

Nelinearni pojavi v optičnem vlaknu

- Uvod: kaj je optična nelinearnost?
- Kerrov pojav
 - lastna fazna modulacija (Self-Phase Modulation; SPM)
 - križna fazna modulacija (Cross-Phase Modulation; XPM)
 - štirivalovno mešanje (Four Wave Mixing; FWM)
- Posledice Kerrove nelinearnosti
- Pojavi nelinearnega sipanja
 - stimulirano Ramanovo (Stimulated Raman Scattering; SRS)
 - stimulirano Brillouinovo (Stimulated Brillouin Scattering: SBS)

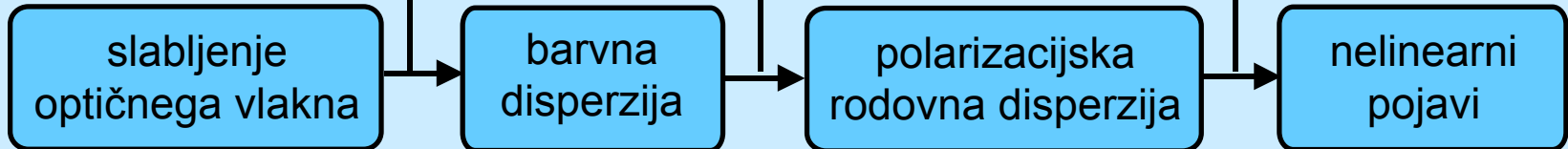
Stopnje razvoja optičnih komunikacij

Optične komunikacije so v zelo kratkem času doživele izredno buren razvoj. Vidikov tega razvoja je več, izstopa pa hitro povečevanje bitne hitrosti.

- zgodnja '70: zmanjšanje izgub vlakna, pojavi se izboljššan polprevodniški laser
- postopno zmanjševanje izgub vlakna
- zgodnja '80: izum optičnega ojačevalnika

- pozna '80: razvoj DFS kot odgovor na problem disperzije,
- različne tehnike kompenzacije disperzije

- pozna '90: sukanje vlakna z namenom zmanjševanja PMD,
- iskanje kompenzacijske tehnike za PMD

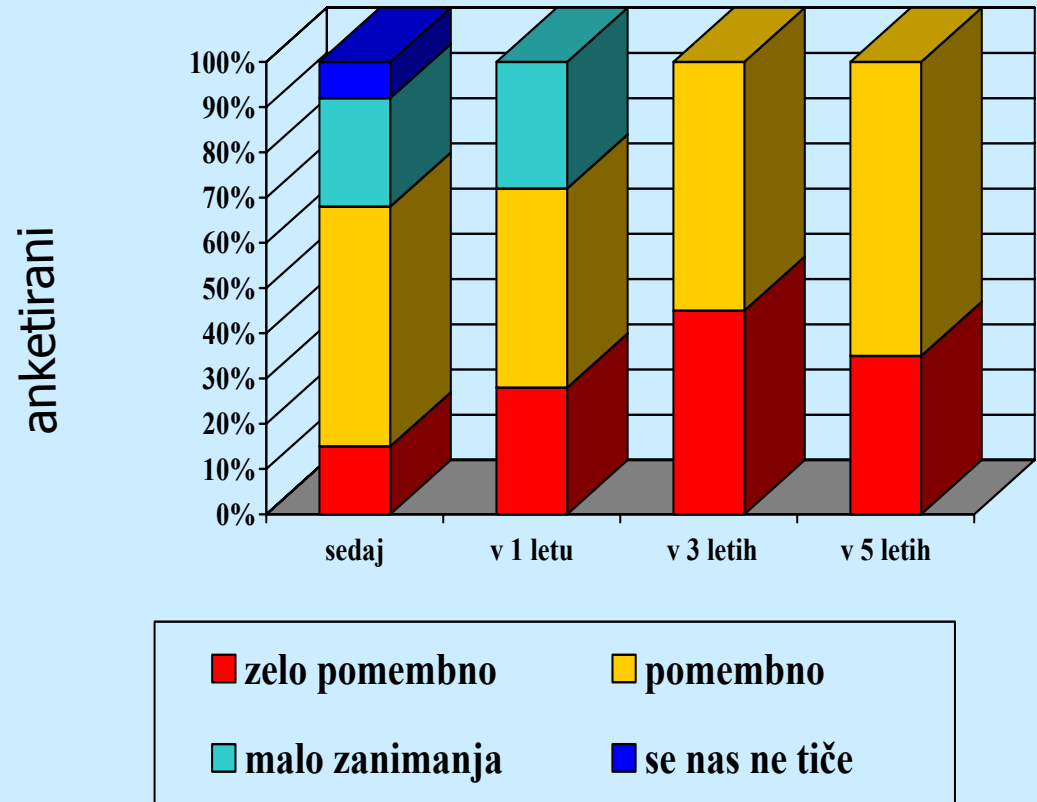


fizikalni omejitveni dejavniki pri prenosu na velike razdalje

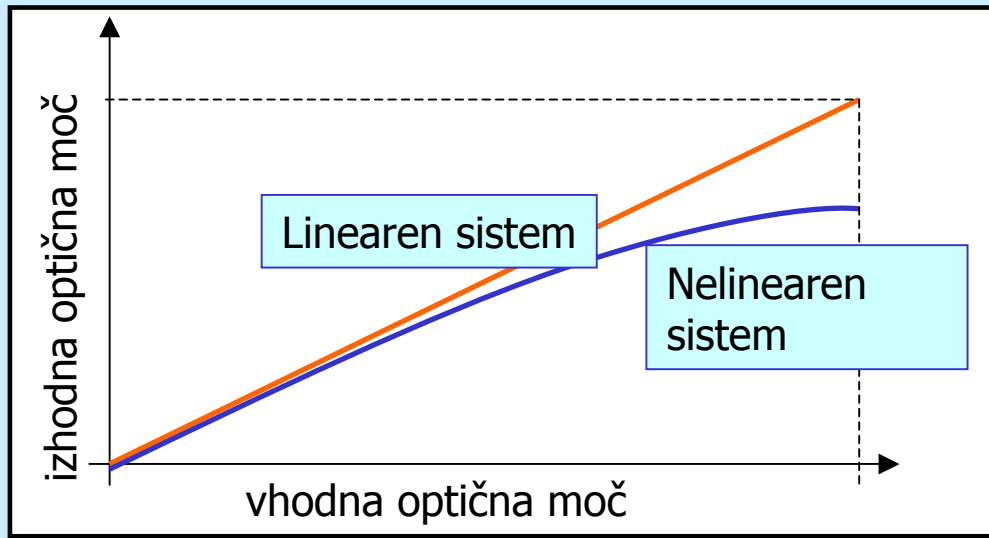
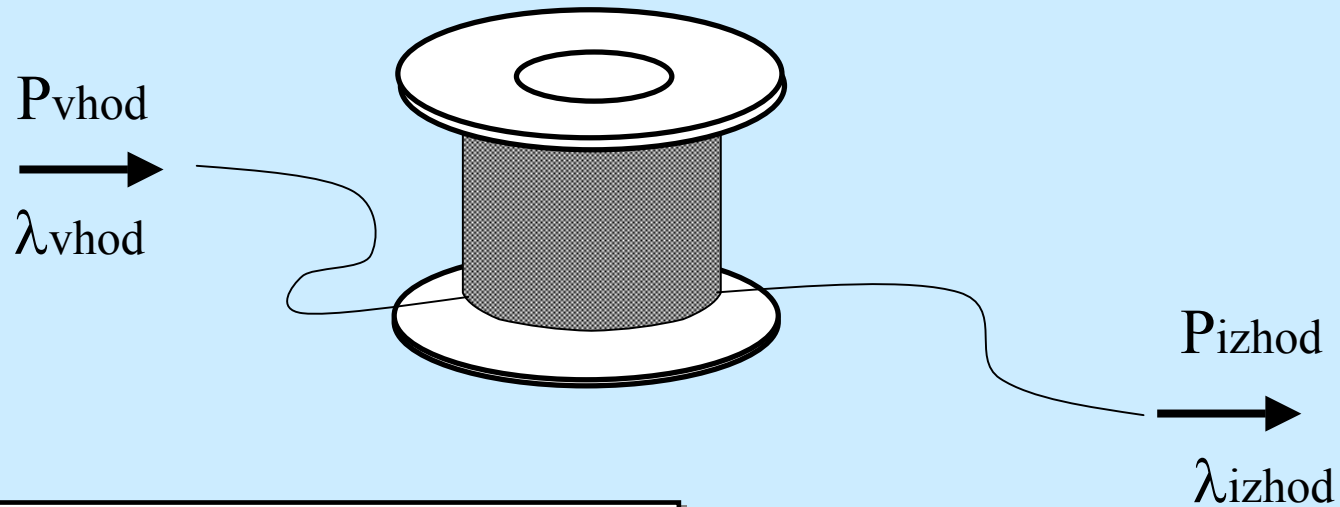
Kdo potrebuje meritve parametrov nelinearnosti?



Pomembnost nelinearnih pojavov (1999)



Kaj je optična nelinearnost?



- Linearni sistem:
izhod je linearno sorazmeren vhodu
- Nelinearni sistem:
izhod ni linearno v razmerju z vhodom

Linearni in nelinearni sistem

	linearna snov	nelinearna snov
lomni količnik	neodvisen od gostote moči	odvisen od gostote moči
hitrost svetlobe	neodvisna od gostote moči	odvisna od gostote moči
načelo superpozicije	velja	ne velja
valovna dolžina svetlobe	se ne spremeni	se lahko spremeni
interakcija svetlobe s svetlobo	ni prisotna	poteka

Zakaj je pomembna nelinearnost optičnega vlakna?

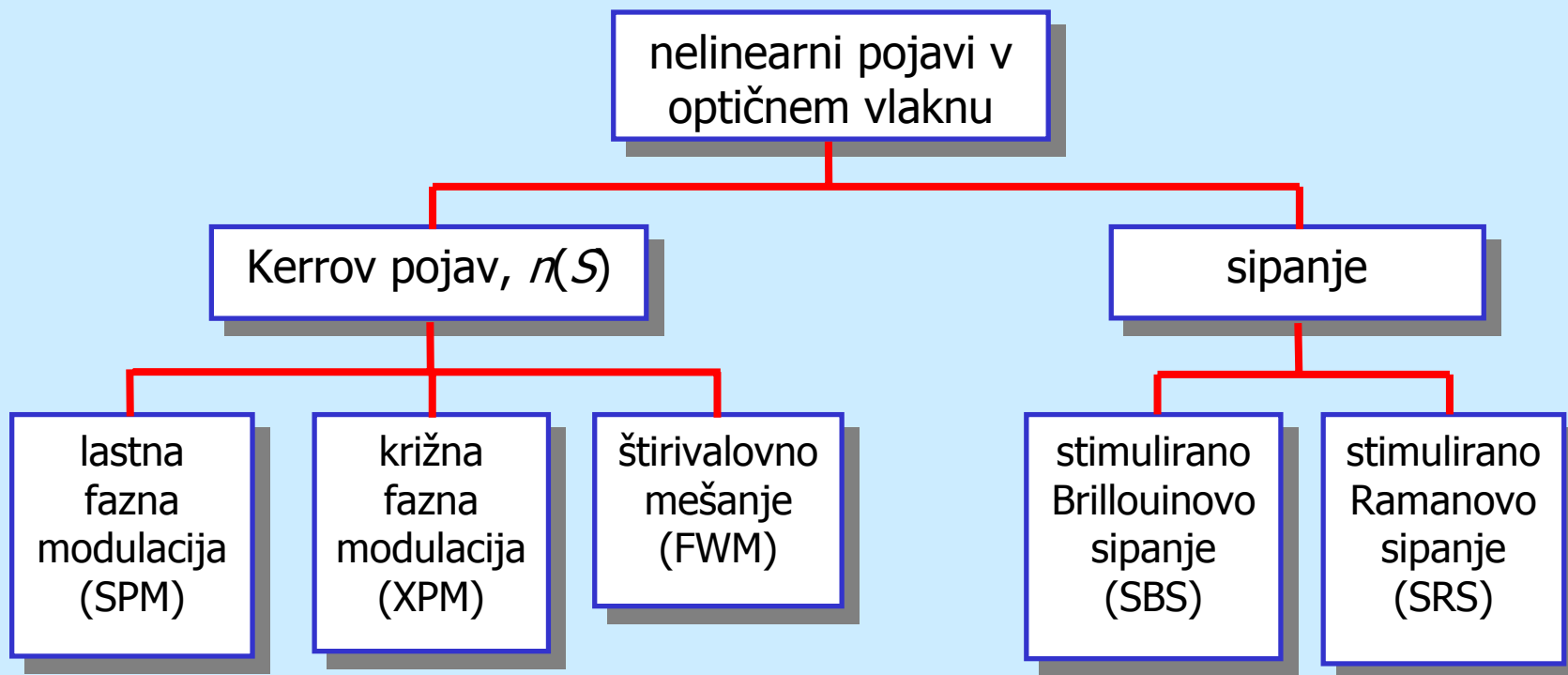
Želena uporaba nelinearnih pojavov:

- pretvorba valovne dolžine pri WDM sistemih,
- hitro optično demultipleskiranje pri OTDM sistemih,
- optična regeneracija,
- nedisperzni prenos s solitoni,..

Neželene posledice nelinearnih pojavov:

- razširitev spektra,
- neželena pretvorba valovne dolžine,
- presluh v WDM sistemih,
- omejitve moči signala,
- popačenje signala,..

Tipi nelinearnih pojavov



Kerrov pojav

Lomni količnik je sestavljen iz linearne in nelinearne dela.

$$n(S) = n_0(\omega) + n_2 \cdot S$$

$$n_2 \approx 2,5 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2 / \text{W}$$

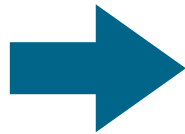
Lomni količnik je odvisen od gostote moči.

SMF

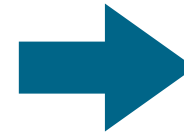
$$A_{\text{eff}} \approx 80 \text{ } \mu\text{m}^2$$

$$n_0(1550 \text{ nm}) \approx 1,451$$

$$P = 20 \text{ dBm (100 mW)}$$



$$S \approx 1,25 \cdot 10^9 \text{ W/m}^2$$



$$\Delta n = n_2 \cdot S \approx 3 \cdot 10^{-11}$$

Tipi nelinearnih pojavov

lastna
fazna
modulacija
(SPM)

Lastna fazna modulacija (SPM)

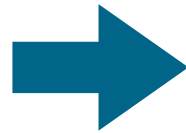
SMF

$$A_{\text{eff}} \approx 80 \mu\text{m}^2$$

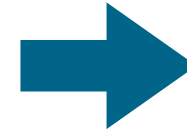
$$n_0(1550 \text{ nm}) \approx 1,451$$

$$P = 20 \text{ dBm (100 mW)}$$

$$L = 50 \text{ km}$$



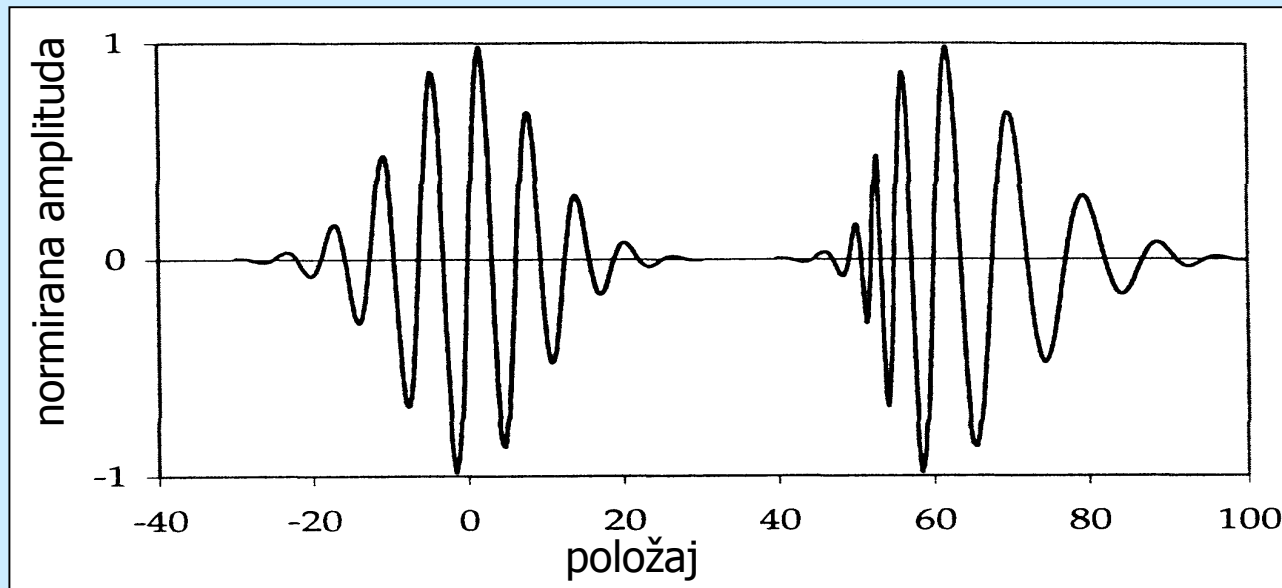
$$\Delta n = n_2 \cdot S \approx 3 \cdot 10^{-11}$$



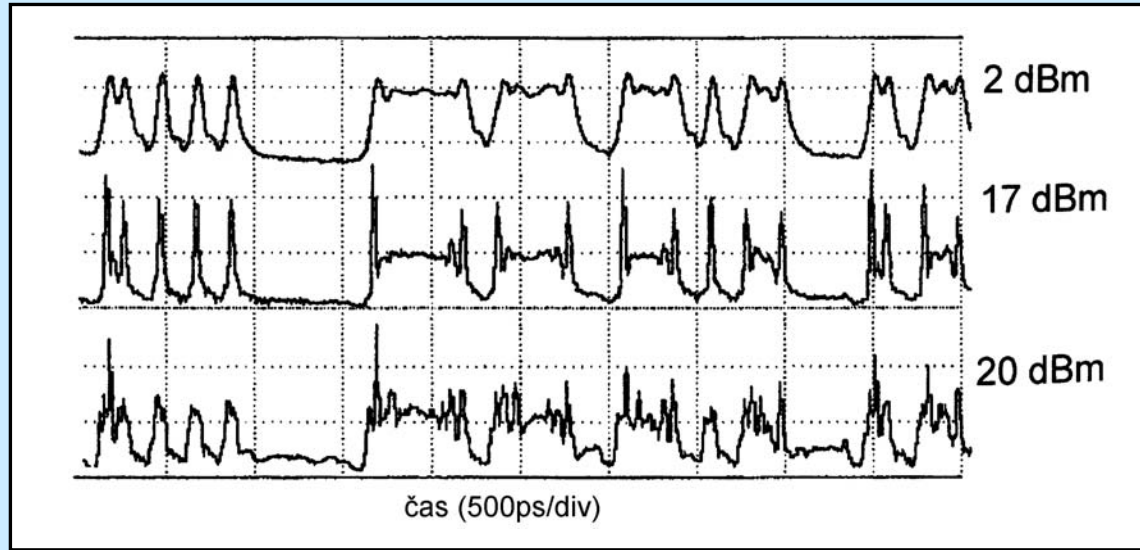
$$\varphi = -\frac{2\pi}{\lambda} \cdot L \cdot \Delta n$$

$$\varphi \approx -2\pi$$

Spremembe intenzitete vodijo do različnih faznih premikov med delom impulza z visoko in nizko intenziteto.



SPM pri sistemih z eno valovno dolžino



- Spektralna razširitev impulza:

- intenzitetni šum ☹️

- kompenzacija disperzije 😊

Tipi nelinearnih pojavov

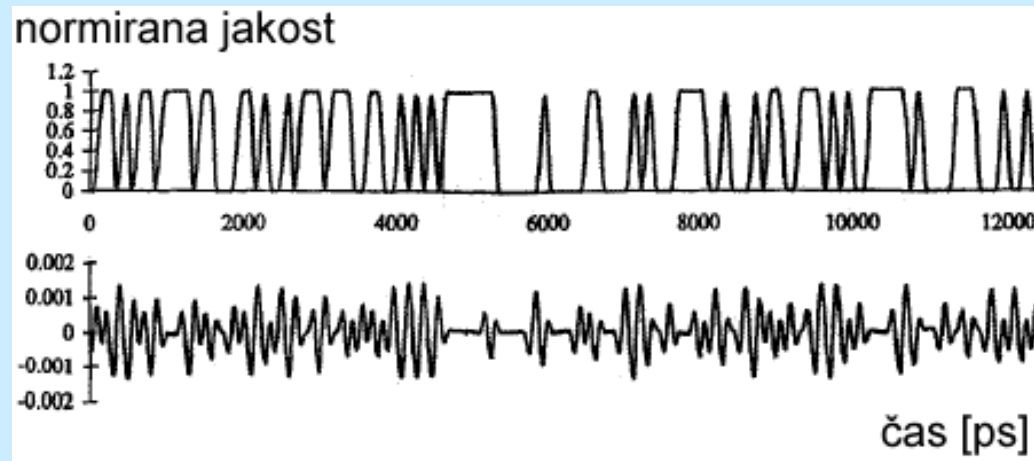
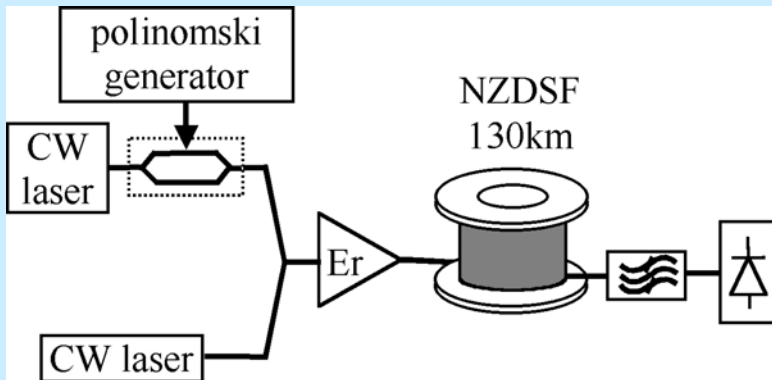
križna
fazna
modulacija
(XPM)

Prečna fazna modulacija (XPM)

- Lomni količnik je funkcija intenzitet vseh signalov v optičnem vlaknu.

Pri večkanalnih WDM sistemih:



- Spreminjajoča moč signala pri eni valovni dolžini fazno modulira istosmerno razširajoče signale.



- Kanali postanejo spektralno širši:
 - presluh zaradi prekrivanja spektra
 - povečana razširitev impulza zaradi kromatske disperzije

Prečna fazna modulacija (XPM)

Pojav XPM je mogoče zmanjšati:

- Zmanjšanje optične moči 
 - zmanjša S/N sistema
- povečanje razmika med WDM kanali na > 100 GHz
 - zmanjša maksimalno število kanalov 

Uporaba XPM za izgradnjo optičnih elementov s pomočjo nelinearnega zančnega zrcala:



- pretvornik valovne dolžine
- optični časovni demultiplekser

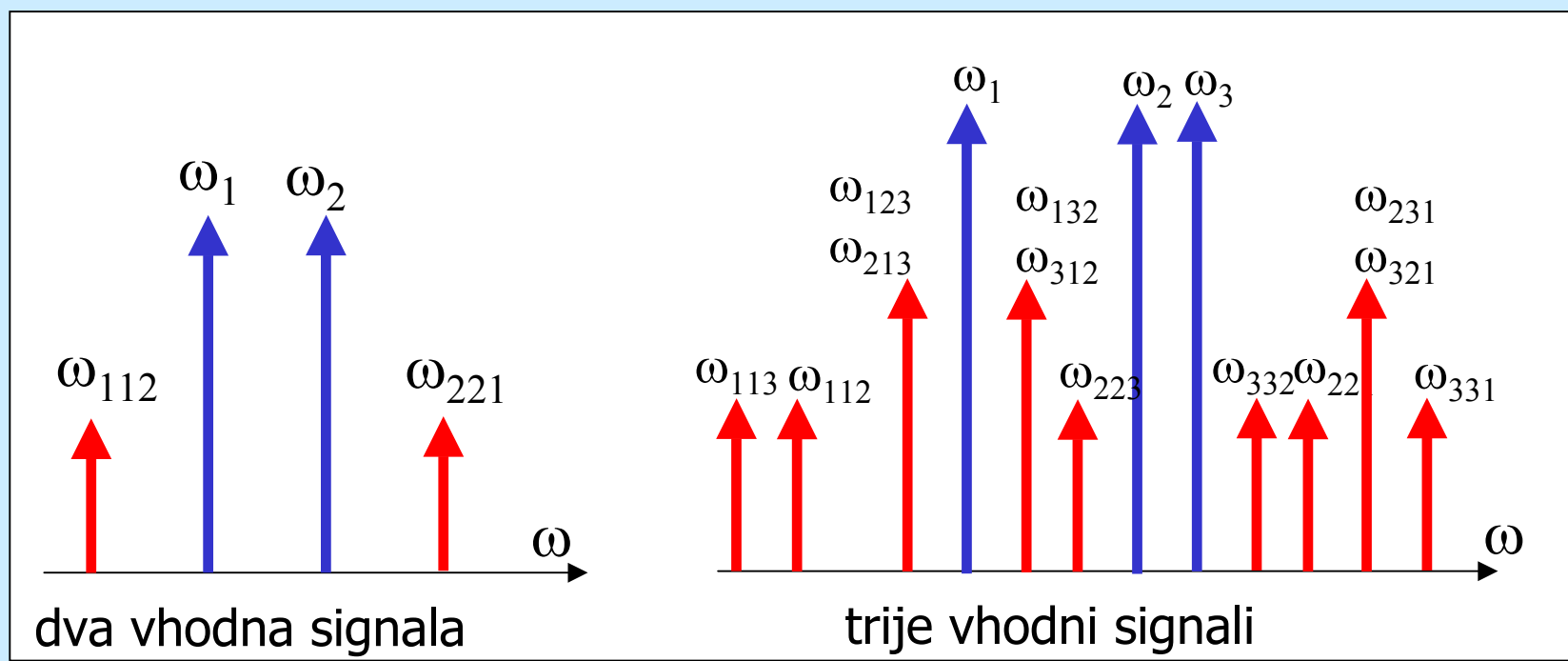
Tipi nelinearnih pojavov

štirivalovno
mešanje
(FWM)

Štirivalovno mešanje (FWM)

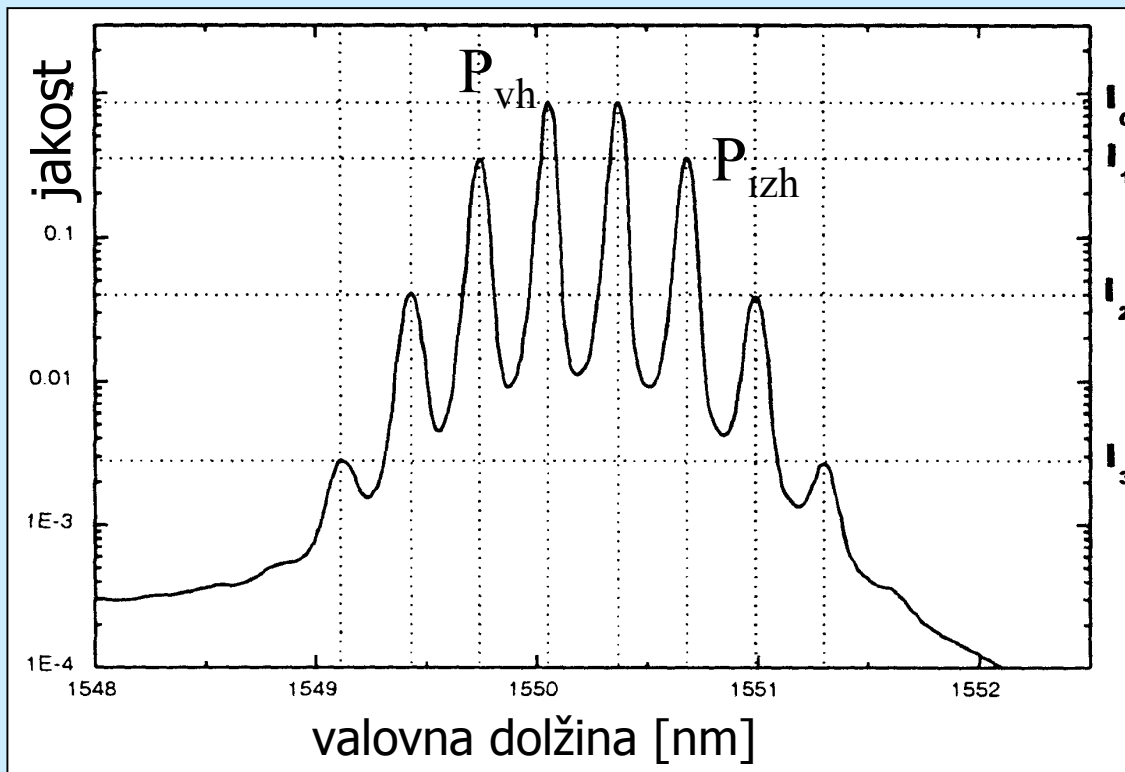
Medsebojno vplivanje signalov na dveh ali več valovnih dolžinah vodi v generiranje novih valovnih dolžin.

➔ nastanek intermodulacijskih produktov



Štirivalovno mešanje (FWM)

Primer izhodnega spektra pri dveh vhodnih CW signalih.



$$P_{izh} \propto \left(\frac{n_2}{A_{eff}} \right)^2 \cdot \frac{P_{vh}^3}{\Delta f^4 \cdot D^2}$$

FWM in ITU-T DWDM mreža

Štirivalovno mešanje je najbolj učinkovito pri:

- Kanalih, ki so blizu

DWDM uporablja razmik manjši od 1nm ☹️

- Enakih frekvenčnih razmikih

ITU mreža ima enake 100 GHz razmike ☹️

- Delovanje poleg valovne dolžine, kjer je disperzija vlakna nič

Disperzijsko premaknjeno vlakno (G.653) ima λ_0
pri 1550 nm ☹️

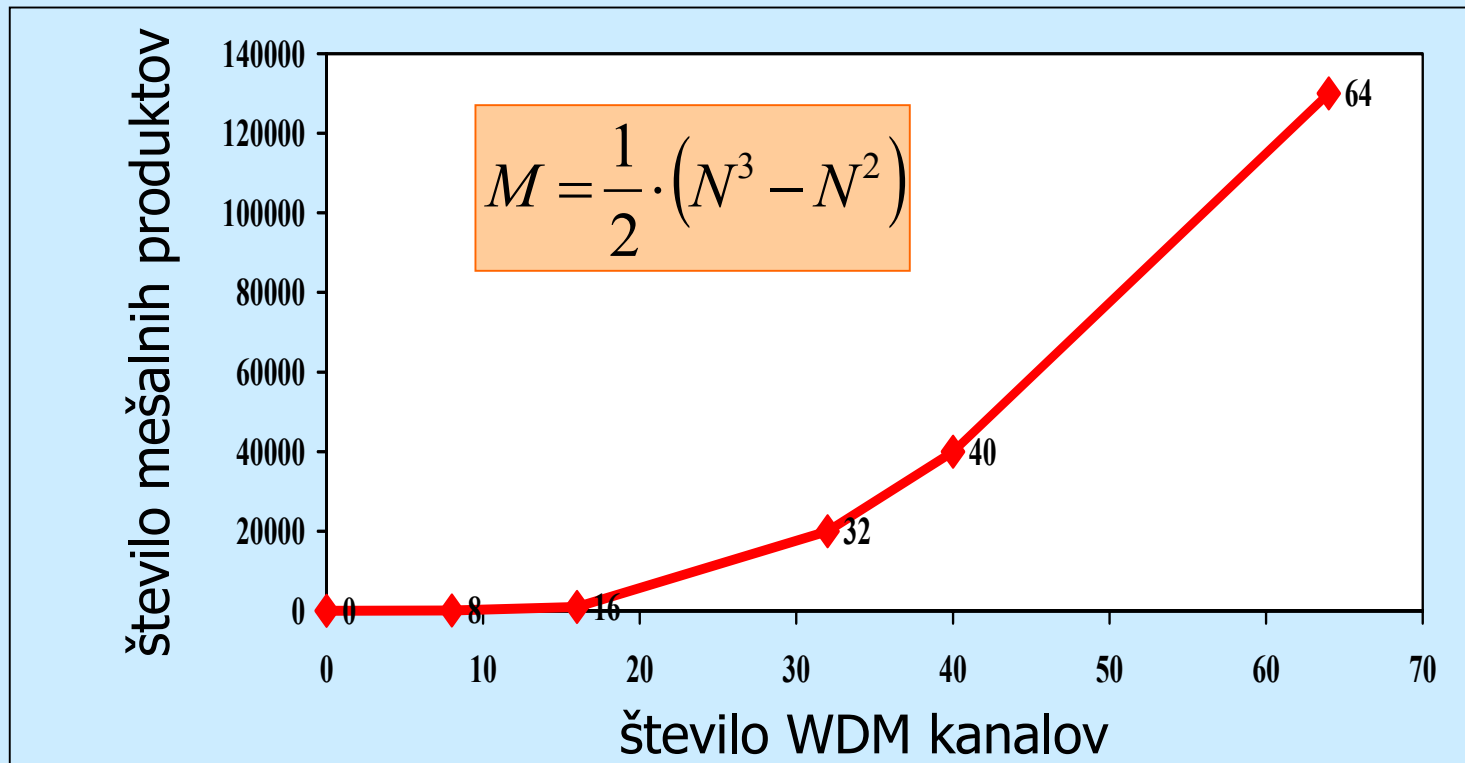
FWM in ITU-T DWDM mreža

Pojav štirivalovnega mešanja je mogoče zmanjšati:

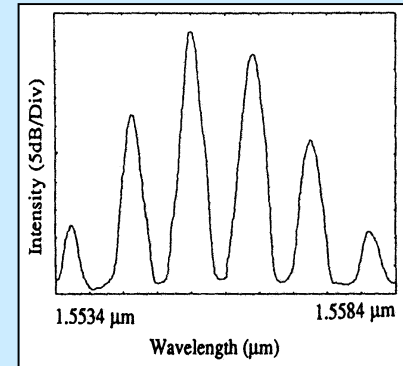
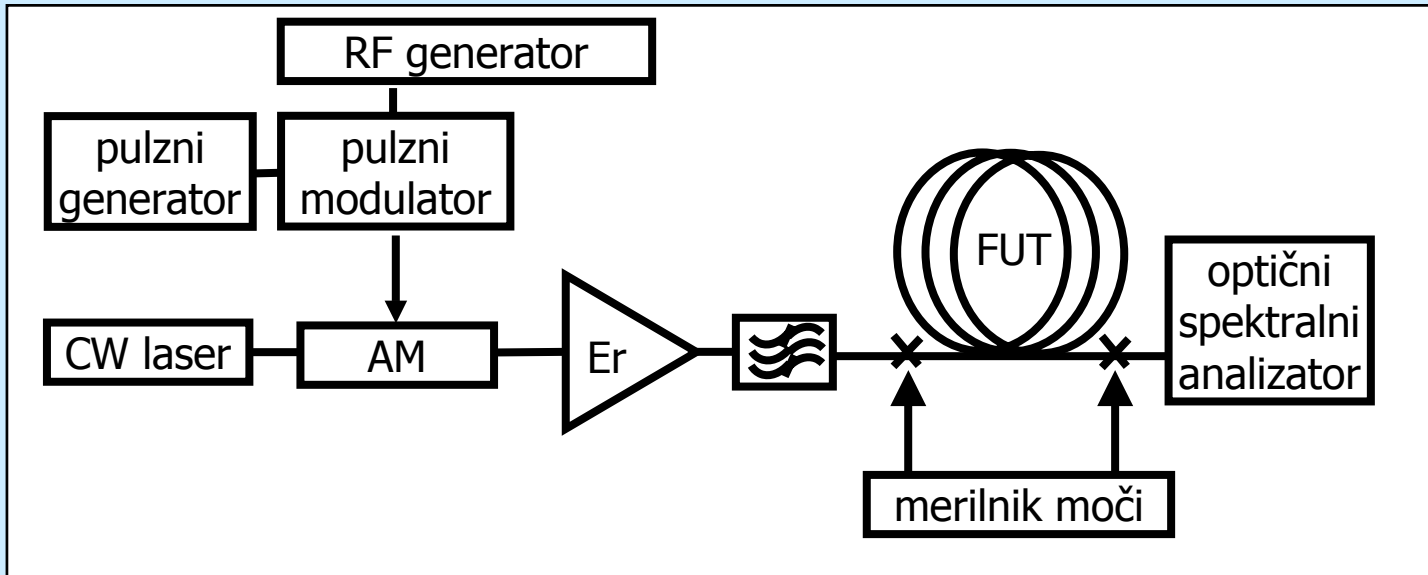
- povečanje razmika med kanali
zmanjšati maksimalno število kanalov v EDFA oknu ☹️
- uporaba neenakih razmikov
postane zapleteno pri velikem številu kanalov ☹️
- delovanje stran od valovne dolžine, kjer je disperzija nič
zahteva običajno ali nenično disperzijsko premaknjeno
vlakno pri 1550 nm 😊

Štirivalovno mešanje (FWM)

Število mešalnih produktov dramatično narašča s številom WDM kanalov.



Dvofrekvenčna merilna vezava za merjenje nelinearnosti optičnega vlakna



B. Batagelj in M. Vidmar, patent 2002

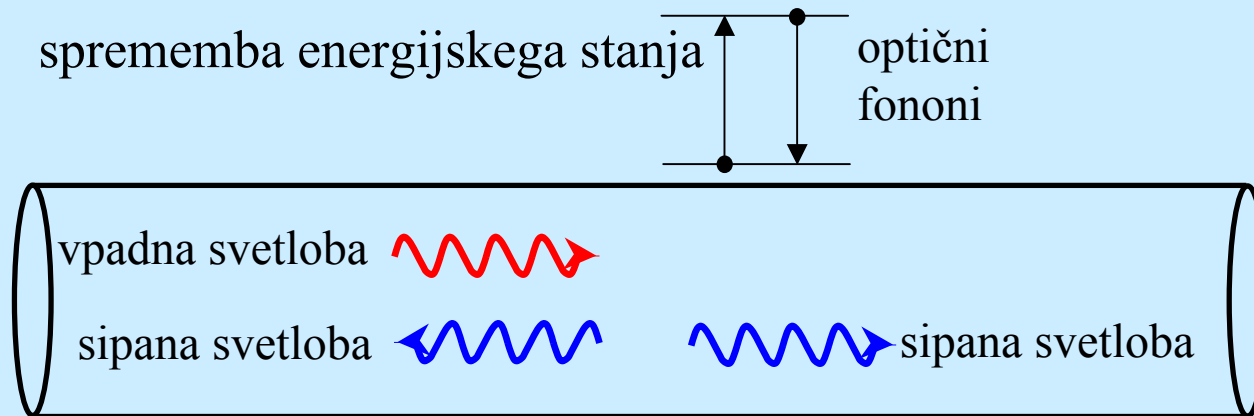


Tipi nelinearnih pojavov

stimulirano
Ramanovo
sipanje
(SRS)

Ramanovo sipanje

- Vpadni valovi izgubijo energijo s povzročitvijo vibracijskih rodov silicijevih molekul in so ponovno oddani na nižjih frekvencah (=daljših valovnih dolžinah).



- Signali pri krajših valovnih dolžinah lahko ojačijo signale z daljšimi valovnimi dolžinami s pomočjo Ramanovega ojačenja.
- Enokanalni sistemi izgubijo velik del optične moči zaradi SRS, ko je prekoračen Ramanov prag.

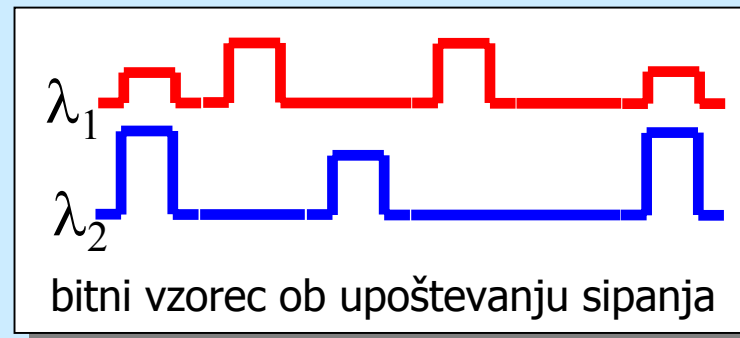
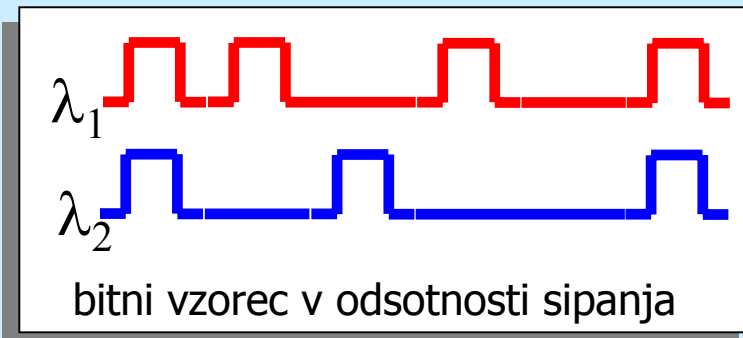
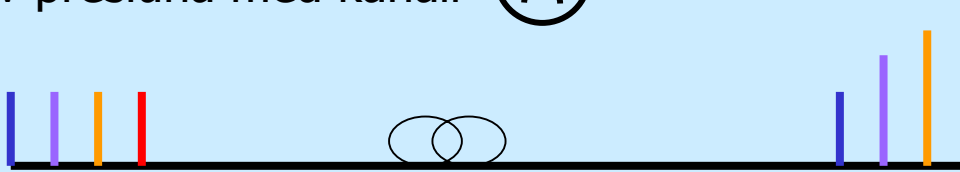
Sistemske posledice zaradi SRS

Enokanalni sistemi:

- Zmanjšanje S/N (malo verjetno za moči pod 1 W) ☹️

Večkanalni sistemi (WDM):

- Širokopasovni optični vlakenski Ramanovi ojačevalniki 😊
- Črpanje kanalov dolgih valovnih dolžin s kanali kratkih valovnih dolžin
 - zmanjšanje S/N celotnega sistema ☹️
 - pojav presluha med kanali ☹️



$$\lambda_1 < \lambda_2$$

Odpravljanje sistemskih posledic zaradi Ramanovega sipanja

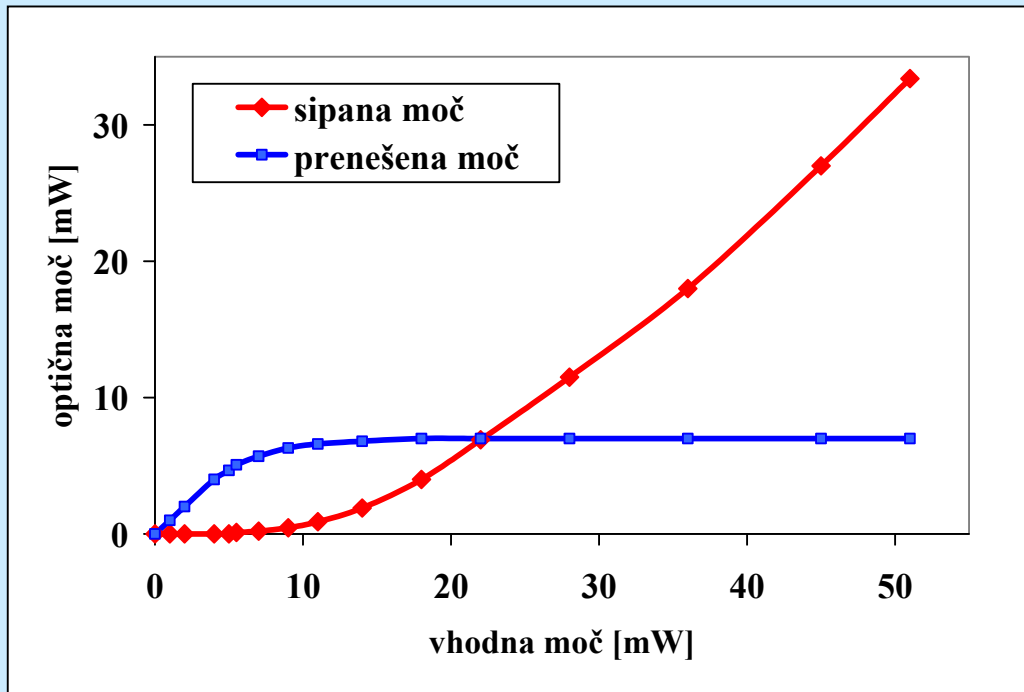
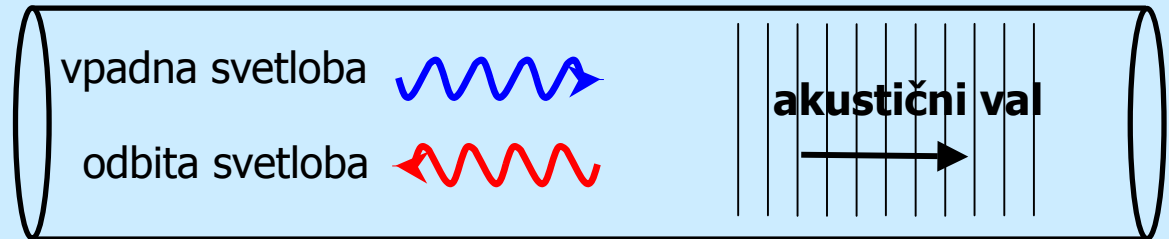
- Zmanjšanje optičnih moči
 - Zmanjša S/N 😞
- Uporaba filtrov pri enokanalnih sistemih
 - Odpravi Ramanov šum, ampak moč signala je še vedno oslABLJENA 😞
- Omejitev razpona valovnih dolžin pri WDM sistemih
 - Omeji maksimalno število kanalov 😞
- Zmanjšanje frekvenčnega razmika med kanali
 - Oteži ločevanje kanalov 😞

Tipi nelinearnih pojavov

stimulirano
Brillouinovo
sipanje
(SBS)

Brillouinovo sipanje

- Vpadni valovi s pomočjo elektroakustike generirajo nazaj sipano svetlobo z Dopplerjevim premikom.
- Frekvenčni premik nazaj sipane svetlobe znaša ~ 10 GHz.



Primerjava nazaj sipanega proti napredujočemu optičnemu valu.

Odpravljanje sistemskih posledic zaradi Brillouinovega sipanja

Posledica v sistemu:

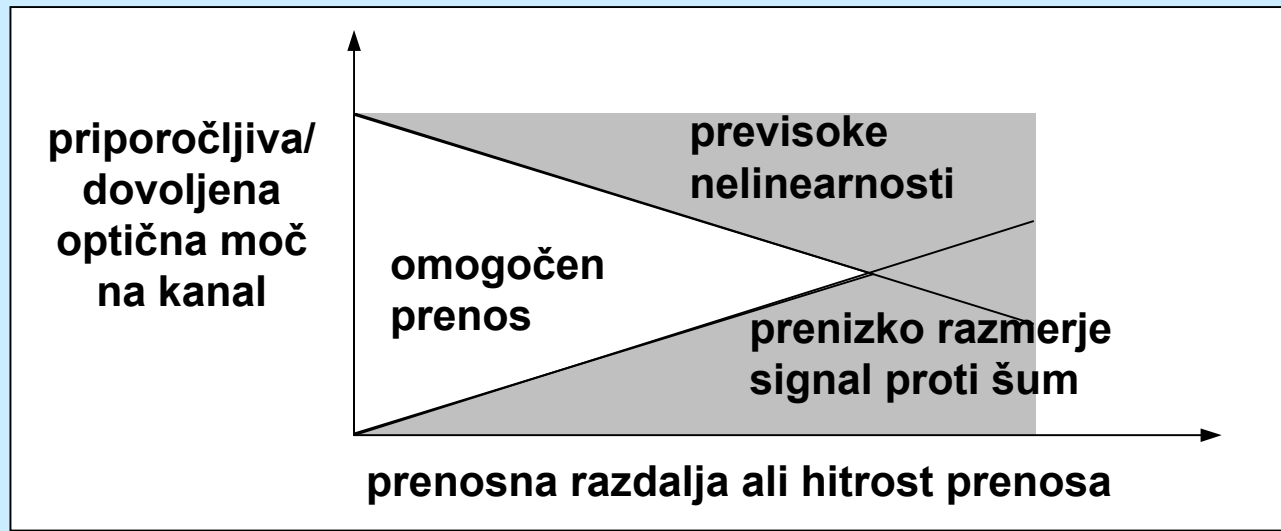
- maksimalna optična moč je "vklenjena" 😞
- nastanek motečega odbitega vala (odpravi ga optični izolator)
- šum pri dvosmernih zvezah 😞 😞

Kako zmanjšamo SBS:

- Povečanje spektralne širine optičnega signala 😊
 - drgetajoči izvor valovne dolžine
 - fazno moduliran signal
 - uporaba visokih bitnih pretokov, ki razširijo spekter nosilca

Sklep

EDFA in WDM sta povečala optično moč → nelinearni pojavi so postali pomembni



- Nelinearnosti je mogoče izkoristiti za kompenzacijo disperzije, optično časovno demultipleksiranje in pretvorbo valovne dolžine.
- Nelinearnosti so zelo pomembne pri velikih razdaljah in visoki optični moči.
- Natančno merjenje n_2 je potrebno za opredelitev optičnega omrežja v prihodnosti.