým jednoduché určenie daného parametra pre vzájomné porovnanie jednotlivých sietí, a tým aj dôkladnú analýzu z pohľadu nákladov na sieť.

Ďalšie uplatnenie daného modelu súvisí s optimalizáciou umiestnenia uzlov podporujúcich vlnovú konverziu v sieťach s riedkou vlnovou konverziou. Pravdepodobnosť blokovania určená pomocou všeobecného modelu môže slúžiť ako porovnávajúci parameter. Jednoduchosť navrhnutého modelu umožňuje opäť pomerne rýchlu analýzu danej siete.

5.2 Vyhodnotenie a význam navrhnutých optimalizačných metód

Použitie navrhnutého modelu pri riešení problematiky optimálneho umiestnenia uzlov podporujúcich vlnovú konverziu v sieťach s riedkou vlnovou konverziou typu *No-Full* vyústilo k návrhu dvoch heuristických OCP algoritmov: algoritmus M1 (OCP algoritmus s presným vyhľadávaním) a algoritmus M2 (OCP algoritmus s postupným vyhľadávaním). Oba algoritmy sú pomerne jednoduché a ľahko implementovateľné.

V prípade algoritmu M1 dochádza k preverovaniu všetkých možností umiestnenia K uzlov podporujúcich vlnovú konverziu. Algoritmus M2 určuje optimálnu polohu postupným pridávaním uzlov podporujúcich vlnovú konverziu. Preto celkový počet možností ako umiestniť uzly podporujúcich vlnovú konverziu podľa algoritmu M2 je podstatne menší ako v prípade algoritmu M1 a tiež nerastie tak dynamicky s počtom uzlov v danej sieti. Výpočtová náročnosť algoritmu M2 je teda podstatne menšia ako algoritmu M1. Avšak, algoritmus M2 je menej presný. Preto pravdepodobnosť blokovania prislúchajúca optimálnemu umiestneniu podľa algoritmu M2 je rovná alebo väčšia ako pravdepodobnosť blokovania prislúchajúca optimálnej polohe určenej pomocou algoritmu M1.

Oba navrhnuté algoritmy sú implementované pri hľadaní optimálneho umiestnenia uzlov podporujúcich vlnovú konverziu jednoduchej prenosovej cesty. V súvislosti s touto problematikou boli vykonané rôzne simulácie a ich výsledky sú uvedené nie len v textovej časti dizertačnej práce, ale aj v jej elektronickej prílohe. Implementácia daných algoritmov pre zložitejšie siete je mimo rozsahu tejto práce.

Z pozorovania jednotlivých simulácií priamo vyplynulo niekoľko zlepšení navrhnutých OCP algoritmov, resp. niekoľko heuristických metód pre zlepšenie optimalizačných algoritmov (H1, H2, H3 a H4). Všetky spomenuté heuristické metódy sú platné vo všeobecnosti. Je ich teda možné implementovať aj pre iné ako navrhnuté algoritmy M1 a M2. Heuristická metóda H1c dáva návod ako optimalizovať polohu umiestnenia uzlov podporujúcich vlnovú konverziu iba na základe veľkosti segmentov, t.j. bez výpočtu pravdepodobnosti blokovania. Heuristická metóda H2 umožňuje jednoduché riešenie problematiky OCP v sieťach typu *No-Lim*, pre ktoré je pomerne ťažké určiť pravdepodobnosť blokovania. Heuristiky H3 a H4 vedú priamo k zjednodušeniu výpočtu pravdepodobnosti blokovania tým, že sa neberie do úvahy počiatočný a koncový uzol prenosovej siete, ako aj jedno-úsekové spojenia.

Pre ozrejmienie jednotlivých heuristických metód je v danej práci uvedených aj niekoľko praktických príkladov a rôzne simulácie sú aj súčasťou elektronickej prílohy tejto práce.

6 Záver

Progresívny teoretický a aplikovaný výskum v súčasnej dobre prebieha neoddeliteľne s potrebou praxe a napreduje „míľovými“ krokmi. Treba si uvedomiť, že v tomto ponímaní daná práca predstavuje len nepatrný krok smerom dopredu v danej oblasti.

Navrhnutý analytický model poskytuje veľmi zaujímavé výsledky. Hoci daný model nie je veľmi náročný, a preto aj veľmi presný, umožňuje matematicky popísať závislosť medzi pravdepodobnosťou blokovania a sieťovými parametrami ako je počet vlnových dĺžok, počet úsekov prenosovej cesty, počet vlákien, zaťaženie a stupeň vlnovej konverzie. Vďaka danému matematickému popisu závislosti pravdepodobnosti blokovania od spomenutých sieťových parametrov je možné lepšie chápať samotnej podstate WDM sietí. Všeobecnosť daného modelu umožňuje aplikovať jeden a ten istý model pre hodnotenie jednovláknových a viacvláknových sietí s ľubovoľným typom vlnovej konverzie (siete bez vlnovej konverzie, siete s obmedzenou, resp. s plnou vlnovou konverziou). Definovaním zisku vlnovej konverzie a použitím navrhnutého modelu je možné vzájomne porovnávať jednotlivé siete, ich výkon, a tak určiť ich efektívnosť a vhodnosť ich použitia. Pri vyjadrení ekonomických nákladov a vďaka porovnaniu výkonu jednotlivých konfigurácií WDM siete je možné stanoviť jej vhodnú konfiguráciu pre praktické použitie.

Praktickou implementáciou daného modelu pri riešení problematiky optimálneho umiestnenia uzlov podporujúcich vlnovú konverziu je návrh dvoch heuristických OCP metód. Obe metódy sú matematicky nenáročné a ľahko aplikovateľné. Poskytujú jednoduchý nástroj pri riešení problematiky zvýšenia výkonnosti siete použitím uzlov podporujúcich vlnovú konverziu.

Vďaka realizovaným simuláciám bolo možné odvodiť niekoľko heuristických metód, ktoré slúžia pre zjednodušenie OCP algoritmov. Predovšetkým zistenie, že optimálna poloha uzlov podporujúcich vlnovú konverziu je viac závislá od počtu úsekov prenosovej cesty ako od zaťaženia v uzle (v prípade neextrémnych rozdielov jednotlivých záťaží), viedlo k návrhu metódy, kde optimálna poloha nie je určovaná na základe hodnotenia pravdepodobnosti blokovania. Zaujímavý je aj návrh, kde optimálne umiestnenie uzlov podporujúcich vlnovú konverziu v sieti typu *No-Lim* je uskutočnené transformáciou tejto siete na sieť typu *No-Full*.

Z celkového pohľadu si dovoľím konštatovať, že daná práca dosahuje istý prínos tak v oblasti teoretického, ako aj v oblasti aplikovaného výskumu. Taktiež verím, že svojim obsahom daná práca spĺňa jej ciele a že dosahuje potrebné nároky.

Dizertačná práca odráža a reaguje aj na potreby súvisiace s riešením projektov na Katedre telekomunikácií, ŽU v Žiline. Taktiež časť výsledkov bola úspešne publikovaná na domácich aj zahraničných konferenciách.

Rozsah dizertačnej práce neumožňuje podrobne uviesť a dostatočne špecifikovať celú danú problematiku. V súvislosti s postupným riešením danej problematiky prirodzene vznikali nové otázky, nápady a myšlienky, ktoré by som chcel rozvinúť v mojej ďalšej výskumnej činnosti. Z ekonomického hľadiska sa javia ako veľmi perspektívne predovšetkým siete s obmedzenou vlnovou konverziou. S poklesom výrobných nákladov optických vlákien budú pravdepodobne viacvláknové siete bez vlnovej konverzie favoritom v tejto oblasti. V budúcnosti by som sa chcel preto detailnejšie venovať práve tejto problematike.

Summary

Thanks to the latest technological advances of optical technology in recent years, optical networks based on wavelength-division multiplexing (WDM) technology are a very attractive solution to satisfy current bandwidth requirements of the Internet infrastructure. Moreover, they promise to provide a scalable solution to support bandwidth needs of future applications. Hybrid WDM/OTDM networks are hugely supposed to be implemented in future long-haul networks. Under the hard open business competition environment in these days, a certain quality of service provided to the customer is required for implementation of WDM networks in to the real network infrastructure. The great effort of network operators leads to optimise their networks and to achieve an optimal compromise between both economic costs of network technologies and quality of service. Hence, the interest in the dimensioning of WDM networks is still really up-to-date subject of the research.

The aim of this thesis is to study optical WDM networks in terms of the blocking probability. In theoretic research part of this thesis, the introduction to WDM optical networks is briefly given through the explanation of the main features, provisioning, advantages and performance analysis of WDM networks as well as next future is presented here. Routing and wavelength assignment (RWA) algorithms impact significantly on the performance of WDM networks and therefore the RWA problem is discussed there, as well. This part of thesis investigates the wavelength conversion in more detail and its impact on the blocking mechanisms. A limited wavelength conversion started to be more attractive thanks to a lot of possibilities, which are offered. Hence, the limited wavelength conversion is more deeply investigates in this part of the thesis. However, the main goal of this thesis is to propose a new analytical blocking probability model and evaluate WDM network architectures in terms of the blocking probability. The proposed model is designed to computer the blocking probability of both single-fiber and mutli-fiber WDM networks with no, limited or full wavelength conversion. It presents the blocking probability as a function of the number of wavelengths W , the number of hops H , the number of fibers F , the load ρ and the wavelength conversion degree k . Although the model is not very accurate due to the link and wavelength independence assumptions, it gives very interesting results, which are simulated and presented in the thesis (some results are presented in electronic appendix of the thesis). The most advantage of this model is its generality and simplicity. Thanks to this, the model is very easily applied to any kind of WDM network.

Due to the definition of the gain of wavelength conversion and due to the implementation of the proposed model, different WDM architectures can be compared and the best one could be used in real configuration. The blocking probability determined by proposed model also can be used for assignation of the quantitative parameter for an economic analysis. Taking into account the wavelength utilization and the blocking probability, the optimal network can be designed.

The purpose of the proposed model is not just to determine performance of WDM networks in term of the blocking probability but it can be implemented to solve an optical converter placement (OCP) problem in sparse limited wavelength conversion networks. The exact searching OCP algorithm and the step-by-step (successive) searching OCP are proposed. Due to the computing simplicity of the model, both the exact searching and step-by-step searching heuristic algorithms are not too complicated and they can be easily applied. Thanks to many performed simulation, a few new heuristic improving methods are proposed in order to simplify OCP algorithms. Mainly, the discovery of highly dependency of the blocking probability on the number of hops (not on the load) leads to the proposition of heuristic improving methods, which do not take into account the blocking probability.

Unfortunate, a lot of problems that arise during the research in line this work are outside the scope of the thesis. New problems related to the optimization of the performance of real networks are potentially a subject of next author research. The detail explanation of theoretic and physics principles behind the optical WDM transmission, wavelength conversion, routing and wavelength assignment is out of the scope of the thesis, as well. For a more detailed exposition of these problems, a lot of papers and books are referred.

This thesis is made behind the post-gradual study at the Department of Telecommunications, University of Žilina. Much of the thesis is based on research that has been supported by Science and Technology Assistance Agency under the contract APVT-20-022404, Technologies for all-optical processing for next generation digital optical networks, and by the project OV 41/2003 – S00095, The convergence of ICT networks and services in Slovak communication infrastructure.

Literatúra citovaná v autoreferáte

- [1] Murthy, C. S. R. Gurusamy, M.: WDM Optical Networks: concepts, design and algorithms, Book, Prentice Hall PTR 2002, New Jersey.
- [2] Rouskas, G. N., Perros, H. G.: "Networking 2002 Tutorials: A Tutorial on Optical Networks," Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2002, LNCS 2497, 2002, pp. 155-193.
- [3] Gumaste, A. , Antony, T.: DWDM Network Designs and Engineering Solutions, Cisco Press, December 2002.
- [4] Bahleda M., BystianskY M., Brídová I.: Optical WDM networks: trends, challenges and future, Proceedings of 6th International Conference Research in Telecommunication Technology RTT 2005, 12.-14. 9. 2005, Hradec nad Moravicí, Hotel Belaria, Czech Republic, pp. 5-10, ISBN: 80-248-0897-8
- [5] Bahleda, M., Bystrianský, M., Blunár, K.: The Blocking Probability Model in All-Optical Networks for Limited Wavelength Conversion, International Conference on Communication Systems and Networks, september 2005, Benidorm, Spain

Zoznam publikácií autora

- [1] Bahleda, M., Blunár, K.: "Optické WDM siete: trendy, výzvy, budúcnosť," časopis Telekomunikace, ročník XLIII, číslo 10/2006, ČVTSS Praha.
- [2] Bahleda, M., Bystriansky, M., Brídová, I.: "Optical WDM networks: trends, challenges and future," Proceedings of 6th International Conference Research in Telecommunication Technology RTT 2005, 12.-14. 9. 2005, Hradec nad Moravicí, Hotel Belaria, Czech Republic, pp. 5-10, ISBN: 80-248-0897-8.
- [3] Bahleda, M., Blunár, K., Brídová, I.: "The Blocking Probability Model in All-Optical Networks for Limited Wavelength Conversion," Proceedings of 6th International Conference Research in Telecommunication Technology RTT 2005, 12.-14. 9. 2005, Hradec nad Moravicí, Hotel Belaria, Czech Republic, pp. 1-4, ISBN: 80-248-0897-8.
- [4] Bahleda, M., Blunár, K., Bystriansky, M., Brídová, I.: "The blocking probability model in all-optical networks for limited wavelength conversion", Proceedings of the 28th International Conference, Telecommunications and Signal Processing TSP - 2005, 1.- 2. 10. 2005, Brno, Czech Republic.
- [5] Bahleda, M., Bystriansky, M., Blunár, K.: "The Blocking Probability Model in All-Optical Networks for Limited Wavelength Conversion," Proceedings of International Conference on Communication Systems and Networks, September 2005, Benidorm, Spain, ISBN: 0-88986-540-X (ISBN (CD): 0-88986-542-6).
- [6] Brídová, I., Bahleda, M.: "Analysis of Optical Access Networks," Zborník 6th European conference of young research and science workers in transport and telecommunication TRANSCOM 2005, 27. – 29. 6. 2005, ISBN 80-8070-415-5.
- [7] Bahleda, M., Blunár, K.: "The converter placement in WDM network," Zborník 6th European conference of young research and science workers in transport and telecommunication TRANSCOM 2005, 27. – 29. 6. 2005, p. 15-18, ISBN 80-8070-415-5.
- [8] Bahleda, M., Blunár, K., Brídová, I.: "Vplyv vlnovej konverzie na priepustnosť WDM sietí, časopis Telekomunikace," ročník XLII, číslo 1/2005, ČVTSS Praha, str. 13-17, ISSN 0040-2591.
- [9] Bahleda, M., Blunár, K.: "The wavelength conversion in WDM networks," Komunikácie, vedecké listy ŽU, ročník 6, číslo 4, EDIS, Žilina 2004, str. 98-102, ISSN 1335-4205.
- [10] Bahleda, M., Blunár, K.: "Blokovanie vo WDM sieťach (Barry-Humbleton model)," Zborník IEEE WORKSHOP usporiadaný študentskou sekciou IEEE pri VUT v Brne, 22. – 25. 9. 2004, str. 12-13, ISBN 80-214-2726-4.
- [11] Bahleda, M., Blunár, K.: "Vlnová konverzia vo WDM sieťach," Journal of AEEE, No. 1, Vol. 3/2004, str. 41-44, ISSN 1336-1376.
- [12] Bahleda, M., Blunár, K., Brídová, I.: "Vplyv vlnovej konverzie na priepustnosť WDM sietí," Zborník 5. medzinárodnej konferencie Elektro 2004 spolu s 5. medzinárodnou konferenciou New trends in diagnostic and repairs of electrical machines and equipments, Žilina 25-26. máj 2004, str. 48-51, ISBN 80-8070-252-7.
- [13] Bahleda, M.: "Vplyv vlnovej konverzie vo WDM sieťach na blokovanie," poster, 10. medzinrodná vedecká konferencia, COFAX 2004, Bratislava, str. 267-268.
- [14] Motková, I., Bahleda, M.: "Optical transmission and optical switching," Digital Communications, DK' 03, International Workshop, júl 2003, Žilina.
- [15] Grendár, D., Wieser, V., Dúha, J., Bahleda, M., Brída, P., Odrobiňák, R.: "Application of Positioning Systems In Intelligent Transport Systems," Zborník V. Medzinárodnej konferencie "Workshop For Candidates For A Doctor's Degree OWD "2003", Poľsko, 2003, str. 115-120.
- [16] Bahleda, M., Blunár, K.: "Just-in-Time Optical Burt Switching," Zborník 11. medzinárodnej vedeckej konferencie "Veda, vzdelávanie a spoločnosť", Žilina 17-19. septembra 2003, str. 11-14, ISBN 80-8070-120-2.
- [17] Bahleda, M.: "Klasické a nové metódy prepojovania optických zhlukov v optických sieťach WDM," AT&P Journal, ročník X, jún 2003, str. 80-82.