

Optické komunikácie

Nelineárne javy v optických vláknach

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

- q Vzhľadom na malý priemer optického vlákna, už relatívne **malý výkon spôsobí veľkú intenzitu svetla**
- q Veľká intenzita a dlhá interakčná dĺžka sa prejavujú v niektorých **nelineárnych javoch**:
 - n **Stimulovaný Ramanov rozptyl**
 - **SRS (Stimulated Raman Scattering)**
 - n **Stimulovaný Brillouinov rozptyl**
 - **SBS (Stimulated Brillouin Scattering)**
 - n **Vlastná fázová modulácia**
 - **SPM (Self Phase Modulation)**
 - n **Nosnou indukovaná fázová modulácia**
 - **CIP (Carrier Induced Phase Modulation)**
 - n **Štvorvlnové zmiešavanie**
 - **FWM (Four Wave Mixing)**

Nelineárne javy ovplyvňujú kvalitu prenosu a spôsobujú obmedzenia optických systémov:

- n **Zvýšenie šumu** v dôsledku presluchu, resp. zvýšenie fázového šumu
- n **Obmedzenie maximálneho vstupného optického výkonu**

Nelineárne javy majú aj **pozitívne aplikácie:**

- n Použitie pre tvorbu **zosilňovačov a zdrojov (vláknových laserov)**

Na základe javu **SPM** vznikajú - **SOLITÓNY** - impulzy, ktoré sa šíria na veľké vzdialenosti **bez skreslenia**

NELINEÁRNE JAVY

JAV	DEGRADÁCIA PRENOSOVÉHO SYSTÉMU	APLIKÁCIE
SRS	Presluchy vo WDM aj OFDM	Ramanov zosilňovač Vláknový Ramanov filter
SBS	Presluchy vo WDM aj OFDM Ohraničuje maximálny vstupný výkon	Brillouinov zosilňovač Brillouinov OTDA - reflektometria
SPM	Fázový šum v PSK aj PM	Optický solitón
CIP	Križová fázová modulácia v PSK aj PM	
FWM	Presluchy v OFDM	

7.1 SRS - STIMULOVANÝ RAMANOV ROZPTYL

- n Vzniká v dôsledku **interakcie svetla s molekulovými kmitmi**
Modulácia svetla pôsobením molekulových kmitov
SRS dáva možnosť vzniku postranných pásiem
ANTI - STOKESOVÉ a **STOKESOVÉ SVETLO**
- n **Ramanov efekt** okrem frekvenčného posunutia optického signálu spôsobuje aj **optický zisk**, resp. **optickú absorpciu** v týchto posunutých frekvenčných pásmach
- n **Stokesové svetlo** môže byť zosilnené, ak čerpací výkon pôvodného svetla je dostatočne veľký a
- n **Anti - Stokesové svetlo** je absorbované (svetlo v tomto pásme bude zoslabené)

Závislosť optických výkonov od dĺžky OV:

$$P_s(L) = P_s(0) \exp(gI_0 L_e)$$

$$P_a(L) = P_a(0) \exp(-gI_0 L_e)$$

kde:

- n $P_s(L)$ je výkon svetla v Stokesovom pásme
- n $P_a(L)$ je výkon svetla v Anti - Stokesovom pásme
- n I_0 je intenzita svetla čerpaceho zdroja
- n L je dĺžka vlákna
- n L_e je efektívna dĺžka vlákna ($L_e = f(L)$)
- n g je Ramanov zisk

L_e (L) odvodíme podľa nasledujúcej úvahy:

- n Predpokladáme, že intenzita svetla čerpaceho zdroja vo vzdialenosti x je určená vzťahom:

$$I(x) = I_0 \exp(-\alpha x)$$

kde:

- n α je tlmenie vlákna zahrňujúce aj straty spojok
- n x je vzdialenosť
- n I_0 je intenzita zdroja na počiatku

Ak $x = x + \Delta x$, potom pre výkon platí vzťah:

$$P_S(x + \Delta x) = P_S(x) \exp[-gI(x) \Delta x]$$

Ak D je relatívne malé, potom:

$$\frac{dP_s}{dx} = P_s g I_0 \exp(-\alpha x)$$

Integráciou dostaneme:

$$\ln \frac{P_s(x)}{P_s(0)} = g I_0 \left[1 - \frac{\exp(-\alpha x)}{\alpha} \right]$$

Pre L_e dostaneme:

$$L_e = \frac{1 - \exp(-\alpha L)}{\alpha}$$

Limitné prípady: $\alpha L \gg 1 \quad L_e = 1 / \alpha$
 $\alpha L \ll 1 \quad L_e = L$

Intenzita čerpaceho zdroja I_0 je vyjadrená ako $I_0 = P / A_e$,
kde:

- n **P** je optický výkon
- n **A_e** je efektívna plocha (je vo vzťahu s plochou jadra optického vlákna a je definovaná ako prienik svetelných polí čerpaceho a signálového svetla)

Pre jednovidové optické vlákna možno A_e odhadnúť ako:

$$A_e = \pi w^2$$

kde:

- n w je priemer poľa vidu

- n **Polarizačné stavy** čerpaceho zdroja ovplyvňujú Stokesove alebo Anti-Stokesove svetlo a teda aj celkovú účinnosť javu **SRS**
- n Ramanov zisk bol pozorovaný aj pre ortogonálnu polarizáciu a meraný zisk v jednojovom optickom vlákne je rovný asi hodnote 1/2 pri súhlasnej polarizácii:

$$P_S(L) = P_S(0) \exp \frac{g P_p L_e}{A_e}$$

$$P_a(L) = P_a(0) \exp \frac{-g P_p s L_e}{A_e}$$

kde:

- n P_p je čerpací výkon
- n s reprezentuje polarizačný stav
- n **Ak $s = 1$** \Rightarrow súhlasná polarizácia, t.j. polarizáciu zachovávajúce optické vlákno
- n **Ak $s = 1/2$** \Rightarrow polarizácia nie je súhlasná

Zisk existuje pre svetlo, ktoré sa šíri súhlasne aj proti čerpaciemu zdroju

n **Kritický výkon:**

$$P_C = \frac{16A_e}{gsL_e} = \frac{16A_e\alpha}{gs[1 - \exp(-\alpha L)]}$$

n Je to výkon, pri ktorom výkon Stokesovho svetla je rovný čerpaciemu výkonu

V tomto prípade je 1/2 vstupného výkonu konvertovaná na Stokesov výkon

Typické hodnoty pre SiO₂ jednovidové vlákna:

- n **Šírka pásma zisku SRS: 10 000 GHz - 10 THz**
- n **Maximálna hodnota zisku: 7.10⁻² - 2.10⁻¹¹ cm/W**
- n **Frekvenčný posun: 0 - 15 000 GHz (okolo 0 - 120 nm)**
- n **Kritický výkon P_c: 1 - 5W**

- n Pre **jednokanálového prenosu** vzniká **SRS** v oboch smeroch. Spätňý signál môže negatívne pôsobiť na činnosť zdroja svetla (**LD**). Vo všeobecnosti je hodnota signálu stimulovaná **SRS** malá a pre jednokanálový prenos možno v **praxi tento vplyv zanedbať**
- n Pre **viackanálový prenos** existujú **presluchy** medzi jednotlivými kanálmi. Pri malých frekvenciách (veľkých vlnových dĺžkach) je svetlo zosilňované a pri veľkých frekvenciách (malých vlnových dĺžkach) je svetlo zoslabované
- n Pre **mieru presluchu** $< 0,5 \text{ dB}$, za predpokladu, že uvažujeme n - kanálový systém platí:

$$\Delta f n P(n - 1) < 330 \text{ GHz W}$$

kde:

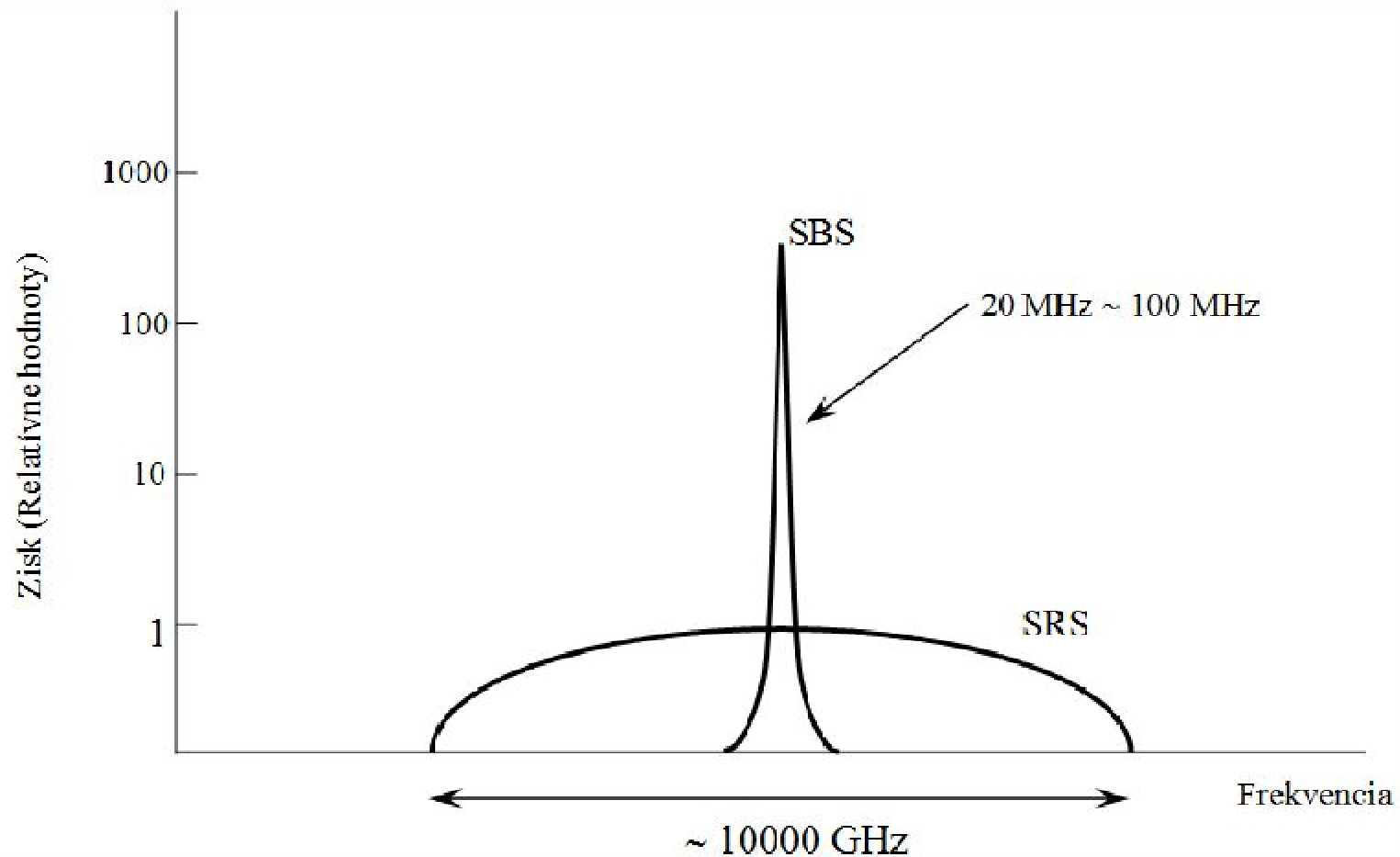
- n Δf je vzdialenosť medzi kanálmi
- n P je výkon na kanál

- n Pri odvodení vzťahu sa uvažoval **trojuholníkový profil zisku** so šírkou pásma $B = 15000$ GHz
- n **Presluch** (degradácia) vplyvom **SRS** je akceptovateľný, ak súčin celkového výkonu a celkovej optickej šírky pásma je menší ako 330 GHzW. Vzhľadom na to, že šírka pásma zisku B je veľmi veľká, jav **SRS** musí byť prepočítaný pre systémy **WDM**, ako aj **OFDM**.
- n **APLIKÁCIE SRS:**
 - Ramanov zosilňovač
 - Ramanov optický vláknový laser

Výhoda Ramanovho lasera spočíva v tom, že vzhľadom na veľkú šírku pásma B , môže byť **preladiťelný** v širokom pásme (50 nm)

7.2 SBS - STIMULOVANÝ BRILLOUINOV ROZPTYL

- n **SBS** vzniká v dôsledku interakcie svetla a **akustických vibrácií** v optickom vlákne
- n **SBS** je podobný ako **SRS**, ale existujú medzi nimi rozdiely:
 1. **rozdiel**: Brillouinov zisk je približne **o 2 rády väčší** ako Ramanov zisk
 2. **rozdiel**: Brillouinov frekvenčný posun a **šírka pásma zisku sú omnoho menšie** než v prípade **SRS**
- n **SRS** má veľkú frekvenčnú šírku pásma, zatiaľ čo **SBS** má malú šírku pásma zisku



Obr. 7.2 Porovnanie stimulovaného Ramanovho rozptylu (SRS) a stimulovaného Brillouinovho rozptylu (SB).

Typické hodnoty pre SiO₂ jednoividové optické vlákna sú:

n	Šírka pásma zisku SBS:	20 - 100 MHz
n	Maximálna hodnota zisku SBS:	4.10 ⁻⁹ cm/W
n	Frekvenčný posun SBS:	10 - 13 GHz

SBS vzniká len pre svetlo, ktoré sa šíri **v opačnom smere** ako je svetlo čerpaceho zdroja

Brillouinová šírka pásma zisku je malá ($\Delta f_B = 20 - 100\text{MHz}$), preto efektívny zisk aproximovaný $\Delta f_B / \Delta f_s$

Pre dostatočne veľký signál Δf_s ($\Delta f_s \gg \Delta f_B$) je zmenšený

- n Ak teda Δf_B je šírka pásma zisku,
 Δf_S je šírka spektrálnej čiary signálu
 Výkon vo vzdialenosti $x = -L$:

$$P(-L) = P(0) \exp \left[g \frac{\Delta f_B}{\Delta f_S} \frac{P_P s L_e}{A_e} \right]$$

- n **Kritický výkon P_c pre SBS:**

$$P_C = \frac{21 A_e}{g s L_e} \frac{\Delta f_S}{\Delta f_B} = \frac{21 A_e \alpha}{g s [1 - \exp(-\alpha L)]} \frac{\Delta f_S}{\Delta f_B}$$

- n Pre niektoré lasery používané pre koherentný prenos je Δf_S porovnateľné alebo menšie ako Δf_B
- n Ak pomer $\Delta f_S / \Delta f_B = 1$, potom **SBS** je veľmi dôležitý

PRÍKLAD 1.) pre P_c :

Parametre vlákna:

n $\omega = 4 \mu\text{m}$

n $L = 30 \text{ km}$

n $\alpha = 0,2 \text{ dB/km}$

n $s = 0,5$

n **SBS** parametre: $g = 4 \cdot 10^{-9} \text{ cm/W}$

n $\Delta f_B = 100 \text{ MHz}$

n Použijeme **LD**: $\Delta f_S < 100 \text{ MHz}$

n Potom: **kritický výkon $P_c = 3 \text{ mW}$** (podstatné zmenšenie oproti **SRS**)n Platí pre prenosový systém určený na **dial'kové prenosy** - využíva úzkopásmový laser a P_c je porovnateľné s výstupným výkonom **LD**

PRÍKLAD 2.)

Parametre vlákna:

n $\omega = 4 \mu\text{m}$

n $L = 5 \text{ km}$

n $\alpha = 0,5 \text{ dB/km}$

n $s = 0,5$

n **SBS** parametre: $g = 4 \cdot 10^{-9} \text{ cm/W}$

n $\Delta f_B = 100 \text{ MHz}$

Použijeme **LD**: $\Delta f_S = 1 \text{ GHz}$

n Potom: **kritický výkon $P_c = 140 \text{ mW}$**

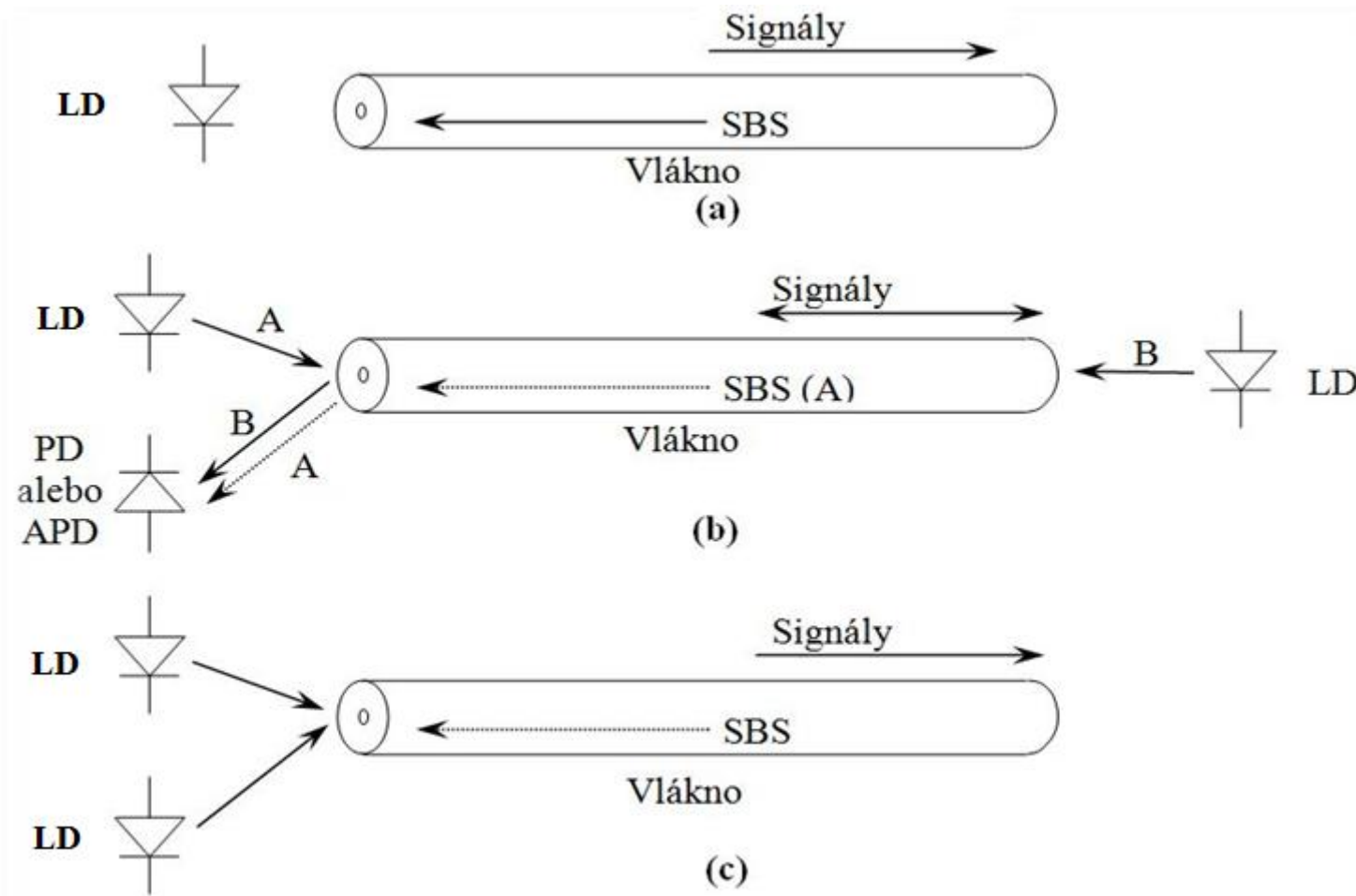
n Platí pre **prístupovú sieť** (prenosové systémy na menšie vzdialenosti - využíva **LD** so širším spektrom a **SBS** je menej dôležitým parametrom týchto systémov).

A. JEDNOKANÁLOVÝ PRENOS:

- n **SBS** je veľký (teda optický signál šíriaci sa v opačnom smere ako signál čerpaceho zdroja) v prípade jednokanálového prenosu, ak je vstupný výkon blízky kritickému výkonu P_c
- n Signál v spätnom smere možno potlačiť **použitím optického izolátora**
- n **SBS môže ohraničiť maximálny výkon naviazaný do systému**
- n Tento signál môže spôsobiť presluchy v prípade obojsmerného prenosu
- n V **TCM** systémoch toto nie je problém

B. MNOHOKANÁLOVÝ PRENOS:

- n V tomto prípade kanál interaguje s vláknom nezávisle kvôli malej šírke pásma Δf_B a malému frekvenčnému posunu
- n V spätnom smere vznikajú viaceré rozptyly
- n **Kritický výkon P_c nie je závislý od počtu kanálov**
- n P_c závisí od použitej modulačnej schémy



Obr. 7. 3 Stimulovaný Brillouinov rozptyl:
 (a) jednosmerný prenos,
 (b) obojsmerný prenos,
 (c) prenos viacerými kanálmi.

APLIKÁCIE:

- ✓ **Brillouinov zosilňovač**
- ✓ **Brillouin Optical - Fiber Time Domain Analysis (OTDA)**, t.j. **Brillouinová optická vláknová reflektometria v časovej oblasti**
- n Brillouinov prenos závisí od rýchlosti akustickej vlny, ktorá je ovplyvnená vibráciami v optickom vlákne
- n Brillouinov jav sa využíva v **reflektometrii** - akustický signál ovplyvňuje intenzitu spätne odrazeného signálu
- n **Brillouinov OTDA**, ktorý meria Brillouinov posun, **môže merať vibrácie v optickom vlákne**

7.3 SPM - VLASTNÁ FÁZOVÁ MODULÁCIA – SOLITÓNY

n Hoci je nelineárny **Kerrov jav** vznikajúci v sklenených optických vláknach veľmi malý, malá vlnová dĺžka ($\sim 1 \mu\text{m}$) a veľká interakčná dĺžka ($\sim 100 \text{ km}$), čo zodpovedá zhruba 10^{11} vlnovým dĺžkám, dávajú možnosť vzniku:

Vlastnej fázovej modulácie

- **SPM (Self Phase Modulation)**

n **Kerrov jav:**

$$n = n_0 + n_2 |E|^2$$

kde:

n_0 je intenzita elektrického poľa

n_2 je obyčajný index lomu

n_2 je intenzitne závislý index lomu

- n Hoci je **Kerrov koeficient pre SiO₂** pomerne malý: $0,6 \cdot 10^{-22}$ V/m, pri veľkom naviazanom optickom výkone:

$$P_0 = \frac{n_0 |E|^2}{2Z_0}$$

kde:

Z_0 je charakteristická impedancia,
vzniká dostatočne veľká intenzita elektrického poľa, čo umožňuje vznik **SPM**

Napríklad:

- n Pre $P_0 = 1$ W, **MM** optické vlákno s typickým priemerom jadra ~ 50 (μm)² je $E = 3 \cdot 10^6$ V/m, čo umožňuje vznik **SPM**

- n **Zmena fázy Δf svetla** preneseného vláknom na vzdialenosť L je:

$$\varphi(E) = \frac{2\pi n(E)}{\lambda} = 2\pi \frac{n_0 + n_0 |E|^2}{\lambda}$$

- n **SPM - vlastná fázová modulácia** a **intenzitne závislá fáza Df** , môžu spôsobovať degradáciu v **PM** alebo **PSK** systéme

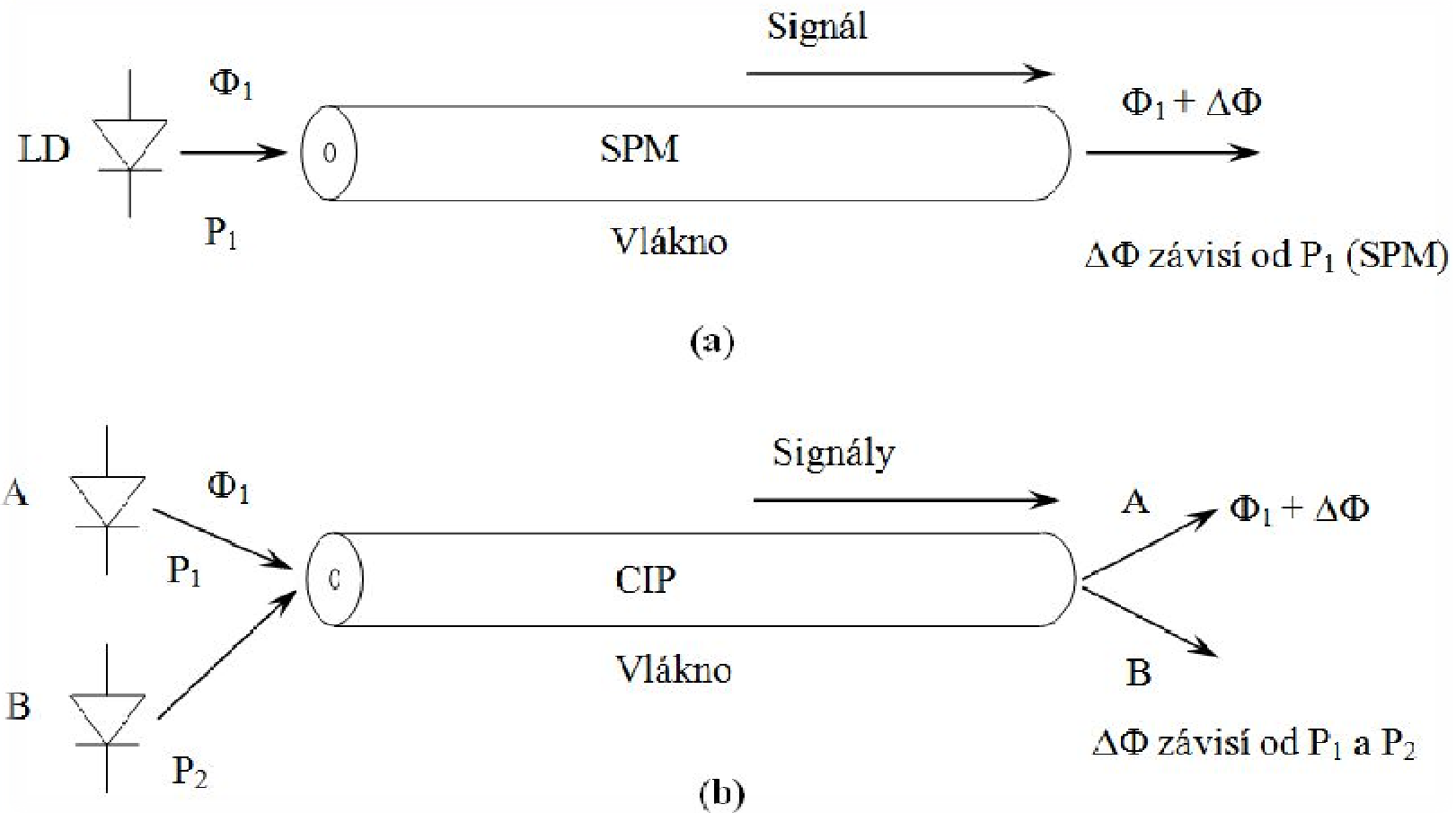
Pre jednokanálový prenos:

- q Ak amplitúda **PSK** modulovaného svetla je ideálna konštanta, neexistuje tu $\Delta\phi$ a teda nedochádza k degradácii

Pre viackanálový prenos:

Intenzitne závislá fáza $\Delta\phi$ pre jeden kanál (napr. kanál A) závisí od čiastkových intenzít všetkých kanálov - vzniká:

- q **CIP (Carrier Induced Phase Modulation) - Nosnou indukovaná fázová modulácia**
môže degradovať **PM** alebo **PSK** systém, keď čiastkové **AM (IM)** komponenty existujú pre fázovo modulované svetlo
Presluch v **PM** alebo **PSK** signáli je veľký, keď pracujeme s **AM** alebo **IM** optickými signálmi
- q **Napríklad:** Jeden kanál využíva **PSK** a (n-1) kanálov používa **IM** v n - kanálovom prenosovom systéme. **CIP** spôsobený celkovým optickým výkonom n - kanálov musí byť zohľadnený pri návrhu **PSK** systému



Obr. 7. 4 Vlastná fázová modulácia (**SPM**) a nosnou indukovaná fázová modulácia (**CIP**):
 (a) degradácia v jednokanálovom prenose,
 (b) degradácia vo viackanálovom prenose.

- n **SOLITÓNY** - sú zvláštne vlny vznikajúce v rôznych prostrediach, ktoré pôsobením nelineárnych javov **nevykazujú disperziu**
- n Ako prvý pozoroval **vznik solitónov lord Raighly** na vodnej hladine kanálu zčerenej pohybujúcou sa vlečnou loďou už v r. 1834
- n Vznik solitónov v optických vláknach je spôsobený:
SPM javom kompenzovaného javu disperzie skupinovej rýchlosti - **GVD (Group Velocity Dispersion Effect)**
- n **V súčasnosti sa uvažuje s využitím solitónov pre prenosové systémy veľkých rýchlostí, určené na veľké vzdialenosti**

n Solitón prvého rádu:

$$\varphi(t) = \varphi_0 \operatorname{sech}^2\left(\frac{t}{T}\right) \quad (7.17)$$

n Perióda solitónu:

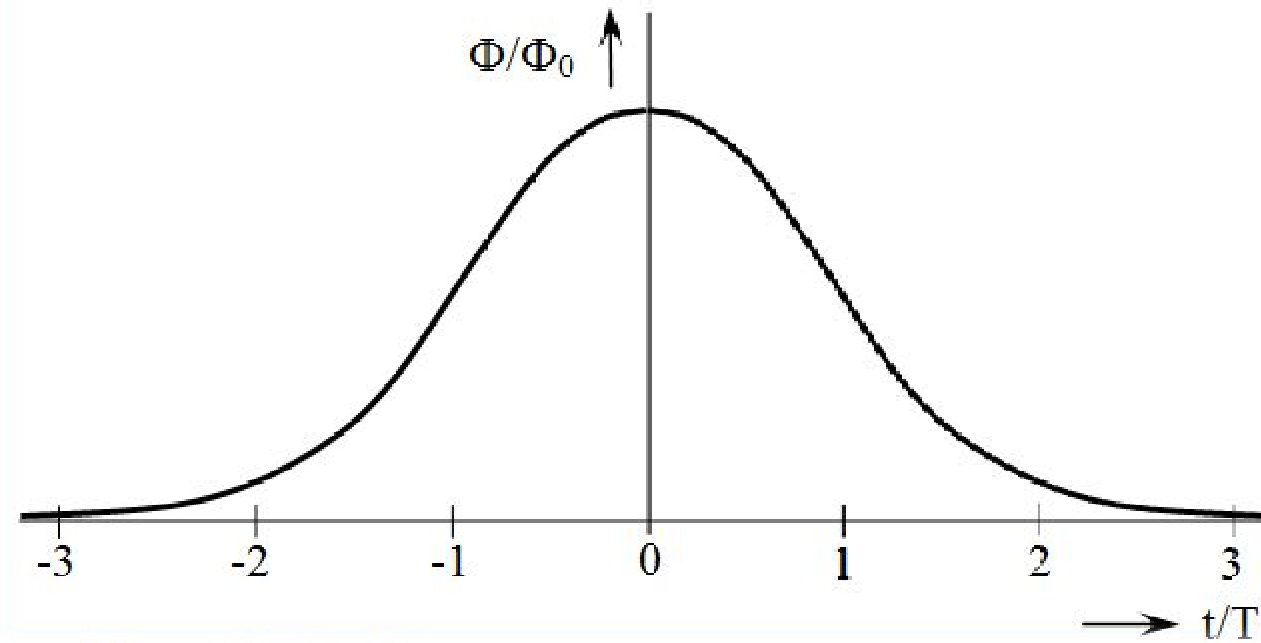
$$T = \left[\frac{\lambda^3 D_m}{2\pi^2 c n_2 E^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7.18)$$

kde:

D_m je materiálová disperzia

n Tvar solitónového impulzu

n Energia obsiahnutá v solitónovom impulze je $2 f_0 T$



Obr. 7.5 Tvar solitónového impulzu.

- n **Napríklad:** pre naviazaný výkon $P_0 = 100 \text{ mW}$ pri $\lambda = 1550 \text{ nm}$ je hustota optického výkonu $I_0 = 2 \cdot 10^9 \text{ W/m}^2$, čo zodpovedá $E = 10^6 \text{ V/m}$
- n Pre vlákno s $D_m = 15 \text{ ps / (km.nm)}$ a $n_2 = 0,6 \cdot 10^{-22} \text{ (m/V)}^2$ dostaneme pre periódu solitónu $T = 12,5 \text{ ps}$ a energiu v impulze $2,5 \text{ pJ}$
- n **Podmienka tvorby solitónu prvého rádu:**

$$n_2 |E|^2 > \frac{\alpha \lambda}{2\pi} \quad (7.19)$$

kde:

a je tlmenie optického vlákna

- n Pre optické vlákno s tlmením $\alpha = 0,22 \text{ dB/km} \cong 5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^{-1}$ je potrebné pre vytvorenie solitónu prvého rádu $E > 4,5 \cdot 10^5 \text{ V/m}$, čo zodpovedá $I_0 > 4,0 \cdot 10^8 \text{ W/m}^2$ (uvažujeme jadro $\sim 50 \text{ (}\mu\text{m)}^2$) a výkon v impulze je 20 mW

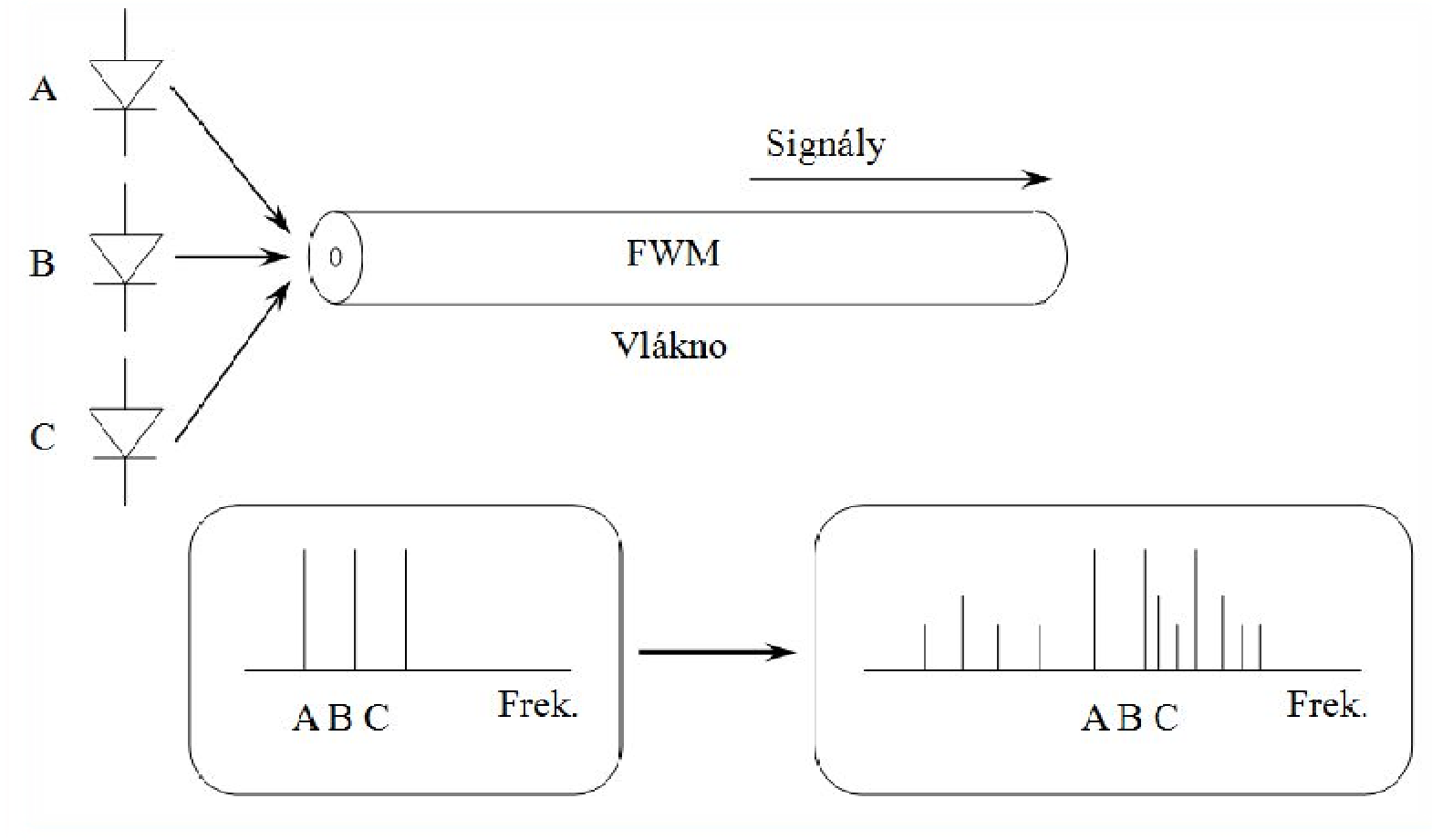
- n **Pre vytvorenie solitónu n - tého rádu potrebujeme n - krát väčší prahový výkon**
- n **Solitóny vyšších rádov** majú viac komplikované tvary
- n **Priestorovú periódu**, t.j. vzdialenosť, na ktorej solitón prvého rádu zmení svoj tvar, možno určiť zo vzťahu:

$$\Lambda = \frac{\pi^2 T^2}{\lambda^2 D_m}$$

- n Po dosadení konkrétnych hodnôt použitých vyššie, dostaneme $\Lambda = 13$ km (je to vzdialenosť, kde sa zmení fáza solitónu o $\pi / 4$)
- n V súčasnosti sa intenzívne pracuje na **výskume optických kounikačných systémov s využitím solitónov**
- n Experimentálne bol overený **prenos solitónov** s využitím **EDFA** na vzdialenosť až **14 000 km bez skreslenia**

7.4 FWM - ŠTVORVLNOVÉ ZMIEŠAVANIE

- n **Zmiešavanie dvoch alebo viacerých optických vln rôznych vlnových dĺžok v optickom vlákne produkuje nové optické vlny na iných vlnových dĺžkach**
- n **Jav je známy ako:**
 - Štvorvlnové zmiešavanie**
 - FWM (Four Wave Mixing)**
- n **FWM je analogický jav ako IMP v oblasti elektrických vln**
- n **FWM je veľmi dôležitý pri návrhu viackanálových prenosových systémov, špeciálne pre OFDM systémy, pretože FWM v nich spôsobuje presluch**



Obr. 7.6 Štvorvlnové zmiešavanie (FWM).

- n V procese zmiešavania sa vyskytujú 4 fotóny:

Frekvencie f_i , f_j , f_k a konštanty šírenia b_i , b_j , b_k

Produkt $f_{i,j,k}$ a $b_{i,j,k}$

Energia fotónu je hf (h je Plancková konštanta)

- n **Zákon zachovania energie:**

$$f_{i,j,k} = f_i + f_j + f_k$$

- n **Zákon zachovania hybnosti:**

$$\beta_{i,j,k} = \beta_i + \beta_j - \beta_k$$

- n **Fázové prispôbenie fotónov**

Nie vždy je toto prispôsobenie vykonané:

$$\Delta\beta = \beta_{i,j,k} - (\beta_i + \beta_j - \beta_k)$$

kde:

n $\Delta\beta$ je **fázové neprispôsobenie**

Výkon generovaného optického žiarenia pre vlákno dĺžky L je:

$$P_{i,j,k}(L) = K \frac{P_i P_j P_k}{A_e^2} \left[\frac{[\exp(j\Delta\beta - \alpha)L] - 1}{j\Delta\beta - \alpha} \right]^2 \exp(-\alpha L)$$

kde:

n K je konštanta,

n P_i, P_j, P_k sú výkony pre optické vlny s f_i, f_j, f_k

n A_e je efektívna plocha vidu

n α je tlmenie optického vlákna

Účinnosť FWM závisí od:

- n **Dĺžky vlákna L**
- n **Ťmenia optického vlákna a**
- n **Plochy základného vidu**
- n **Čerpaceho výkonu**
- n **Fázového neprispôsobenia Db**

Fázové neprispôsobenie Db ovplyvňuje frekvenčný odstup kanálov Δf a chromatická disperzia optického vlákna

Preto účinnosť **FWM** klesá s rastúcou separáciou kanálov Δf

Táto účinnosť je zanedbateľná (t.j. **efekt FWM sa neuplatní**):

pri separácii kanálov $\Delta f > 30 \text{ GHz}$ pre obyčajné **SM** optické vlákno

pri separácii kanálov $\Delta f > 100 \text{ GHz}$ pre **SM** optické vlákna
s posunutou disperziou (**DSF**)

v oblasti vlnových dĺžok okolo $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$