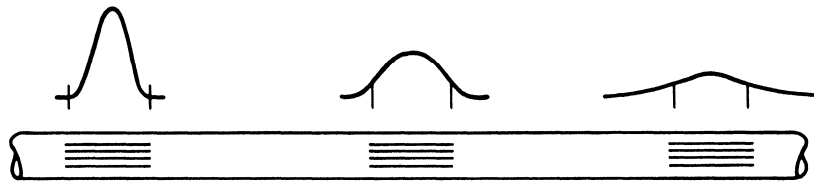


9. Disperzija optičnega vlakna

9.1. Posledice disperzije

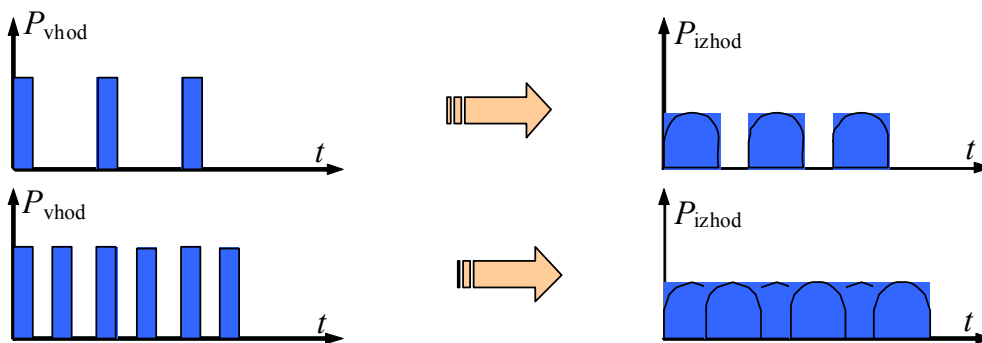
Poleg slabljenja je disperzija drugi pomemben omejitveni pojav optične komunikacijske zveze osnovane na optičnem vlaknu. Pojavlja se povsod, kjer prenosna karakteristika medija odstopa od idealne linearne frekvenčne odvisnosti, kakršno ima na primer ravninski val v neomejenem prostoru.

Ko v optično vlakno pošljemo svetlobni impulz, ki pri digitalni zvezi po dogovoru predstavlja logično enico, pride do nevšečnosti, da se širina impulza med potovanjem povečuje. V vlakno je vstopal lepo oblikovan digitalni optični impulz, iz vlakna pa dobimo razširjen impulz, kot prikazuje slika 1. Če zanemarimo slabljenje optičnega vlakna, bo energija impulza, ki je definirana kot ploščina pod ovojnico impulza, ostala nespremenjena. Njegova amplituda, pa se bo znižala zaradi časovne razširitve. Pojavu razširitve impulza strokovno pravimo **disperzija**.



Slika 1: Razširitev impulza pri potovanju po optičnem vlaknu.

Disperzija je moteč pojav predvsem pri velikih bitnih pretokih (zmogljivostih zveze), ko so časovne razdalje med impulzi dokaj majhne. Po razširitvi pride namreč do prekrivanja impulzov, kot prikazuje slika 2. Prekrivanje med sosednimi biti, poveča verjetnost narobe sprejetega bita.

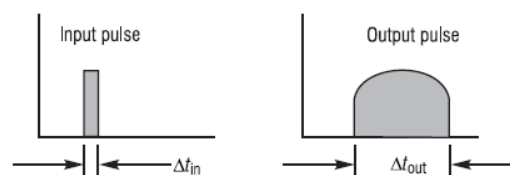


Slika 2: Primerjava vpliva razširitve signala pri dveh različnih bitnih pretokih (zmogljivostih zveze).

V nekaterih posebnih primerih uporabe optičnega prenosnega medija je disperzija lahko celo zaželen pojav, kar bomo obravnavali v poglavju nelinearnih pojavov v optičnem vlaknu. Največkrat pa na disperzijo gledamo kot na škodljiv pojav in skozi te oči jo tudi obravnavamo v tem poglavju.

Disperzija povzroči preoblikovanje modulatorske ovojnice optičnega signala, ki ga prenašamo po optičnem vlaknu. Do preoblikovanja modulatorske ovojnice pride zato, ker pridejo na konec vlakna posamezne komponente, ki optični signal sestavljajo, različno zakasnjene. Najpogosteje je preoblikovanje modulatorske ovojnice zaznati kot razširitev. Vhodni optični signal širine Δt_{vh} se razširi na Δt_{izh} , kot prikazuje slika 3. Razširitev zaradi disperzije je definirana kot

$$\Delta t = \sqrt{\Delta t_{izh}^2 - \Delta t_{vh}^2}$$



Slika 3: Razširitev optičnega impulza.

Ker je disperzija linearni pojav, razširitev narašča premosorazmerno z naraščanjem dolžine optičnega vlakna po katerem impulz potuje.

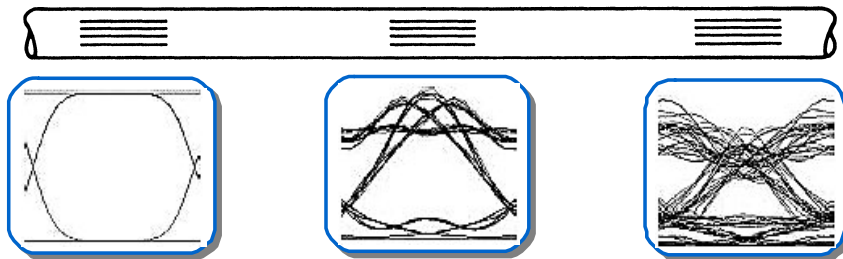
Primer:

Zaradi mnogorodovne disperzije se svetlobni impulz, ki prepotuje 40 km optičnega vlakna, razširi za $\Delta t_1 = 200 \mu\text{s}$. Kolikšna bo razširitev impulza Δt_2 , če zvezo skrajšamo na 15 km?

$$\frac{\Delta t_2}{\Delta t_1} = \frac{L_2}{L_1}$$

$$\Delta t_2 = \frac{L_2}{L_1} \cdot \Delta t_1 = \frac{15 \text{ km}}{40 \text{ km}} \cdot 200 \mu\text{s} = \underline{\underline{75 \mu\text{s}}}$$

V optični zvezi ima disperzija za posledico spremembo modulacijskega spektra in s tem popačitev (distorzijo) modulacijske ovojnice. Pri visoki bitni hitrosti, ko so časovne razdalje med impulzi dokaj majhne, pride zaradi razširitve do prekrivanja sosednjih impulzov oziroma do intersimbolne interference, kot je prikazano na izhodu vlakna na sliki 4. Disperzija omejuje informacijsko kapaciteto optične zveze, saj pride pri previsoki bitni hitrosti do prekrivanja sosednjih impulzov oziroma (intersimbolne interference) in napačno sprejetih bitov.



Slika 4: Prikaz nastanka intersimbolne interference zaradi disperzije prenosne poti.

9.2. Klasifikacija disperzij

Disperzijo v optičnih vlaknih razvrščamo v dve skupini po tem, ali je pojav razširitve impulza odvisen od spektralne širine svetlobnega vira ali ne. V primeru, da je razširitev impulza odvisna od spektralne širine vira govorimo o kromatski disperziji. V ostalih primerih, pa imenujemo disperzijo za nekromatsko.

Vsaka od tipov disperzije je po fizikalnem principu delovanja povsem ločen pojav, pri vseh pa nastane isti nezaželen učinek, ki se odraža kot razširitev optičnega impulza.

Pri **kromatski disperziji** so škodljive posledice disperzije skupinske hitrosti opazne tem bolj, čim širši spekter ima svetlobni vir. Kromatsko disperzijo poznamo zaradi treh posledic: valovodne disperzije, snovne disperzije in disperzije lomnega lika.

Optično vlakno je dielektrični valovod, kjer s steno omejen prostor povzroči utesnjenost polja, kar ima za posledico nastanek valovodne disperzije v sicer idealnem mediju.

Disperzijo lahko prispeva tudi snov sama, če je njen lomni količnik odvisen od frekvence oziroma valovne dolžine.

Odvisnosti lomnih količnikov od valovne dolžine se načeloma za jedro in oblogo lahko razlikujeta. Ker sta snovi jedra in obloge v šibkolomnih malodisperzih vlaknih običajno zelo podobni, lahko disperzijo lomnega lika zanemarimo.

H kromatski disperziji, ki jo imenujemo tudi barvana disperzija, torej prevladujoče prispevata snovna in valovodna disperzija.

Nekromatska disperzija, pri kateri škodljive posledice skupinske hitrosti niso odvisne od spektralne širine vira, je lahko mnogorodovna ali polarizacijska.

Popačitveni mehanizem, ki nastane v mnogorodovnem optičnem vlaknu, kjer je signal razpršen po času, nastane, ker skupinska hitrost optičnega signala ni enaka za vse rodove. V enorodovnem optičnem vlaknu, kjer se širi samo en rod valovanja, nastane disperzija zaradi različnih hitrosti razširjana valovanj z eno ali drugo polarizacijo.

Ko imamo poznane posamezne prispevke razširitve zaradi različnih disperzij, celotno disperzijsko razširitev izračunamo kot

$$\Delta t = \sqrt{(\Delta t_1)^2 + (\Delta t_2)^2 + (\Delta t_3)^2 \dots + (\Delta t_n)^2}.$$

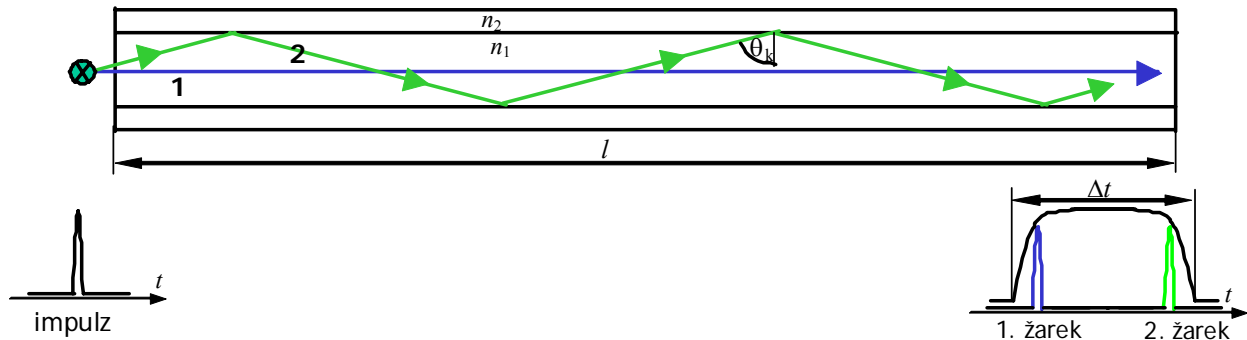
Prenosna zmogljivost optičnega vlakna je običajno podana kot produkt bitne zmogljivosti (C) in razdalje (L). Približna zmogljivost zveze je v povezavi z razširitvijo signala podana kot

$$C = \frac{1}{\Delta t}.$$

To je teoretična meja, ki jo v praksi največkrat zmanjša za faktor 2 ali 3.

9.3. Mnogorodovna disperzija optičnega vlakna

Snovno-geometrijski parametri mnogorodovnega optičnega vlakna dopuščajo, da se v vlaknu širi mnogo rodov (žarkov). Vsak rod ima svojo fazno hitrost. S prispodobno žarkovne optike se mnogorodovna disperzija v vlaknu s stopničastim lomnim likom lahko prikaže kot potovanje po več poteh, kot prikazuje slika 5. Svetlobni žarek, ki se med potovanjem odbija od sten, opravi v primerjavi z direktnim svetlobnim žarkom daljšo pot, zato pride na izhod vlakna zakasnjeno. Vhodni optični impulz se torej razmaže po časovnem prostoru.



Slika 5: Potovanje dveh skrajnih žarkov: direktni žarek in žarka, ki še zadosti kotu popolnega odboja.

Direkten žarek ($\theta = \pi/2$) prepotuje dolžino optičnega vlakna v času

$$t_1 = \frac{l_1}{c_1} = \frac{l}{\frac{c_0}{n_1}}$$

Zadnje prispeli žarek, ki pri odbojih ravno še zadosti kotu popolnega odboja, potuje po daljši poti in pride na konec vlakna v času

$$t_2 = \frac{l_2}{c_1} = \frac{l_2}{\frac{c_0}{n_1}} = \frac{l}{\sin \theta_k} \cdot \frac{1}{\frac{c_0}{n_1}} = \frac{l}{\frac{n_2}{n_1}} \cdot \frac{1}{\frac{c_0}{n_1}} = \frac{l}{c_0} \cdot \frac{n_1^2}{n_2}$$

Ker je lomni količnik jedra večji od lomnega količnika obloge, je čas potovanja vijugajočega žarka večji od časa potovanja direktnega žarka.

Razlika med časoma, ko prispe zadnji žarek in direktni žarek je **razlika rodovne zakasnitve** in predstavlja zakasnitev, ki jo vnaša mnogorodovna disperzija.

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{l \cdot n_1}{c_0} \left(\frac{n_1}{n_2} - 1 \right) \approx t_1 \cdot \Delta$$

Kjer je Δ lomni parameter dvoplastnega vlakna

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_2}$$

Vidimo, da razlika rodovne zakasnitve ni odvisna od polmera jedra optičnega vlakna.

Primer:

Izračunajte za koliko se razširi optični impulz zaradi mnogorodovne disperzije v mnogorodovnem vlaknu dolžine $l=100$ km z lomnim parametrom $\Delta=0,01$ in lomnim količnikom jedra $n_1=1,46$.

$$t_1 = \frac{l}{c_1} = \frac{l}{\frac{c_0}{n_1}} = \frac{100 \text{ km} \cdot 1,46}{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}} = 0,49 \cdot 10^{-3} \text{ s} = \underline{\underline{490 \mu\text{s}}}$$

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{l \cdot n_1}{c_0} \left(\frac{n_1}{n_2} - 1 \right) \approx t_1 \cdot \Delta = 490 \mu\text{s} \cdot 0,01 = \underline{\underline{4,9 \mu\text{s}}}$$

Primer:

Izračunajte največjo zmogljivost zveze iz prejšnjega primera.

$$C < \frac{1}{\Delta t} = \frac{1}{4,9 \mu\text{s}} = 204 \text{ kbit/s}$$

Najbolj praktično, je če razliko rodovne zakasnitve podajamo na enoto dolžine

$$\Delta \left(\frac{t}{l} \right) = \frac{n_1}{c_0} \left(\frac{n_1 - n_2}{n_2} \right)$$

Primer:

Izračunajte razliko rodovne zakasnitve na dolžinsko enoto za vlakno z lomnim količnikom jedra 1,46 in lomnim količnikom obloge 1,45.

$$\Delta \left(\frac{t}{l} \right) = \frac{n_1}{c_0} \left(\frac{n_1 - n_2}{n_2} \right) = \frac{1,46}{3 \cdot 10^{-4} \text{ km/ns}} \left(\frac{1,46 - 1,45}{1,45} \right) = \underline{\underline{34 \text{ ns/km}}}$$

Impulz se razširi za 34 ns na vsak km optičnega vlakna.

Razlika rodovne zakasnitve se v približku lahko zapiše tudi z numerično odprtino

$$\Delta t \approx t_1 \cdot \Delta = t_1 \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{NA}{n_1} \right)^2$$

Zaradi boljših spojnih lastnosti, ki so opisane v prejšnjem poglavju, je zaželena čim večja numerična odprtina. Vendar velika numerična odprtina pomeni tudi veliko mnogorodovno disperzijo, kar pa je vsekakor nezaželeno.

Obratno nam majhna NA pomeni manjši sklopni izkoristek, vendar posledično manjšo mnogorodovno disperzijo. Zaradi zelo majhnega lomnega parametra pa je tako vlakno zelo šibkolomno, kar pomeni, da je zelo občutljivo na krivinsko slabljenje.

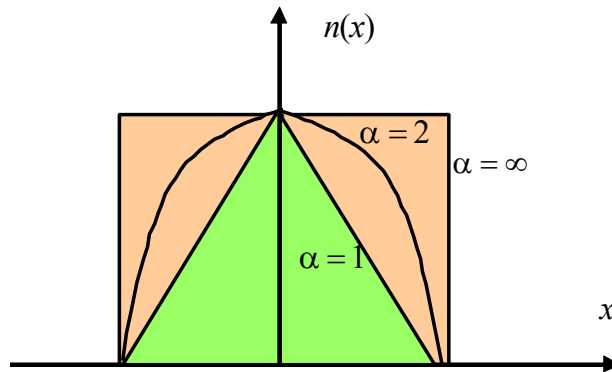
Iz zgornjega sklepanja vidimo, da nam spreminjanje NA ne pomaga pri zmanjšanju mnogorodovne disperzije. Obstajata pa dve drugi rešitvi za odpravljanje mnogorodovne disperzije.

Če omogočimo, da se bo po optičnem vlaknu širil le direktn svetlobni žarek, do razširitve optičnega impulza zaradi mnogorodovne disperzije ne more priti. To naredimo tako, da zmanjšamo premer jedra optičnega vlakna toliko, da se bo po njem širil samo osnovni rod svetlobnega valovanja. Na ta način dobimo enorodovno vlakno.

Druga možnost je da izdelamo vlakno z gradientnim lomnim likom, pri katerem se lomni količnik jedra zvezno spreminja v lomni količnik obloge

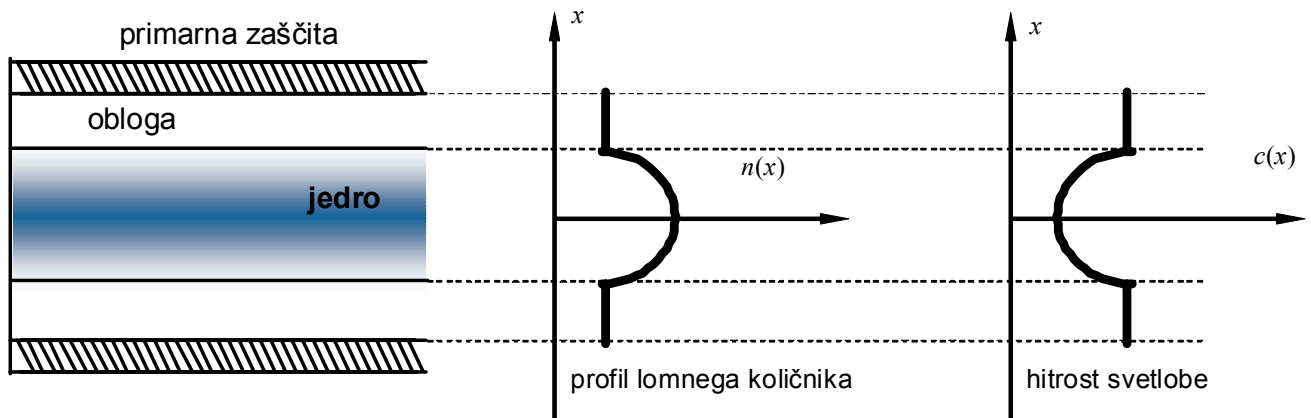
$$n_1^2(x) = n_1^2 \left(1 - 2\Delta \left(\frac{x}{a} \right)^\alpha \right)$$

V eni skrajnosti pri $\alpha = 1$ ima lomni količnik jedra trikotno obliko. V drugi skrajnosti pri $\alpha = \infty$ ima lomni količnik jedra stopničast lomni lik. Pri $\alpha = 2$ ima lomni količnik jedra parabolično obliko, kot prikazuje slika 6.



Slika 6: Spreminjanje lomnega lika glede na parameter α .

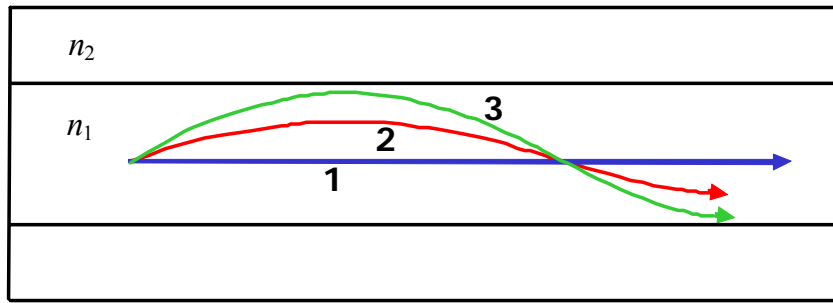
Pri vlaknu z paraboličnim lomnim likom se lomni količnik iz gostejšega v sredini jedra zvezno spreminja v redkejšega na robu vlakna, posledično temu je hitrost razširjanja svetlobe v sredini jedra vlakna najmanjša, kot prikazuje slika 7.



Slika 7: Vlakno z gradientnim lomnim likom.

Pri vlaknu z gradientnim lomnim likom imajo žarki sinusne trajektorije, kot prikazuje slika 8. Vsi žarki imajo isto periodo

$$L = \pi a \sqrt{\frac{2}{\Delta}}$$



Slika 8: Vlakno z gradientnim lomnim likom.

Žarek na obodu potuje s hitrostjo

$$c \approx \frac{c_1}{1 - \Delta \left(\frac{x}{a}\right)^2}$$

Razlika rodovne zakasnitve pa znaša

$$\Delta t \approx t_1 \cdot \Delta^2$$

Primer:

Izračunajte za koliko se razširi optični impulz zaradi mnogorodovne disperzije v mnogorodovnem vlaknu paraboličnega lomnega lika dolžine $l=100$ km z lomnim parametrom $\Delta=0,01$ in lomnim količnikom jedra $n_1=1,46$.

$$t_1 = \frac{l}{c_1} = \frac{l}{\frac{c_0}{n_1}} = \frac{100 \text{ km} \cdot 1,46}{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}} = 0,49 \cdot 10^{-3} \text{ s} = \underline{\underline{490 \mu\text{s}}}$$

$$\Delta t \approx t_1 \cdot \Delta = 490 \mu\text{s} \cdot 0,01^2 = \underline{\underline{49 \text{ ns}}}$$

Primer:

Izračunajte največjo zmogljivost zveze iz prejšnjega primera.

$$C < \frac{1}{\Delta t} = \frac{1}{49 \text{ ns}} = 20,4 \text{ Mbit/s}$$

Mnogorodovna disperzija omejuje pasovno širino mnogorodovnega optičnega vlakna.

$$B[\text{MHz}] = D[\text{MHz} \cdot \text{km}] \cdot l^{-1} [\text{km}^{-1}]$$

Na primer, običajno vlakno s stopničastim lomnim likom, ki ima premer jedra 50 μm , bo omejevalo pasovno širino na 20 MHz pri enem kilometru dolžine. Pravimo, da je pasovna širina 20 MHz·km.

Glede na pasovno širino se mnogorodovna optična vlakna delijo v ISO razrede, kot prikazuje spodnja tabela.

ISO razred	dimenzija	Disperzija pri 850 nm
OM1	62,5/125	6 – 24 MHz·km
OM2	50/125	100 – 1000 MHz·km
OM3	50/125	MHz·km
OM4	50/125	

9.4. Kromatska disperzija optičnega vlakna

Pri kromatski oziroma barvni disperziji signali različnih valovnih dolžin potujejo z različnimi hitrostmi. Enota za kromatsko disperzijo D je ps/nm·km, kar pomeni, da je koeficient disperzije na enoto dolžine (kilometer) vlakna razmerje med razširitvijo impulza in širino valvnodolžinskega spektra.

$$|D| = \frac{1}{L} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta \lambda}$$

Ker zaradi praktičnosti običajno dolžino L podajamo v kilometrih, spektralno širino vira $\Delta \lambda$ v nanometrih in razširitev Δt v pikosekundah je za kromatsko disperzijo D zelo primerna enota ps/nm·km.

Škodljive posledice kromatske disperzije pridejo tem bolj do izraza, čim širši optični spekter ima svetlobni vir. Iz tega razloga je zaželena uporaba spektralno ozkih svetlobnih virov (DFB ali DBR laser). Pri nižjih bitnih hitrostih od 10 Gbit/s je optična zveza omejena predvsem zaradi slabljenja v vlaknu. Pri bitnih hitrostih, ki so večje od 10 Gbit/s pa je kromatska disperzija standardnega enorodovnega vlakna zelo velik omejitveni dejavnik.

Primer:

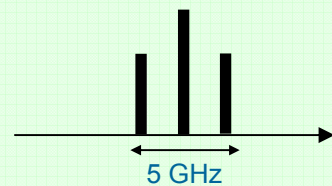
Optično zvezo z zmogljivostjo 2,5 Gbit/s želimo na vlaknu G.652 sestaviti iz zunanje moduliranega DFB laserja na valovni dolžini 1550 nm. Vlakno G.652 ima pri valovni dolžini 1550 nm disperzijo 16,5 ps/(nm·km). Kolikšen je maksimalni doseg zveze, če naj se impulzi ne razširijo za več kot polovico bitne periode?

$$\Delta t = \frac{1}{2C} = \frac{1}{2 \cdot 2,5 \text{ Gbit/s}} = \underline{\underline{200 \text{ ps}}}$$

Širina amplitudno moduliranega 2,5 Gbit/s signala znaša 5 GHz.

$$\Delta \lambda = \frac{\Delta f \cdot \lambda_0^2}{c_0} = \frac{5 \text{ GHz} \cdot (1550 \text{ nm})^2}{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}} = 40 \text{ pm}$$

$$l = \frac{\Delta t}{D \cdot \Delta \lambda} = \frac{200 \text{ ps}}{16,5 \frac{\text{ps}}{\text{nm} \cdot \text{km}} \cdot 0,04 \text{ nm}} = \underline{\underline{300 \text{ km}}}$$



Primer:

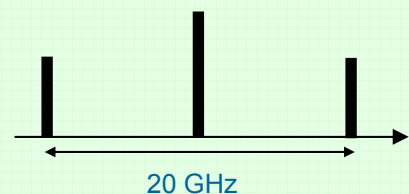
Optično zvezo z zmogljivostjo 10 Gbit/s želimo na vlaknu G.652 sestaviti iz zunanje moduliranega DFB laserja na valovni dolžini 1550 nm. Vlakno G.652 ima pri valovni dolžini 1550 nm disperzijo 16,5 ps/(nm·km). Kolikšen je maksimalni doseg zveze, če naj se impulzi ne razširijo za več kot polovico bitne periode?

$$\Delta t = \frac{1}{2C} = \frac{1}{2 \cdot 10 \text{ Gbit/s}} = \underline{\underline{50 \text{ ps}}}$$

Širina amplitudno moduliranega 10 Gbit/s signala znaša 20 GHz.

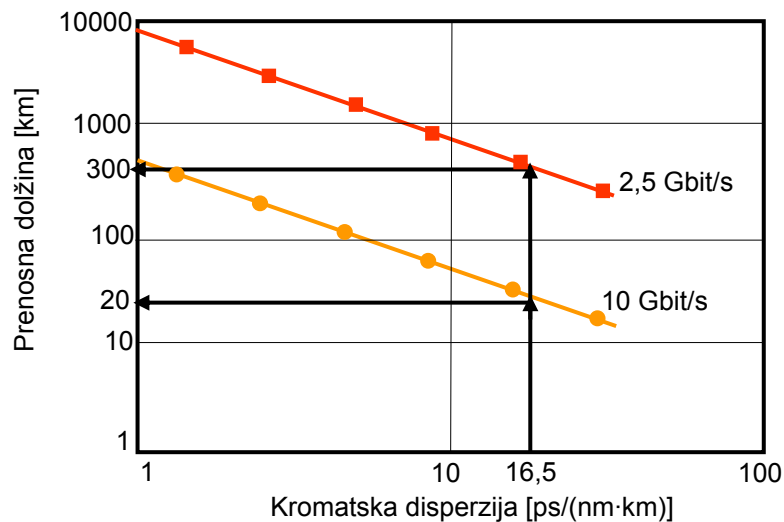
$$\Delta \lambda = \frac{\Delta f \cdot \lambda_0^2}{c_0} = \frac{20 \text{ GHz} \cdot (1550 \text{ nm})^2}{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}} = 160 \text{ pm}$$

$$l = \frac{\Delta t}{D \cdot \Delta \lambda} = \frac{50 \text{ ps}}{16,5 \frac{\text{ps}}{\text{nm} \cdot \text{km}} \cdot 0,16 \text{ nm}} = \underline{\underline{19 \text{ km}}}$$



Učinek kromatske disperzije se povečuje z kvadratom bitne hitrosti, kot prikazuje slika 9. Z naraščanjem bitne hitrosti se maksimalna dolžina optične zveze zmanjšuje s korenom.

$$L \propto C^{-2}$$



Slika 9: Disperzija ima kvadraten vpliv na zmogljivost zveze.

V enorodovnem optičnem vlaknu kromatsko disperzijo delimo v dve skupini:

- snovna disperzija in
- valovodna disperzija.

Snovna disperzija nastane, ker je lomni količnik stekla frekvenčno odvisen. To pomeni, da signali z različnimi valovnimi dolžinami potujejo z različnimi hitrostmi zaradi snovnih sestavin samega vlakna.

Snovne disperzija je sicer pojav, ki se ga lahko tudi koristno izrablja za razločevanje posameznih komponent svetlobe v prizmi. Za prenos optičnega signala pa je škodljiv pojav, saj povzroča njegovo časovno razširitev.

Iz grafa na sliki 10 je razvidno, da snovna disperzija SiO₂ stekla narašča z naraščanjem valovne dolžine.

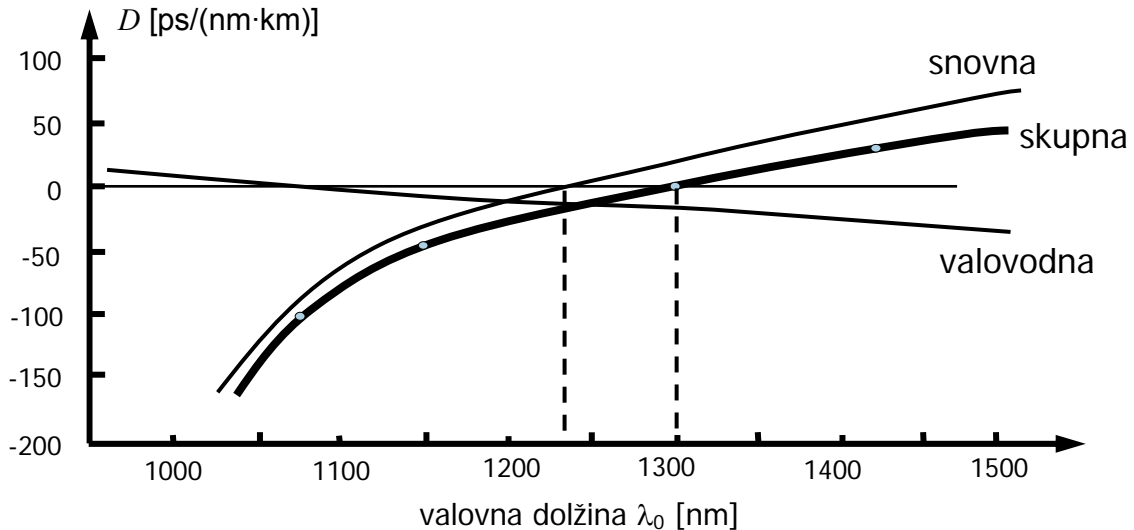
Valovodna disperzija je posledica različnih lomnih količnikov jedra in obloge optičnega vlakna. Valovodna disperzija dielektričnega valovoda je posledica omejitve prostora v katerem je polje utesnjeno. Valovodna disperzija je posledica valovodnega načina razširjanja valov v vlaknu. Njena vrednost je odvisna od snovno geometrijskih parametrov vlakna.

Efektivni lomni količnik se spreminja v odvisnosti od valovne dolžine:

- kratke valovne dolžine, svetloba je dovolj omejena znotraj jedra
- srednje valovne dolžine, svetloba se razširja tudi malo v oblogo. To navidezno zmanjšuje lomni količnik
- dolge valovne dolžine, veliko svetlobe se razširja v oblogo. To prenese efektivni lomni količnik zelo blizu lomnemu količniku obloge. Kar zakasni eno ali več valovnih dolžin v primerjavi z ostalimi

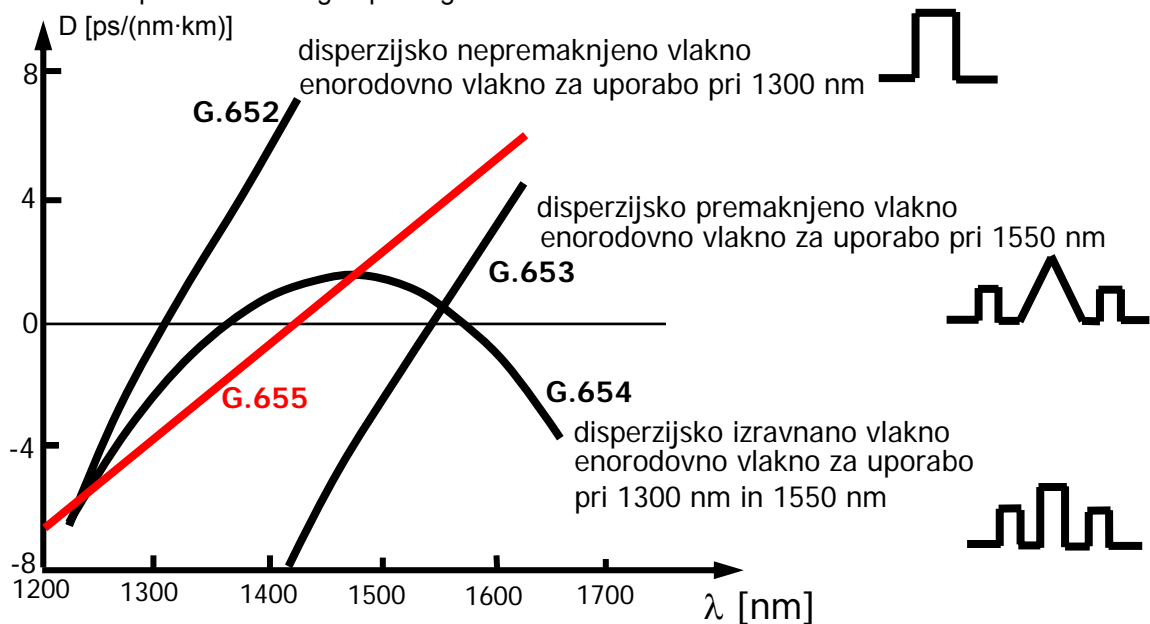
Snovna disperzija SiO₂ in valovodna disperzija enorodovnega optičnega vlakna z stopničastim lomnim likom tvorita skupno kromatsko disperzijo. Pri valovni dolžini 1300 nm se učinek snovne in valovodne disperzije ravno odštejeta in skupna disperzija znaša tam nič. Valovna dolžina pri kateri je disperzija enaka nič se imenuje nična disperzijska valovna dolžina (angl. *zero-dispersion wavelength*). To je valovna dolžina pri kateri ima vlakno maksimalno informacijsko prenosno kapaciteto. Za standardno enorodovno vlakno je to območje 1310 nm. To je torej razlog za nastanek drugega spektralnega okna v optičnih komunikacijah.

Standard za G.652 govori, da mora nična disperzija ležati med 1300 nm in 1324 nm.



Slika 10: Kromatska disperzija enorodovnega optičnega vlakna kot seštevek snovne in valovodne disperzije.

Snovno in valovodno disperzijo je mogoče uravnotežiti ter ustvariti valovno dolžino pri kateri je disperzija nič kjerkoli znotraj področja delovanja optičnih zvez med 1310 nm do 1650 nm. Z obliko lomnega lika pri enorodovnem optičnem vlaknu namreč lahko vplivamo na disperzijske lastnosti valovoda. S seštevkem snovne in valovodne disperzije lahko torej dobimo vlakno s skorajda poljubno disperzijo. Na sliki 11 so prikazani poteki disperzije v odvisnosti od valovne dolžine za nekatere standardizirane tipe enorodovnega optičnega vlakna.



Slika 11: Kromatska disperzija različnih tipov enorodovnega optičnega vlakna.

Disperzijsko premaknjeno vlakno G.653 je znatno premaknjeno v desno. Minimalna disperzija tovrstnega vlakna je v okolici 1550 nm, kjer je tudi slabljenje optičnega vlakna najmanjše. Pri G.654 vlaknu sta snovna in valovodna disperzija tako izenačeni, da dobimo disperzijsko izravnano optično vlakno. Disperzija je pri tem vlaknu minimalna v drugem in tretjem spektralnem oknu. Kasnejši razvoj optičnih sistemov je pokazal, da zaradi nastanka nezaželenih nelinearnih pojavov za komunikacijo ni najbolj idealno področje z minimalno disperzijo. Iz tega razloga se je izdelovanje in polaganje optična vlakna tipa G.653 in G.654 opustilo.

Vlakno z oznako G.655, ki ima v področju delovanja manjšo pozitivno disperzijo (od 4 do 8 ps/(nm·km)). Dobijo se v raznih izvedbah strmine in efektivne površine jedra, ki sta na žalost premosorazmerna parametra.

9.4.1. Kompenzacija kromatske disperzije optičnega vlakna

V daljših sistemih in sistemih z bolj izkoriščeno pasovno širino nakopičeno disperzijo ne smemo zanemarjati, saj kvarno vpliva na optični signal, ki ga prenašamo. Disperzija je linearen pojav in ga je zato mogoče dokaj enostavno kompenzirati.

Metode kompenzacije kromatske disperzije lahko razdelimo na naslednje tri skupine.

Pred-popačenje (angl. *predistortion*) ki se izvaja na strani oddajnika s prilagajanjem lastnosti vhodnega optičnega signala. Pred vstopom v optično vlakno se optičnemu impulzu doda frekvenčni žvižg (angl. *frequency chirp*), ki je obraten od tistega, katerega bo signal deležen med potovanjem po optičnem vlaknu.

Po-kompenzacija (angl. *postdetection*) je narejena v sprejemniku na električnem signalu z uporabo adaptivnega odziva za disperzijski pojav. Zadušitev vpliva kromatske disperzije je opravljena preko elektronskega izenačevalnega filtriranja. Po-kompenzacijo je mogoče izvajati le na signalih z nižjimi bitnimi hitrostmi, saj nas pri tem omejuje zmogljivost digitalnega procesorja.

Linjska (angl. *In-line*) kompenzacija kromatske disperzije je povsem optična metoda, ki je narejena vzdolž prenosne poti. Izvede se lahko v katerikoli točki vzdolž prenosne poti z uporabo povsem optičnih rešitev, ki zmanjšujejo pojav kromatske disperzije. Od številnih predlaganih in uporabljenih metod se največkrat uporablja kompenzacijski modul z disperzijsko kompenzacijskim vlaknom (angl. *Dispersion Compensation Fiber – DCF*).

Disperzijska kompenzacijska vlakna so postala pomembni elementi, ki sestavljajo današnji visoko zmogljiv optični prenosni sistem. Pri uporabi DCF kompenzacije disperzije je potrebno zadovoljiti sledečemu pogoju

$$D_V \cdot L_V = -D_K \cdot L_K$$

Kjer sta D_V in L_V , kromatska disperzija in dolžina prenosnega optičnega vlakna, D_K in L_K sovpadata disperziji in dolžini DCF-ja. Dolžina prenosa L_V in disperzija D_V sta parametra, ki ju v naprej poznamo, kar pomeni da je mogoče enačbo (?) zadovoljiti samo, če imata D_V in D_K različna predznaka. Dolžina L_K mora biti kratka kot je le mogoče, zaradi minimalnega vnosa slabljenja. V ta namen je smiselno uporabljati DCF-je z visoko negativno disperzijo.

Disperzijsko kompenzacijska optična vlakna imajo majhen premer jedra, kar vodi do relativno velike komponente valovodne disperzije. Skupna vrednost koeficienta disperzije D_2 za komercialno dostopne DCF-je leži v območju od -90 do -150 ps/nm×km. Zaradi slabšega vodenja osnovnega rodu preko območja jedra, vnaša DCF višje slabljenje. Zasnova DCF-ja je bolj občutljiva na mikro krivine vlakna, zato je DCF neprimerno za kabliranje in polaganje. Skupni koeficient slabljenja α_{DCF} DCF-ja je v območju od 0,4 do 0,7 dB/km, kar je znatno višje kot slabljenje v prenosnih vlaknih v valovno dolžinskem območju okoli 1550 nm, ki znaša malo nad 0,2 dB/km. Za karakterizacijo različnih tipov DCF-jev je pomembno razmerje $|D_K|/\alpha_{DCF}$, ki mora biti visoko kot je le mogoče. DCF-ji, ki so izdelani danes, imajo običajno razmerje > 200 ps/nm/dB.

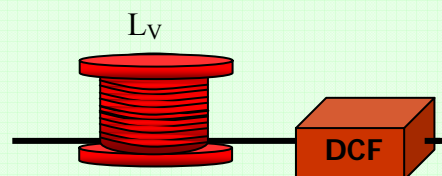
Primer:

Optična zveza dolžine 60 km vsebuje vlakno G.652 z disperzijo 16,5 ps/(nm·km). Kolikšna je potrebna dolžina kompenzacijskega vlakna z disperzijo -80 ps/(nm·km), ki ga vgradimo pred sprejemnik, za popolno kompenzacijo disperzije?

$$\Delta t = 0 = \Delta \lambda \cdot (L_V D_V + L_K D_K)$$

$$L_K = -\frac{L_V D_V}{D_K} = -\frac{60 \text{ km} \cdot 16,5 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})}{-80 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})} = \underline{\underline{12,4 \text{ km}}}$$

Slabljenje DCF znaša dodatnih 6 dB.



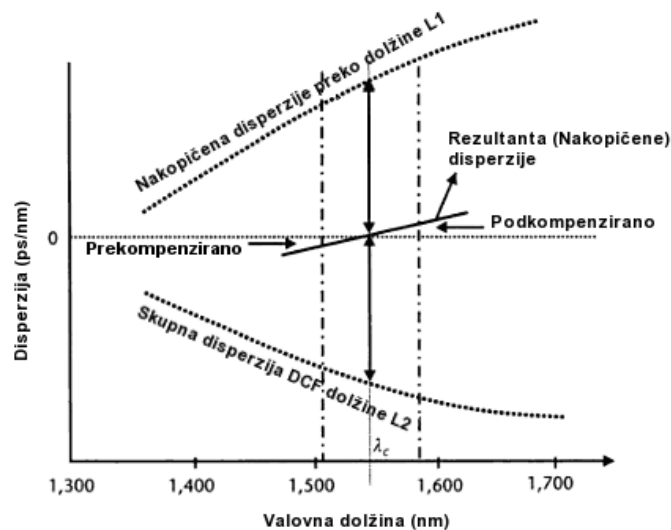
Z dodajanjem modulov za kompenzacijo disperzije v optično zvezo vnašamo dodatno slabljenje, zato je potrebno optični signal dodatno ojačati. Iz praktičnih razlogov sta modul za kompenzacijo disperzije in optični ojačevalnik običajno nameščena na isti lokaciji.

Pri kompenzaciji WDM zvez je pomemben parameter širina frekvenčnega pasu, ki ga lahko kompenziramo. Nakopičena disperzija najbolj vpliva na WDM signale skrajnih zunanjih kanalov v optičnem spektru.

DCF-ji se lahko uporabljajo za kompenzacijo kromatske disperzije v enokanalnih kot tudi v večkanalnih prenosnih sistemih. Če ga uporabljamo v večkanalnih prenosnih sistemih ali WDM okolju mora biti pogoj enačbe (?) izpolnjen za vsak individualni WDM kanal.

$$D_V(\lambda_i) \cdot L_V = -D_K(\lambda_i) \cdot L_K$$

Ker je $D_V(\lambda)$ odvisna od valovne dolžine, bo nakopičena disperzija $D_V(\lambda)L_V$ različna za vsak individualni kanal. Zato je zaželeno, da imajo DCF-ji ne samo veliko negativne disperzije, ampak tudi neg. disperzijsko strmino, kar zadovolji pogoje enačbe (?).



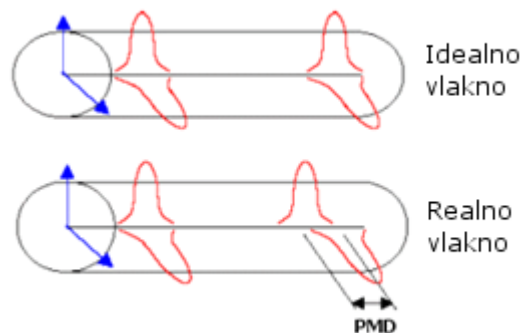
Slika 12: Primer neidealnega ujemanja kompenzacije disperzije med prenosnim vlaknom in DCF.

Kompenzacijska vlakna pri katerih se ujema tudi disperzijska strmina zmanjšujejo razširjanje v nakopičeni disperziji v WDM sistemu. Negativna disperzijska strmina zagotavlja manjše razširjanje nakopičene disperzije, medtem ko DCF z pozitivno disperzijsko strmino (angl. positive dispersion slope) razširjanja nakopičene disperzije ne popravlja. DCF-ji z negativno disperzijsko strmino omogočajo mnogo boljše prenosne razdalje, preden je potrebno urejati disperzijo posameznega kanala v sprejemniku.

Pri bitnih hitrostih večjih od 80 Gbit/s je potrebna dinamična kompenzacija disperzije.

9.5. Polarizacijska rodovna disperzija optičnega vlakna

V preteklosti, ko so telekomunikacijski sistemi delovali pri nizkih bitnih hitrostih je bila polarizacijska rodovna disperzija (angl. Polarization Mode Dispersion – PMD) za praktične aplikacije nepomemben pojav. Z naraščanjem bitne hitrosti v enorodovnem optičnem vlaknu nad 10 Gbit/s v posameznem kanalu, postaja PMD omejujoč dejavnik. Večina enorodovnih vlaken podpira dva polarizacijska rodova, vertikalni in horizontalni. Ker ta polarizacijska stanja niso uravnotežena, pride do medsebojnega vpliva med impulzi, pri čemer pride do razmazanja signala, kot prikazuje slika 13. Dvlomnost povzroča, da se monokromatični optični signal razdeli na dva ortogonalna polarizirana signala, ki potujeta z različno hitrostjo. Isto se zgodi vsakemu impulzu moduliranega optičnega signala: impulz se razdeli v dva impulza, ki potujeta z različno hitrostjo. Ko se signala združita, pride do razmazanega signala, zaradi različnih časovnih prihodov.



Slika 13: Potovanje impulza v idealnem in realnem optičnem vlaknu.

PMD je posledica proizvodnega procesa in zunanjih vplivov na optično vlakno, kot je na primer ovalnost vlakna. Odstopanje snovi in geometrijskih parametrov od krožne simetrije ali pa pri polarizacijski anizotropiji stekla se hitrost obeh rodov razlikujeta in pojavlja se polarizacijska disperzija. Večina materialov, vključno z silicijevim optičnim vlaknom, ni izotropičnih ali pa postanejo izotropični pod določenimi pogoji.

Optična vlakna imajo koeficient PMD manjšo od $0,5 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$, vlakno tipa G.652 ima PMD $0,3 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$, pri ostalih vlaknih pa se spusti tudi do $0,1 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$. Posebne tehnike pri izdelavi optičnega vlakna (vrtenje proforme) pripomorejo k manjši vrednosti PMD.