

**Obsah**

1.1	Prenos informácií pomocou svetla, základné fyzikálne princípy, vlnové dĺžky využívané v OKS;.....	2
1.2	typy vlnovodov, prenosové vlastnosti, vzájomná komparácia;.....	3
1.3	numerická apertúra NA, odvodenie vzťahu, fyzikálny význam;.....	4
1.4	tlmenie a disperzia, typy disperzií, fyzikálny význam a vplyv na prenos; .....	5
1.5	multiplex. techniky používané v OKS, zákl. blok. schémy, vzáj. porovnanie; .....	6
1.6	optické komponenty v sieťach WDM a ich špecifické vlastnosti;.....	8
1.7	systemy DWDM a CWDM, ich vlastnosti a vzájomné porovnanie;.....	10
1.8	diaľkové, metropolitné a prístupové siete WDM, ich topológie, parametre, vlastnosti a vzájomné porovnanie;....	11
1.9	pasívna optická sieť PON, jej koncept, architektúra, vlastnosti, typy a činnosť.....	15

## 1.1 Prenos informácií pomocou svetla, základné fyzikálne princípy, vlnové dĺžky využívané v OKS;

Prenos informácií vo voľnom priestore využíva na prenos viditeľnú oblasť svetla a spravidla aj dômyselný spôsob kódovania. Nie je vhodný pre telekomunikačné účely (rýchly a spoľahlivý diaľkový prenos) z nasledovných dôvodov:

- a) malý dosah - obmedzený priamou viditeľnosťou
- b) malá kapacita - vzájomné rušenie
- c) nemožnosť utajenia
- d) malá spoľahlivosť

Využíva sa doteraz vzhľadom na jednoduchosť a finančnú nenáročnosť, rýchle zriadenie a pohotovosť systému.

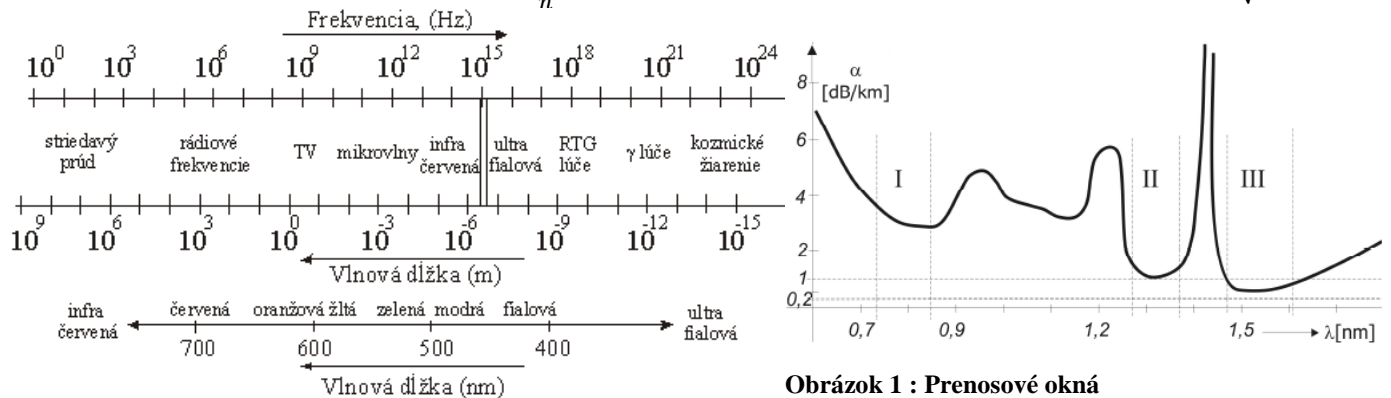
### Prenos v uzavretom priestore: VÝHODY

- a) **veľká prenosová kapacita** -Svetlo predstavuje vysokofrekvenčné EMP vlnového charakteru. Nositeľ energie - elektricky neutrálny fotón. Energia fotónu  $W = \varepsilon_{ph} = h \cdot f [eV]$ ,  $h$  -Planckova konšt.,  $f$  - frekvencia

$f = \frac{c}{\lambda}$ ,  $c = 2,9979 \cdot 10^8 [ms^{-1}]$  rýchlosť šírenia svetla vo vákuu,  $\lambda$  - vlnová dĺžka

Kinetická energia fotónu  $W = m_{ph} \cdot c^2$ ,  $m_{ph}$  -hmotnosť fotónu, De Broglieho vlnová dĺžka  $m_{ph} \cdot c^2 = h \cdot f \Rightarrow \lambda_0 = \frac{h}{m_{ph} \cdot c}$

Fázová rýchlosť šírenia svetla v prostredí  $v = \frac{c}{n}$ , index lomu/optická hustota prostredia  $n = \sqrt{\varepsilon_r \mu_r}$ ,  $c = 1/\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}$



Obrázok 1 : Prenosové okná

### Obrázok 2: Optické spektrum, Viditeľná oblasť optického spektra

Pre optoelektroniku sa využíva krátkovlnná oblasť infračerveného žiarenia t.j. oblasť okolo

$$\lambda = 0,8 \div 1,6 [mm], f = 400 \div 150 [THz]$$

V tejto oblasti ako sa využívajú v súčasnosti 3 okná, kde optovody ( $SiO_2$ ) vykazujú najmenšie tlmenie, zdroje žiarenia (LED, laser) majú dostatočný výkon a detektory (fotodiódy PIN, LFD) dostatočnú citlivosť.

Nosná frekvencia  $f$  je rádovo  $10^{14}$  Hz, šírka pásma v GHz je - vysoko úzkopásmová záležitosť  $\Delta f/f$

- b) **vysoká odolnosť proti rušeniu EMP a presluchom** -Nosič energie - fotón, elektricky neutrálny a imúnny voči cudziemu EMP. Vyrovňovanie potenciálov odpadá. Žiarenie je náhodný stochastický diskretný diskontinuálny proces.
- c) **utajenie prenášanej informácie**
- d) **malé skreslenie charakteristiky tlmenia** -Vo využívaných pásmach je odchýlka tlmenia od konštantnej hodnoty niekoľko desiatín dB, čo je v porovnaní s priebehmi na metalických vedeniach neporovnateľne menšie. Teplotná závislosť charakteristiky tlmenia je veľmi malá. A prenosové pásmo je väčšie.
- e) **väčšie vzdialenosti opakovacích úsekov** -Nepatrné tlmenie – vzdialenosti medzi opakovacími sú omnoho väčšie. Čo zvyšuje spoľahlivosť a znižuje náklady na údržbu.
- f) **úspora materiálu, malý objem a hmotnosť** -Nepatrné rozmery (rádovo mm) - jednoduchšia manipulácia, montáž, menej priestoru. Obrovská úspora deficitných materiálov (Cu, Al,Pb): koaxiál 50kg Cu/km, 8,2g  $SiO_2$ /km

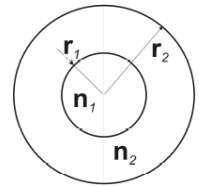
### NEVÝHODY:

- a) Nároky na technológiu výroby (čistota materiálu, presnosť vzhľadom na malé rozmery, ideálny homogénny valec kvôli disperzii), drahá prístrojová technika,
- b) spájanie vlákien (zváranie, lepenie), odbočovanie, väzobné členy, konektory, nadväzovanie zdrojov (modulátorov) a detektorov na vlákno, regenerácia, nároky na presnosť pri montáži

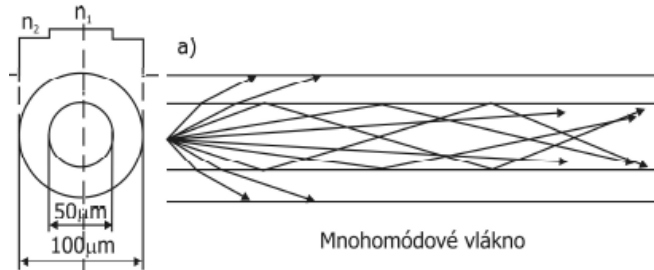
**1.2 typy vlnodov, prenosové vlastnosti, vzájomná komparácia;**

Optické vlákno je najčastejšie zložené z dielektrického valcového vlákna s indexom lomu  $n_1$  (tzv. jadro), na ktorom je koncentricky nanosená dielektrická vrstva s indexom lomu  $n_2$ . Tieto indexy lomu musia spĺňať podmienku  $n_1 > n_2$ , pričom ich pomer sa musí blížiť k jednotke.

**3 základné typy svetlodov:**

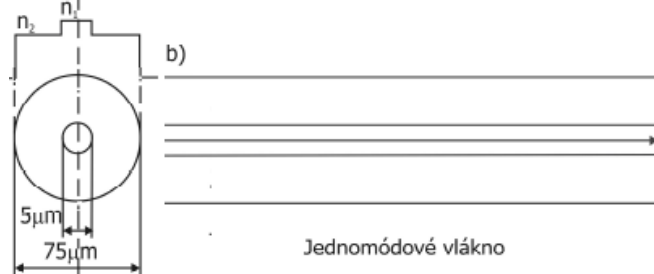


**a) mnohomódový s konštantným indexom lomu v radiálnom smere jadra**



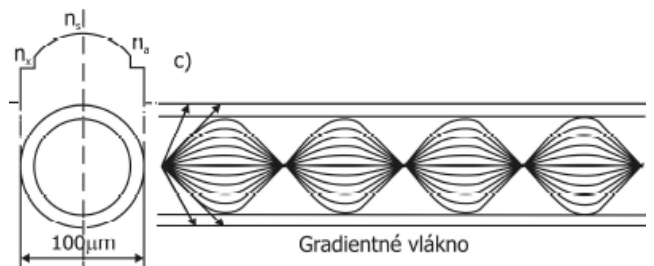
EM energia šíriaca sa svetlom je koncentrovaná do jadra, malá časť sa šíri plášťom, kde je tlmená. Rozloženie EMP v svetlodove je závislé od rozmerov vlákna  $r_1$  a  $r_2$  a pomeru indexu lomu  $n_1/n_2$ . V prípade, že priemer jadra  $2r_1$  je podstatne väčší ako dĺžka vlny budiaceho žiarenia, vytvára sa vo vlákne veľké množstvo módov EMP, ktoré sa šíria súčasne (mnohomódový prenos MM).

**b) jednomódový s konštantným indexom lomu v radiálnom smere jadra,**

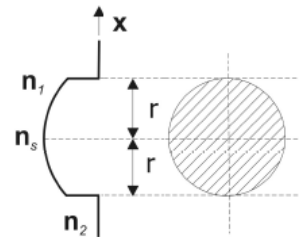


Pre prenos len jedného módu EMP, musí byť priemer jadra  $2r_1$  rádovo rovnaký ako je dĺžka vlny prenášaného EMP a hodnota pomeru indexu lomu jadra a plášťa  $n_1/n_2$  sa musí blížiť k jednotke (jednomódový prenos SM).

**c) mnohomódový gradientný s premenným indexom lomu v radiálnom smere jadra.**



Vlákno s jadrom, ktorého hodnota indexu lomu  $n_x$  sa znižuje od pozdĺžnej osi vlákna (od stredu) radiálnym smerom ku okraju jadra podľa vzťahu  $n_x = n_s \cdot [1 - k \cdot \Delta \cdot (x/r)^\xi]$ ,  $x$  - vzdialenosť od stredu jadra,  $r$  - polomer jadra,  $\xi$  - prirodzené číslo. Pribeh indexu lomu na gradientnom vlákne:  $n_2$  - index lomu pre  $x > r$  (plášť),  $n_s$  - index lomu pre  $x = 0$  (stred jadra),



$n_1$  - index lomu pre  $x = r$  (povrch jadra),  $k$  - určuje minimálnu hodnotu indexu lomu pre  $x = r$ .

Výhoda gradientného mnohomódového vlákna spočíva v podstatnom znížení šíriacich sa módov oproti mnohomódovému vláknu s konštantnou hodnotou indexu lomu v jadre, a tým v podstatnom znížení vplyvu rozdielných skupinových časov šírenia jednotlivých módov.

**Prenos energie optickým vláknom** - Šírenie optického žiarenia môžeme sledovať buď riešením vlnovej rovnice, alebo môžeme vychádzať zo zákonov klasickej fyzikálnej optiky.

**a) Opis použitím vlnovej teórie**

Pri riešení vychádzame z vlnových rovníc pre obe zložky EMP  $\vec{E}$  a  $\vec{H}$ . Ak použijeme cylindrické súradnice, bude  $x = r \cdot \cos \varphi$ ,  $y = r \cdot \sin \varphi$ ,  $z = z$ . Pozdĺžna os svetlodovu je totožná so súradnicovou osou  $z$ .

Vlnová rovnica elektrického poľa je  $\frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial \phi^2} + \chi^2 E_z = 0$ , obdobne pre MP (Hz namiesto  $E_z$ ).

Kde  $\chi = \sqrt{k_1^2 + \beta^2}$ . Tieto rovnice platia pre homogénne prostredie s konštantným indexom lomu. V našom prípade treba však rozlíšiť pole v jadre ( $r \leq r_1$  kde  $r_1$  je polomer jadra), ktoré musí nadobúdať reálne konečné hodnoty, a pole, ktoré sa vytvorí v plášti ( $r > r_1$ ). Intenzita poľa v plášti musí exponenciálne klesať so vzrastajúcim parametrom  $r$ , aby väčšina EM energie bola koncentrovaná v jadre. Pre  $z$ -tú zložku poľa hľadáme riešenie v tvare  $E_z = A \cdot F(r) \cdot e^{jv\phi}$ , kde  $v$  je celé číslo,

aby funkcia mala periódu  $2\pi$ . Dosadením dostaneme Besselovú rovnicu  $\frac{\partial^2 F}{\partial r^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial F}{\partial r} - (\chi^2 - \frac{v^2}{r^2})F = 0$ . Z riešenia rovnice vyplýva, že pozdĺžna fázová konštanta  $\beta$  a vlnové čísla  $k_1$  a  $k_2$  sú viazané vzťahmi  $u^2 = r_1^2(k_1^2 - \beta^2)$ ,  $v^2 = r_1^2(\beta^2 - k_2^2)$ , kde  $r_1$  - je polomer jadra,  $k_1 = \frac{\omega}{v_1} = \frac{2\pi}{\lambda_1} = \frac{\omega}{c} \cdot n_1$  je vlnové číslo jadra,  $k_2 = \frac{\omega}{v_2} = \frac{2\pi}{\lambda_2} = \frac{\omega}{c} \cdot n_2$  je vlnové číslo plášťa,  $k_0 = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda_0}$  je vlnové číslo vákuu. Relatívna fázová konštanta B jadrovej vlny je  $B = \frac{v^2}{v^2} = \frac{\beta^2 - k_2^2}{k_0^2(n_1^2 - n_2^2)}$

Normalizovaná frekvencia  $V = \sqrt{u^2 + v^2} = \frac{2\pi r_1}{\lambda_0} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = k_0 r_1 NA$

Parameter V charakterizuje vlastnosti vlnovodu. NA nazývame numerickou apertúrou optovodu.

Je zrejmé, že čím väčšia je NA vlnovodu, tým lepšia je účinnosť naviazania zdroja žiarivej energie do vlákna a tým menšie sú požiadavky na smerovosť vyžarovanej charakteristiky zdroja. Ale optovod s väčšou numerickou apertúrou má menšiu šírku kmitočtového pásma (čím väčšia NA, tým väčší počet šíriacich sa módov vo vlnovode - súvislosť uvedieme neskôr) v dôsledku väčšej medovej disperzie. Z riešenia Besselovej rovnice  $J_0(V) = 0$  vyplýva, že jej prvý koreň je číslo 2,405. Podmienka pre šírenie len jedného módu v optovode (pre ktorý platí  $n_1/n_2 \rightarrow 1$ ) je  $V < 2,405$

**b) Šírenie optického žiarenia pomocou geometrickej optiky**

Vychádzame z úvahy o úplnom odraze, ktorý je založený na lome lúčového zväzku od rozhrania dvoch prostredí, z ktorých prvé má vyšší index lomu  $n_1$  ako  $n_2$ . Na opis dráh lúčových zväzkov použijeme Snellov zákon lomu.

Pri vzniku úplného odrazu sú všetky lúče dopadajúce pod väčším uhlom odrazené úplne späť do prostredia, z ktorého dopadli. Podmienka pre medzný uhol, keď sa zväzok na rozhraní jadra a plášťa úplne odrazí, podľa  $\sin h = n_1/n_2$

Podmienku pre najväčší možný vstupný uhol  $\Theta$ :  $\sin \theta = n_1 \cdot \cos h$

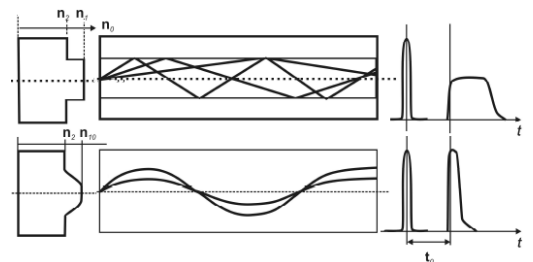
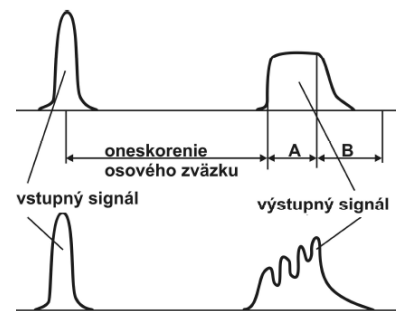
Z tejto podmienky vyplýva, že keď dopadne na vstup vlákna zväzok lúčov pod uhlom väčším ako  $\Theta$ , nastane v rovine dopadu A lom a časť energie lúča nenávratne unikne z vlákna. V prípade, že dopadajúce zväzky lúčov spĺňajú podmienku uhol dopadu  $\leq \Theta$ , dochádza na rozhraní medzi jadrom a plášťom k úplnému odrazu a lúče sa šíria vláknom.

**Časové oneskorenie signálu pri prenose optovodmi** - Lúčové zväzky šíriace sa vláknom pod rôznym uhlom prekonajú vo vlákne rôzne dlhé vzdialenosti, a preto zložky toho istého vstupného signálu prichádzajú s rôznym časovým oneskorením. Pre monochromatické zväzky môžeme odvodiť vzťah pre rozdiel vzdialeností „z“ silného lúčového zväzku vzhľadom na vzdialenosť „z“ osového zväzku  $l = z \cdot (n_1/n_2)$ . Rozdiel v dĺžke dráhy zväzku prechádzajúceho v osi a zväzku, ktorý dopadol na vstupnú plochu pod medzným uhlom  $\theta$ , môžeme vyjadriť vzťahom  $\Delta z = z \cdot (\Delta n_1/n_2)$  kde  $\ln \ll n_1 \ll n_2$ , z ktorého vyplýva pre časový rozdiel  $\Delta t$  príchodu oboch zväzkov na výstup vlákna  $\Delta t = (z/c) \cdot \Delta n_1 \cdot (n_1/n_2)$

Pri nemonochromatických lúčových zväzkoch vo viacmódových vláknach každý mód sa šíri inou osovou (axiálnou) skupinovou rýchlosťou, takže; signál realizovaný na vstupe vlákna jediným impulzom sa na výstupe skladá zo zložiek, ktoré prichádzajú s rôznym oneskorením oproti módu, ktorý by prešiel v osi vlákna bez odrazov, čím sa podstatne zväčší šírka impulzu.

Na obrázku je znázornené principiálne rozšírenie šírky impulzu. Je znázornený vstupný impulz po prechode napr. 4-módového vlákna. Na ďalšom obrázku je znázornený priebeh lúčových zväzkoch pri vláknach s konštantným indexom lomu a pri gradientných vláknach. Bodkou je označená vzdialenosť, akú za určitý čas  $t$  prejdú jednotlivé módy. Z obrázka je zrejmé, že osová rýchlosť gradientného vlákna podstatne menej kolíše ako vlákna s konštantným indexom lomu, v dôsledku čoho aj rozšírenie impulzu na výstupe, bude podstatne menšie.

V prípade signálu realizovaného radom impulzov môže dôjsť k takému veľkému skresleniu (rozšíreniu), že sa podstatne zníži spoľahlivosť prenosu. V takomto prípade by bolo treba príslušne znížiť rýchlosť prenosu.



**1.3 numerická apertúra NA, odvodenie vzťahu, fyzikálny význam;**

Numerická apertúra (NA) optického vlákna predstavuje sínus maximálneho uhla, pod ktorým je ešte možné zo vzduchu naviazať do vlákna lúč optického žiarenia tak, aby tento neunikol z jadra do plášťa, ale aby bol vedený pozdĺž osi vlákna.

Hraničný uhol:  $\sin h = n_2/n_1$  Index lomu:  $n = c/v$  Snellov zákon:  $n_x \cdot \sin \alpha_x = konst.$

$$NA = n_0 \cdot \sin \alpha_{max} = n_1 \cdot \sin(90^\circ - h) = n_1 \cdot \cos h = n_1 \cdot \sqrt{1 - \sin^2 h} = n_1 \cdot \sqrt{1 - (n_2/n_1)^2} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

**Fyzikálny význam:** NA udáva maximálny uhol otvorenia, pod ktorým sa šíria jadrové vlny po naviazaní na vlákno zo zdroja.

NA charakterizuje schopnosť vlákna preniesť prijímaný optický výkon (výkonnosť naviazania lúča na vlákno).

Čím vyššia NA, tým vyšší počet módov šíriacich sa v jadre, ale tým vyššia medzimódová disperzia.

Zdroj: čo najvyššia NA

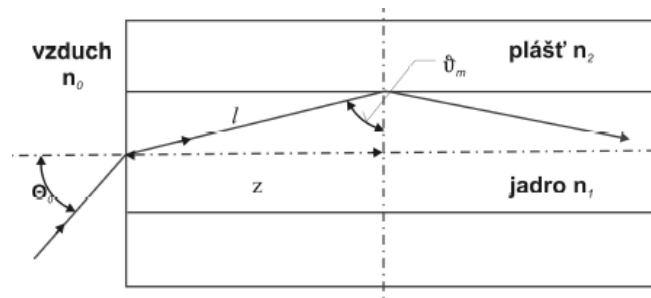
Kapacita: čo najmenšia NA

$n_0, n_1, n_2$  – index lomu vzduchu, jadra, plášťa

Zo známej NA je ďalej možné vypočítať Normovanú

frekvenciu a následne aj približný počet módov šíriacich sa

po vlákne.  $V = \pi \cdot NA \cdot 2a/\lambda$  a počet módov:  $N \approx \frac{V^2}{2} \cdot \frac{\xi}{\xi+2}$  Pre SI vlákno  $\xi \rightarrow \infty$  a pre GI vlákno  $\xi \rightarrow 2$ .



### 1.4 tlmenie a disperzia, typy disperzií, fyzikálny význam a vplyv na prenos;

#### TLMENIE – UTLMOVANIE VÝKONU

Koeficient tlmienia vlákna:  $\alpha = \alpha_s + \alpha_a + \alpha_b$  [dB/km]

Optický výkon:  $P_L = P_0 \cdot 10^{-\alpha \cdot L/10}$  [W] exponenciálne klesá so vzdialenosťou

Tlmenie vlákna vo vzdialenosti  $L$ :  $a = \alpha \cdot L = 10 \log(P_0/P_L)$

- Rozptyl** optického žiarenia predstavuje odchylenie od zamýšľaného smeru žiarenia do odlišných smerov. Existuje niekoľko druhov rozptylu v celom optickom spektre, jeden však nemožno odstrániť – Rayleighov rozptyl. Zapríčiňujú ho malé zmeny hustoty jadra. Vlastnosti Raleighovho rozptylu:

- Rozptyľuje sa na všetky smery rovnako
- Straty spôsobené týmto rozptylom sú nepriamoúmerné vlnovej dĺžke žiarenia  $\alpha_s = R/\lambda^4$

Raleighov rozptyl predstavuje bariéru tlmienia, ktoré nemožno prekonať. Udáva teda minimálne možné tlmenie vlákna.

- Absorpcia:** Pomocou mechanizmu absorpcie sa optické žiarenie zmení na tepelnú energiu, ktorá zahrieva vlákno.

- Pod  $\lambda = 1300nm$  sa objavuje **ultrafialová absorpcia** (jej príspevok je celkovým stratám vlákna je však zanedbateľný, t.j. menší ako Raleighho rozptyl)
- Pri  $\lambda > 1300nm$  sa začína uplatňovať **infračervená absorpcia**, ktorá je zvlášť významná pri  $\lambda = 1600nm$ . Zabraňuje prenosu žiarenia s väčšími vlnovými dĺžkami vláknom.
- Absorpcia  $OH^-$**  je spôsobená znečistením vodou a vodnými parami. V súčasnej modernej výrobe optických vlákien v prakticky sterilnom prostredí zostávajú jediným znečisťovateľom hydroxylové ióny, ktoré kmitajú a tým spotrebúvajú energiu žiarenia a spôsobujú straty. Hoci  $\lambda = 2730nm$  je už nad pásmom prenosu, vyššie harmonické kmitania (950, 1240 a 1380nm) zasahujú do aj do prenosového pásma vlnových dĺžok. 700-1600nm a pri vlnových dĺžkach spôsobujú nárast tlmienia vlákna už pri nízkych koncentráciách  $OH^-$ .

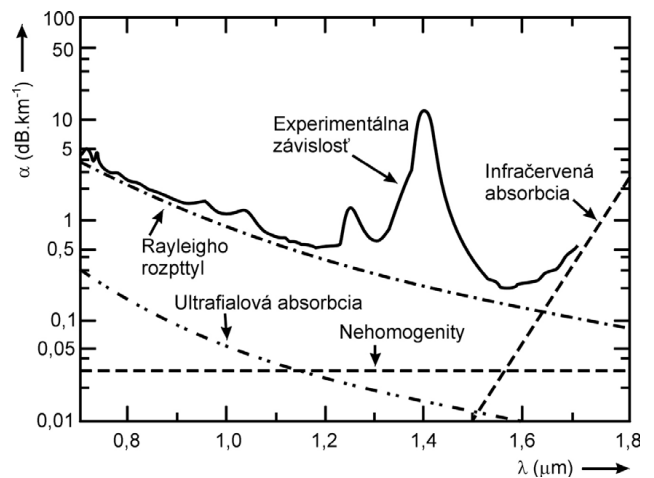
- Ohyb:**

- Mikroohyb je zapríčinený náhodnými ymenami od priamej menovitej polohy vlákna. Na rozdiel od MM vlákien, straty v SM vláknoch yavisia od vlnovej dĺžky – straty sa zvyšujú s narastajúcou  $\lambda$ .
- Makroohyb** je zakrivenie vlákna viditeľnéhoľným okom. V SM vlákne je vplyvom makroohybu základný mód čiastočne vyžiarený do plášťa. Pretože priemer módového poľa sa zväčšuje s vlnovou dĺžkou žiarenia, budú aj straty makroohybom prudko narastať s narastajúcou vlnovou dĺžkou optického žiarenia.

#### DISPERZIA – ROZŠIROVANIE IMPULZU

Disperzia je limitujúcim faktorom prenosovej rýchlosti. Čím je disperzia väčšia, tým menšia prenosová rýchlosť sa môže na prenos použiť. Na celkovú disperziu vlákna prispievajú 2 druhy fyzikálne odlišiteľných disperzií.

- Módová disperzia (intermódová, mnohomódová)**
- Chromatická disperzia (intramódová, spektrálna)** – rozdeľuje sa ďalej na materiálóvú, vlnovodóvú a profilóvú



$$D_{CH} = D_{MAT} + D_V + D_P \quad D = D_M + D_{CH} \quad \Delta t_{CH} = \Delta t_{MAT} + \Delta t_V + \Delta t_P \quad \Delta t^2 = \Delta t_M^2 + \Delta t_{CH}^2$$

**Módová disperzia**  $D_M = \Delta t_M / L$  [ns/km] – spôsobuje rozšírenie impulzu optického žiarenia vplyvom rozličných dráh módov šíriacich sa v MM vlákne. Pri teoretickom rozbere sa pritom predpokladá ideálny zdroj žiarenia, ktorý vysiela monochromatické žiarenie (jedna  $\lambda$ ). V prípade SM vlákna je módová disperzia nulová. Najväčší rozdiel dráh je medzi módom šíriacim sa pod kritickým uhlom  $h$  a osovým módom. Rozšírenie impulzu  $\Delta t_M$  predstavuje rozdiel maximálneho a minimálneho času šírenia sa módu:  $\Delta t_M = t_{max} - t_{min}$ ,  $\Delta t_M = L^m \cdot NA^2 / 2 \cdot n_1 \cdot c$ . Odvodený vzťah predstavuje teoretickú hranicu rozšírenia impulzu. Možno ju zaznamenať len na veľmi krátkych vzdialenostiach.

V GI vlákna je módová disperzia podstatne priaznivejšia ako v SI vlákna. Pri SI vlákne je rovnovážne rozloženie módov na relatívne krátkej vzdialenosti (môže byť kratšia ako 1km), rozšírenie impulzu bude úmerné  $L^{0.5}$ .

Pri GI vlákna sa rovnovážne rozloženie módov dosiahne vo väčšej vzdialenosti (cca 10km).

Ak je na trati viac spojok a konektorov, nastáva ustálený stav rozloženia módov skôr a rozšírenie impulzu sa zmenší.

$$m = \frac{1}{0,5} \quad L \ll \quad SI: L = 1km, GI: L = 10km$$

**Chromatická disperzia** – zapríčiňuje rozšírenie impulzu tým, že nijaký skutočný zdroj nevysiela len jednu  $\lambda$ , ale širšie či užšie spektrum  $\Delta\lambda$ . Disperzia SM vlákna je charakterizovaná len chromatickou disperziou v jednotkách [ns/(nm.km)] alebo častejšie ako v jednotkách [ps/(nm.km)].

Rýchlosť, ktorou sa impulzy optického žiarenia šíria pozdĺž vlákna, závisí od  $\lambda$ . Takto sa rôzne  $\lambda$ , ktoré obsahujú optický impulz, dostanú na koniec vlákna v rôznom čase napriek tomu, že sa môžu šíriť po rovnakej dráhe, ako v prípade SM.

Výsledkom je rozšírenie impulzu počas jeho šírenie vo vlákne. Príčina – chromatická disperzia. Jej zložky:

- Materiálová disperzia**  $D_{MAT} = (-1/L) \cdot (dt_s/d\lambda)$  [ps/(nm.km)] Základná zložka chromatickej disperzie. Je zapríčinená závislosťou  $n$  od  $\lambda$ . Praktické zdroje optického výkonu nevysielať monochromatické žiarenie, ale žiarenie s určitou spektrálnou šírkou  $\Delta\lambda$ . Jednotlivé dĺžky z  $\Delta\lambda$  sa šíria rozličnými rýchlosťami, čím sa zväčšuje šírka impulzov šírením po vlákne. Rozšírenie impulzov je úmerné  $\Delta\lambda$  (spektrálnej šírke impulzu).  
 $D_{MAT} = 0$  pre SiO<sub>2</sub> na  $\lambda = 1280nm$ . Pridaním prímiesi možno do určitej miery posúdiť nulovú disperziu smerom do vyšších vlnových dĺžok. Rozšírenie impulzu  $\Delta t_{MAT}$  vplyvom  $D_{MAT}$  je možné vyjadriť:  $\Delta t_{MAT} = D_{MAT} \cdot \Delta\lambda \cdot L$ . Záporná hodnota disperzie informuje, že sa nachádzame vľavo od nulovej disperzie. V tomto prípade zložky spektra s väčšou vlnovou dĺžkou sú rýchlejšie a predbiehajú zložky s nižšou vlnovou dĺžkou. Na výpočet rozšírenia impulzu sa použije absolútna hodnota disperzie.
- Vlnová disperzia**  $D_V$  je súčasť chromatickej disperzie. Priemer módového poľa narastá so zväčšujúcou sa  $\lambda$  ( $\uparrow \omega_0 \sim \uparrow \lambda$ ). Plášťom vlákna sa môže šíriť tým viac energie, čím je väčšia  $\lambda$ .  $D_V$  sa definuje na jednotku dĺžky. Typická hodnota  $D_V$  pre SM konvenčné vlákno pri  $\lambda = 1300nm$  je  $2ps/(nm.km)$ . Pretože sa hodnota  $D_V$  pripočítava k  $D_{MAT}$ , jej praktickým dôsledkom je posunutie bodu nulovej hodnoty chromatickej disperzie doprava na vyššiu vlnovú dĺžku. Posunúť bod nulovej chromatickej disperzie doľava nie je možné.
- Profilová disperzia**  $D_P$  - na rozdiel od vlnovodovej disperzie nie sú závislosti zmien  $n$  plášťa a jadra od  $\lambda$  rovnaké.

### 1.5 multiplex. techniky používané v OKS, zákl. blok. schémy, vzáj. porovnanie;

**Multiplex** - združovanie viacerých informačných signálov pre spoločný prenos cez jedno prenosové médium ,

- podľa fyzickej formy signálov v okamihu multiplexovania - elektrické, optické;
- podľa povahy prenášaných signálov - analógové, číslicové;
- podľa prenosovej šírky pásma prenášaných signálov - úzkopásmové, širokopásmové.

**SDM (Space Division Multiplexing)** - pre každý prenášaný signál je vyhradené samostatné prenosové médium – opt.vl.,

- najpriamočiarejšia alternatíva na zvýšenie prenosovej kapacity linky,
- vyžaduje nasadenie väčšieho množstva optických vlákien, ktoré nemusia byť na zvolenej trase inštalované,
- vyžaduje použitie samostatnej množiny aktívnych a/alebo pasívnych optických komponentov, ktorá musí byť nainštalovaná na každom použitom optickom vlákne,
- výrazne zvyšuje náklady na použité prenosové médium, hlavne pri diaľkových systémoch.

**TDM (Time Division Multiplexing)** - prístup a zdieľanie šírky pásma prenosového média v časovej oblasti,

- súčasný prenos rôznych signálov cez rovnaké optické vlákno tak, že niekoľko číslicových signálov je združených do jedného vysokorýchlostného číslicového združených číslicového signálu (až do 10 Gbit/s),

- obmedzenia sú dané jednak vlastnosťami samotného prenosového média, jednak rýchlosťami spracovania číslicového signálu, ktoré môžu byť dosiahnuté v elektronických obvodoch,
- časovodelené multiplexovanie v optickej oblasti OTDM (Optical Time Division Multiplexing).

**WDM (Wavelength Division Multiplexing)** - prístup a zdieľanie šírky pásma prenosového média vo vlnodĺžkovej oblasti,

- súčasný prenos rôznych signálov cez rovnaké optické vlákno na viacerých rozdielnych vlnových dĺžkach,
- oveľa väčšia šírka pásma pre účastníka, ale s vlastným vyhradenými optickými komponentmi,
- môžu byť prenášané viaceré rôzne formáty rámcov alebo protokoly, pričom každý prenášaný signál má pridelenú vlastnú nezávislú vlnovú dĺžku,
- minimalizuje potrebu inštalácie nových optických káblov do existujúcich OPS, znižuje počet nasadzovaných optických vlákien v nových OPS a poskytuje priestor na budúce rozširovanie optokomunikačných sietí.

**OFDM (Optical Frequency Division Multiplexing)**

- súčasný prenos rôznych signálov cez rovnaké optické vlákno na jednej vlnovej dĺžke tak, že sa každému prenášanému signálu priradí vlastná rádiová frekvencia,
- rozdielne frekvenčné signály sú elektricky multiplexované do signálu FDM, ktorý vygeneruje optický signál OFDM vysielaný do optického vlákna,
- poskytuje efektívny prostriedok na zhromažďovanie a združovanie nízkorychlostných elektrických signálov do vysokorychlostného optického transportného signálu,
- umožňuje na jednej vlnovej dĺžke kombinovať synchronne optické signály s asynchrónnymi typmi optických signálov, pretože všetky sú nezávisle časované a doručované vlastnými riadiacimi informáciami.

**SCM (Subcarrier Multiplexing)**

- vyhradený elektrický podnosný kanál pre každého používateľa,
- zdieľanie optického kanála a príslušných optických komponentov, počet účastníkov a priradená šírka pásma pre účastníka sú určené RF elektronikou.

**OCDM (Optical Code Division Multiplexing)** - súčasný prenos rôznych signálov cez rovnaké optické vlákno využitím špecifického optického kódu na základe techniky CDMA (Code Division Multiple Access),

- každý dátový bit je rozdelený do  $n$  časových období, ktoré sa nazývajú čipy (chips) (ktoré chips),
- kódovacia postupnosť je vytvorená zmenou parametrov optického žiarenia buď v časovej oblasti,
- vo vlnodĺžkovej oblasti alebo v oboch oblastiach naraz (dvojmerné kódovanie 2D),
- bez ohľadu na oblasť, v kt. sa kódovacia postupnosť vytvára, dochádza k značnému rozšíreniu spektra dátového sig.
- pri vysielaní kódovacej postupnosti v časovej oblasti sa mení buď fáza (bipolárne) alebo výkon (pozitívne) opt. signálu,
- pri vysielaní kódovacej postupnosti vo vlnodĺžkovej oblasti je možné vybrať zo špecifickej množiny vlnových dĺžok,
- pri 2D kódovaní sa kombinuje výber vlnových dĺžok a časové rozšírenie.

Vlastnosť	Kapacita	Náklady	Obnova	Spoľahlivosť
SDM	Najlepšia	Najvyššie	Jednoduchá	Dobrá
TDM	Dobrá	Nízke	Ťažká	Najlepšia
WDM	Lepšia	Vyššie	Ľahká	Lepšia

**Porovnanie TDM a WDM**

- koncept TDM je určený na generovanie najrýchl. výsledného združeného číslicového sig., ktorý je ekonomicky možný,
- koncept WDM je určený pre generovanie optických signálov pri rôznej „farbe“ a ich vysielanie do rovnakého opt. vlákna,
- prístup TDM poskytuje spôsob zvýšenia bitových rýchlostí príslušných signálov na každom prenosovom kanále,
- prístup WDM poskytuje spôsob zvýšenia prenosovej kapacity na existujúcom optickom vlákne použitím zvýšeného počtu prenosových kanálov pri rozdielnych vlnových dĺžkach,
- dátový tok TDM môže byť vložený do systému WDM na ľubovoľnú použitú vlnovú dĺžku, čím sa vytvorí najväčšia prenosová kapacita.

**Výhodami WDM oproti TDM sú tieto vlastnosti:**

- systémy WDM majú pri nízkych prenosových rýchlostiach oveľa vyššie vzdialenostné limity,
- systémy WDM môžu v prípade potreby zvýšiť svoju prenosovú kapacitu modulárnym spôsobom pridaním ďalších vlnových dĺžok,
- systémy WDM môžu byť navrhnuté ako transparentné systémy, t.j. rozdielne vlnové dĺžky môžu prenášať signály s rôznymi prenosovými rýchlosťami a protokolovými rámcami,

d) systémy WDM môžu byť preferované pri komplikovanejších sieťach, hlavne pri využití funkcií sieťových optických komponentov, napr. OADM, OXC.

**Nevýhodami WDM oproti TDM sú tieto vlastnosti:**

- systémy WDM nie sú vhodné na rozvinutie v disperzne posunutých optických vláknach,
- systémy WDM vyžadujú špeciálne navrhnuté optické zosilňovače,
- systémy WDM vyžadujú samostatné zakončovacie zariadenia pre každý prenosový kanál (vlnovú dĺžku) vrátane nákladných optických vysielačov a prijímačov,
- transparentné systémy WDM ponúkajú menej možností monitorovania a manažmentu optokomunikačnej siete ako systémy TDM.

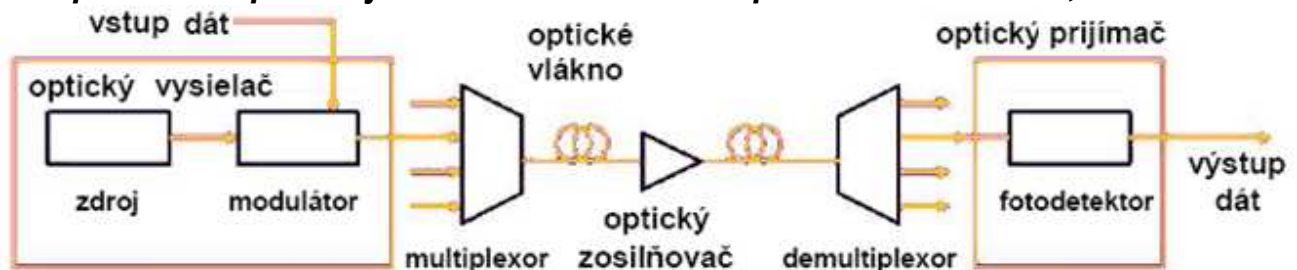
**Výhodami OCDM oproti TDM/WDM sú tieto vlastnosti:**

- systémy OCDM majú zjednodušený sieťový manažment a činnosť, nie sú potrebné mechanizmy riadenia kanálov pre vyhnutie sa kolíziám alebo pridelovania šírky pásma, nie je potrebná synchronizačná schéma a algoritmus plánovania proti prúdovej prevádzky,
- systémy OCDM podporujú väčší počet účastníkov ako systémy TDM alebo WDM,
- systémy OCDM ponúkajú rovnakú virtuálnu topológiu ako systémy WDM s použitím jednoduchšej sieťovej konfigurácie,
- prístupové systémy OCDM môžu byť prispôbené novým dodatočným účastníkom pri nižších nákladoch a zložitosti,
- systémy OCDM podobne ako systémy WDM sú plne transparentné na rozdiel od systémov TDM,
- systém OCDM ponúka celo-optickú granularitu, pretože môže vyhovieť veľkému počtu účastníkov s nízkymi požiadavkami na prenosovú šírku pásma v spoločnom optickom prenosovom médiu,
- systém OCDM predstavuje zabezpečenie signálov na optickej úrovni, zatiaľ čo systémy TDM a WDM vyžadujú šifrovanie na elektrickej úrovni.

**Nevýhodou OCDM oproti TDM/WDM je hlavne nasledujúca vlastnosť:**

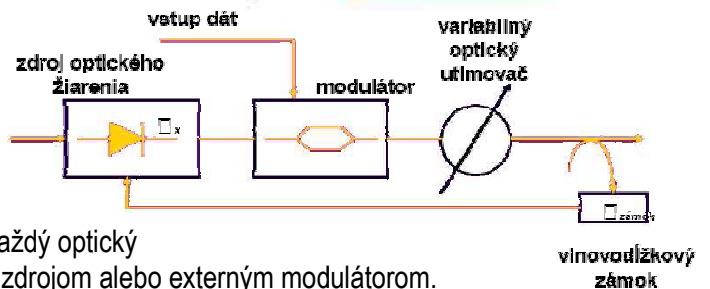
- ide o jednu z technológií s rozloženým spektrom, s tým súvisia aj značné finančné a technologické náklady potrebné na inštaláciu, vybavenie a prevádzku príslušných koncových zariadení.

## 1.6 optické komponenty v sieťach WDM a ich špecifické vlastnosti;



### OPTICKÝ VYSIELAČ (zdroj + modulátor)

- generuje optické signály pri viacerých vlnových dĺžkach,
- vo všeobecnosti sa využíva vysielač samostatne na každú vlnovú dĺžku, mohol by byť však použitý aj jeden širokopásmový vysielač s vhodnou optickou sústavou na poskytnutie všetkých vyžadovaných vlnových dĺžok,
- po vygenerovaní v zdroji optického žiarenia je následne každý optický signál samostatne modulovaný, buď priamo modulujúcim zdrojom alebo externým modulátorom.
- svetelný zdroj musí byť monochromatický (s jednou vlnovou dĺžkou), kompaktný, stabilný (konštantná výkonová úroveň a konštantná vlnová dĺžka generovaného toku optického žiarenia) s dlhou dobou životnosti (roky),
- svetelné zdroje sú klasifikované ako koherentné (fotóny sú vo fáze - lasery) a nekoherentné (fotóny sú náhodné a nesfázované – diódy LED),
- existujú dva typy laserov – polovodičové a vláknové
- svetelné zdroje sú klasifikované ako modulované (svetlo je kódované) a spojito-vlnové CW (Continuous Wave),
- na kontrolovateľné a časové ovplyvňovanie charakteristík optického žiarenia sú v externom optickom modulátore použité špecifické materiály.





## OPTOKOMUNIKAČNÉ SYSTÉMY A SIETE

Stránka 9 z 16

- Modulácia je proces vkladania dát do svetelného toku - priama, nepriama (externá). Vstupný komponent do siete WDM – optický vysielač - sa vytvorí integráciou svetelného zdroja a externého optického modulátora.

### OPTICKÉ VLÁKNO

- môže byť najviac limitujúcim komponentom z hľadiska kapacity systémov WDM, špeciálne v prípade, ak sa dosah optokomunikačného prenosového systému použitím optických zosilňovačov výrazne zvýši,
- obmedzenia dominantné v optickom vlákne narastajú priamoúmerne s dĺžkou optického vlákna, pričom medzi ne patrí predovšetkým tlmenie, disperzia a nelineárne optické efekty.
- typy optických vlákien v optických sieťach WDM:
  - a) štandardné jednomódové vlákna SSMF,
  - b) vlákna s nízkou špičkou hydroxylových iónov LWPF,
  - c) nenulové disperzne posunuté vlákna s pozitívnou disperziou NZDSF (jadro, plášť, 2.jadro, 2.plášť súosé)
  - d) negatívne disperzne posunuté vlákna NDSF,
  - e) disperziu kompenzujúce vlákna DCF.
- Optické vlákno BIF (Bend-Insensitive Fiber)- odolné voči ohybom optického vlákna, určené predovšetkým pre aplikácie v architektúre FTTH (extra small core, upravená súososť, vzduchová bublina okolo jadra, ...)

### Chromatická disperzia CD

- nelineárny jav - štvorvlnové zmiešavanie FWM, vplyv nelineárneho javu FWM môže byť najvyšší blízko nulovej hodnoty CD; vyššia hodnota CD znižuje vplyv nelineárneho javu FWM z dôvodu väčšej zmeny rýchlosti šírenia sa,
- v podstate zmena rýchlosti šírenia sa optického žiarenia v závislosti od vlnovej dĺžky,

### Polarizačná módová disperzia PMD

- každý polarizačný mód má rozdielny index lomu, ktorý môže zapríčiniť rozdielne rýchlosti šírenia sa optického žiarenia v optickom vlákne.

### Kompenzácia disperzie (CD, PMD):

- disperziu kompenzujúce vlákna DCF
- disperziu kompenzujúce moduly DCM
- duobinárna modulácia
- elektronická disperzná kompenzácia EDC (v prijímači - DFE, FFE, MLSE; vo vysielači)
- nenulové disperzne posunuté vlákna NZDSF

### OPTICKÝ MULTIPLEXOR

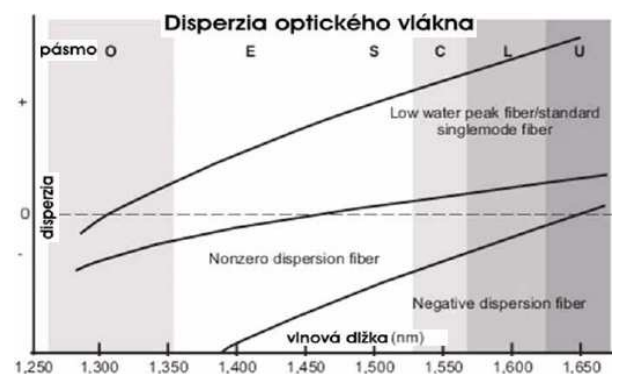
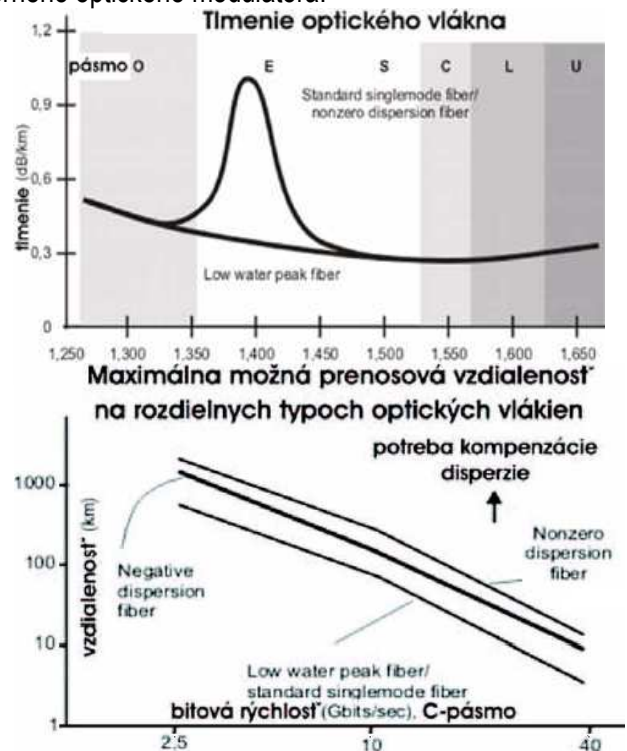
- kombinuje viaceré vlnové dĺžky vstupných optických signálov a doručuje ich do spoločného prenosového optického vlákna,
- zvyčajne má vlnovodízkovú selektívnu optiku.
- využívaný buď samostatne alebo vo väčších elementoch - vlnovodízkových smerovačoch (statické, dynamické) a optických add/drop multiplexoroch.

### OPTICKÝ DEMULTIPLEXOR

- prijíma tok optického žiarenia s viacerými vlnovými dĺžkami a rozdeľuje ich do priestorovo samostatných vlnovodízkových komponentov, t.j. každá vlnová dĺžka sa objaví na rozdielnom výstupe a získajú sa tak nezávislé výstupné optické signály.
- klasifikuje sa ako pasívny a aktívny (laditeľný detektor).

### OPTICKÝ ZOSILŇOVAČ

- kompenzuje straty optických signálov v optickom vlákne a optických komponentoch,



- mierami výkonnosti zosilňovačov sú operačná šírka pásma, výkonový zisk a jeho spektrálne vyrovnanie, výstupný výkon a šumový obraz.
- širokopásmový zosilňovací prístroj - optické zosilnenie nevyžaduje konverziu optických signálov na elektrické signály.

#### Polovodičový optický zosilňovač SOA

- vytvára ziskové prostredie cez populačnú inverziu elektrickým pumpovaním polovodičového materiálu (InGaAsP)
- je malý a môže byť ľahko integrovaný do optokomunikačných prenosových systémov,
- má veľkú operačnú šírku pásma, je citlivý na polarizáciu a vyžaduje vlákna zachovávajúce polarizáciu,
- poskytuje nízky pomer SNR a generuje významný kanálový presluch.

#### Erbium dopovaný vlákňový zosilňovač EDFA

- erbiové ióny v dopovanom optickom vlákne sú vybudené na vyššie energetické úrovne optickým pumpovaním pri vlnových dĺžkach 980 a 1480nm
- tieto vybudené ióny sa uvoľňujú na nižší metastabilný stav vyprodukovaním akustického fotónu alebo fotónovej emisie za rádovo niekoľko mikrosekúnd
- zosilnenie vzniká vtedy, keď sa excitovaný erbiový ión uvoľní späť do základného stavu po stimulovaní signálovým fotónom a vyprodukuje druhý, identický fotón pri vlnovej dĺžke 1550 nm,
- po spontánnom životnom čase rádovo ms sa voľne vybudené ióny uvoľňujú pričom pri tomto procese sa takisto uvoľňujú fotóny - vznik negatívneho javu ASE.
- najkritickejšie výkonnostné parametre sú zosilnený výstupný optický výkon pri vlnovej dĺžke 1550nm (dBm) a šumový obraz (dB) (výstupný výkonový zisk G je prvotne určený celkovým výkonom pumpového zdroja a vnútornými stratami optického zosilňovača, šumový obraz NF je definovaný ako pomer pomeru SNR na vstupe k pomeru SNR na výstupe optického zosilňovača)
- najsilnejší výkonový zisk je v pásme 1525 – 1570nm, ale prakticky je limitovaný centrálny rozsah do tzv. C pásma (1530 až 1565 nm),
- niekedy pracuje v pásme 1570 – 1605nm, ktoré tvorí časť tzv. L-pásma (1565 až 1625 nm).

#### Ramanov zosilňovač RA

- na zosilnenie optických signálov využíva stimulovaný Ramanov rozptyl SRS,
- pracuje v širokom spektre vlnových dĺžok pokrývajúce pásma S, C a L, vyžaduje však veľmi dlhé optické vlákna a vysokovýkonové pumpové laserové zdroje.

#### OPTICKÝ PRIJÍMAČ

- má citlivosť závislú od dátovej rýchlosti individuálnych prenosových kanálov a malú závislosť od celkovej optickej šírky pásma prenosového systému.
- v každom bode optickej siete, v ktorom je potrebná opticko-elektrická konverzia,
- kritickým parametrom optického prijímača je jeho rýchla odpoveď na dopad optických fotónov pri veľmi vysokých bitových rýchlostiach,
- polovodičové PIN a lavínové APD fotodiódy.
- príklady optickej funkcionality: (monitorovanie výkonnosti optických signálov; demultiplexovanie celého signálového pásma pre sledovanie, kanálového výkonu, centrálnej vlnovej dĺžky a optického pomeru SNR; integrovanie laditeľného optického filtra; integrovanie optického predzosilnenia a kompenzácie disperzie)



### 1.7 systémy DWDM a CWDM, ich vlastnosti a vzájomné porovnanie;

Počet združovaných kanálov pri multiplexovaní WDM je závislý od 3 kľúčových faktorov:

- rozmiestnenie prenosových kanálov,
- celková optická šírka pásma prenosového systému WDM systému WDM,
- modulacná šírka pásma individuálnych optických signálov.

Rozmiestnenie kanálov a typy systémov WDM

- staršie **BWDM** (Broadband WDM) - 2 používané vlnové dĺžky pracovali v dvoch rozdielnych prenosových oknách - v I. a II. prenosovom okne (pri vlnových dĺžkach 850 a 1300 nm) alebo v II. a III. prenosovom okne (pri vlnových dĺžkach 1300 a 1550 nm),

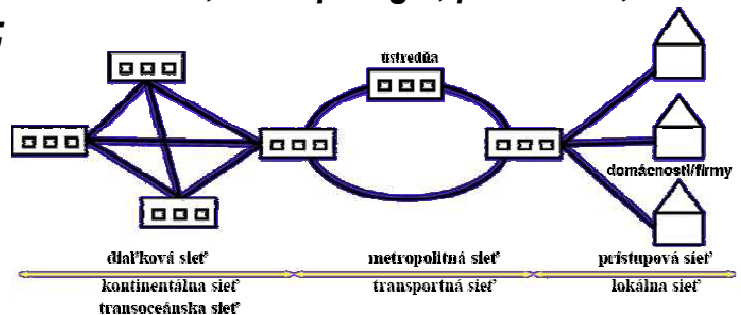
- novšie **WWDM** (Wide WDM) - viaceré vlnové dĺžky v jednom prenosovom okne, optické kanály mali zvyčajne oddelené niekoľko nm - 1275,7; 1300,2; 1324,7 a 1349,2 nm. V súčasnosti sa používajú v sieťach PON, ktoré na svoju činnosť môžu použiť 2 alebo 3 vlnové dĺžky - 1310 nm (O), 1490 nm (S) a 1550 nm (C),
- v súčasnosti najpoužívanejšie **DWDM** (Dense WDM) - kanálové rozmiestnenie zvyčajne nie viac ako niekoľko nm v použiteľnom pásme 1530 až 1625 nm prenosového okna optického vlákna, štandard ITU-T G.694.1: stredná frekvencia 193,10 THz (zodpovedajúca 1552,52 nm) s kanálovým rozmiestnením 50 GHz (alebo 0,39 nm),
- najnovšie systémy **CWDM** (Coarse WDM) - kanály rozšírené v pásme 1270 až 1610 nm s veľkým kanálovým rozmiestnením 20 nm. Systém CWDM je alternatíva k systému DWDM, optické vysielače CWDM používajú optické multiplexovanie na dosiahnutie ekvivalentných sériových dátových rýchlostí signálov.

Vlastnosť	DWDM	CWDM
Cieľ	maximalizovať prenosovú vzdialenosť bez el. regenerácie maximalizovať počet $\lambda$ na rozloženie nákladov	minimalizovať náklady na komponenty
Pásmo vlnových dĺžok	C 1530 až 1565 nm      L 1565 až 1625 nm	1270 až 1610 nm
Počet prenos. kanálov	vysoký	nízky, max. 18
Kanálové rozmiestnenie	až 0,2 nm pri 25 GHz	20 nm
Lasery	drahé, chladené	lacné, nechladené
Filtre	vysoké požiadavky	nízke požiadavky
Mux/demux	bez	lacné
Zosilňovače	áno	bez
Prenosové vzdialenosti	veľké	krátke a stredné
Siete WDM	diaľkové	metropolitné, prístupové
Multiplexovanie	- elektrické na dosiahnutie 1 výsledného toku rádovo Gbit/s	- optické na dosiahnutie viacerých sériových tokov rádovo Mbit/s

**1.8 diaľkové, metropolitné a prístupové siete WDM, ich topológie, parametre, vlastnosti a vzájomné porovnanie;**

Telekomunikačné siete:

- podnikové - LAN, MAN, WAN;
- verejné - prístupová, metropolitná (miestna ústredňová), diaľková (mediústredňová)



**Topológie sietí (sietové topológie)**

- fyzická - z pohľadu optickej fyzickej vrstvy, tj.: uzly v sieti = umiestnenie optického komponentu, linka v sieti = spojenie optickým vláknom.
- virtuálna - z pohľadu vyššej vrstvy, tj.: uzly v sieti = uzly vyššej vrstvy, linka v sieti = svetelná cesta, ktorá má byť zostavená medzi príslušnými sieťovými uzlami. => namapovať každé spojenie do (jedinečnej) svetelnej cesty, spracovať každú svetelnú cestu ako fyzickú linku.

Topológia	Bod-bod	Kruh
Prenosová vzdialenosť - krátka	SM/MM OV zopár vlnových dĺžok (16 až 40) nízke bitové rýchlosti (od 1,25 Gbit/s po 10 Gbit/s) na $\chi$	zopár km po obvode kruhu do 10 pasívnych OADM minimálny počet vlnových dĺžok 16 bitová rýchlosť až 10 Gbit/s na $\chi$ jeden dohľadací kanál
Prenosová vzdialenosť - dlhá	SM OV viac vlnových dĺžok (80 až 160) vysoké bitové rýchlosti (od 10 Gbit/s vyššie na $\chi$	až stovky km po obvode kruhu viac ako 32 aktívnych OADM minimálny počet vlnových dĺžok 32, maximálny Nx32 bitová rýchlosť až 10 Gbit/s na $\chi$ viac dohľadacích kanálov
Prenosová vzdialenosť - veľmi krátka	konverzia sériového dátového toku do paralelného bitová rýchlosť na OV k/N [Gbit/s]	

- topológia typu bod-bod, systémy DWDM,
- prepojenie dvoch vzdialených megalopolisov (kontinentálne) alebo kontinentov (transoceánske) a zaobchádzanie s obrovským množstvom súhrnnej prevádzky,
- rozdiel medzi podmorským a pozemným systémom je vo vonkajšom prostredí optických vlákien.
- dosah systému –predstavuje vzdialenosť medzi regenerátormi (prichádza ku konverzii O-E-O),
- rozpätie systému –predstavuje vzdialenosť medzi 2 susednými optickými zosilňovačmi.

**Ciele:**

- podporovať efektívne a spoľahlivo veľké množstvo optických prenosových kanálov (vlnových dĺžok) na jedno optické vlákno (80, 160, projektované až 1000),
- podporovať čo najvyššie prenosové rýchlosti na jeden optický prenosový kanál (10Gbit/s, 40Gbit/s, projektovaná až 160Gbit/s) a rôzne modulácie (nielen UP-NRZ(OOK), ale aj CS-RZ, duobinárna, DPSK, DQPSK),
- podporovať protokolovú transparentnosť pri prenose optických dátových signálov,
- prenášať prevádzku medzi koncovými bodmi svetelnej cesty na vzdialenosť viac ako 4000 km.
- LH–Long-Haul (1990) dosah = 5 -6 rozpätí ULH–ultra LH (1999) dosah = 15 -25rozpätí ELH–extra LH (2001) dosah = 80 -100rozpätí

Diaľkové siete WDM	LH (Long-Haul)	MH (Medium-Haul)	SH (Short-Haul)
Cieľ	spojiť dva vzdialené hlavné uzly (kontinentálne) alebo kontinenty (transoceánske) distribuovať obrovské množstvo súhrnnej prevádzky	nastaviť systémové požiadavky a určité návrhové parametre pre konkrétny obchodný model	
Maximálna prenosová vzdialenosť	viac ako 4000 km	od 1000 do 1500 km	menej ako 500 km
Charakteristické vlastnosti	veľké množstvo optických kanálov (vlnových dĺžok) na jedno optické vlákno (80, 160, projektované 1000)		rozšírený manažment vlnových dĺžok a prenosovej šírky pásma
Optické komponenty	minimálny počet optických zosilňovačov minimálny počet disperzných kompenzátorov		multiplexory OADM

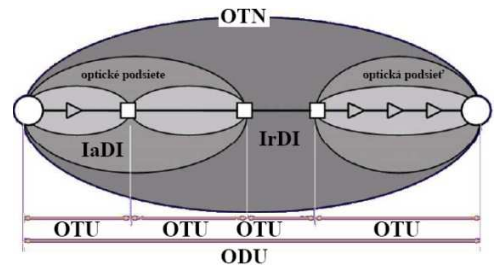
**METROPOLITNÉ SIETE WDM**

- metropolitné jadro, metropolitný prístup a podnikové segmenty,
- infraštruktúra musí byť
  - o škálovateľná (t.j. umožňuje rýchle a cenovo prijateľné rozšírenie siete),
  - o flexibilná (t.j. poskytuje prenosovú šírku pásma dynamicky podľa potrieb zákazníkov),
  - o rýchla (t.j. podporuje široký rozsah aplikácií prenosových rýchlostí od 2Mbit/s k 2,5Gbit/s a viac),
  - o transparentná (t.j. vyhovuje viacerým dátovým formátom a protokolom signálov –IP, ATM, Gigabit Ethernet, SONET/SDH).
- základné voľby –ATM, TDM a WDM,
- výhodou ATM a TDM je možnosť poskytovať viaceré služby na jednej platforme, nevýhodou limitovaná prenosová rýchlosť a škálovateľnosť, nepodpora Gigabit Ethernet a SDI,
- WDM má vysokú škálovateľnosť, umožňuje poskytovať prenosovú rýchlosť na vlnovú dĺžku od 50 Mbit/s až do 10 Gbit/s, má dostatočnú flexibilitu a do veľkej miery podporuje transparentnosť –prepínač ATM, smerovač IP, multiplexor SDH/SONET, prepínač Ethernet.
- pokročilá voľba –Fiber Channel,
- sériový protokol navrhnutý pre komunikáciu sietí SAN (Storage Area Network),
- koncept SAN integruje pamäťové a sieťové technológie (pamäťové zariadenia, server, prepojovacie zariadenia, komunikačná infraštruktúra),

- cieľom FCh je prenášať rozdielne typy prevádzky pre aplikácie, ktoré potrebujú prvotriedne schopnosti pamäťových a sieťových technológií –IP, SCSI, FICON, ESCON, HIPPI, FDDI, ATM.
- pokročilá voľba –Carrier Ethernet,
- technológia Ethernet cez siete MAN a WAN,
- pôvodná technológia Ethernet je súbor rámcovo - založených štandardov pre fyzickú a signalizačnú vrstvu siete LAN,
- služba Ethernet je rozhranie poskytovateľ - služba pre zákazníkov bez ohľadu na poskytovanú technológiu,
- základy CE–definované (už) Ethernet rozhranie UNI, spojenie EVC a definície služieb Ethernet; (ešte nie) službové OAM, rozhranie Ethernet NNI,
- posun od SONET/SDH k Ethernet over WDM.
- pokročilá voľba – Optical Transport Network,
- hierarchia OTH je nový štandard pre optické transportné siete, ktorý umožňuje mapovať existujúce voľby vďaka použitiu optického spracovania signálov, zároveň poskytuje efektívne metódy pre dohľad nad optickou cestou,
- sieť OTN definuje optické sieťové architektúry založené na optickom kanále prenášanom na špecifickej vlnovej dĺžke, na rozdiel od systémov DWDM je štruktúra signálu štandardizovaná.
- Metropolitné siete WDM 6/20

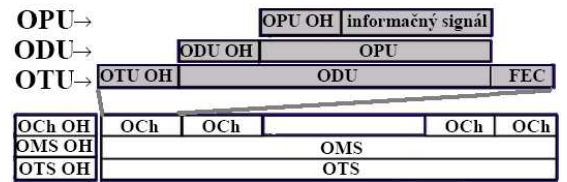
**Optická transportná hierarchia OTH**

- základ pre konvergovanú transportnú vrstvu siete NGN pre asynchrónne ( dátové) a synchrónne (TDM) služby,
- jej vlastnosti:
  - a) transparentnosť mapovania a multiplexovania prenášaných signálov,
  - b) zníženie prenosových a operačných nákladov, monitorovanie cesty medzi koncovými účastníkmi,
- definuje 2 triedy rozhraní –IrDIa IaDI.



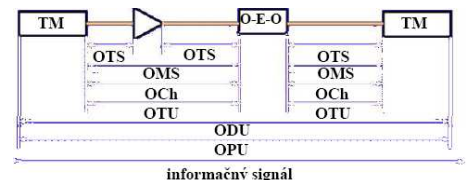
**Optická transportná sieť OTN**

architektúra zložená z 3 vrstiev – OCh, OMS, OTS – zakončených na optickej úrovni OTN, definuje 3 včlenené štruktúry – OPU, ODU, OTU – pre mapovanie užitočných signálov a ich príslušných riadiacich signálov pre prenos prostredníctvom optickej siete, vrátane multiplexovania.



**METROPOLITNÉ SIETE WDM**

- fyzická topológia je obvykle kruh,
- logická topológia môže byť bod-bod, hviezda, polygón alebo čisto kruh,
- topológia typu bod-bod je základná, pridaním optického komponentu OXC a/alebo včlenením optických komponentov OADM a DCSje možné vytvoriť ostatné topológie:
  - o prvý krok -vznik kruhových topológií,
  - o druhý krok -prepojenie viacerých takýchto kruhových infraštruktúr a vytvorenie väčšej, polygonálnej siete,
  - o tretí krok -možné pridanie nových sieťových vlastností.
- založené na statických kruhoch DWDM s uzlami OADM prepojených na siete PON cez OLT alebo na sekundárne kruhy CWDM alebo SDH vytvorené pre DSLAM alebo bezdrôtový prenos –2 vrstvy združovania,
- založené na kruhoch WDM s uzlami ROADM prepojených na siete WDM PON cez OLT –1 jednotná hybridná WDM/TDMA PON infraštruktúra.



**Porovnanie**

**Diaľkové siete WDM**

**Metropolitné siete WDM**

Distribúcia	bod-bod, OADM, bod-mnohobod	fyzicky kruh, OADM, logicky bod-bod a bod-mnohobod
Ochrana	1+1	voliteľný štvorkruh, dvojkruh
Transparentnosť služieb	áno	Áno
Služba na požiadanie	áno	Áno
Zdieľaná vlnová dĺžka	áno	nie
Samostatná vlnová dĺžka	áno	áno

**Metropolitné siete WDM**

**LM (Large Metro)**

**MM (Medium Metro)**

**SM (Small Metro)**

## OPTOKOMUNIKAČNÉ SYSTÉMY A SIETE

Stránka 14 z 16

Geografická oblasť	veľká, nad 1000 km po obvode kruhu	stredná, okolo 500 km po obvode kruhu	malá, do 100 km po obvode kruhu
Kruhovú topológiu	štvorvláknová (kvadrálna)	dvojvláknová (duálna)	jednovláknová
Počet vlnových dĺžok	40 až 80 (alebo viac) na optické vlákno	do 40 na optické vlákno	menej ako 40 na optické vlákno
Prenosová rýchlosť	10 Gbit/s a 40 Gbit/s na vlnovú dĺžku	od 2,5 Gbit/s do 10 Gbit/s na vlnovú dĺžku	do 2,5 Gbit/s na vlnovú dĺžku

### PRÍSTUPOVÉ SIETE WDM

- pôvodne dva základné typy služieb – klasická telefónna služba POTS cez telefónnu sieť a služba prenosu analógových videosignálov vysielaná cez káblovú sieť,
- služby môžu byť klasifikované na základe troch hlavných kritérií:
  - o požiadavka na prenosovú šírku pásma prenášaných signálov,
  - o či táto požiadavka je symetrická alebo asymetrická,
  - o či samotná služba je vysielacia alebo spojovaná.
- pre obnovu a rozšírenie infraštruktúry a pre podporu nových služieb:
  - o pevný metalický prístup (xDSL, HFC, PLC),
  - o bezdrôtový prístup (rádiový, mobilný, optický),
  - o satelitný prístup,
  - o pevný optický prístup FTTx,
- nová forma architektúry prístupovej siete.
- centrálny uzol HUB, vzdialené uzly RN, jednotky sieťového rozhrania NIU,
- napájacia (feeder) sieť, distribučná (distribution) sieť.
- distribučná sieť - vysielacia (broadcast) alebo spojovaná (switched),
- napájacia sieť - s vyhradenou (dedicated) alebo zdieľanou (shared) prenosovou šírkou pásma.

Napájacia sieť

Zdieľaná

Vyhradená

Distribučná sieť	Vysielacia	HFC, TPON	WPON
	Spojovaná	FTTC	Telefón, xDSL, WRPON

### Architektúra FTTx

- spoľahlivosť prenosového média (napájacia sieť),
- vymeniteľnosť prenosového média (distribučná sieť),
- dosiahnuteľnosť vzdialených komunít v porovnaní s konkurenčnými technológiami,
- flexibilita prenosovej šírky pásma signálov (Gbit/s),
- škálovateľnosť,
- implementovateľnosť s pasívnymi komponentmi,
- možnosť využiť rôzne typy WDM.
- typy:
  - o architektúra FTTD – ideálna architektúra (?!),
  - o architektúra FTTH/B – optické vlákno až do domu alebo budovy,
  - o architektúra FTTC – optické vlákno až k jednotke ONU, vzdialenosť je asi 200m od domov,
  - o architektúra FTTCab – optické vlákno až k jednotke ONU, vzdialenosť je okolo 1 km od domov,
  - o architektúra FTTEEx – optické vlákno až po miestnu ústredňu, v ktorej je umiestnená aj jednotka ONU, medzi ONU a NT sú distribuované elektrické informačné signály prostredníctvom rôznych prenosových médií – metalických vedení, energetických rozvodov alebo bezdrôtového spojenia.

### Porovnanie

	Diaľková sieť WDM	Metropolitná sieť WDM	Prístupová sieť WDM
Rozpätie	od 400 km do 4000 km	od 100 km do 1000 km	< 20 km
Topológia vlákna	bod-bod, polygonálna	polygonálna, kruhová	kruhová, lineárna
Typ vlákna	NDSF/SMF	NDSF/SMF	MMF/SMF
Hustota kanálov	veľmi vysoká > 160	Stredná 40 (?)	nízka, stredná

Granularita kanálov	50 nm	100 nm	200 až 400 nm
Kapacita systému	niekoľko Tbit/s	< Tbit/s	< 10 Gbit/s
Topológia prevádzky	lineárna, polygonálna	kruhová, hub	lineárna
Stratégia ochrany	1:1/1+1 (bod-bod)	vlákno/služba	služba
Škálovateľnosť	presmerovanie (polygón)	1F/2F/4F kruh	1:1/1+1
	do pren. rýchlosť/ $\lambda$	do pren. rýchlosť/ $\lambda$ (?)	pevná (?)
	na vlnovú dĺžku	na vlnovú dĺžku	na vlnovú dĺžku
Optické zosilnenie	OFA, RA	SOA	žiadne
Kompenzácia disperzie	CMD, PMD	žiadna	žiadna

## 1.9 pasívna optická sieť PON, jej koncept, architektúra, vlastnosti, typy a činnosť.

### PASÍVNA OPTICKÁ SIET' PON

#### koncept

- v podstate dvojcestný bod-mnohobod systém, ktorý obsahuje pasívne optické elementy v distribučnej časti prístupovej siete a aktívne optické elementy v koncových bodoch prístupovej siete,
- optické vysielacie a prijímače sú nainštalované iba vo vnútri budov, ostatné aktívne optické komponenty sa vo vonkajšom prostredí nepoužívajú,
- znižuje náklady na sieťové zariadenia a činnosti zabezpečujúce ich inštaláciu, operácie a údržbu.

#### optické terminály

- optický linkový terminál OLT -riadiaci prvok spolu s príslušným optickým vysielateľom a prijímačom, riadi celú pasívnu optickú prístupovú sieť a poskytuje rozhranie medzi prístupovou sieťou a metropolitnou sieťou,
- optické sieťové terminály ONT -rozhranie medzi prístupovou sieťou a koncovým účastníckym vybavením,
- v súčasnosti 1 OLT na max. 64ONT.

#### poprúdový prenos

- jednotka OLT zahŕňa optický laser vysielajúci poprúdový signál pri vlnovej dĺžke 1490nm,
- každá bunka alebo paket v poprúdovom signále nesie adresu svojho cieľového terminálu,
- každý terminál ONT reaguje iba na tie pakety, ktoré sú pre neho adresované,
- poprúdový dátový prenos tiež poskytuje časovacie signály potrebné na riadenie protiprúdového dátového prenosu,
- tretí vlnovodížkový kanál pri vlnovej dĺžke 1550nm je určený výhradne pre poprúdový prenos signálov videoslужieb.

#### protiprúdový prenos

- jednotky ONT musia mať optické vysielacie pri vlnovej dĺžke 1310 nm pre protiprúdové signály,
- potrebná je synchronizácia protiprúdového prenosu,
- pre pridelovanie rozdielnych časových slotov jednotlivým terminálom ONT používa protokol TDMA, avšak rozvíjajú sa algoritmy DBA,
- systém PON musí zmerať vzdialenosti OLT a ONT a zahrnúť vlastné oneskorenie optických signálov pri šírení sa na prenosovej ceste do programovania časových slotov pre ONT,
- max. prenosová vzdialenosť PON je 20 km.

#### vláknová architektúra

- zvyčajne jednomódové optické vlákna,
- rozmiestnenie a počet rozdeľovačov závisí na návrhu systému PON –1:8, 1:4 a 1:8 ...,
- jednóvláknový systém PON -znižuje náklady na optické vlákna, avšak je potrebné použiť optiku WDM na oboch koncoch tohto systému,
- duálnóvláknový systém PON -vyhýba sa zložitosti optiky WDM, jedno optické vlákno pre poprúdovú distribúciu analógových videosignálov, druhé optické vlákno venované pre digitálny prenos hlasových, dátových a digitálnych videosignálov s možnosťou použitia extra vlnovej dĺžky.

#### triedy PON:

- celóvláknová AFPON - najjednoduchšia architektúra PON používa samostatné optické vlákno pre každého koncového účastníka,
- telefónna TPON - poprúdová prevádzka je vysielaná optickým vysielateľom OLT k všetkým optickým prijímačom ONT cez pasívny výkonový rozdeľovač,

- vlnodĺžkovo multiplexovaná WPON - jednoduchý optický vysielač OLT sa nahrádza poľom vysielačov WDM alebo jedným laditeľným vysielačom,
- vlnodĺžkovo smerovaná WRPON - zavádza sa vlnodĺžkové smerovanie AWG, čím sa riešia problémy so stratami optického výkonu a podpora WDM.

Porovnanie	AFPON	TPON	WPON	WRPON
Zdieľanie optického vlákna	nie	áno	áno	áno
Rozdelenie optického výkonu	žiadne	1/N	1/N	žiadne
Bitová rýchlosť ONT	ONTmax	N x ONTmax	ONTmax	ONTmax
Synchronizácia uzla	nie	áno	áno	áno
Zdieľanie CO	nie	áno	nie	áno

#### prenosové technológie PON:

- sieť typu ATM PON (1990) - založená na štandarde FSAN, vyžaduje prenos informácií použitím buniek ATM s pevnou dĺžkou, je navrhnutá na zaobchádzanie s hlasovými, obrazovými a dátovými signálmi, je nevhodná na prenos prevádzky formátovanej podľa protokolu IP (proces časovo náročný, komplikovaný a neefektívny),
- širokopásmová BPON (1996),
- sieť typu Ethernet PON (2001) - dáta vysielať v paketoch s variabilnou dĺžkou podľa protokolu IEEE 802.3 pre Ethernet,
- gigabitová GPON (2003).

	APON	BPON	GPON	EPON
Protokol	ATM	ATM	ATM a GEM	Ethernet
Štandard	ITU-T G.983.1	ITU-T G.983.3	ITU-T G.984	IEEE 802.3ah
Maximálna vzdialenosť	20 km	20 km	10/20 km, logická 60 km	10/20 km
Rozdeľovací pomer	1:32	1:32	1:64 (reálne), 1:128 (úvahy)	1:16, 1:32
Ochranný čas			25,7 ns + 70,7 ns	512 ns + AGC + CDR

	GPON	EPON
Dátová rýchlosť –poprúdová	1,244 Gbit/s, 2,488 Gbit/s	1,25 Gbit/s
Dátová rýchlosť –protiprúdová	155/622 Mbit/s, 1,244/2,488 Gbit/s	1,25 Gbit/s
Priemerná účinnosť	=93 %	=55 %
Veľkosť rámca	GEM 5 + ≤1518 bytov	Ethernet 64 –1518 bytov
Riadiaca informácia pre algoritmy DBA	2 byte	GATE/REPORT 64 bytov

#### Budúcnosť PON

- možnosti ďalšieho vývoja a výskumu
  - o CuPON – metalické homogénne vedenia využívajúce technológie xDSL (prenos do 1km s rýchľ rádovo Gbit/s),
  - o RF PON – kombinácia optických vlákien a rádiového prenosu vhodná pre videoslужby,
  - o C PON – súčasná generácia PON (TDM-PON):
- požiadavky na rozšírenie šírka pásma (rýchlosť, vlnové dĺžky), na zväčšenie dosahu a počtu používateľov (optické zosilňovače, technika OCDM), na zmiešané služby poskytované viacerými poskytovateľmi služieb na zdieľanej prístupovej sieťovej infraštruktúre,
  - o C+1 PON – budúca generácia PON (oddelenie nových a existujúcich služieb):
- prekrytie služieb prostredníctvom techniky WDM, SCM, linkového kódu s tvarovaním spektra,
  - o C+2 PON – budúca generácia PON (nové architektúry a technológie s vyššou kapacitou):
- WDM-PON založená na laditeľných komponentoch, na rozdelení spektra, na blokovani injekcie, na centralizovaných svetelných zdrojoch.



## 1.1 OKSS EXTRA

Telekomunikačné siete: analógové, digitálne - asynchrónna, synchronna, optická.

Optické siete – evolúcia: módová disperzia, chromatická disperzia, úzkospektrálne laserové zdroje, vlnovodžkové multiplexovanie WDM.

1. generácia - siete, v ktorých je optické vlákno použité ako prenosové médium a v ktorých je všetko spojovanie a spracovanie signálov v sieťových uzloch vykonávané elektronicky (verejné siete SONET/SDH, počítačové prepojenia, ESCON, Fiber Channel, HIPPI, metropolitné siete FDDI, ATM, IP)
2. generácia - siete, v ktorých je smerovanie realizované v optickej oblasti (siete WDM a OTDM).

**Služby** - Akákoľvek sieť pozostáva z viacerých vrstiev pričom každá vrstva môže vykonávať rozdielne funkcie. Je potrebné vnímať 2G optické siete ako základnú optickú fyzickú vrstvu, ktorá môže ponúkať 3 základné typy služieb pre vyššie vrstvy.

**Transparentnosť** - Hlavná vlastnosť 2G optických sietí je, že poskytované prenosové služby môžu byť transparentné k aktuálnym dátam posielaným cez svetelnú cestu, t.j. optické dátové signály sú akceptované pri akejkoľvek bitovej rýchlosti a akomkoľvek formáte, môžu byť prenášané aj analógové optické dátové signály.

**Služba svetelnej cesty** - celá linková prenosová šírka pásma určená priradenou vlnovou dĺžkou je poskytovaná vyššej vrstve, zostavená alebo zrušená na základe požiadavky vyššej vrstvy (služba prepájania okruhov), alternatívne je možné poskytovať permanentné svetelné cesty (zostavené na čas, po ktorý sa sieť využíva).

**Služba virtuálneho okruhu** - prenosová šírka pásma ponúkaná vyššej vrstve môže byť menšia ako celá linková prenosová šírka pásma, združovanie virtuálnych okruhov buď na vlnovú dĺžku na linke WDM alebo na prenosové rýchlosti v prípade linky OTDM (služba prepájania okruhov), pevné alebo štatistické (služba prepájania paketov).

**Datagramová služba** - umožňuje prenášať krátke pakety alebo správy informácií medzi uzlami v sieti bez potreby riadiacej informácie na zostavenie explicitného spojenia.

**Transparentnosť** - Úroveň transparentnosti dosiahnuteľná v optickej sieti závisia od niekoľkých parametrov fyzickej vrstvy, ako je napr. prenosová šírka pásma a pomer signál-šum. Aktuálne požiadavky závisia od použitej modulačnej techniky, protokolového formátu a bitovej rýchlosti digitálneho signálu. Okrem toho, analógové signály vyžadujú oveľa vyššie pomery signál-šum ako digitálne signály. Najvyššia úroveň transparentnosti sa získa, ak dátový signál zostáva v optickej forme od svojho zdroja k svojmu cieľu. V niektorých prípadoch musí byť dátový signál v rámci prenosovej cesty regenerovaný.

### Regenerácia 3R

- regenerácia s obnovou časovania a tvarovania (3R) - v tomto prípade je časovací (taktovací) signál získaný z informačného signálu, ktorý je následne znovu synchronizovaný,
- v podstate nová kópia digitálneho signálu v každom regeneračnom kroku, čím umožňuje signálu prechádzať cez veľké množstvo regenerátorov,
- zároveň však eliminuje transparentnosť na bitové rýchlosti a protokolové formáty signálov,
- určitá obmedzená forma transparentnosti bitových rýchlostí je možná použitím programovateľných čipov na obnovu časovania, ktoré môžu pracovať s viacerými prenosovými rýchlosťami digitálnych signálov.

### Regenerácia 2R

- regenerácia bez obnovy časovania (2R) – ponúka transparentnosť bitových rýchlostí bez podporovania analógových dát alebo rozdielných protokolových formátov signálov,
- tento prístup však limituje počet možných regeneračných krokov, konkrétne pri vyšších prenosových rýchlostiach nad stovky Mbit/s,
- obmedzenie je dané jitterom, ktorý má schopnosť akumulácie pri každom regeneračnom kroku.

### Regenerácia 1R

- regenerácia bez obnovy časovania a tvarovania (1R) – je jednoducho prijatie signálu a jeho opätovné vyslanie bez obnovy časovania alebo tvarovania,
- táto forma regenerácie môže pracovať aj s analógovými dátami, ale jej výkonnosť je výrazne slabšia ako predchádzajúcich dvoch foriem regeneračných techník

### Architektúra B&S WDM - architektúra vysielania a výberu B&S

- rozdielne sieťové uzly vysielajú na rozdielných vlnových dĺžkach
- optický väzobný prvok kombinuje optické signály prichádzajúce zo všetkých uzlov a rozdeľuje ich na všetky výstupné porty,

- každý sieťový uzol využíva laditeľný optický filter
- použitie v sieťach LAN a MAN, aj v prístupových sieťach
- počet uzlov v sieti je limitovaný počtom prípustných vlnových dĺžok, ale aj úrovňou vysielaného optického výkonu,
- konektivita je poskytovaná väčšinou triviálnym spôsobom a žiadna smerovacia funkcia nie je implementovaná.

#### Architektúra WR WDM - architektúra vlnovodízkového smerovania WR

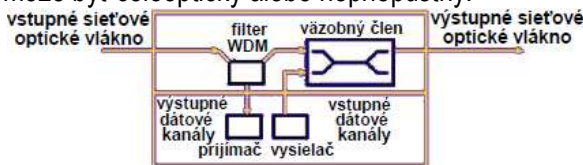
- signály prijaté z jedného uzla selektívne vysielajú do príslušnej časti siete na základe informácie prijatej zo zdrojového uzla, t.j. uzly sú schopné smerovať rozdielne vlnové dĺžky na vstupnom porte na rozdielne výstupné porty,
- kapacita jednej vlnovej dĺžky môže byť priestorovo znovu použitá, obmedzenie je platné len v prípade, že sieťové uzly nemajú schopnosť konvertovať vlnové dĺžky
- použitie v sieťach MAN a WAN, ale aj vo veľkých a stredných metropolitných sieťach,
- smerovanie a spojovanie optických signálov je založené na ich vlnových dĺžkach.

#### Architektúra B&S OTDM - architektúra vysielania a výberu B&S

- namiesto vlnových dĺžok majú rozdielne sieťové uzly priradené rozdielne časové okná pre vysielanie svojich dát,
- takéto siete sú charakteristické rovnakými vlastnosťami ako siete B&S WDM, ale môžu sa eventuálne stať vhodnými na rozvinutie v sieťach LAN

#### Architektúra OPS OTDM - optická paketovo-prepájaná sieť OPS

- mala by uskutočňovať všetky funkcie, ktoré sú vykonávané sieťami prepájania paketov v súčasnosti
- základom sú vysokorýchlostné optické paketové prepínače,
- v ideálnom prípade by mali byť všetky funkcie (prepínanie, konverzia) vykonávané v sieťovom uzle v optickej oblasti, ale v praxi sa určité funkcie vykonávajú v elektronickej oblasti,
- samotná hlavička môže byť posielaná pri nižších bitových rýchlostiach ako dáta, takže môže byť spracovaná elektronicky.
- uzol siete –pozostáva z dvoch častí: optického add/drop multiplexora OADM; k nemu pripojeného systému WDM, ktorý môže byť celooptický alebo nepriepustný.



#### Vlnovodízkovo multiplexovaná sieť WDM-PON

- varianty podľa kategórií: B&S vs. WR, zdieľaná vs. vyhradená, jednovláknová vs. duálnovláknová, jednostupňová optika vs. kaskádová optika, „farebná“ vs. „bezfarebná“ ONU, priama modulácia vs. podnosná modulácia, OOK vs. OOK/FSK modulácia pre „bezfarebnú“ ONU, nezosilňovaná vs. zosilňovaná, nechránená vs. chránená.

#### Hybridná sieť HPON - predstavuje nevyhnutnú budúcu prechodnú fázu od sietí TDM-PON k sieťam WDM-PON, vytvára medzistupeň medzi týmito sieťami, pre jej výskum a vývoj existujú 2 motivácie:

- vytvoriť novú sieť, ktorá by prekonávala možnosti siete TDM-PON, nie je to však plnohodnotná sieť WDM-PON, nie je príliš drahá a poskytuje dostatočnú kapacitu pre potreby účastníkov v dlhodobjšom horizonte,
- preklenúť prechod medzi sieťami PON s čo najmenšími nákladmi na prebudovanie siete, so spätnou kompatibilitou so staršou technikou TDM a zároveň s možnosťou použitia novej techniky WDM.

#### Optická dátová sieťová hierarchia ODNH - nová hierarchia sieťových architektúr zariadení

- zoskupenie dátovej prevádzky a jej smerovanie

Typ	Sieťové zariadenie	Sieťová architektúra
5	Optický dátový transportný uzol	Diaľková sieť WDM
4	Optický dátový jadrový uzol	Chrbticová sieť WDM
3	Optický dátový distribučný uzol	Metropolitná jadrová sieť WDM
2	Optický služobný linkový prístupový multiplexor	Metropolitná prístupová sieť WDM
1	Optický služobné linkové ukončenie	Prístupová sieť WDM (PON)

- metropolitné a prístupové zariadenia (typ 1, 2, 3) -multiplexovanie dát, zhromažďovanie dátových tokov pri centrálnych uzloch a poskytovanie prevádzkovej distribúcie a manažmentu prenosovej šírky pásma,
- jadrovézariadenia (typ 4, 5) -obnovenie a transport veľkého objemu prevádzky,

- vlnové pásmo -výrez optického spektra vlnových dĺžok, ktorý je nezávislý od dátového toku, podporuje prenos viacerých fyzicky združených rozdielnych optických signálov, avšak spracovávaných ako jedna spoločná jednotka.

## PASÍVNA OPTICKÁ SIET' PON – Pridelovanie šírky pásma

### optické terminály

- optický linkový terminál OLT -riadiaci prvok spolu spríslušným optickým vysielačom a prijímačom, riadi celú pasívnu optickú prístupovú sieť a poskytuje rozhranie medzi prístupovou sieťou a metropolitnou sieťou,
- optické sieťové terminály ONT -rozhranie medzi prístupovou sieťou a koncovým účastníckym vybavením,
- v súčasnosti 1 OLT na max. 64 ONT.

### protiprúdový prenos

- jednotky ONT musia mať optické vysielače pri vlnovej dĺžke 1310 nm pre protiprúdové signály,
- potrebná je synchronizácia protiprúdového prenosu,
- pre pridelovanie rozdielnych časových slotov jednotlivým terminálom ONT používa protokol TDMA, avšak rozvíjajú sa algoritmy DBA,
- systém PON musí zmerať vzdialenosti OLT a ONT a zahrnúť vlastné oneskorenie optických signálov pri šírení sa na prenosovej ceste do programovania časových slotov pre ONT,
- max. prenosová vzdialenosť PON je 20 km.

### Statické pridelovanie šírky pásma

**FBA –Fixed Bandwidth Allocation** -garantuje každému terminálu ONT pevnú dĺžku časového grantu vkaždom službovom cykle, pracuje s technikou TDMA, jednoduchá na implementáciu,

**LBA –Limited Bandwidth Allocation** - dĺžka časového grantu každého terminálu ONT je zhora ohraničená maximálnou dĺžkou časového grantu určenou systémovými parametrami,

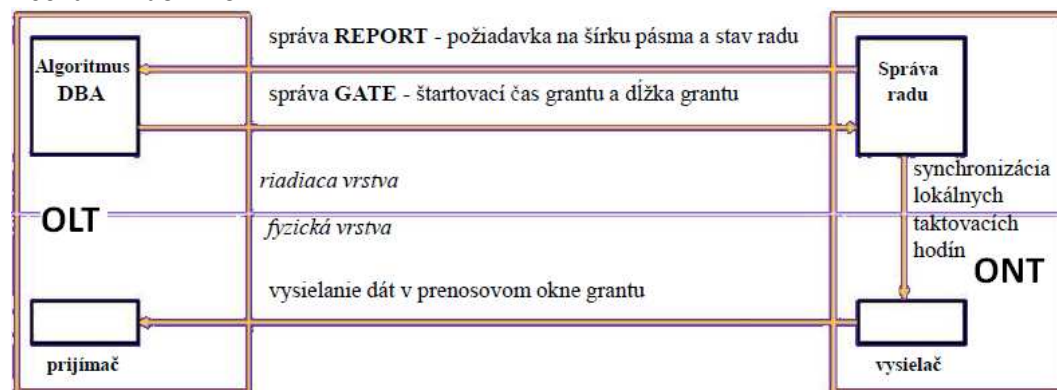
**CBA –Credit-based Bandwidth Allocation** - OLT pridáva kredit do pôvodnej požiadavky každého terminálu ONT a na základe ich vyhodnotenia je priradená dĺžka aktuálneho časového grantu, kredit môže byť konštantný alebo lineárny,

**EBR –Excessive Bandwidth Reallocation** - rozšírenie algoritmu LBA, ktoré využíva opätovnú distribúciu nevyužitej šírky pásma niektorého terminálu ONT medzi ostatné terminály ONT.

### Dynamické pridelovanie šírky pásma

- dátová prevádzka je značne rôznorodá, preto sú aj požiadavky účastníkov na poskytnutie príslušnej šírky pásma v čase veľmi premenlivé(prípadné použitie statického pridelovania šírky pásma je neefektívne),
- rozhodovací mechanizmus MPCP (Multi-Point Control Protocol) je zameraný na dynamické pridelovanie protiprúdovej šírky pásma, pričom nešpecifikuje žiadny algoritmus DBA.

### Mechanizmus MPCP



### Algoritmy DBA

- algoritmy pridelovania šírky pásma DBA (Dynamic Bandwidth Allocation) môžu byť použité pre výpočet a určenie bezkolízneho časového harmonogramu protiprúdového prenosu a pre vytvorenie správ REPORT/GATE,
- k požiadavkám používateľov je možné pristupovať nasledujúcimi spôsobmi:
  - stanoviť prioritné státie v rade,
  - stanoviť prioritné plánovanie,
  - prideliť šírku pásma podľa triedy.

### Vývoj algoritmov DBA

- prispôbenie sa fluktuácii prevádzky
  - o odhad množstva prevádzky prichádzajúcej medzi 2 následnými prenosovými grantami k terminálom ONT pomocou pomerného riadenia v metóde CTE IPACT a jednodkrovej predikcie v metóde DBA pre QoS,

- o sofistikované predikčné mechanizmy pre algoritmy DBA,
- poskytovanie parametrov QoS - vývoj mechanizmov QoS, ktoré poskytnú absolútne štatistické zaistenie QoS.

#### **Algoritmy DBA v sieťach WDM-PON**

- algoritmy DBA sú použité pre určenie bezkolízneho časového harmonogramu protiprúdového prenosu na rozdielnych vlnových dĺžkach používaných terminálmi ONT,
- k požiadavkám používateľov je možné pristupovať dvomi všeobecnými formami: plánovanie online, plánovanie offline.
- plánovanie online –stratégia NASC: – plánovanie protiprúdového prenosu pre konkrétny ONT na najskôr prístupnom vlnovodízkovom kanále spomedzi kanálov podporovaných terminálom ONT,
- plánovanie offline –interval ISCG: - –plánovanie protiprúdového prenosu až po prijatí požiadaviek všetkých ONT, čím jednotka OLT berie do úvahy požiadavky všetkých terminálov ONT naraz,

#### **Prideľovanie vlnových dĺžok WA**

- vlnové dĺžky môžu byť združené do skupín s cieľom získať rozmanité pásma vlnových dĺžok zdieľané v jednom optickom vlákne alebo prispôsobené vo viacerých optických vláknach,
- algoritmus WA umožňuje prideliť samostatnú vlnovú dĺžku pre každú skupinu požiadaviek na neprekrývajúce sa svetelné cesty,
- minimalizácia počtu skupín a maximalizácia počtu svetelných ciest v každej skupine,
- rovnaké pásma vlnových dĺžok môžu uľahčiť priemyselnú výrobu optických komponentov.

#### **Smerovanie vlnových dĺžok RWA**

- pre danú sieťovú topológiu a množinu požiadaviek na svetelné cesty je cieľom určiť cestu a vlnovú dĺžku pre každú požiadavku použitím minimálneho možného počtu vlnových dĺžok,
- dve dimenzie riešenia problému RWA: virtuálne linky v ľubovoľnom reprezentačnom grafe, pole reprezentačných grafov alebo vlnových dĺžok dostatočných pre splnenie požiadaviek.

#### **Dynamické prideľovanie vlnových dĺžok**

- významnou vlastnosťou v počiatočnej fáze implementácie sietí WDM-PON je protokolová transparentnosť, t.j. každý prenosový kanál pracuje nezávisle na ostatných,
- celková priepustnosť systému WDM-PON môže výrazne vzrásť, ak budú používané vlnové dĺžky zdieľané medzi viacerými terminálmi ONT,
- nové algoritmy dynamického prideľovania vlnových dĺžok a šírky pásma, ktoré pridelujú nielen časové intervaly, ale aj vlnové dĺžky pre každé spojenie medzi terminálmi OLT a ONT,
- algoritmy úzko súvisia s architektúrou siete WDM-PON.

#### **Virtualizácia šírky pásma**

- ponúka množstvo služieb (od pod- $\lambda$  k nad- $\lambda$ ) pre prenos cez spoločnú sieť WDM pri dátovej rýchlosti optimalizovanej s ohľadom na najnižšie sieťové náklady,
- elektrické spracovanie signálov je použité buď na multiplexovanie viacerých pod- $\lambda$  služieb na spoločnú vlnovú dĺžku alebo na spojenie šírky pásma viacerých  $\lambda$  pre podporu prenosu nad- $\lambda$  služby typu koniec-koniec,
- optimalizované využívanie linkovej kapacity systému WDM,
- integrovaný manažment šírky pásma,
- klientské rozhrania pre viaceré služby a protokoly,
- vysoko – integrované obvody PIC a mapovací protokol DVC.

#### **Siete 40G DWDM**

1997 –prvý prenos 40 Gbit/s

1998 –prvý prenos 40 Gbit/s DWDM

1999 –prenos 80 kanálov x 40G

2000 –prenos 176 kanálov x 40G

2004 –40G prenos na už inštalovanom 10G systéme na vzdialenosť 1700 km

#### **CHRBTCOVÉ SIETE WDM**

- topológia typu polygón,
- aplikácia ELH–kontinentálna sieť, kontinentálny most,
- inteligentné optické siete ION-relatívne malý počet sieťových uzlov s veľkou prenosovou šírkou pásma, každý sieťový uzol má veľmi veľké optické spojovacie zariadenie,
- v reálnej prevádzke vytvárajú diaľkové a chrbticové siete WDM hybridnú sieťovú topológiu-uzly s funkciou add/drop sú použité na distribúciu prevádzky, obnovenie služieb a zabezpečenie prevádzky v prípade poruchy.

#### **Chrbticové siete WDM**

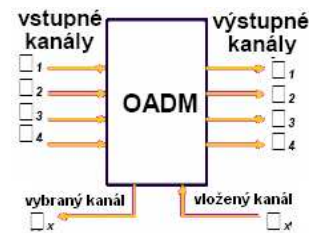
Cieľ	zhromažďovať obrovské množstvo súhrnnej prevádzky
Charakteristické vlastnosti	inteligentná optická sieť pozostávajúca z relatívne malého počtu uzlov s veľkou prenosovou šírkou pásma
Optické spojovacie zariadenia	viac ako 1000 x 1000vlnových dĺžok
Počet vlnových dĺžok	od 80 do 160(alebo viac) na optické vlákno
Prenosová rýchlosť	10Gbit/s alebo 40Gbit/s na vlnovú dĺžku

## VÄZOBNÝ PRVOK

- využívaný pri kombinovaní a rozdeľovaní optických signálov v optickej sieti, má recipročnú vlastnosť.

### OPTICKÝ ADD/DROP MULTIPLEXOR OADM

- vyčlení 1 alebo viac vlnových dĺžok z optického signálu a zvyčajne včlení na ich miesto 1 alebo viac vlnových dĺžok.
- jeho funkciou je vkladať vyberať vlnové dĺžky (prenosové kanály) do alebo z hlavného toku optického žiarenia,
- môže byť klasifikovaný ako s pevnou alebo s dynamicky vyberanou vlnovou dĺžkou
- Rekonfigurovateľný OADM - dynamická povaha optickej vrstvy, môže byť charakterizovaný ako
  - a) dvojstupňový – pridelovanie vlnových dĺžok medzi klientskym a sieťovým portom,
  - b) mnohostupňový - pridelovanie vlnových dĺžok medzi 4 a viac sieťovými portami (ľubovoľnými),
  - c) jadrový (core) - uzol s plnou funkčnosťou ako súčasť transportnej alebo metropolitnej siete
  - d) koncový (edge) - uzol s obmedzenou funkčnosťou na rozhraní jadrovej a prístupovej siete
  - e) bezfarebný - neobmedzené pridelovanie vlnových dĺžok k vláknovým portom.



### OPTICKÝ PREPÍNAČ OXC

- presmeruje individuálne vlnové dĺžky, zvyčajne medzi viaceré možné výstupy, optický alebo vlnovodítkový smerovač má podobnú funkciu.
- jeho funkciou je prepínať ľubovoľné vstupné vlnové dĺžky (prenosové kanály) s ľubovoľnými výstupnými vlnovými dĺžkami (prenosovými kanálmi),
- umožňuje uskutočňovať na rozdielnych úrovniach: vláknová FXC; vlnovodítková WSXC. WIXC
- cieľom je presunúť spracovania z elektronickej do optickej oblasti a združovať optické signály podľa vlnových dĺžok

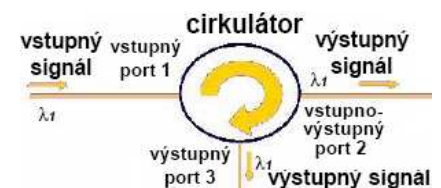
### OPTICKÝ VLNOVODÍTKOVÝ KONVERTOR OWC

- dokáže zmeniť pracovnú vlnovú dĺžku optického signálu na inú, čím umožní efektívnejšie využívanie sieťových prostriedkov.
- jeho funkciou je umožniť premiestňovanie rôznych vlnových dĺžok (prenosových kanálov), zvyšovať flexibilitu siete a účinnosť prenosovej šírky pásma optického vlákna
- prepínanie alebo smerovanie v určitom sieťovom uzle pri mnohých vlnových dĺžkach medzi mnohými bodmi,
- vstup do siete na určitej vlnovej dĺžke, ktorá nie je vhodná na použitie alebo sa v nej nevyužíva,
- zvýšenie efektívnosti využitia prípustných vlnových dĺžok v optickom vlákne z pohľadu sieťových liniek
- pri hraniciach medzi rozdielnymi optickými sieťami bez vzájomnej koordinácie pridelovania vlnových dĺžok
- základné spôsoby: optické bránenie, vlnové zmiešavanie.
- cieľom je vlnovodítková konverzia nezávislá od bitovej rýchlosti alebo formátu optického signálu, plne optická, s nízkym výkonom, bez degradácie optického výkonu signálu a s laditeľným výstupom.



### OPTICKÝ FILTER

- základný komponent pre najmenej 2 aplikácie: multiplexovanie/demultiplexovanie vlnových dĺžok; vyrovnávanie výkonových úrovní optických signálov,
- funkciou optických spektrálnych filtrov je rozpoznať úzke pásmo vyžadovanej optickej frekvencie v širokospektrálnom optickom toku a buď ho prepustiť alebo ho odmietnuť,



- využívajú sa efekty mnohocestnej interferencie a/alebo materiálovej disperzie, založené na interferencii alebo absorpcii optického žiarenia,
- optické filtre sa rozdeľujú na pevné a laditeľné, prípadne hybridné.

### IZOLÁTOR

- pasívny nerezipročný prvok, ktorého úlohou je umožniť prenos žiarenia v jednom smere, ale zároveň blokovat' prenos žiarenia v inom, opačnom smere.

### CIRKULÁTOR

- pasívny prvok, ktorý vedie optický signálový tok z portu na port iba v jednom smere a tým zabraňuje šíreniu sa toku optického žiarenia nežiaducim smerom,
- na rozdiel od izolátora má viac portov (3 alebo 4).

### VÝKONOVÝ UTLMOVAČ, OPTICKÝ VYROVNÁVAČ

- vznik spektrálneho zvlnenia

a) vlnové dĺžky optického žiarenia v jednom optickom vlákne generované jedným alebo viacerými optickými zdrojmi nemusia mať rovnakú úroveň optického výkonu,

b) ak sú do pôvodného optického signálu v jednom optickom vlákne vkladané nové vlnové dĺžky, ktoré pochádzajú z rozdielnych systémov či dokonca sietí, takisto majú rozdielne úrovne optického výkonu.

- význam spektrálneho vyrovnávania

a) zlepšuje systémový pomer SNR a teda zvyšuje výkonnosť optických zosilňovačov,

b) adaptívne riadi úroveň intenzity optického výkonu každého prenosového kanála pre korekciu ziskových/stratových nerovností v optických systémoch WDM.

### VÝKONOVÝ UTLMOVAČ

- optický komponent, ktorého hlavnou funkciou je vyrovnat' optický výkon signálov pri vstupe a/alebo výstupe optických zosilňovačov tak, aby výkonový rozdiel medzi signálmi bol minimálny a dynamický rozsah prijímača bol akceptovaný

### OPTICKÝ VYROVNÁVAČ

- optický komponent, ktorý vyrovnáva optické výkony signálov, monitoruje ich výkonové úrovne a selektívne vykonáva prispôbenie z hľadiska požiadaviek optického vlákna a/alebo optického prijímača.

### OPTICKO-ELEKTRICKÝ REGENERÁTOR

- regenerátor je monochromatický prístroj - regenerácia je viackroková technika elektronického zosilnenia úrovne optických signálov, pri ktorej je optický signál WDM konvertovaný na elektrický signál, v tejto forme je signál časovaný, tvarovaný a zosilnený (3R) a nakoniec je konvertovaný späť do optickej formy.

