

Digitalni sistemi prenosa

Profesor dr Miroslav Lutovac

- Optički sistemi
- mr Danilo Lalović
- Preporučena knjiga:
Telekomunikacioni sistemi
Vladanka Aćimović-Raspopović, Slobodan Lazović

Nelinearni efekti

- Sve dok je nivo optičke snage unutar optičkog vlakna mali, vlakno se može tretirati kao linearni medijum, što znači da su slabljenje i indeks prelamanja nezavisni od snage signala
- Kada nivo optičke snage značajno poraste optičko vlakno postaje nelinearni medijum, odnosno slabljenje i indeks prelamanja nisu više nezavisni od snage signala

Tipovi nelinearnih efekata optičkog vlakna

Jednokanalni

Kerr-ov efekat

$$n = n(\omega) + n_2 \frac{P(t)}{A_{\text{eff}}}$$

Self-phase modulation - sopstvena fazna modulacija (**SPM**)

Faza optičkog signala modulirana proporcionalno snazi signala.

Stimulated Brillouin scattering - stimulirano Brillouinovo rasejanje (**SBS**)

Rasejanje svetlosnog signala u pravcu izvora;

Povećanje slabljenja optičkog vlakna.

Više kanalni /WDM

Cross-phase modulation - unakrsna fazna modulacija (**XPM**)

Faza optičkog signala modulirana proporcionalno snazi susednih kanala.

Four-wave mixing - četvero-talasno mešanje (**FWM**)

Generisanje novih spektralnih komponenti;
Preslušavanje i mešanje signala različitih kanala.

Efekti rasejanja

Stimulated Raman scattering - stimulirano Ramanovo rasejanje (**SRS**)

Transfer energije sa nižih talasnih dužina ka većim talasnim dužinama.

.

Nelinearni efekti

- Sistemi sa pojačavačima rade u nelinearnom režimu, jer je nivo signala dovoljno veliki i nelinearni efekti postaju znatni
- Nelinearni efekti su ključni razlog za ograničavanje nivoa snage u svakom kanalu i samog broja kanala
- Nelinearni efekti od značaja u optičkim sistemima su stimulirano Brilluino rasejanje, Ramanovo rasejanje, sopstvena fazna modulacija (Self phase modulation) unakrsna fazna modulacija (cross phase modulation) i četvero-talasno mešanje (four wave mixing). Prva dva procesa su nelinearni procesi rasejavanja, dok su ostali posledica zavisnosti indeksa prelamanja vlakna od intenziteta. Unakrsna fazna modulacija i četvorotalasno mešanje se javljaju isključivo u WDM sistemima, dok se ostali javljaju i u jednokanalnim sistemima.
- Uticaj nelinearnih efekata na performanse sistema, osim Brillouinovog rasejanja, zavisi od disperzije

Četvoro-talasno mešanje

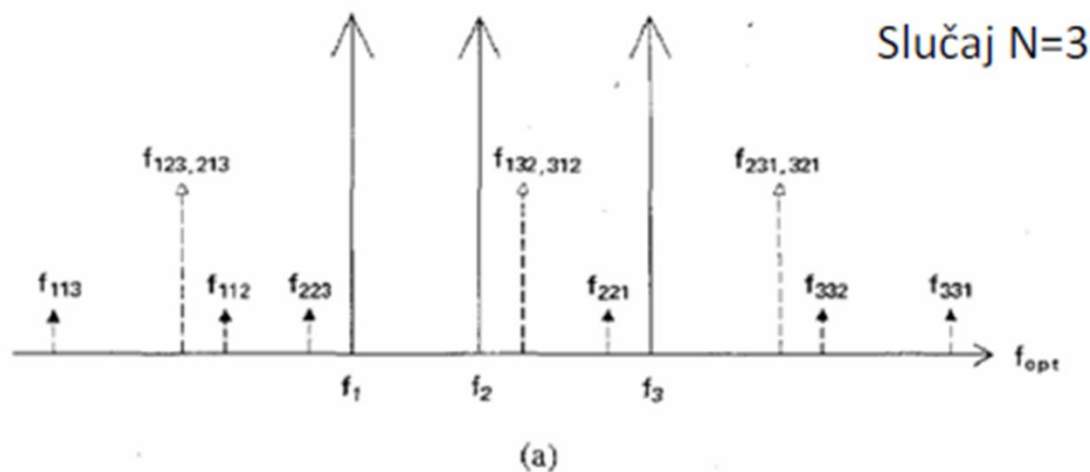
Mešanjem N kanala *frekvencija* f_i, f_j, f_k

nastaju produkti na

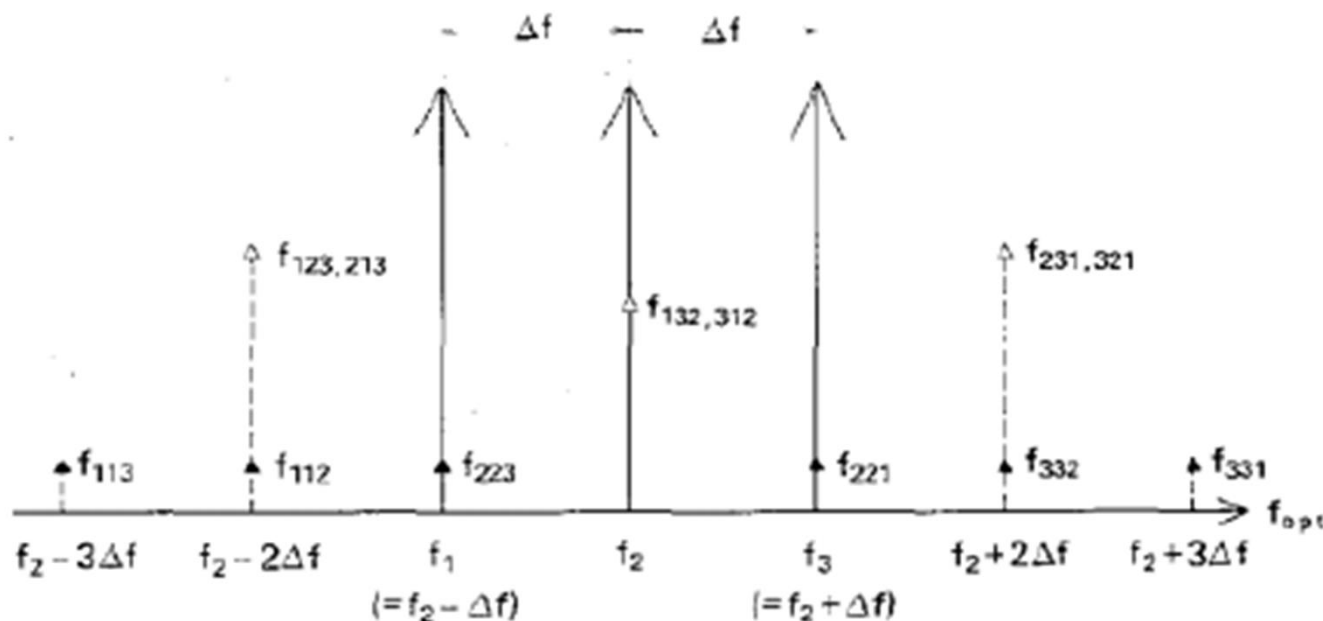
frekvencijama

$$f_{ijk} = f_i + f_j - f_k$$

Broj produkata četvoro-talasnog mešanja je $\frac{1}{2}N^2(N-1)$



- U slučaju jednake razlike između frekvencija pojedinih kanala novonastali produkti četvorotalasnog mešanja će se poklopiti sa korisnim signalima i doći će do njihovog mešanja i posledično degradacije korisnog signala.

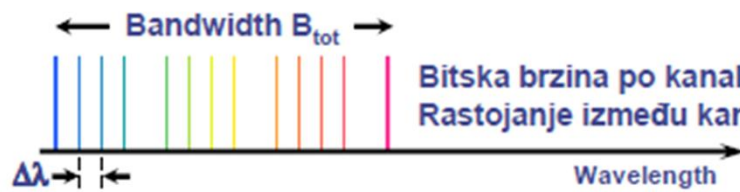


- Za neke efekte disperzija nije nepoželjna pojava; ona može da smanji uticaj preslušavanja izazvanog stimulisanim Ramanovim rasejanjem i četvoro-talasnim mešanjem
- Kada je u pitanju Ramanovo rasejanje, povećava dužinu na kojoj se javlja interakcija između kanala. U slučaju četvorotalasnog mešanja disperzija izaziva nepodešenost faza intermodulacionih produkata i korisnih signala i time smanjuje njihov ukupan uticaj. Ovo je razlog zašto su projektovana NZDSF vlakna, koja imaju malu vrednost disperzije u oblasti talasnih dužina 1530nm -1560 nm, ali dovoljnu da se minimizira degradacija signala usled četvoro-talasnog mešanja. Smanjenje nelinearnih efekata kod NZDSF vlakana je postignuto uravnotežavanjem uticaja različitih nelinearnih efekata. Istovremeno smanjenje uticaja svih nelinearnih efekata se postiglo povećanjem efektivne površine NZDSF vlakna, čime se praktično smanjuje intenzitet svetlosti koji se prostire. Ovaj efekat se postigao optimizacijom profila indeksa prelamanja. Ovaj tip NZDSF vlakana se naziva LEAF (Large Effective Area Fibers).

- Vekiki deo instalisanih optičkih vlakana čine standardna monomodna vlakna, pa je kod njih potrebno izvršiti kompenzaciju disperzije za velike bitske brzine
- Za tu namenu su projektovana vlakna za kompenzaciju disperzije (Dispersion Compensations Fibers -DCF)
- Ova vlakna imaju veliku negativnu disperziju što se postiže povećanjem razlike indeksa prelamanja u jezgru i omotaču
- Veći indeks prelamanja u jezgru može da se dobije povećanjem nivoa germanijuma, a to za posledicu ima povećanje slabljenja vlakna i iz tog razloga se mora naći balans između kompenzacije disperzije i slabljenja vlakna
- Za WDM sisteme je važan parametar i negativan nagib disperzije, koji može delimično ili potpuno da kompenzuje pozitivan nagib disperzije standardnog vlakna čime se može otkloniti ograničenje u pogledu dužine veze.

Povećanje kapaciteta prenosa WDM sistema

Inicijalna konfiguracija



Ograničenja:

- Tehnologija

Fizički efekti unutar vlakna

Strategije unapređenja: B'_{tot} , R' , $\Delta\lambda'$

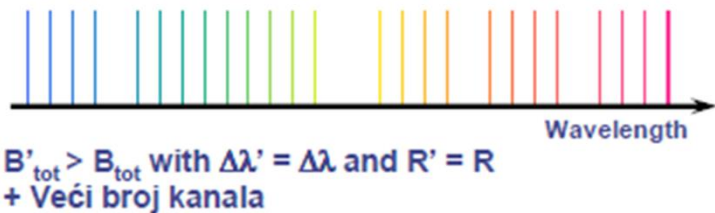
- Povećanje bitske brzine po kanalu



- Smanjenje rastojanja između kanala



- povećanje ukupnog WDM propusnog opsega



- Elektronske komponente za veće brzine

- Disperzija polarizacionog moda (PMD)

Hromatska disperzija (CD)

Sopstvena fazna modulacija (SPM)

- Izdvajanje kanala

Multipleksiranje / demultipleksiranje

-WDM nelinearni efekti (FWM, XPM

- Ramanovo rasejanje)

- Širokopojasni pojačavači

-WDM nelinearni efekti
(Ramanovo rasejanje)

Standardizacija optičkih vlakana

- ITU u okviru studijskih grupa neprekidno vrši standardizaciju optičkih vlakana i njihove karakteristike, geometrijske i karakteristike prostiranja definiše serija preporuka od ITU G.650 do ITU G.657.
- Osnovne preporuke za karakteristike optičkih vlakana:
- Preporuka ITU-T G.650 daje definicije i test metode relevantnih parametara monomodnih vlakana.
- ITU-T G.651 preporuka daje karakteristike 50/125 μ m multimodnog optičkog vlakna sa gradijentnim indeksom prelamanja
- Multimodno vlakno sa gradijentnim indeksom prelamanja se može koristiti u oblastima talasnih dužina 850nm i 1310nm.
- Geometrijske karakteristike su:
 - Preporučena vrednost prečnika jezgra je 50 μ m $\pm$ 3 μ m
 - Preporučena vrednost prečnika omotača je 125 μ m $\pm$ 3 μ m

Standardizacija optičkih vlakana

- Greška koncentričnosti mora biti manja od 6%. Ona predstavlja rastojanje između centra jezgra i centra omotača, podeljena sa nazivnim prečnikom jezgra.
- Optičke karakteristike:
- Profil indeksa prelamanja treba da je skoro paraboličan.
- Numerički otvor zavisi od primene i vrednosti su između 0.18 i 0.24 (± 0.02)
- Koeficijent slabljenja treba da bude 4 dB/km na 850nm i 2 dB/km na 1310nm. Međutim zavisno od procesa proizvodnje i sastava vlakna, moguće je postići 2-2.5 dB/km na 850nm i 0.5-0.8 dB/km na 1310nm.
- Hromatska disperzija (dominantna uticaj kod multimodnih vlakana je disperzija materijala) i za vlakna od vrlo čistog silicijuma je vrednost koeficijenta hromatske disperzije na 850nm manja od 120 ps/(nm*km), a na 1310nm je manja od 6 ps/(nm*km).
- Primena ovog tipa vlakna je prvenstveno u pristupnim telekomunikacionim mrežama. Korišćenjem ovog tipa vlakna mogu se realizovati Ethernet Veze kapaciteta 1 Gbit/s na rastojanjima od 550 m koristeći linijske uređaje koji rade na talasnoj dužini $\lambda=850\text{nm}$

Standardizacija optičkih vlakana

- ITU-T preporuka G.652 – Geometrijske i optičke karakteristike monomodnih optičkih vlakana
- Ova monomodna vlakna su optimizirana za primenu u oblasti talasnih dužina 1310 nm, jer u ovoj oblasti imaju nultu disperziju. Monomodna vlakna prema preporuci ITU-T G.652 se koriste i u oblasti talasnih dužina 1550 nm.
- Nominalna vrednost prečnika polja moda na talasnoj dužini 1310nm treba da se nalazi u opsegu od 9 do 10 μm . Za Gausovu raspodelu polja, prečnik polja moda jednak je rastojanju između tačaka u kojima je kriva raspodele amplitude polja opadne na $1/e$, od svoje maksimalne vrednosti, odnosno, u kojima kriva raspodele (intenziteta) optičke snage opadne na $1/e^2$, od svoje maksimalne vrednosti. Odstupanje prečnika polja moda od njegove nominalne vrednosti treba da je manje od 10%.
- Preporučena vrednost za nominalni prečnik omotača vlakna je 125 μm . Odstupanje od ove vrednosti treba da bude u granicama $\pm 2.4\%$.
- Greška koncentričnosti polja moda ne treba da bude veća od 1 μm na talasnoj dužini od 1310nm.
- Eliptičnost polja moda treba da je manja od 6%.
- Eliptičnost omotača treba da je manja od 2%.

Standardizacija optičkih vlakana

- U cilju da se vlakno zaštititi od oštećenja, iznad omotača vlakna mora se postaviti primarna zaštita neposredno posle izvlačenja vlakna na potrebnu dužinu. Ova zaštita treba da prijanja na omotač i ne sme da degradira optičke karakteristike vlakna. Ona može biti izvedena u jednom ili više slojeva. Primarna zaštita vlakna treba da bude otporna na dejstvo vode i da može da skine uz upotrebu odgovarajućeg rastvarača u vremenu manjem od 1 minuta. Preporučeni spoljašni prečnik primarne zaštite je oko 250 μm .
- Razlikuju se dva tipa granične talasne dužine
 - Vrednost izmerena na vlaknu neugrađenom u kabl dužine 2m referentnom ili alternativnom metodom.
 - Vrednost određena na fabričkoj dužini kabla metodom koja odgovara referentnoj metodi za merenje granične talasne dužine.
- Granična talasna dužina tipa 1, mora da se nalazi u intervalu 1100nm do 1280nm. Preporučena granična talasna dužina, tipa 2, je u intervalu od 1260nm do 1270 nm.
- Koeficijent slabljenja ovog vlakna u kablovima koji su danas dostupni je manji od 0.4dB/km u oblasti talasnih dužina 1310 nm i 0.25 dB/km u opsegu talasnih dužina 1550nm.

- Koeficijent hromatske disperzije monomodnih vlakana prema preporuci ITU-T G.652 treba da bude manji od vrednosti koje su specificirane u tabeli

Maksimalni koeficijent hromatske disperzije	Opseg talasnih dužina
3.5 ps/nm*km	1285nm-1330nm
6 ps/nm*km	1270nm-1340 nm
20 ps/nm*km	Oko 1550 nm

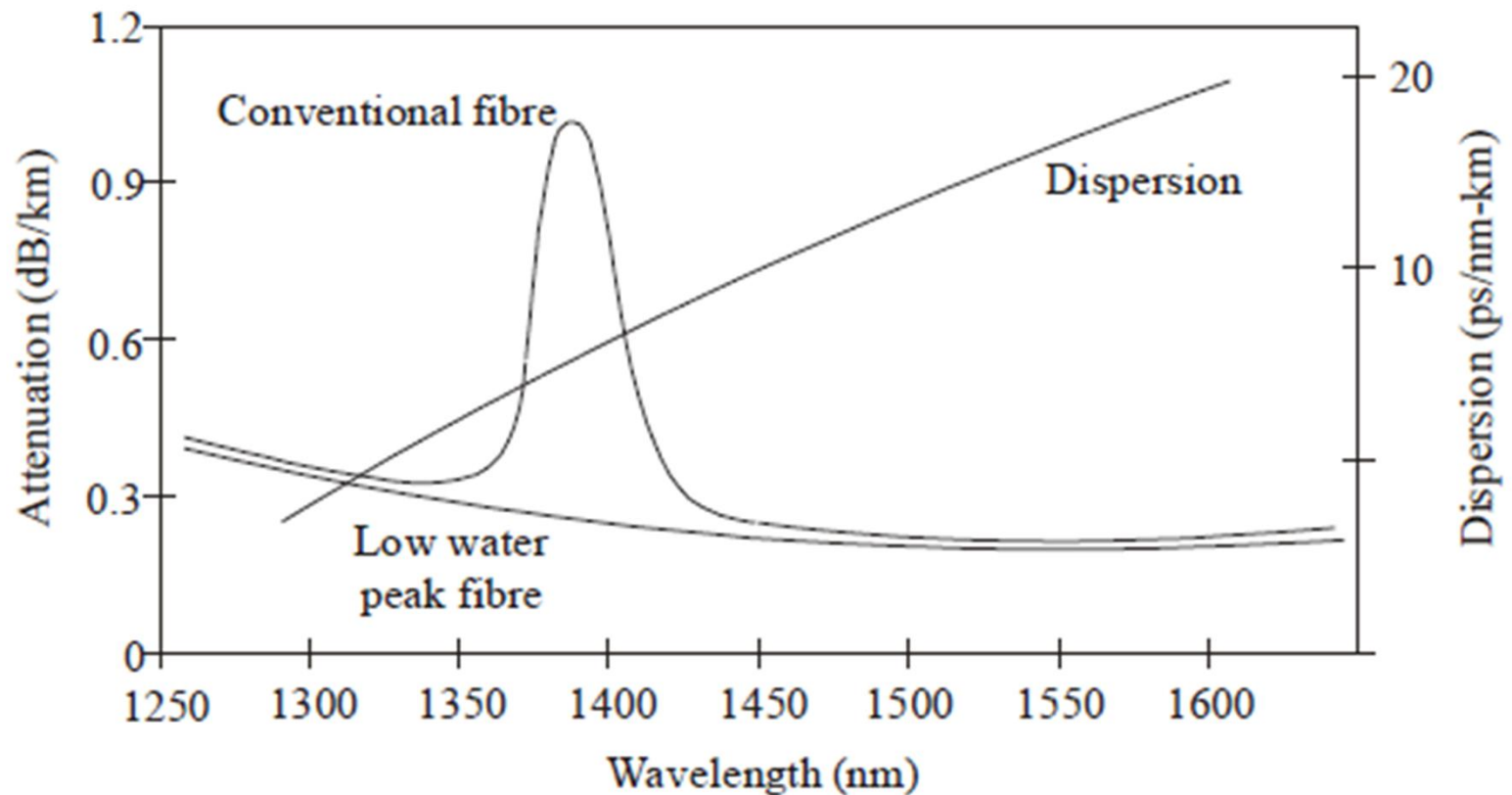
Koeficijent hromatske disperzije za standardna monomodna vlakna

- Postoje četiri tipa optičkog vlakna tipa ITU-T G.652 čije su glavne razlike navedene u tabeli

Kategorija	PMD _Q (ps/km)	Water Peak
A	0.5	WPNS
B	0.2	WPNS
C	0.5	LWP
D	0.2	LWP

Tabel 2. Kategorije optičkih vlakana ITU-T G.652
 PMDQ – vrednost disperzije polarizacionog moda na linku
 WPNS – Water Peak Not Specified
 LWP – Low Water Peak vlakno

Slabljenje optičkog vlakna (ITU-T G.652) sa krivom disperzije



- ITU-T preporuka G.653 – Geometrijske i optičke karakteristike monomodnih optičkih vlakana sa pomerenom disperzijom
- Ova monomodna vlakna su optimizirana za primenu u oblasti talasnih dužina 1550 nm, jer u ovoj oblasti imaju nultu disperziju
- Monomodna vlakna prema preporuci ITUT G.653 se koriste i u oblasti talasnih dužina 1310 nm.
- Nominalna vrednost prečnika polja moda na talasnoj dužini 1550 nm treba da se nalazi u opsegu od 7 do 8.3 μm . Odstupanje prečnika polja moda od njegove nominalne vrednosti treba da je manje od 10%.
- Preporučena vrednost za nominalni prečnik omotača vlakna je 125 μm . Odstupanje od ove vrednosti treba da bude u granicama $\pm 2 \mu\text{m}$.

- Greška koncentričnosti polja moda ne treba da bude veća od $1\text{ }\mu\text{m}$ na talasnoj dužini od 1550nm .
- Eliptičnost omotača treba da je manja od 2%.
- Razlikuju se dva tipa granične talasne dužine
 - Vrednost izmerena na vlaknu neugrađenom u kabl dužine 2m referentnom ili alternativnom metodom.
 - Vrednost određena na fabričkoj dužini kabla metodom koja odgovara referentnoj metodi za merenje granične talasne dužine.
 - Preporučena granična talasna dužina, tipa 2, treba da je manja od 1270 nm .
 - Koeficijenti slabljenja ovih vlakna u kablovima su uporedivi sa koeficijentima slabljenja u vlaknima tipa ITU-T G.652.

ITU-T preporuka G.654

- Geometrijske i optičke karakteristike monomodnog optičkog vlakna optimiziranog u oblasti 1550 nm
- Ova monomodna vlakna su optimizirana za primenu u oblasti talasnih dužina 1550 nm.
- Nominalna vrednost prečnika polja moda na talasnoj dužini 1550 nm treba da bude 10.5 μm . Odstupanje prečnika polja moda od njegove nominalne vrednosti treba da je manje od 10%.
- Preporučena vrednost za nominalni prečnik omotača vlakna je 125 μm . Odstupanje od ove vrednosti treba da bude u granicama $\pm 2 \mu\text{m}$.
- Greška koncentričnosti polja moda ne treba da bude veća od 1 μm na talasnoj dužini od 1550nm.
- Eliptičnost omotača treba da je manja od 2%.
- Granična talasna dužina treba da bude veća od 1350 nm.

ITU-T preporuka G.654

- Optička vlakna opisana u ovoj preporuci treba imaju koeficijent slabljenja u oblasti 1550 nm ispod 0.22 dB/km.
- Najniža vrednost koeficijenta slabljenja zavisi od procesa proizvodnje, strukture vlakna i dizajna kabla.
- Postignute su vrednosti od 0.15dB/km do 0.19dB/km u oblasti 1550 nm.
- Veća granična talasna dužina može da obezbedi manje slabljenje ovih vlakana usled makrosavijanja.
- Primena ovog vlakna je pogodna za podmorske instalacije.
- Maksimalni koeficijent hromatske disperzije na 1550nm treba da bude 20 ps/(nmkm).

ITU-T preporuka G.655

- Karakteristike monomodnog optičkog vlakna sa nenultom disperzijom
- Ova monomodna vlakna se primenjuju u oblasti talasnih dužina 1550 nm.
- Nominalna vrednost prečnika polja moda na talasnoj dužini 1550 nm treba da bude od 8 μm do 11 μm . Odstupanje prečnika polja moda od njegove nominalne vrednosti treba da je manje od 10%.
- Preporučena vrednost za nominalni prečnik omotača vlakna je 125 μm . Odstupanje od ove vrednosti treba da bude u granicama ± 2 μm .
- Greška koncentričnosti polja moda ne treba da bude veća od 1 μm na talasnoj dužini od 1550nm.
- Eliptičnost omotača treba da je manja od 2%.
- Granična talasna dužina vlakna treba da bude veća od 1470 nm, dok granična talasna kabla vlakna treba da bude veća od 1480 nm.

ITU-T preporuka G.655

- Optička vlakna opisana u ovoj preporuci treba imaju koeficijent slabljenja u oblasti 1550 nm ispod 0.25 dB/km. Najniža vrednost koeficijenta slabljenja zavisi od procesa proizvodnje, strukture vlakna i dizajna kabla. Postignute su vrednosti od 0.19dB/km do 0.25dB/km u oblasti 1550 nm
- Maksimalni koeficijent hromatske disperzije u oblasti 1530nm – 1565 nm treba da bude maksimalno 10 ps/(nm km).

$$D_{\min} \leq |D(\lambda)| \leq D_{\max} \text{ za } \lambda_{\min} \leq \lambda \leq \lambda_{\max}$$

$$0.1 \text{ ps / (nm * km) } \leq D_{\min} \leq D_{\max} \leq 10 \text{ ps / (nm * km)}$$

$$1530 \text{ nm} \leq \lambda_{\min} \leq \lambda_{\max} \leq 1565 \text{ nm}$$

$$D_{\max} \leq D_{\min} + 5 \text{ ps / (nm * km)}$$

Spajanje Optičkih vlakana

- Optički kablovi se proizvode sa određenim fabričkim dužinama, koje zavise od konstrukcije kabla.
- Prilikom instalacije dolazi do nastavljjanja optičkih kablova što znači da se mora vršiti spajanje optičkih vlakana
- Spojevi optičkih vlakana:
 - Nerazdvojivi
 - Razdvojivi (konektori)

Gubici pri spajanju optičkih vlakana

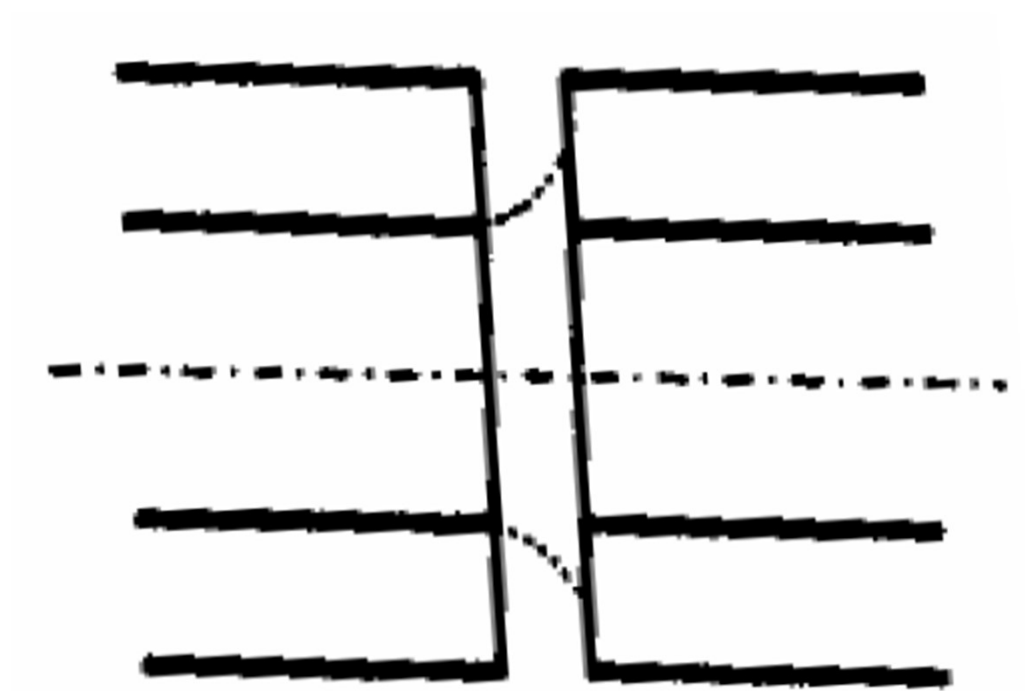
- Ocena performansi mesta spajanja optičkih vlakana su: nastali gubici i efikasnost spajanja.
- Efikasnost spajanja se definiše kao odnos snage optičkog signala posle spajanja P_1 i snage pre spajanja P_0
- Mera gubitaka A usled spajanja se definiše prema formuli:

$$A = \frac{P_0 - P_1}{P_0} = 1 - \eta$$

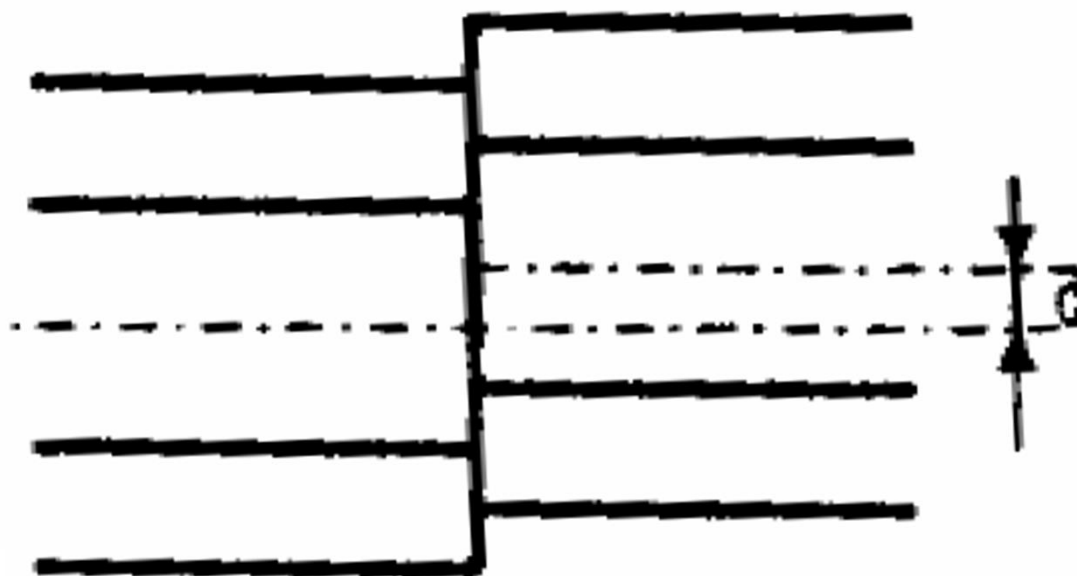
- Slabljenje koje nastaje pri spajanju optičkih vlakana se definiše kao
- $L = -10 \log \eta$
- Sledeća preporuka ITU-T L.12 pod nazivom Optical Fibre Joints – Spojevi optičkih vlakana definiše karakteristike mesta spajanja vlakana i optičkih gubitaka za multimodna i monomodna optička vlakna, fizičke karakteristike spajanja vlakana, kao i metode spajanja i test metode.
- Postoje spoljašni i unutrašnji faktori koji utiču na spajanje optičkih vlakana.
- Spoljašni faktori gubitaka se javljaju kao posledica primenjene tehnike spajanja vlakana, odnosno grešaka pri centriranju i lošeg kvaliteta površine vlakna koja bi trebalo da bude ravna, glatka i normalna na osu vlakna.
- U ovaj skup faktora spadaju: longitudinalni pomeraj, lateralni pomeraj jezgra i ugaona nepodešenost. Kod multimodnih vlakana izraženi su dominatno uticaj pomeraja pri centriranju vlakana i ugaona nepodešenost. Kao primer, pomeraj od 0.14 poluprečnika jezgra ili 10 će prouzrokovati približno 0.25dB slabljenja, dok će razdvajanje krajeva reda jednog poluprečnika jezgra prouzrokovati samo oko 0.14dB slabljenja.

- Unutrašnji faktori slabljenja se javljaju kao posledica refleksije na spoju koja nastaje zbog razlika između parametara vlakana koje spajamo. Do refleksije dolazi usled nagle promene indeksa prelamanja na mestu spajanja. Razlike u sledećim parametrima vlakana utiču na slabljenje spojeva:
 - prečnik jezgra
 - prečnik omotača
 - Numerička apertura
 - Indeks prelamanja u jezgrima
 - Koncentričnost i eliptičnost prečnika polja uzrokuju gubitke koji se svrstavaju u unutrašnje, ukoliko do razlike nije došlo u toku proces spajanja vlakana.
 - Nepodešenost prečnika jezgra kod multimodnih vlakana odnosno prečnika polja moda kod monomodnih vlakana.
- Unutrašnji faktori gubitaka kod spojeva multimodnih vlakana su osetljivi na neslaganja prečnika jezgra i numeričke aperture, a manje su osetljivi na neslaganja parametara profila, eliptičnosti jezgra i koncentričnosti.
- U principu spojevi monomodnih optičkih vlakana su najosetljiviji na nepodešenost prečnika polja moda, zbog značajno manjih dimenzija prečnika polja moda. Na primer, pomeraj pri centriranju od $1.2\mu\text{m}$ će prouzrokovati slabljenje spoja od približno 0.3dB za vlakna sa prečnikom polja moda u opsegu $8\mu\text{m}$ do $10\mu\text{m}$. Uzroci pomeraja pri centriranju vlakana kod monomodnih optičkih vlakana su razlike u prečniku vlakna i ekscentričnosti (odstupanje od središta) jezgra.

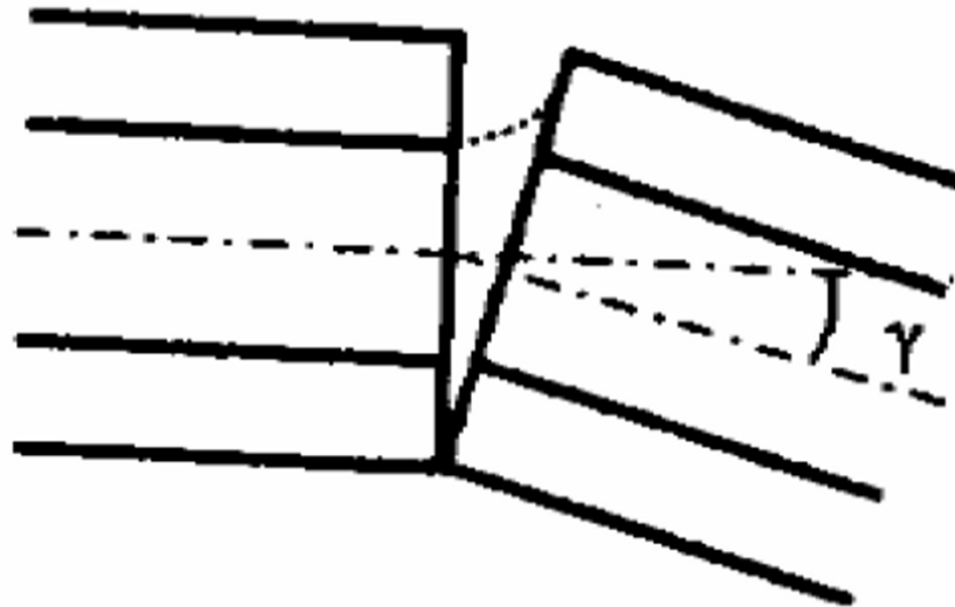
Longitudinalni pomerač



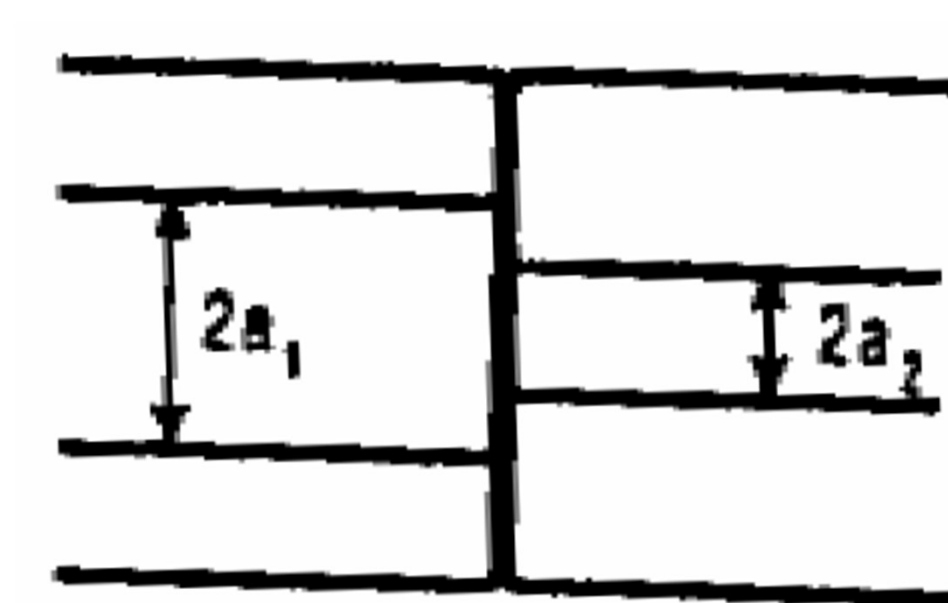
Lateralni pomeraaj



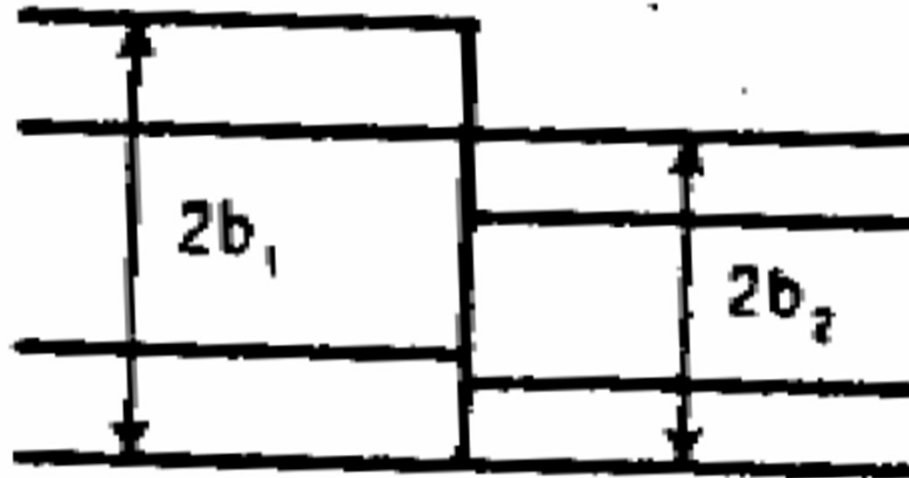
Ugaona nepodešenost



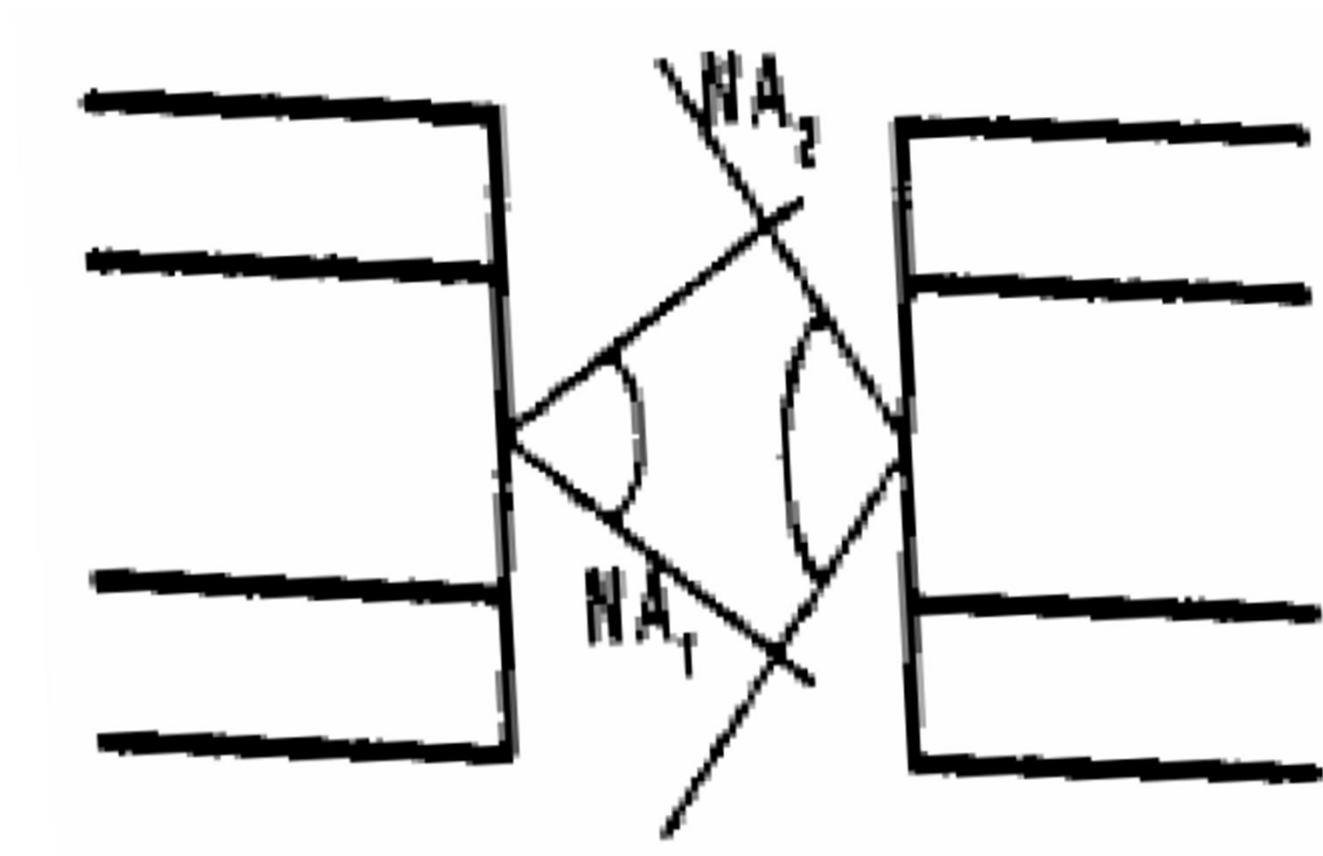
Prečnik jezgra



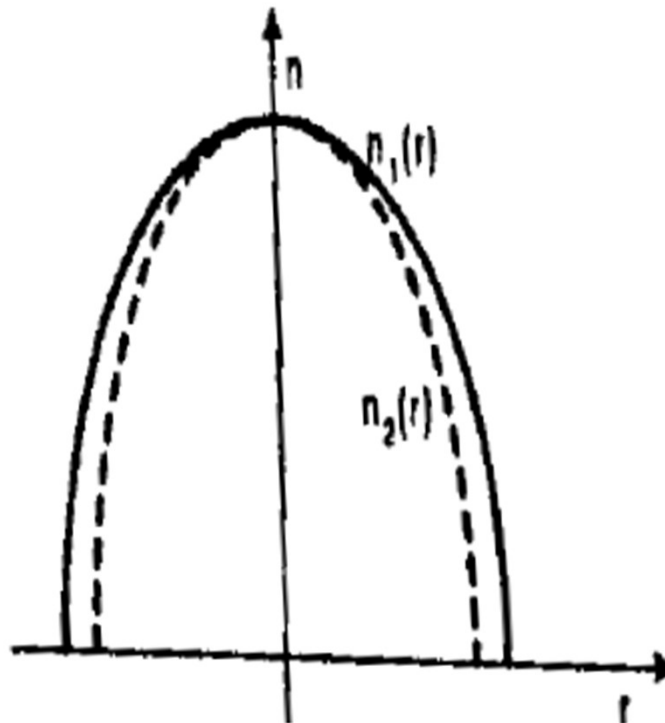
Prečnik omotača



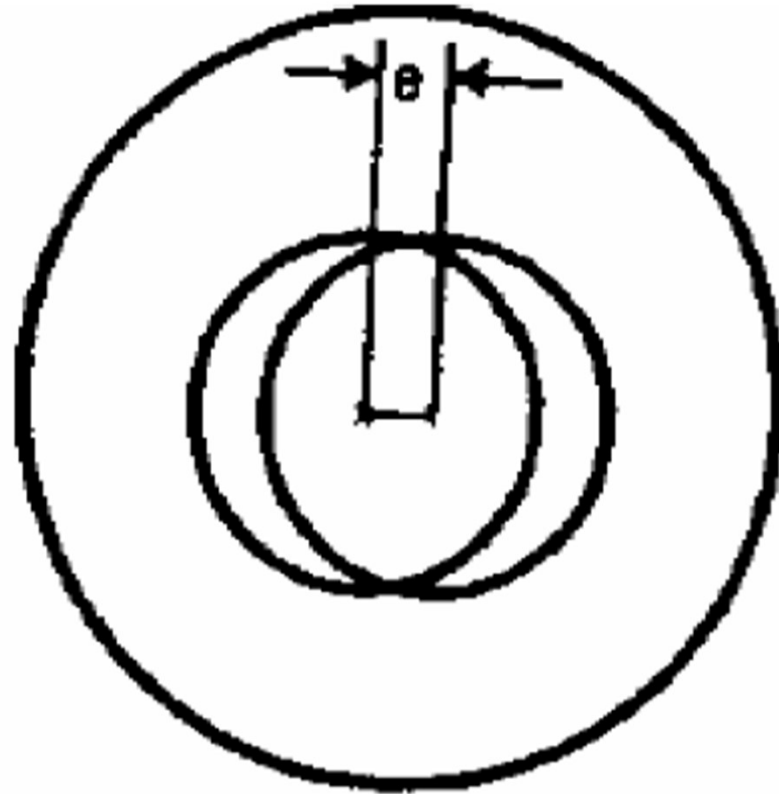
Numerička apertura



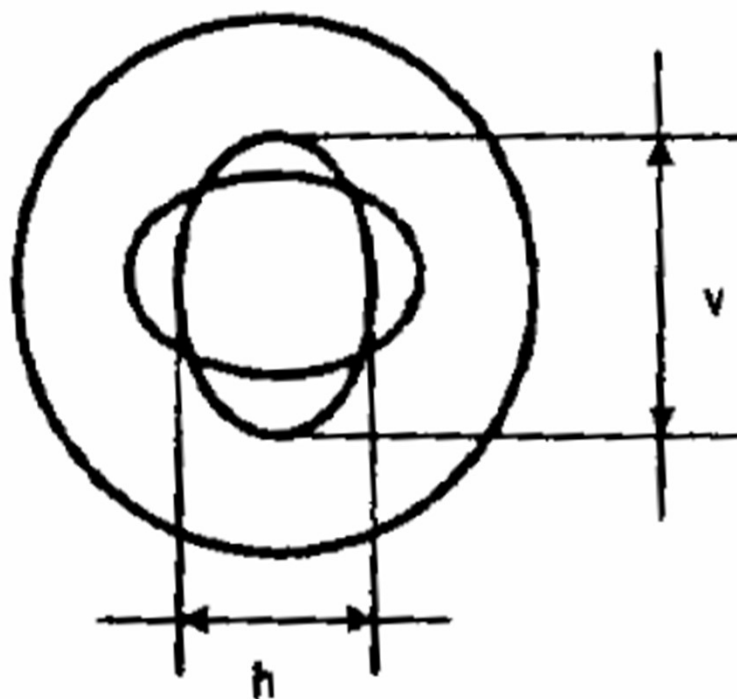
Različite promene indeksa prelamanja u jezgrima



Koncentričnost jezgra



Eliptičnost jezgra



Proračun ukupnog slabljenja optičke deonice

$$L = 52.5km, L_{fk} = 2.1km$$

Broj spojeva u okviru optičke deonice je N_{sp}

$$N_{sp} = \frac{L}{L_{fk}} - 1,$$

$$N_{sp} = 24$$

Proračun ukupnog slabljenja optičke deonice

Broj konektorskih spojeva $N_c=2$

Ukupno slabljenje optičke deonice je A_{tot}

$$A_{tot} = (\alpha_c + \alpha_m) * L + N_{sp} * l_s + N_c * l_c$$

$$A_{tot} = 18.1dB$$

Maksimalno dozvoljeno slabljenje za optički interfejs
L-16.2 metodom najgoreg slučaja

Proračun ukupnog slabljenja optičke deonice

$$A_{\max} = P_{t \min} - P_{r \min} - P_D$$
$$A_{\max} = 24dB$$

Pošto je $A_{\max} \geq A_{tot}$

zaključak je da slabljenje optičke deonice nije ograničavajući faktor za primenu optičkog interfejsa sa kodom L-16.2 za realizaciju STM -16 veze na ovoj optičkoj deonici

Proračun ukupnog slabljenja optičke deonice

Proračun ukupne disperzije optičke deonice:

$$D(\lambda) \bullet L \leq D_{TR} , \lambda = 1550nm$$

$$1050 \text{ ps/nm} \leq 1600 \text{ ps/nm}$$

Pošto je ispunjen ovaj uslov ni disperzija na optičkoj deonici nije ograničavajući faktor pa je zaključak da se optički interfejs sa kodom L-16.2 može primeniti za realizaciju STM -16 veze na ovoj optičkoj deonici

Disperzija



ps/(nm km)

(picoseconds per nanometer wavelength change and kilometer propagation distance)

Encyclopedia of Laser Physics and Technology - group velocity dispersion

Profesor dr Miroslav Lutovac

mlutovac@viser.edu.rs

Ova prezentacija je nekomercijalna.

Slajdovi mogu da sadrže materijale preuzete sa Interneta, stručne i naučne građe, koji su zaštićeni Zakonom o autorskim i srodnim pravima.

Ova prezentacija se može koristiti samo privremeno tokom usmenog izlaganja nastavnika u cilju informisanja i upućivanja studenata na dalji stručni, istraživački i naučni rad i u druge svrhe se ne sme koristiti –

Član 44 - Dozvoljeno je bez dozvole autora i bez plaćanja autorske naknade za nekomercijalne svrhe nastave:

(1) javno izvođenje ili predstavljanje objavljenih dela u obliku neposrednog poučavanja na nastavi;

- ZAKON O AUTORSKOM I SRODNIM PRAVIMA

("Sl. glasnik RS", br. 104/2009 i 99/2011)