

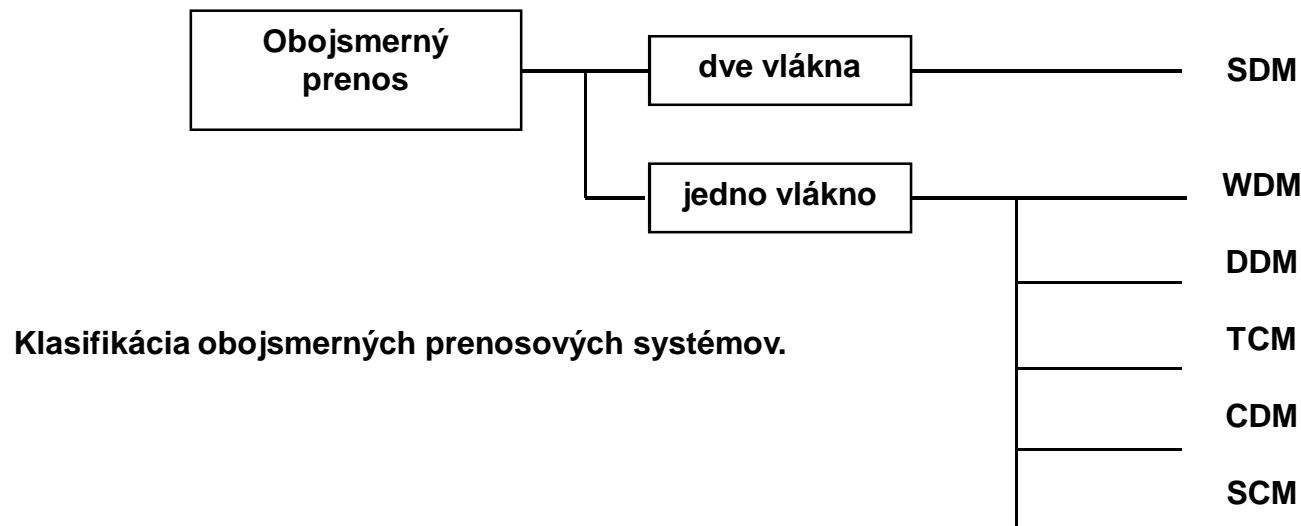
Optické komunikácie

Multiplexné metódy

Dr.h.c. Prof. RNDr. Ing. Ján Turán, DrSc., KEMT FEI TU Košice

OBOJSMERNÝ PRENOS

- 2 optické vlákna
- n **SDM** - Space Division Multiplexing (**Priestorový multiplex**)
- 1 optické vlákno
- n **WDM** - Wavelength Division Multiplexing
(Multiplex v oblasti vlnových dĺžok), (tiež. **Spektrálny multiplex**)
- n **DDM** - Directional Division Multiplexing (**Smerový multiplex**)
- n **TCM** - Time Compression Multiplexing (**Časový multiplex**)
- n **CDM** - Code Division Multiplexing (**Kódový multiplex**)
- n **SCM** - Subcarrier Multiplexing (**Multiplex subnosnej vlny**)



6.1 SYSTÉMY PRE OBOJSMERNÝ PRENOS

WDM - prenášané signály medzi užívateľmi sú nesené s rôznymi vlnovými dĺžkami. Tieto vlnové dĺžky signálov sa združujú a rozdzružujú v optickom vlákne pomocou zariadenia:

WDM – multiplexor, demultiplexor

V závislosti od počtu vlnových dĺžok v určitom prenosovom okne, delíme WDM systémy na:

1. **Bežný WDM (WDM)**
2-3 vlnové dĺžky z oblasti 0,85-1,55 μm
2. **Široký WDM (Wide WDM – WWDM)**
odstup kanálov 25 nm
3. **Riedky WDM (Coarse WDM – CWDM)**
odstup kanálov 20 nm
4. **Hustý WDM (Dense WDM – DWDM)**
odstup kanálov 1nm s vyhlídkou na 0,4 nm

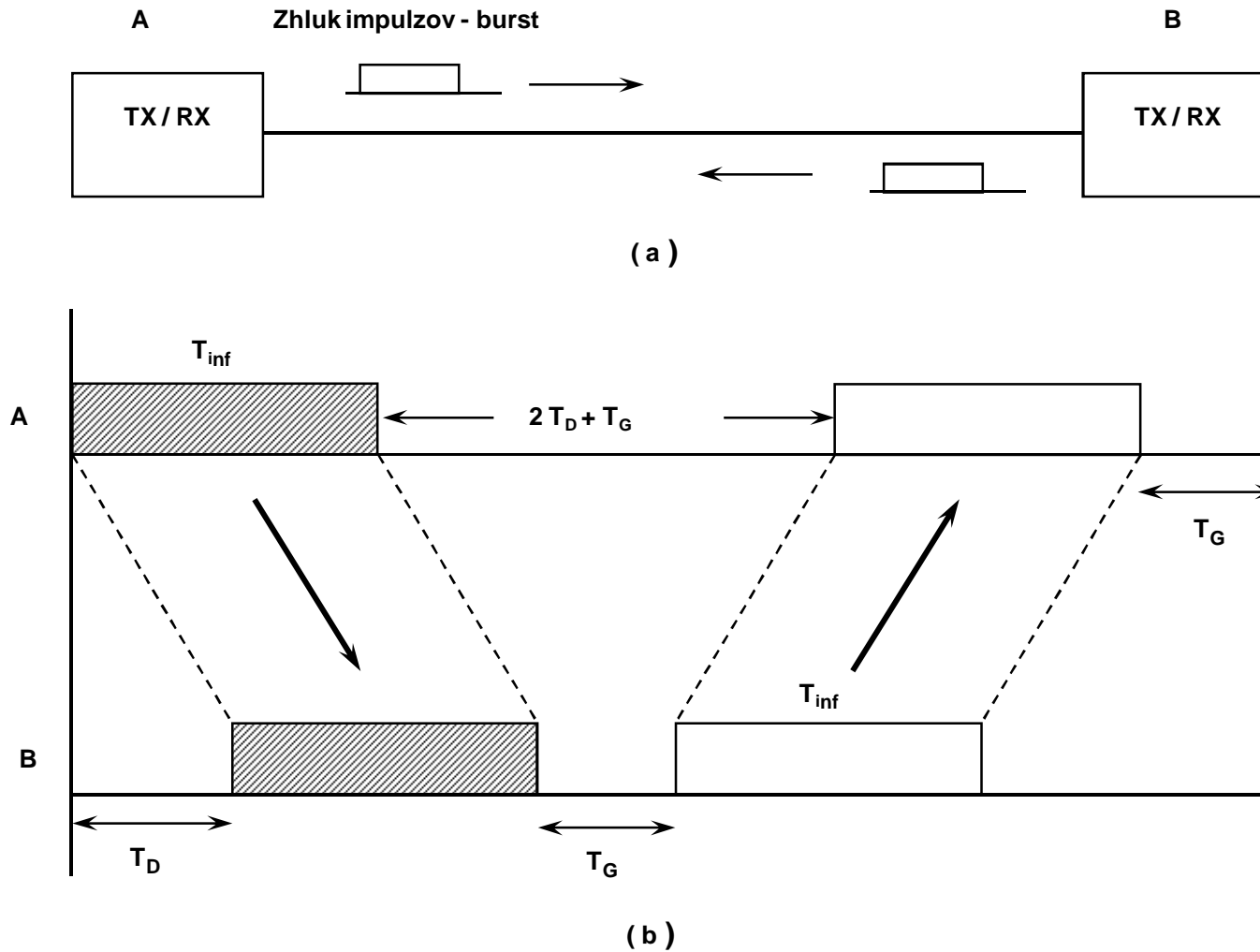
DDM - obe strany vysielajú signály s rovnakou vlnovou dĺžkou, ale vysielacie a prijímacie zariadenia sú rozdelené smerovo na dve komunikačné časti

Podobnú konštrukciu majú aj systémy TCM, CDM a SCM

TCM - dáta medzi užívateľmi sú prenášané v časových intervaloch, nie nepretržite.

Predpokladaná prenosová rýchlosť systému závisí od:

- q Vzdialenosti
- q Celkového času prenosu informácie
- q Použitého linkového kódu



Prenosový systém TCM: (a) zapojenie
(b) časová korešpondencia

Celkový cyklus systému TCM trvá: $T_B = 2(T_{INF} + T_D + T_G)$

Pre linkový kód NRZ (Non Return to Zero) platí: $T_B \geq 2\left(T_D + T_G + \frac{I_{INF}}{2}\right)$

kde $I_{INF} = B_1 T_B$ a I_{INF} je informačný tok v bitoch,
 B_1 je prenosová rýchlosť zdroja informácií (nie systému)

Potom :

$$B \geq \frac{2B_1 T_B}{T_B - 2(T_D + T_G)}$$

Prenosová rýchlosť B je minimálne 2 krát väčšia ako prenosová rýchlosť informácie B_1

Typická kapacita potrebnej pamäte je: $M = 2I_{INF}$

n **CDM** - vstupné signály sú modulované rôznymi ortogonálnymi kódmi, čo určuje jednoznačný prenos

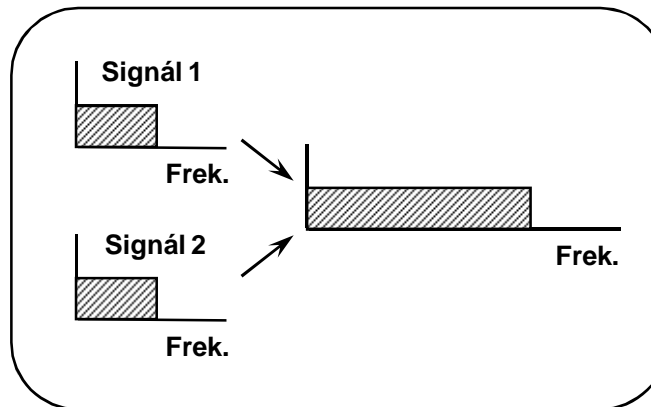
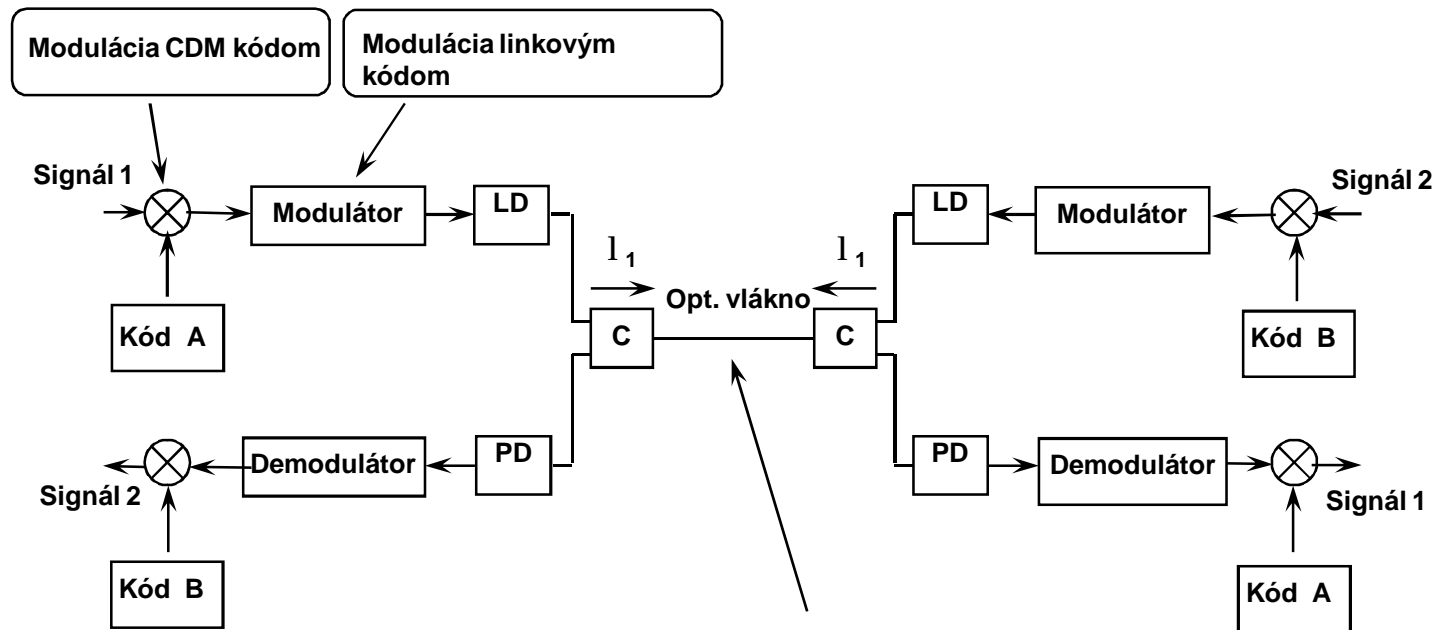
n Výstupné signály z CDM modulátora:

$$X(t) = S_1(t) * C_A(t)$$

$$Y(t) = S_2(t) * C_B(t)$$

kde $C_A(t)$, $C_B(t)$ sú **ortogonálne kódy**

$S_1(t)$, $S_2(t)$ sú signály od užívateľa 1 a 2 vstupujúce do modulátora



Prenosový systém CDM

Opätovnou aplikáciou kódov $C_A(t)$, $C_B(t)$ obnovíme pôvodné signály $S_1(t)$, $S_2(t)$

$$X(t) * C_A(t) = S_1(t) * C_A(t) * C_A(t) = S_1(t)$$

$$Y(t) * C_B(t) = S_2(t) * C_B(t) * C_B(t) = S_2(t)$$

Ak je odrazený signál detekovaný fotodiódou, potom platí:

$$Y(t) * C_A(t) = S_2(t) * C_B(t) * C_A(t)$$

čo sa vyhodnotí ako náhodný signál v prenášanom frekvenčnom pásme, čo v praxi znamená, že je zanedbateľný presluch medzi prenášanými signálmi

SCM - vstupné signály sa modulujú na rôzne nosné frekvencie. Vzniknú tak dve postranné pásma, pričom optickým vláknom sa prenáša len horné postranné pásmo (použitie pásmového filtra). V prijímacej časti sa prenášaný signál konvolúciou s nosnou frekvenciou a následným prechodom cez pásmový filter upraví do pôvodného frekvenčného pásma. Neželané detegovanie odrazeného signálu fotodiódou je potlačené použitím vhodného pásmového filtra.

Výhodou tohto systému je možnosť prenosu veľkého množstva signálov v rôznych frekvenčných pásmach.

Porovnanie obojsmerných prenosových systémov a ich hlavné parametre.

PARAMETER	SDM	WDM	DDM	TCM	CDM	SCM
Počet vlákien	2	1	1	1	1	1
Prenosová rýchlosť	B	B	B	~2B	2B	analógovo
Počet vlnových dĺžok	1	2	1	1	1	1
Zložitosť opt. zariadenia	J	Z	Z*	J	J	J
Zložitosť elektr. obvodov	J	J	J	Z	Z	Z

Poznámka :

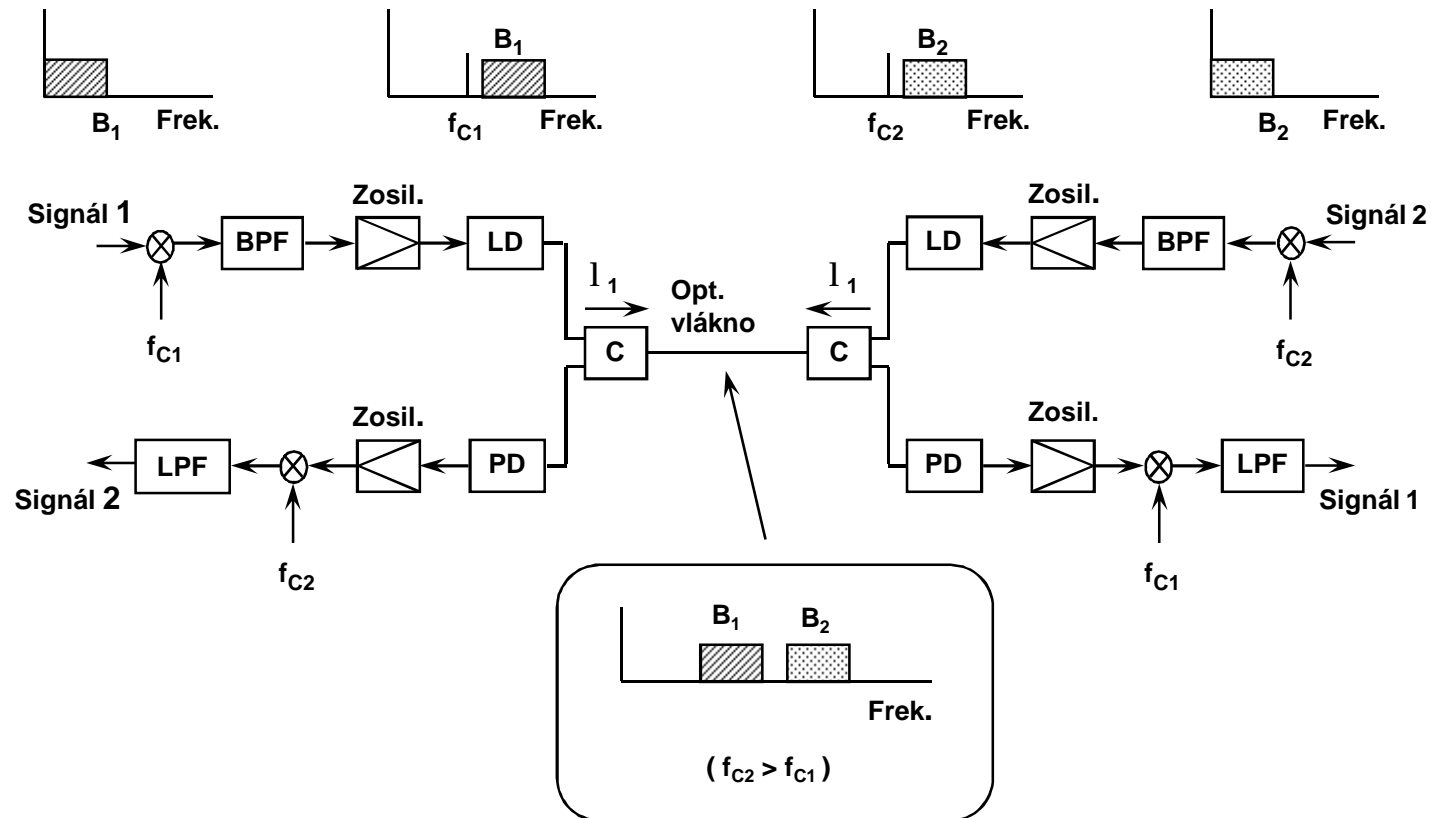
J = Jednoduché

Z = Zložité

B = Prenosová rýchlosť

* Zložitá v dôsledku odrazu.

Prenosový systém SCM.

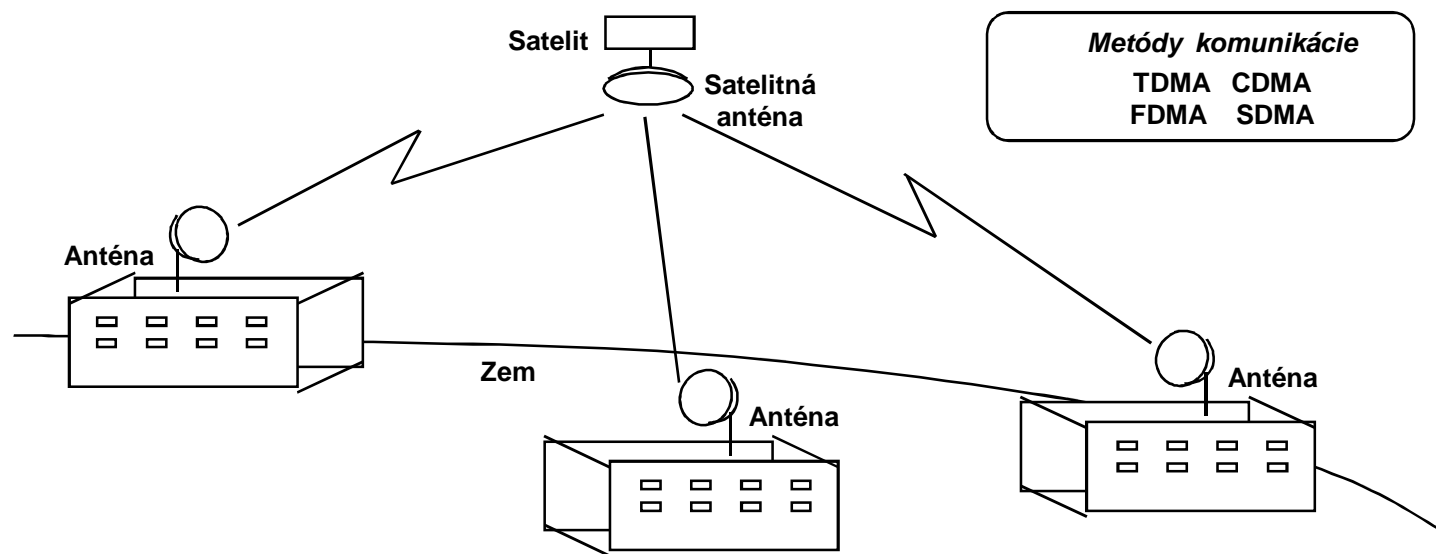


BPF – (Band Pass Filter) – Pásmový priepust
LPF – (Low Pass Filter) – Dolnofrekvenčný priepust

6.2 PRÍSTUPOVÉ METÓDY PRE PASÍVNU OPTICKÚ SIŤ

Pri zavedení rôznych prístupových metód pre **PON** možno vychádzať z metód využívaných pre satelitné komunikácie

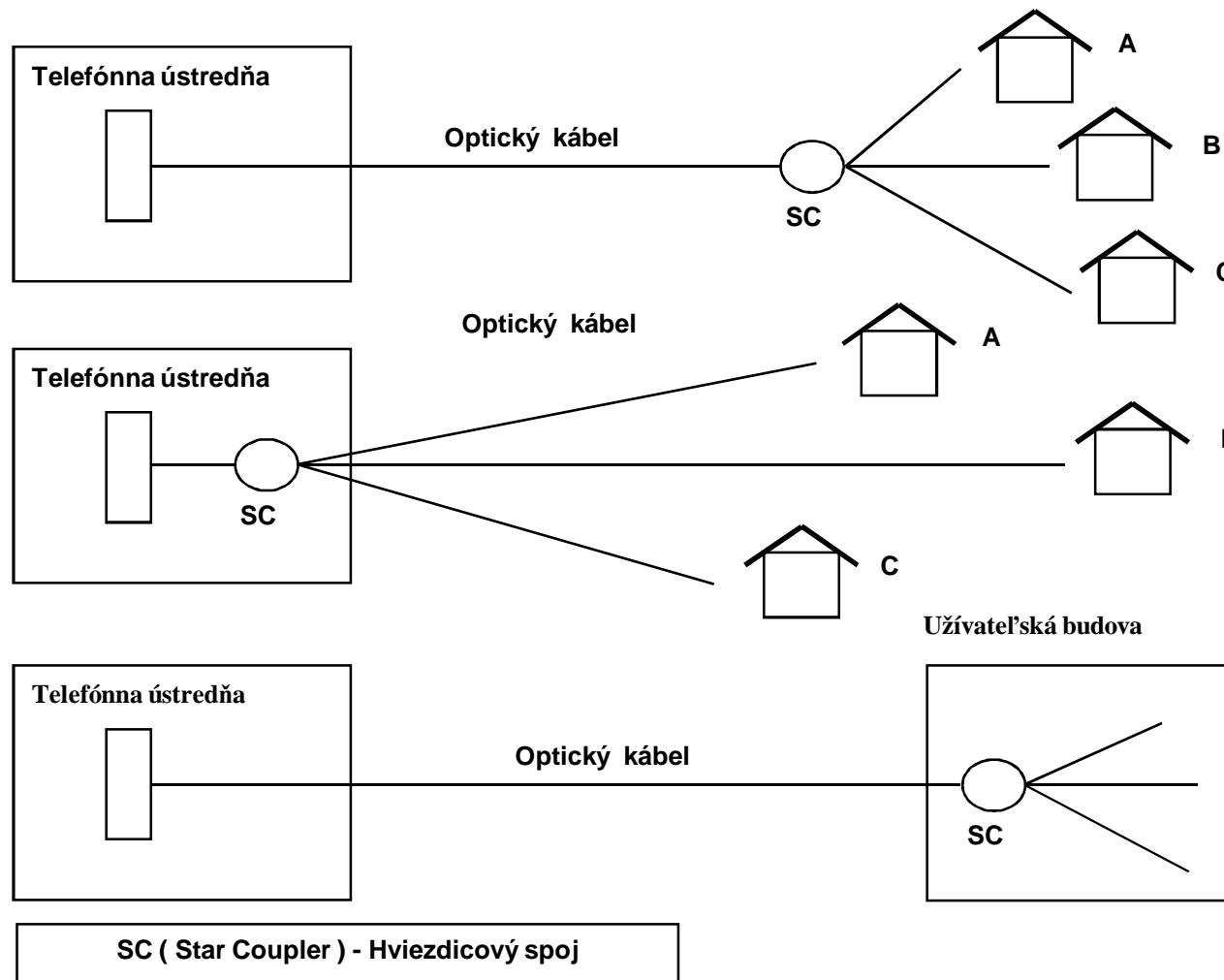
- n **Satelitné komunikácie** využívajú satelitnú anténu, s ktorou komunikuje viac antén umiestnených na Zemi
- n Komunikačným signálom je voľné prostredie, tzv. **voľný éter**



Metódy mnohonásobného prístupu vo voľnom priestore:

- n **TDMA** - (**Time - Division Multiple Access** - mnohonásobný prístup v časovej oblasti)
 - Čas je rozdelený na intervaly, ktoré sú pridelené jednotlivým užívateľom. Užívateľia vysielajú a prijímajú signály v časových intervaloch používajúc rovnakú frekvenciu
- n **CDMA** - (**Code – Division Multiple Access** - mnohonásobný prístup v kódovej oblasti)
 - Každému užívateľovi je pridelený jednoznačný ortogonálny kód
- n **FDMA** - (**Frequency-Division Multiple Access** - mnohonásobný prístup vo frekvenčnej oblasti)
 - Každému užívateľovi sú jednoznačne pridelené prenosové frekvencie.
- n **SDMA** - (**Space - Division Multiple Access**- mnohonásobný prístup v priestorovej oblasti)
 - Užívateľom je pridelený elektromagnetický lúč

Podobné metódy mnohonásobného prístupu môžu byť použité aj v prístupovej optickej sieti - **PON** - **PASÍVNA OPTICKÁ SIET**, ktorá je však izolovaná od okolia, takže každý **PON** predstavuje nezávislý jednorozmerný optický vláknový komunikačný éter

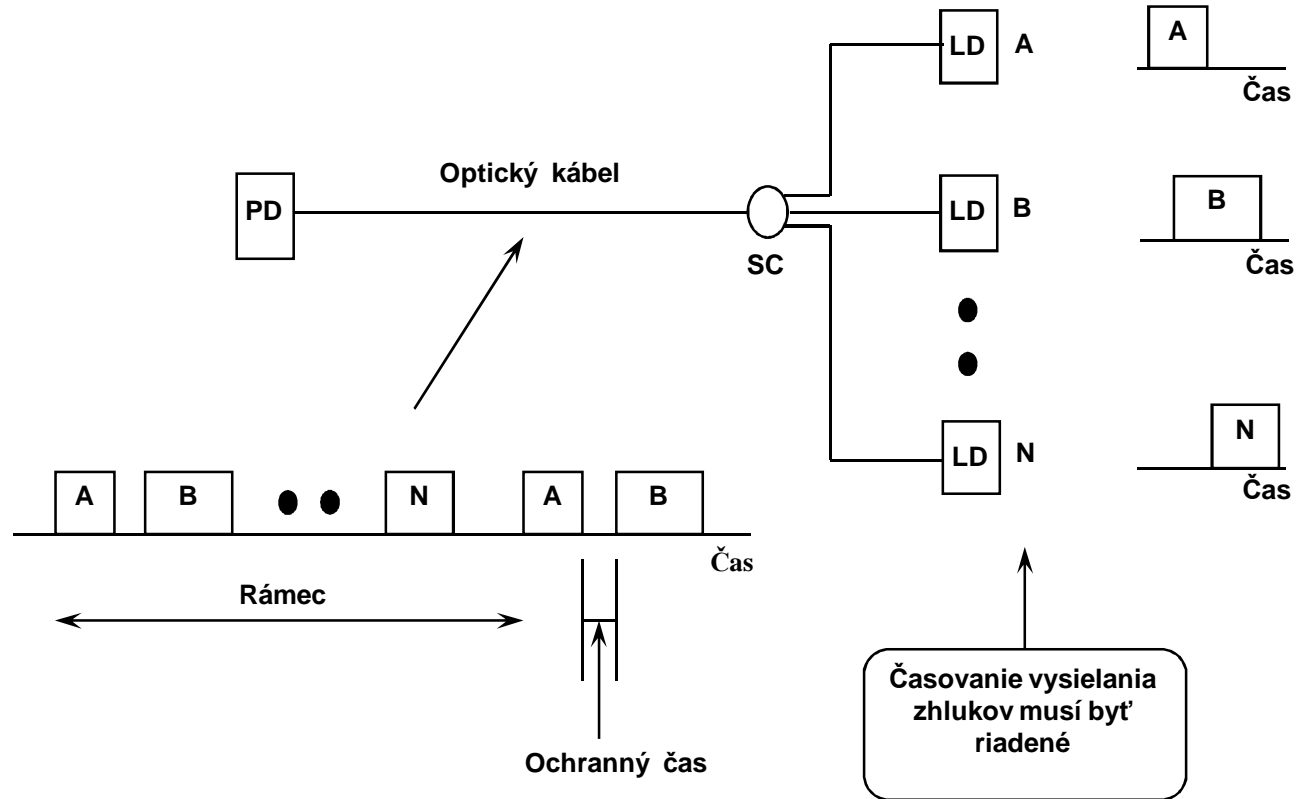


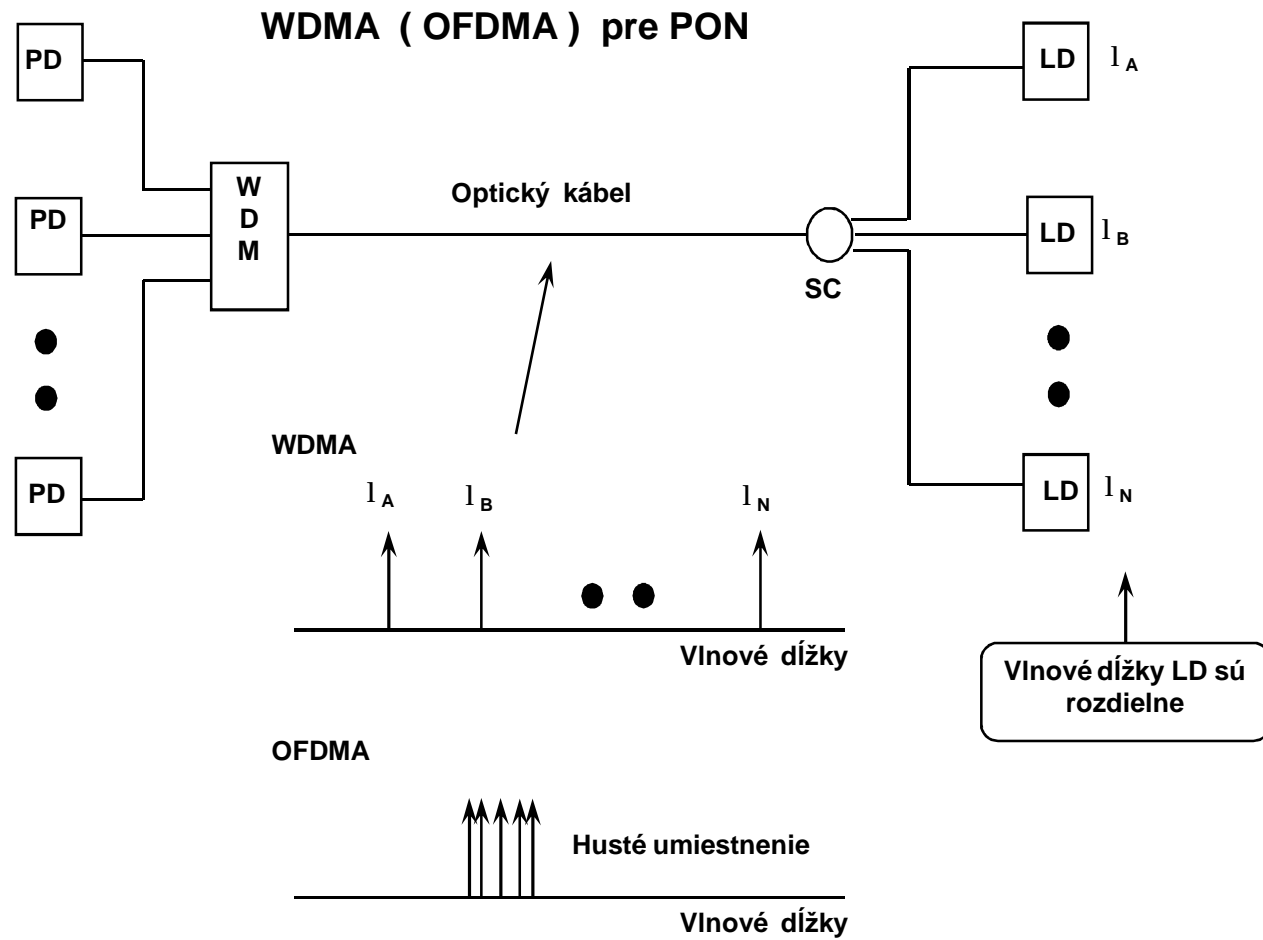
Pasívna optická sieť (PON)

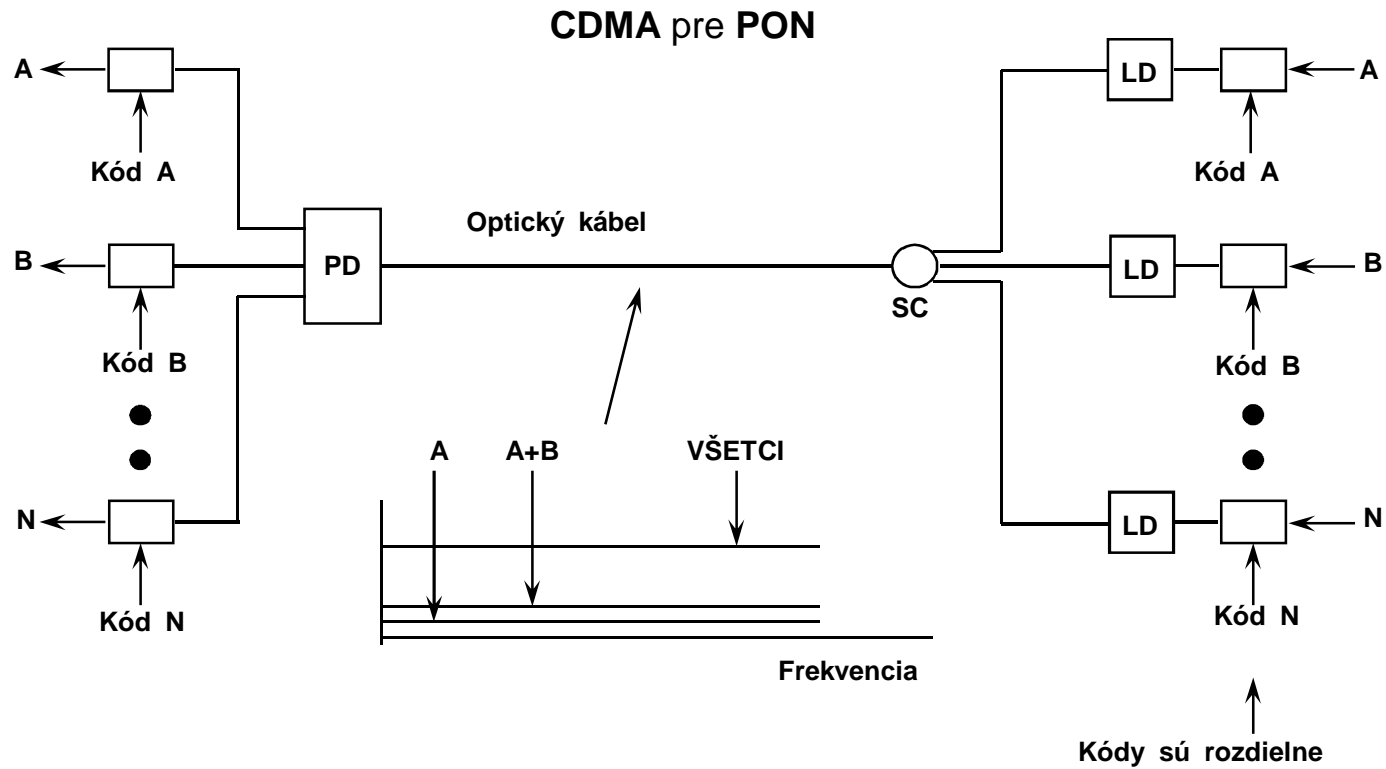
Metódy mnohonásobného prístupu pre PON:

- n **TDMA** - (Time - Division Multiple Access
 - mnohonásobný prístup v časovej oblasti)
 - Každému užívateľovi je pridelený časový interval, ktoré sa navzájom neprekrývajú
- n **OFDMA** - (Optical Frequency - Division Multiple Access
 - mnohonásobný prístup v oblasti optických frekvencií)
 - Špeciálny prípad **WDMA** s menšími intervalmi medzi kanálmi. Vlnové dĺžky všetkých laserov musia byť rozdielne
- n **SCMA** - (Subcarrier Multiple Access
 - mnohonásobný prístup v oblasti subnosnýchvln)
 - Užívateľom sú pridelené rôzne frekvencie. Signály sa od užívateľa prenášajú cez optické vlákno len v určitom optickom frekvenčnom pásme, ktoré sa neprekrýva s frekvenčnými pásmami iných užívateľov
- n **CDMA** - (Code - Division Multiple Access
 - mnohonásobný prístup v kódovej oblasti)
 - Užívateľovi je pridelený jednoznačný ortogonálny kód

TDMA pre PON







6.3 PRENOSOVÉ MÓDY PRE DIGITÁLNY PRENOS

STM - (**Synchronous Transfer Mode** - **Synchronný prenosový mód**)

- Rámec je rozdelený na časové intervaly, ktoré sú jednoznačne pridelené užívateľom. Časové rámce majú rovnakú dĺžku, pretože sú riadené stabilným zdrojom času (kryštálovými hodinami). Časový rámec sa opätovne vysielá až po odvysielaní časového intervalu od všetkých užívateľov

- **Malá flexibilita, ale veľká prenosová rýchlosť**

ATM - (**Asynchronous Transfer Mode** - **asynchronný prenosový mód**)

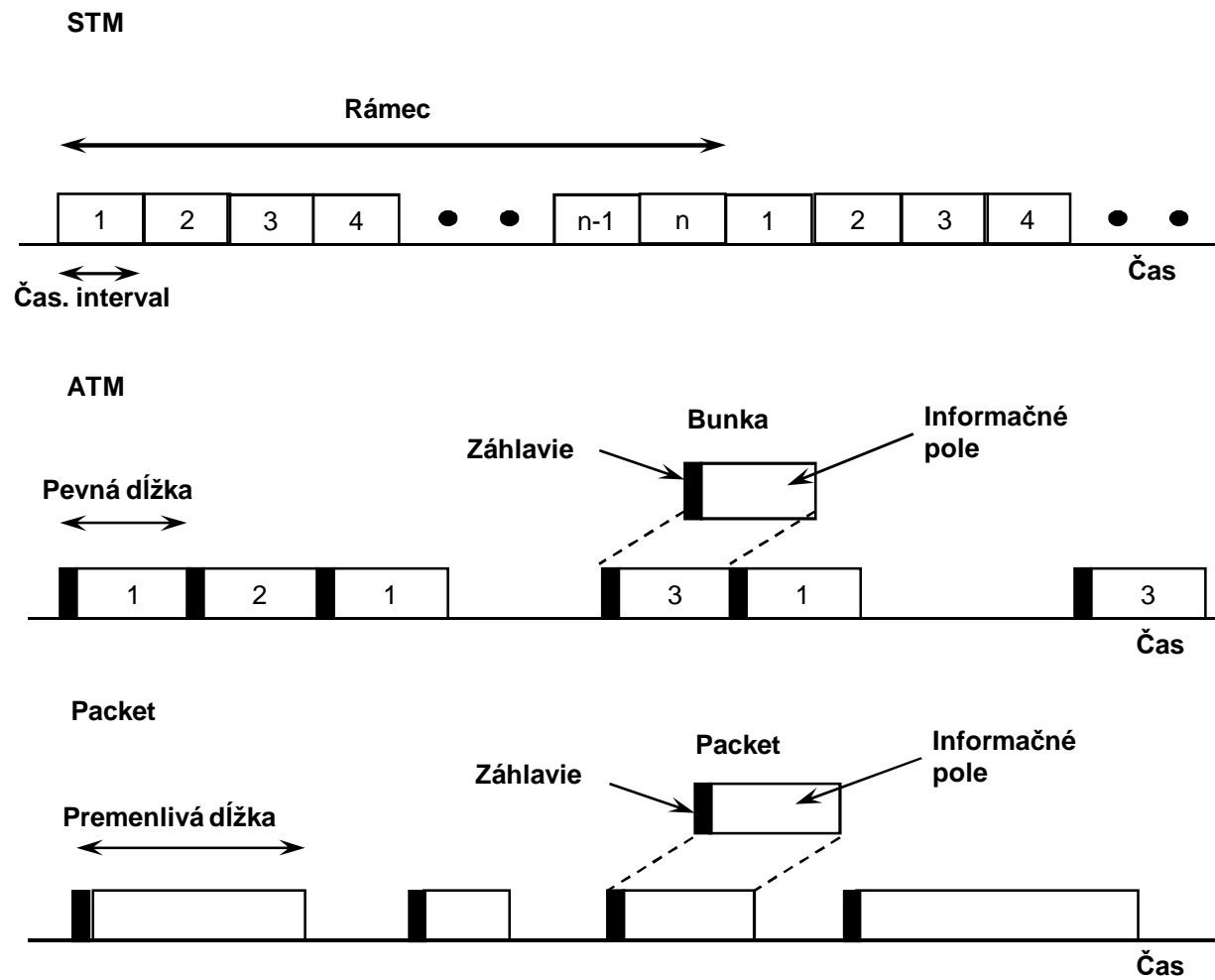
- Užívateľom sú pridelené tzv. buňky rovnakej dĺžky, ktoré obsahujú hlavičku (záhlavie) a informačné pole. Tieto buňky sa na rozdiel od **STM** neprenášajú v presne stanovenej postupnosti. Ich usporiadanie závisí od množstva informácií, ktoré jednotliví užívatelia potrebujú preniesť.

- **Dobrá flexibilita aj pomerne vysoká prenosová rýchlosť**

PACKET - (**Paketový prenosový mód**)

- Mód je podobný **ATM**, ale sa môže meniť dĺžka časovej bunky - paketu. Jednotlivé pakety už nie sú usporiadané tesne za sebou, ovplyvňuje to však prenosovú rýchlosť, ktorá je relatívne menšia.

- **Veľká flexibilita**



Prenosové módy pre digitálny prenos

6.4 OPTICKÝ FREKVENČNÝ MULTIPLEX - OFDM

Optický frekvenčný multiplex OFDM využíva optickú frekvenčnú selektivitu

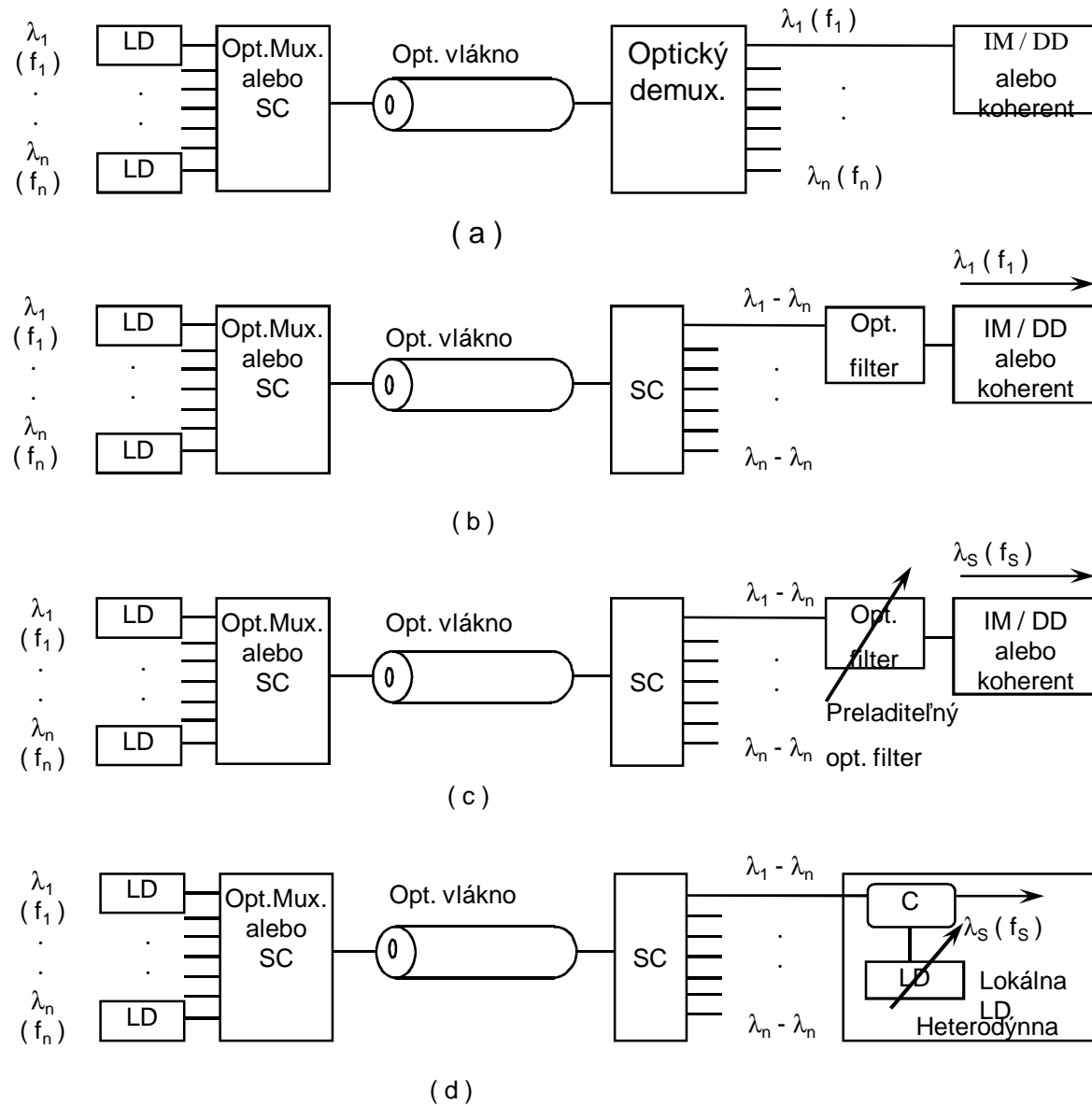
- n Do optického multiplexora (Opt. Mux.), alebo do optického hviezdicového väzobného prvku (SC) vstupuje viac optických signálov z rôznych LD. V týchto zariadeniach dochádza k zmiešaniu optických signálov a výsledný zmiešaný optický signál je prenášaný jedným optickým vláknom

Optický multiplexor (demultiplexor):

- n Zariadenie na rozdelenie signálov s rôznymi vlnovými dĺžkami do rôznych kanálov
(selektivita vlnovej dĺžky)

Optický väzobný člen:

- n zariadenie na oddelenie kanálov, v ktorých sú k dispozícii všetky vlnové dĺžky
(združovanie a rozvetvovanie optického výkonu)



Obr.6.14 Konfigurácia OFDM : (a) metóda 1 , (b) metóda 2 , (c) metóda 3 , (d) metóda 4
6. kap. OVKS KEMT FEI TU Košice

- n Požadovaný signál s danou vlnovou dĺžkou je selektívne prijatý pomocou **preladiateľného optického filtra alebo heterodynnou technológiou**

Môžu byť použité:

- n **MZ - Interferometer**
- n **FP - Interferometer**
- n **LD filter**

LD filtre využívajú zosilňovacie charakteristiky LD, ktoré majú úzky rozsah vlnových dĺžok

Frekvenčná stabilita LD je potrebná pre všetky konfigurácie

POŽADOVANÝ ODPSTUP KANÁLA :

Uvažuje sa úroveň presluhov kanálov podľa
pomeru S/I (signál/interferencia)

Pre $S/I = 30$ dB sú požadované tieto odstupy kanálov D:

n	FSK	heterodynný :	$D = 3,8 R_b$
n	ASK	heterodynný :	$D = 9,5 R_b$
n	PSK	heterodynný :	$D = 12,4 R_b$
n	ASK	homodynný :	$D = 7,5 R_b$
n	PSK	homodynný :	$D = 10,5 R_b$

kde • R_b je prenosová rýchlosť

Približná vzdialenosť kanálov je $10 R_b$ a to je menšia hodnota,
 ako pri systéme WDM

Faktory spôsobujúce presluch kanálov:

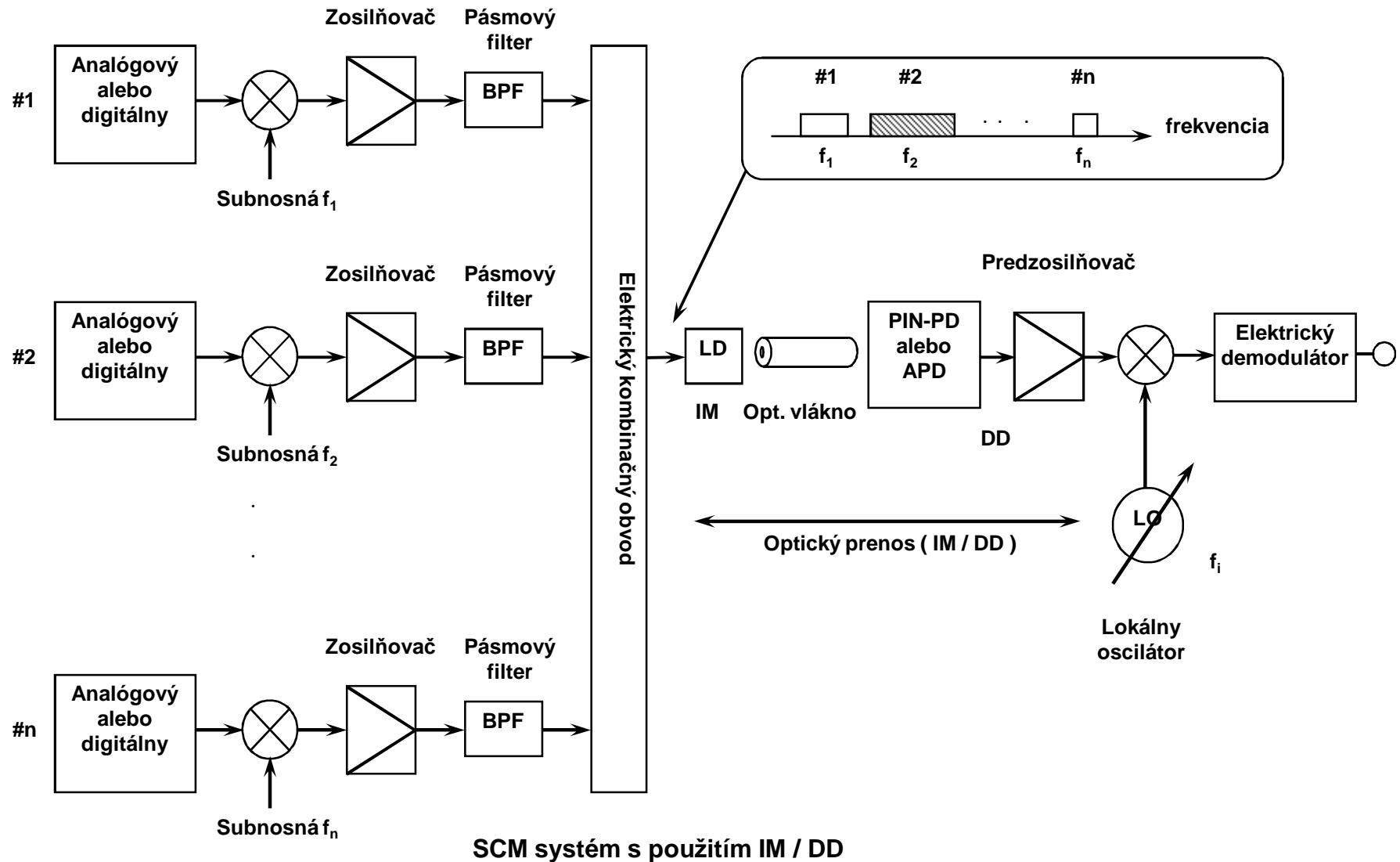
- n Intermodulačné poruchy
- n Príspevok výstrelového šumu z druhého kanála
- n Presluchy vytvárané nelineárnymi javmi v jednovidových vláknach

6.5 MULTIPLEX SUBNOSNÝCH VÍŇ

Pre efektívny prenos mnohokanálových signálov, pre užívateľské siete je výhodný:

Multiplex subnosných víŇ -
(SCM - Subcarrier multiplexing)

- n Digitálne alebo analógové signály sú modulované subnosnými frekvenciami $f_1 \dots f_n$, zosilňované a filtrované pásmovými priepustkami a napokon multiplexované
Signály sú prenášané optickým vláknom do prijímacích **IM/DD**
alebo koherentných systémov



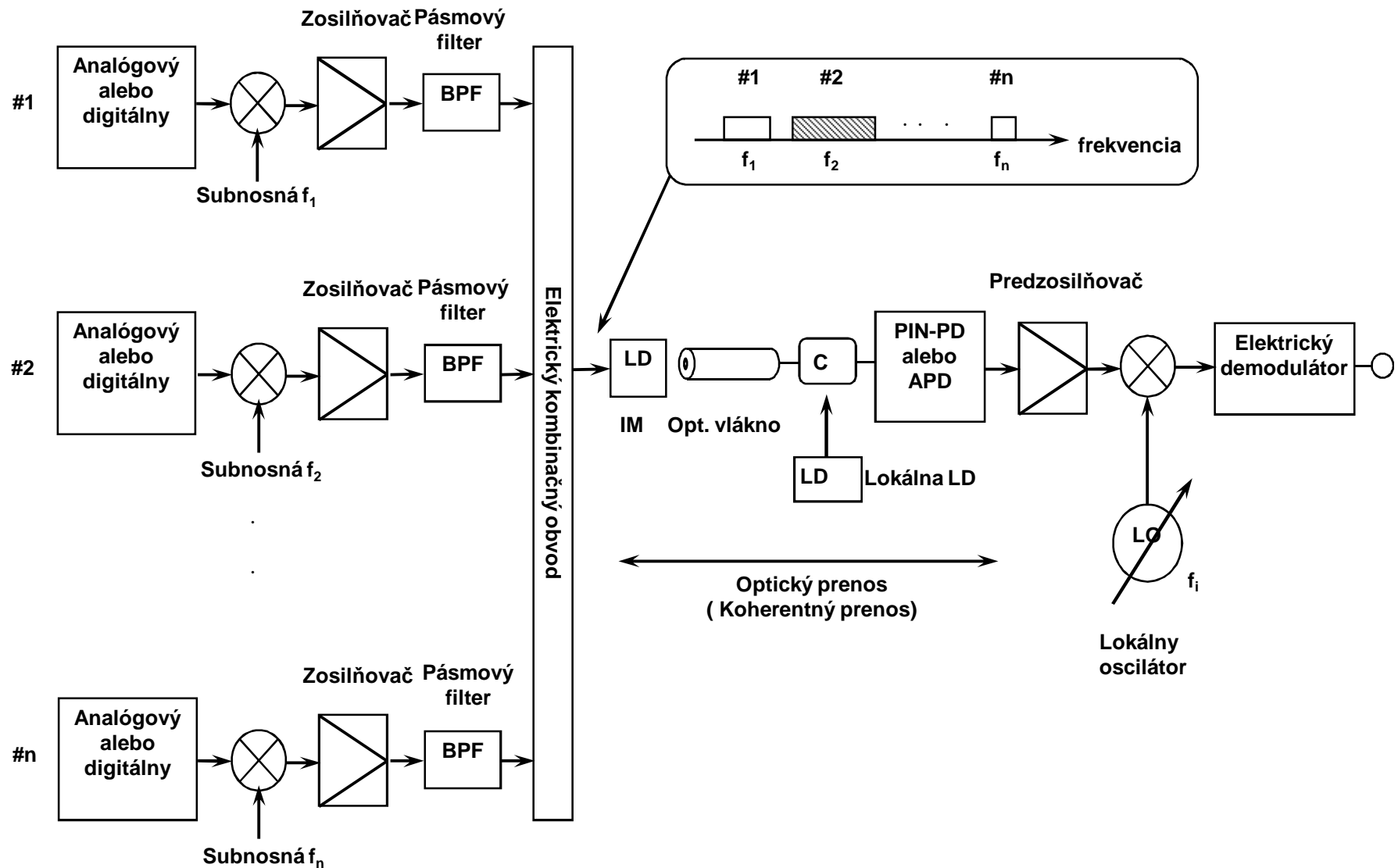
SCM systém s optickým koherentným prijímačom
Koherentne modulované svetlo z laserovej diódy je prenášané optickým vláknom a detegované lokálnou LD

Systém SCM má niekoľko výhod pre mnohokanálový prenos:

- § Pre tento prenos je **potrebný len jeden laser**
V OFDM LD vysielača nie je spoločná, ale každý kanál má svoju LD
Navyše frekvencia týchto laserov musí byť stabilizovaná
- § Pre SCM sa môže použiť **komerčne dostupná elektronika** - možno získať z hľadiska nákladov vysoko efektívny systém
- § **Digitálne** (ASK, FSK, PSK) a **analógové** (AM, FM, PM) elektrické signály sa môžu prenášať **jedným systémom**
- § **Šírka pásma** týchto signálov **môže byť rozdielna**

Nevýhoda systému SCM:

Ohraničený prenosový dosah, pretože výkon lasera je spoločný pre všetky n kanály



SCM systém s použitím koherentnej technológie

6.5.1 SYSTÉMY S MULTIPLEXOM SUBNOSNÝCH VÍLN S POUŽITÍM IM/DD

Modulovaný optický signál v SCM systéme:

$$P(t) = P_0 \left[1 + \sum_{i=1}^n m_i \cos(\omega_i t + \varphi_i) \right]$$

- Kde
- P_0 je priemerný prijatý výkon
 - n je počet kanálov
 - m_i je optický modulačný index (OMI)
 - ω_i je uhlová frekvencia
 - φ_i je fáza i -tého kanála

Výstupný fotoprúd z APD diódy:

$$I_{dc} = \eta e M \left(\frac{P_0}{hf} \right) = R M P_0 = M I_p$$

$$i_{ac} = R M P_0 m_i \cos(\omega_i t + \varphi_i) = m_i I_{dc} \cos(\omega_i t + \varphi_i)$$

Pre jednoduchosť píšeme M namiesto $\langle M \rangle$ (stredná hodnota multiplikačného faktora)

- n I_{dc} je stredná hodnota prúdu
- n i_{ac} je striedavý prúd v i -tom kanále

Stredná kvadratická hodnota prúdu i-tého kanála:

$$\langle i_{ac}^2 \rangle = \frac{1}{2} m_i^2 I_{dc}^2 = \frac{1}{2} m^2 I_{dc}^2 = \frac{1}{2} m^2 M^2 I_p^2$$

kde pre jednoduchosť predpokladáme: $m_i = m$ ($i = 1, 2, \dots, n$)

V SCM systémoch musíme uvažovať dva typy šumov:

n Šum intenzity lasera

n Šum intermodulačného produktu

n Šum intenzity lasera sa prejavuje v dôsledku fluktuácie laserového žiarenia

n Obyčajne je definovaný ako **relatívny šum intenzity (RIN – Relative Intensity Noise)**:

$$RIN = \frac{\langle (\Delta P)^2 \rangle}{P}$$

- kde
- P je priemerný optický výkon
 - ΔP je fluktuačná zložka výkonu laserového žiarenia

RIN vzniká vplyvom troch faktorov:

- n Vlastná (kvantová) fluktuácia intenzity (výkonu)
- n Reflexia - odraz v laseri
- n Priestorová filtrácia laserového žiarenia na výstupe z lasera

Typické hodnoty RIN pre LD:

od - 130 dB/Hz do - 160 dB/Hz pre $I_b = 1,2 I_{th}$

n RIN závisí od laserového budiaceho prúdu I_b :

$$RIN = C \left[\left(\frac{I_b}{I_{th}} \right) - 1 \right]^{-3}$$

Šum intenzity pre RIN je:

$$\langle i_R^2 \rangle = RIN I_{dc}^2 B = RIN M^2 I_p^2 B$$

n RIN je dôležitý len ak I_p je veľké

n Porovnajme šum intenzity s výstrelovým šumom:

$$\frac{\langle i_R^2 \rangle}{\langle i_s^2 \rangle} = \frac{RIN I_p^2 B}{2e I_p B} = \frac{RIN I_p}{2e}$$

Príklad: $RIN = -135$ dB/Hz a $R = 1$ [A/W],

v tomto prípade je vstupný optický výkon - 40 dBm,

$I_p = 0,1$ μ A a pomer šumu 0,01 (veľmi malý)

Ak je optický výkon - 10 dBm, pomer je 10. Vtedy sa už RIN stáva dôležitým parametrom

Šum intermodulačného produktu

IMP (Intermodulation Product Noise)

vzniká zmiešavaním nosných vplyvom nelinearity lasera

Pomer C/N:

$$C/N = \frac{\frac{1}{2} m^2 M^2 I_p^2}{\langle i_R^2 \rangle + \langle i_{IM}^2 \rangle + \langle i_s^2 \rangle + \langle i_d^2 \rangle + \langle i_t^2 \rangle}$$

Vzťah medzi C/N a S/N závisí od spôsobu modulácie

Pre AM platí: $S/N = C/N$

Pre FM platí:
$$S/N = \frac{3B(\Delta F)^2(C/N)}{2f_m^3}$$

- kde
- f_m je maximálna hodnota šírky pásma signálu
 - ΔF je maximálna frekvenčná odchýlka
 - $B = (2f_m + 2\Delta F)$ je šírka pásma pre FM

6.5.2 SYSTÉMY S MULTIPLEXOM SUBNOSNÝCH VÍLN S POUŽITÍM KOHERENTNEJ ECHNOLÓGIE

Pri odvodení šumu koherentného prenosu berieme do úvahy aj **príspevok výstrelového šumu lokálneho lasera**. Pretože pri koherentnom prenose je prijímač veľmi citlivý, RIN je menej dôležitý ako v prípade SCM systémov s použitím IM/DD priamej detekcie.

n Šum je daný vzťahom:

$$\sigma^2 = \langle i_R^2 \rangle + \langle i_{IM}^2 \rangle + \langle i_s^2 \rangle + \langle i_d^2 \rangle + \langle i_t^2 \rangle + \langle i_L^2 \rangle$$

Energia signálu pre jeden kanál závisí od optickej koherentnej modulácie. Pre heterodynný SCM systém s fázovou moduláciou PM :

$$C/N = \frac{2R^2 P_L P_s b J_1^2(b) [J_0(b)]^{2n-2}}{\langle i_R^2 \rangle + \langle i_{IM}^2 \rangle + \langle i_s^2 \rangle + \langle i_d^2 \rangle + \langle i_t^2 \rangle + \langle i_L^2 \rangle}$$

- kde
- n je počet kanálov
 - b je fázový modulačný index
 - J_0, J_1 sú Besselové funkcie nultého, resp. prvého rádu

Fázový modulačný index predpokladajme rovnaký pre všetky n kanály. Vzťah medzi C/N a S/N pre SCM systémy s použitím koherentnej technológie je analogický ako pre SCM systémy s priamou detekciou IM/DD.

6.6 WDM PRENOSOVÉ SYSTÉMY

WDM, resp. dokonalejšia **OFDM** optická multiplexná technológia umožňuje efektívne využiť veľkú šírku pásma **OV**

WDM spočíva v rozdelení veľkej šírky pásma **OV** na **neprekývajúce sa subpásma** alebo **optické kanály**, ktoré umožňujú simultánne a nezávisle prenášať rôzne optické signály po tom istom vlákne

Optické kanály sú charakterizované centrálnou vlnovou dĺžkou optickej nosnej, šírkou pásma a frekvenčným odstupom kanálov

Pre moderné **WDM** systémy sa pre **OV** na báze **SiO₂** obyčajne uvažuje o dvoch oblastiach s malým tlmením:

v okolí $\lambda = 1300$ nm

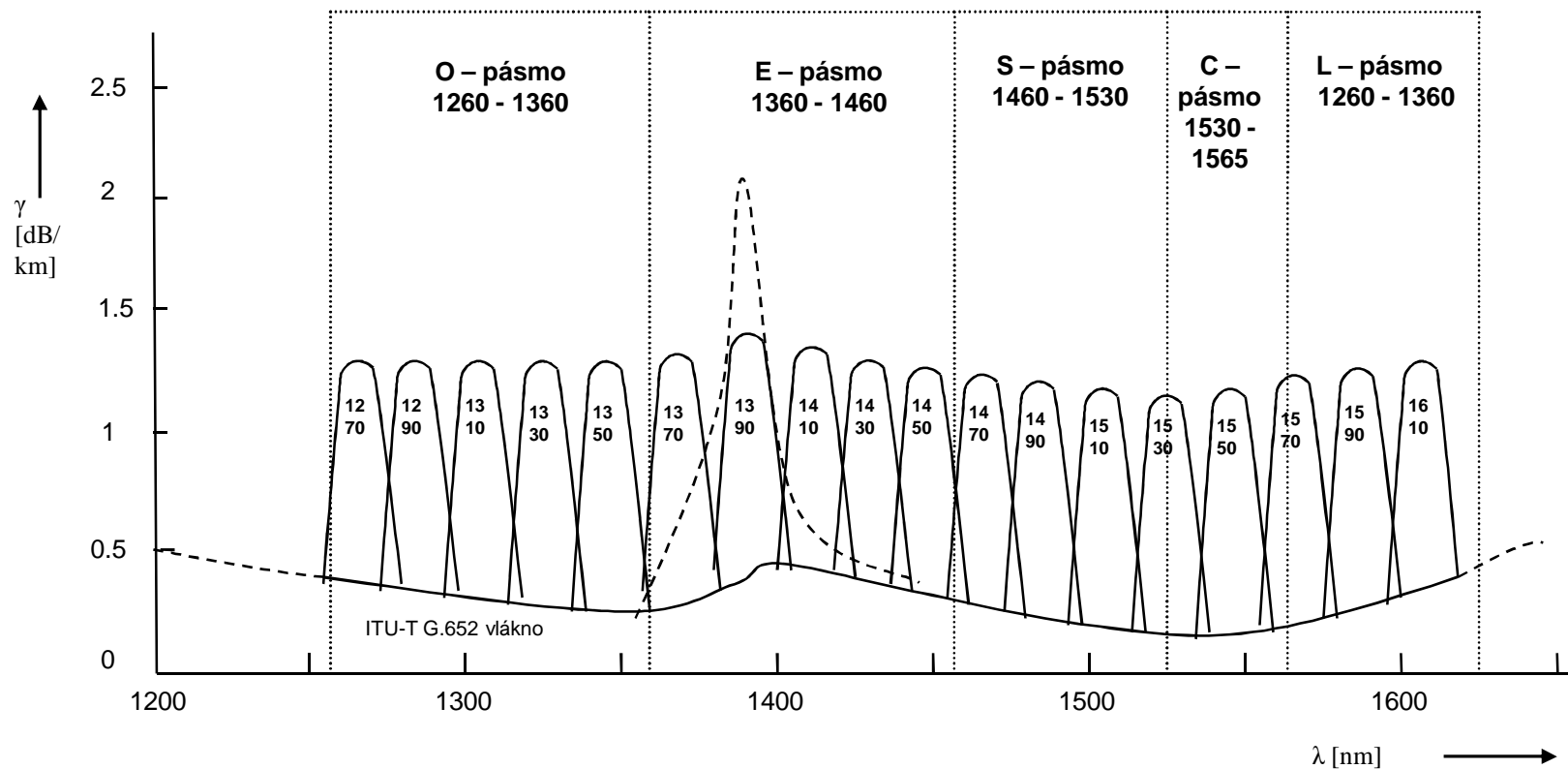
v okolí $\lambda = 1500$ nm

Obidve oblasti poskytujú: **šírku pásma okolo 200 nm**
s tlmením **OV pod 0,5 dB/km**

Teoreticky tieto dve oblasti poskytujú:

prenosové pásmo s prenosovou kapacitou až 50 Tbps

Rozdelenie týchto pásiem na subpásma je **normalizované podľa ITU**



C-WDMA spektrálne sloty podľa odporúčania **ITU-T G.654.2**

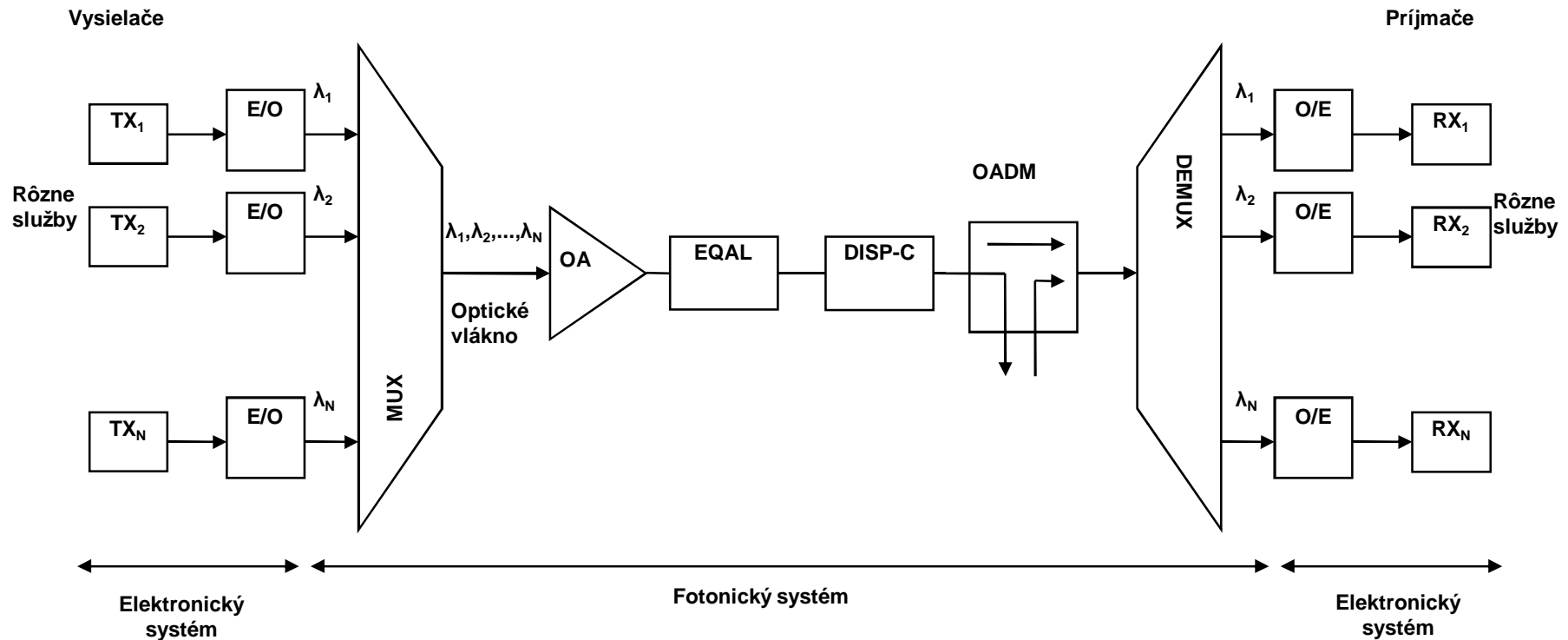
Rozdelenie optických pásiem v OV podľa ITU

Názov pásma	Rozsah vlnových dĺžok [nm]
O – band Original	1260 – 1360
E – band Extended	1360 – 1460
S – band Short wavelength	1460 – 1530
C – band Commercial	1530 – 1565
L-band Long wavelength	1565 – 1626
U – band Ultra-long wavelength	1625 – 1675

- n **Maximálna prenosová rýchlosť** je pre daný optický kanál ohraničená rýchlosťou elektronického spracovania signálov. V súčasnosti je preto technicky nemožné dosiahnuť úplné využitie tejto prenosovej kapacity použitím len jednej optickej nosnej. Využitím rôznych WDM, resp. OFDM technológií možno už v súčasnosti pri prenosovej rýchlosti na jeden optický kanál **niekoľko desiatok Gbps** (čo umožňuje súčasná elektronika) a **počte optických kanálov nad 1000** dosiahnuť celkovú prenosovú rýchlosť na jedno OV rádove **niekoľko Tbps**
- n Bloková schéma WDM prenosového systému:

Elektronická časť slúži na pripojenie účastníkov s rôznymi službami na prenosový systém

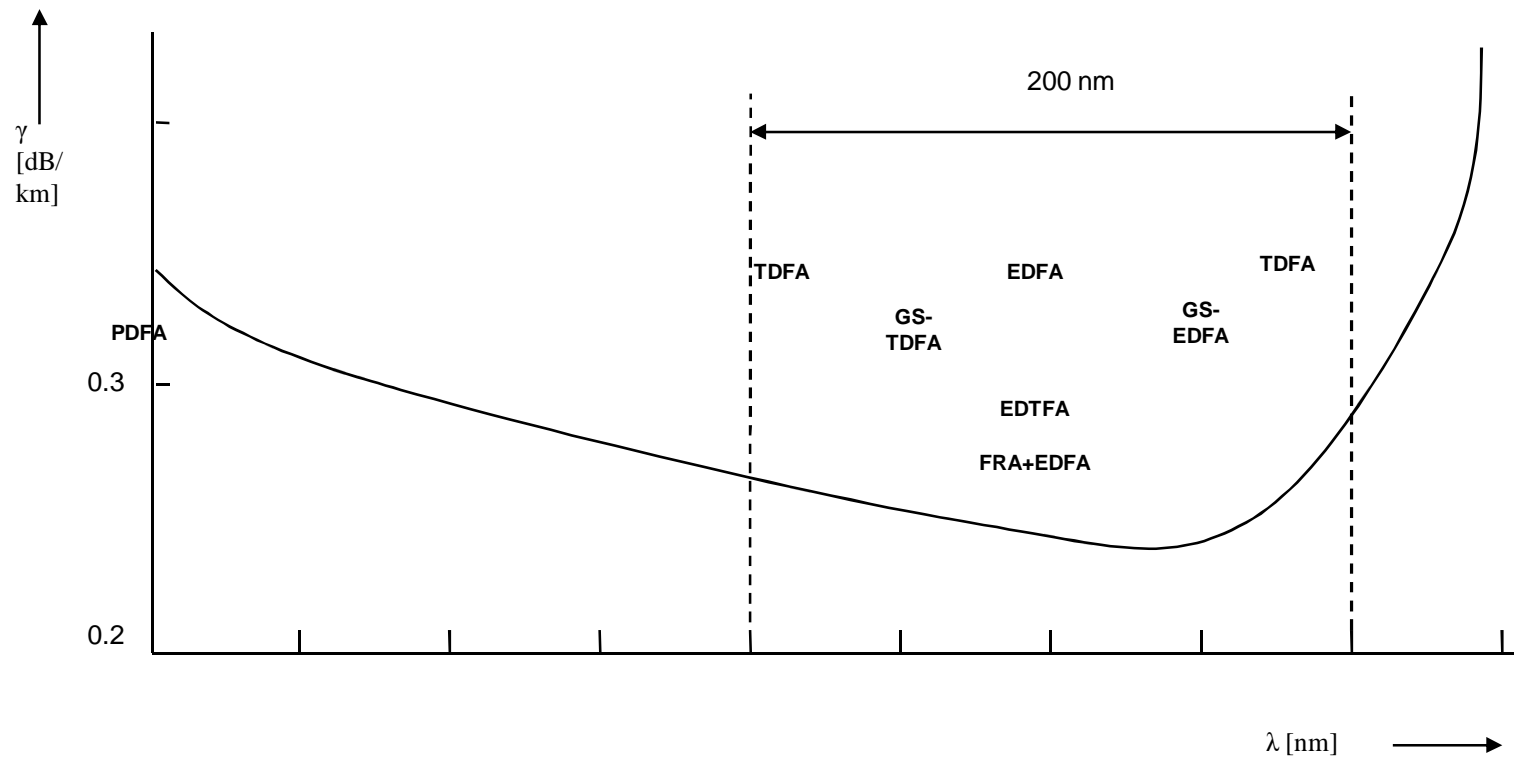
Fotonická časť realizuje prenos a management optických signálov



Bloková schéma WDM prenosového systému

- n **Prenosový systém:**
 - Jednoduché jednovidové OV
 - Zložitejšia optická vláknová sieť
- n **Sieť obsahuje:**
 - Optické zosilňovače –OA (Optical Amplifier)
 - WDM equalizátor -EQAL (Equalization)
 - WDM kompezátor disperzie
 - DSP-C (Dispersion Compensation)
 - Optický vydeľovač a prirad'ovač kanálov
 - OADM (Optical Add-Drop Multiplexer)
 - WDM multiplexor (MUX) a demultiplexor (DEMUX)
- n **Vysielače** sú tvorené modulátormi a **LD (E/O)**, ktoré pracujú na rôznych vlnových dĺžkach λ_1 až λ_N
- n **Optické kanály** sú multiplexované (**WDM MUX**) do optického prenosového systému

- n Po demultiplexovaní (**WDM DEMUX**) sú signály privedené na **optické prijímače** tvorené fotodiódami **PIN** alebo **APD (O/E)**
- n **Demodulátory** konvertujú optické signály na elektronické signály
- n **Optický zosilňovač OA** je použitý na udržiavanie požadovanej úrovne optického signálu v prenosovej sieti
- n Na **equalizáciu WDM kanálov** a **kompenzáciu disperzie** optickej vláknovej siete sa používa zapojenie blokov **EQUAL** a **DISP-C**
- n Blok **OADM** zapojený v prenosovom systéme umožní **vydeliť**, resp. **pridať optický kanál** - **vetvenie siete**



Oblasti použitia optických zosilňovačov: **PDFA** – Praseodim Doped Fiber Amplifier, **TDFA** – Telur Doped Fiber Amplifier, **GS-TDFA** – Gain Saturated TDFA, **EDFA** – Erbium Doped Fiber Amplifier, **GS-EDFA** – Gain Saturated EDFA, **EDTFA** – EDFA with Telur doping, **FRA+EDFA** – Fiber Raman Amplifier + EDFA