

SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET U RIJECI

Ivan Afrić

**MJERENJE KROMATSKE DISPERZIJE PRI VRLO
VISOKIM PRIJENOSNIM BRZINAMA**

DIPLOMSKI RAD

Rijeka, 2013.

SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET U RIJECI

**MJERENJE KROMATSKE DISPERZIJE PRI VRLO
VISOKIM PRIJENOSNIM BRZINAMA**

DIPLOMSKI RAD

Predmet: Optoelektronički sustavi
Mentor: Dr.sc. Irena Jurdana
Student: Ivan Afrić
Matični broj: 13980/E
Studij: Elektroničke i informatičke tehnologije u pomorstvu

Rijeka, rujan, 2013.

Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Optička disperzija	2
2.1. Posljedice disperzije	2
2.2. Podjela optičke disperzije.....	3
2.2.1. Kromatska disperzija.....	3
2.2.2. Disperzija polarizacijskih modova	7
2.3. Specifikacije kromatske disperzije u optičkim vlaknima.....	9
3. Posljedice i kompenzacija kromatske disperzije	12
3.1. Širenje impulsa uzrokovano kromatskom disperzijom	12
3.1.1. Maksimalna dozvoljena disperzija	13
3.1.2. Maksimalna udaljenost prijenosa	13
3.2. Pogoršanje signala uzrokovano kromatskom disperzijom i kompenzacija kromatske disperzije	15
3.2.1. Kompenzacija disperzije	17
3.2.2. Disperzijsko kompenzacijsko vlakno u WDM sustavu.....	18
3.2.3. Braggove rešetke	20
3.2.4. Maksimalna devijacija kromatske disperzije	22
3.2.5. WDM sustavi: tolerancija na rezidualnu kromatsku disperziju	23
4. Modulacija signala i njezin utjecaj na kromatsku disperziju	24
4.1. NRZ-OOK modulacija	24
4.2. RZ-OOK modulacija	26
4.3. PSK modulacija.....	26
4.4. Varijacija PSK modulacije – NRZ-DPSK	28
4.5. Varijacija PSK modulacije – CS-RZ.....	29
4.6. Varijacija PSK modulacije – Duo-binarni	30
5. Mjerenje kromatske disperzije	33
5.1. Upotreba podataka dobivenih mjerenjem	33
5.2. Metode ispitivanja kromatske disperzije.....	34
5.2.1. Optički izvori.....	35
5.2.2. Metoda pomaka faze	35
5.2.3. Poboljšanje metode pomaka faze za terenska ispitivanja.....	37

5.2.4.	Diferencijalna metoda pomaka faze	39
5.2.5.	Metoda spektralnog grupnog kašnjenja u vremenskoj domeni	39
6.	Testiranje kromatske disperzije u koherentnim sustavima	43
6.1.	Ramanovo pojačanje	44
6.2.	Poznavanje efektivne površine	45
6.3.	Testiranje kromatske disperzije.....	46
7.	Uređaji za mjerenje kromatske disperzije	49
7.1.	EXFO FTB-5800	50
7.2.	EXFO FTB-5700	53
8.	Zaključak	57
	Literatura	59
	Skraćenice	60
	Popis slika	62
	Popis tablica	64

1. Uvod

Razvoj vrlo visokih brzina prijenosa (VHBR, engl. *Very High Bit Rate*), kao što su 40 Gbit/s i 100 Gbit/s, je potaknut povećanjem udaljenosti i potražnjom za većom propusnosti mreža. Međutim, ove visoke brzine su vrlo osjetljive na kromatsku disperziju (CD, engl. *Chromatic Dispersion*) i zahtijevaju pažljivo nadziranje.

Podaci dobiveni mjerenjem neophodni su pri tehničkoj realizaciji i eksploataciji telekomunikacijskog sustava. Kontrola ispravnosti različitih uređaja koji čine telekomunikacijsku mrežu nemoguća je bez električnih mjerenja. Granične vrijednosti u kojima se može nalaziti mjerena veličina određene su tehničkim propisima na temelju kojih se projektiraju uređaji i prijenosna mreža.

Rad je podijeljen na osam poglavlja, pa su tako nakon Uvoda u drugom poglavlju ovog rada obrađene osnove optičke disperzije i njihova podjela, te su prikazane specifikacije kromatske disperzije kod različitih vrsta optičkih vlakana.

Treće poglavlje sadržava posljedice prijenosa signala uzrokovane kromatskom disperzijom, te različiti načini kompenzacije kromatske disperzije. Detaljnije su objašnjena dva najčešća oblika kompenzacije, korištenje disperzijsko kompenzacijskog vlakna i Braggovih rešetki.

Četvrto poglavlje govori o različitim načinima modulacije signala kod optičkog prijenosa podataka, te njihovom utjecaju na smanjenje učinaka kromatske disperzije.

U petom poglavlju obrađene su različite metode mjerenja kromatske disperzije, te osnove njihovog rada.

Šesto poglavlje govori o kromatskoj disperziji u sustavima s koherentom detekcijom signala i njihovim najbitnijim elementima, kao što je Ramanovo pojačalo.

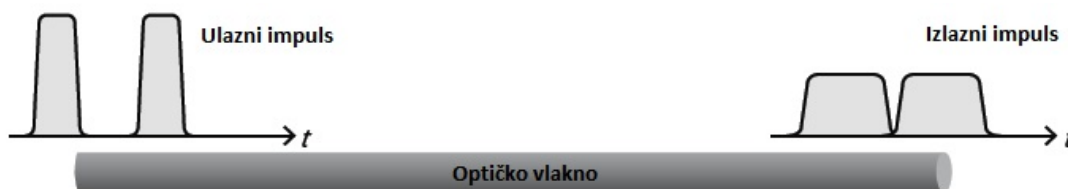
U preposljednjem, sedmom, poglavlju obrađeni su uređaji za mjerenje kromatske disperzije iz dvije podvrste uređaja (jednostrani i dvostrani). Opisana su dva uređaja proizvođača EXFO, FTB-5700 i FTB-5800.

2. Optička disperzija

Pored slabljenja signala, disperzija je drugi po redu ograničavajući faktor optičkih komunikacija preko optičkih vlakana. Pojavljuje se svugdje gdje prijenosna karakteristika medija odstupa od idealne linearne frekvencijske ovisnosti, npr. ravni val u slobodnom prostoru.

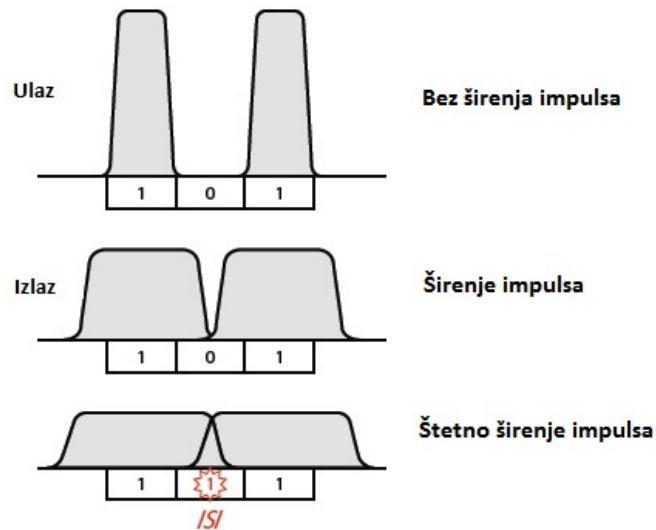
2.1. Posljedice disperzije

Kad predajnik šalje optički impuls kroz optičko vlakno, koji u digitalnom svijetu predstavlja logičku jedinicu, dolazi do širenja impulsa pri njegovom putovanju kroz vlakno. U vlakno ulazi pravilno oblikovan optički impuls, a izlazi prošireni impuls, kao što je prikazano na slici 2.1. Ako zanemarimo slabljenje impulsa unutar optičkog vlakna će energija impulsa, definirana kao površina ispod krivulje impulsa, ostati nepromijenjena. Dok će se njegova amplituda smanjiti radi širenja impulsa. Tu pojavu širenja impulsa nazivamo disperzija.



Slika 2.1 Širenje impulsa pri putovanju kroz optičko vlakno

Disperzija dolazi najviše do izražaja kod veza sa vrlo visokim brzinama prijenosa, jer je kod tih brzina vremenski razmak između impulsa vrlo mali, te dolazi do mogućnosti preklapanja susjednih impulsa zbog njihovog širenja. Zbog toga se javlja intersimbolna interferencija (ISI, engl. *Inter-Symbol Interference*), te kao što je prikazano na slici 2.2 dolazi do promjene jednog bita iz 0 u 1.



Slika 2.2 ISI uzrokovan širenjem impulsa

2.2. Podjela optičke disperzije

Postoje tri vrste disperzije:

- Intermodalna ili višemodna disperzije
- Intramodalna ili jednomodna kromatska disperzija (CD)
 - Materijala disperzija
 - Valovodna disperzija
- Disperzija polarizacijskih modova (PMD, engl. *Polarisation Mode Dispersion*)

Od tri vrste disperzije, s obzirom na jednomodno vlakno (SMF, engl. *Single Mode Fiber*), CD izaziva najviše problema kod prijenosa, dok PMD je najteže predvidjeti i ispraviti.

2.2.1. Kromatska disperzija

Brzina rasprostiranja elektromagnetskih valova kroz neko sredstvo ovisi o interakciji valova s materijalom, odnosno njegovom molekularnom građom. Kako sama interakcija, način i intenzitet ovisi o valnoj duljini, odnosno frekvenciji svjetlosti, očito je da i brzina propagacije ovisi o valnoj duljini. Pri transmisiji na visokim brzinama, neophodno je uzeti u obzir činjenicu o kontinuiranosti optičkog spektra signala. Kako pak brzina propagacije nekog optičkog signala ovisi o njegovoj valnoj duljini, očito je da će različite spektralne komponente realnog optičkog signala na cilj pristizati u različitim vremenskim razmacima, što se u vremenskoj domeni manifestira kao širenje impulsa, odnosno

dispertzija. Za razliku od višemodne disperzije u ovom slučaju govorimo o jednomodnoj, odnosno kromatskoj disperziji.

Za monokromatski signal možemo kao brzinu propagacije uzeti faznu brzinu,

$$v_f = \frac{c}{n} = \frac{\omega}{\beta}, \quad (2.1)$$

gdje je c brzina svjetlosti u vakuumu, n indeks loma materijala, $\omega=2\pi f$ kružna frekvencija, a β konstanta propagacije,

$$\beta = \frac{2\pi n}{\lambda}. \quad (2.2)$$

Kružna frekvencija opisuje kako se faza signala mijenja s vremenom, a opisuje promjenu faze s udaljenošću. Fazna brzina određuje brzinu kojom se fronta konstantne faze pomiče kroz prostor. Ako se pak promotri realniji slučaj, tj. signal koji je sastavljen od valova bliskih frekvencija koji čine valni paket, tada je brzina propagacije takva signala jednaka grupnoj brzini v_g koja je dana sljedećim izrazom,

$$v_g = \frac{d\omega}{d\beta} = \frac{1}{\frac{d\beta}{d\omega}} = \frac{1}{\beta_1} \quad (2.3)$$

Očito je da je u mediju koji nije disperzivan, zbog toga što je fazna brzina neovisna o valnoj duljini, propagacija signala jednako opisana faznom i grupnom brzinom.

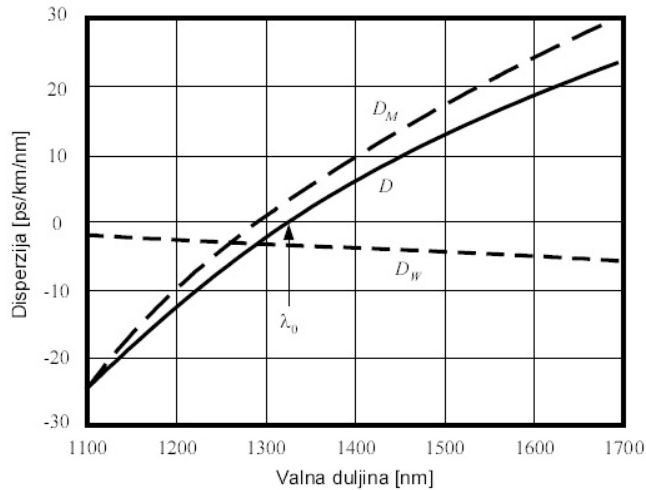
Ako se promotri optičko vlakno duljine L , te optički signal, čiji se spektar širine $\Delta\lambda$ nalazi oko centralne valne duljine λ , širenje impulsa se može opisati sljedećim izrazom

$$\Delta T = DL\Delta\lambda, \quad (2.4)$$

gdje je D koeficijent disperzije prema sljedećoj formuli,

$$D = \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{1}{v_g} \right) = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 \quad (2.5)$$

Parametar β_2 u gornjem izrazu naziva se disperzija grupne brzine (GVD, *Group Velocity Disperision*).



Slika 2.3 Koeficijent disperzije u ovisnosti o valnoj duljini

Izvor: ITU-T Manual: "Optical fibres, cables and systems", ITU, 2009.

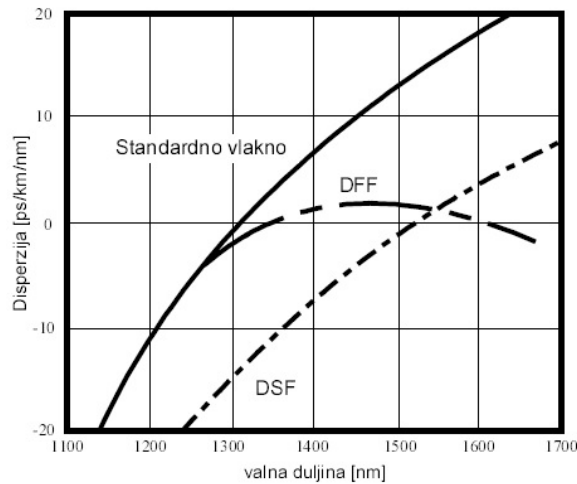
Na slici 2.4 prikazana je ovisnost koeficijenta disperzije D o valnoj duljini svjetlosti za standardno jednomodno vlakno. Kao što se može vidjeti, koeficijent disperzije isčezava za valnu duljinu nulte disperzije $\lambda_0=1300$ nm. Koeficijent disperzije je sastavljen od dvije komponente, materijalne disperzije D_M , te valovodne disperzije D_W , tj.

$$D = D_M + D_W \quad (2.6)$$

Materijalna disperzija je posljedica činjenice da indeks loma optičke niti ovisi o valnoj duljini. Na fundamentalnoj razini, uzrok materijalnoj disperziji leži u karakterističnim rezonantnim frekvencijama na kojima materijal apsorbira elektromagnetsko zračenje. Na slici se može vidjeti da je materijalna disperzija, koja je povezana s parametrom β_2 , ispod valne duljine nulte disperzije negativna, a za sve veće valne duljine pozitivna. U valnom području 1350-11660 nm materijalna disperzija se može aproksimirati sljedećim izrazom,

$$D_M = 122 \left(1 - \frac{\lambda_0}{\lambda}\right). \quad (2.7)$$

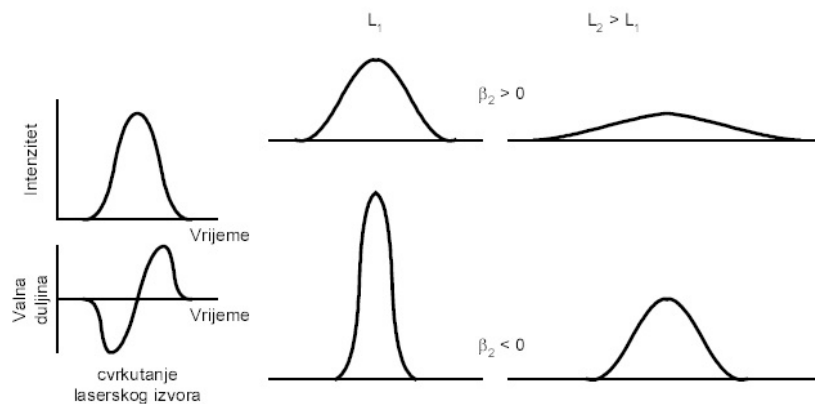
Valovodna disperzija posljedica je geometrijskih svojstava vlakna, odnosno raspodjele električnog polja u samoj niti. Naime, u tipičnim radnim uvjetima efektivna površina kojom putuje svjetlost rasprostire se djelomično i u područje omotača, što ima za posljedicu promjenu efektivnog indeksa loma. Veće valne duljine povećavaju efektivnu površinu, te se time mijenja efektivni indeks loma. Na slici se može vidjeti doprinos valovodne disperzije ukupnom koeficijentu disperzije.



Slika 2.4 Koeficijent disperzije za standardno (SMF), DSF i DFF optičko vlakno

Izvor: ITU-T Manual: "Optical fibres, cables and systems", ITU, 2009.

Kako doprinos valne disperzije ukupnoj disperziji ovisi o parametrima vlakna, odnosno profilu indeksa loma, moguće je dizajnirati optičko vlakno koje ima pomaknutu λ_0 u područje 1550 nm. Takva se vlakna nazivaju vlakna s pomaknutom disperzijom (DSF, engl. *Dispersion Shifted Fiber*). Nadalje, moguće je dizajnirati doprinos valovodne disperzije, tako da je ukupna disperzija relativno malena preko šireg područja, npr. 1300-1600 nm. Takva se vlakna nazivaju vlakna s poravnom disperzijom (DFF, engl. *Dispersion Flattened Fiber*). Veoma je važno naglasiti pravilan smisao disperzije, odnosno njen utjecaj na propagaciju optičkog signala. U optičkom se prijenosu ne može promatrati utjecaj samo jednog parametra na propagaciju, već je najčešće potrebno promatrati interakciju više fenomena. U ovom je trenutku je prikladno spomenuti interakciju cvrkutanja laserskog izvora (engl. *laser chirp*) i disperzivnog svojstva optičkog vlakna.



Slika 2.5 Interakcija cvrkutanja laserskog izvora i disperzije optičkog vlakna

Izvor: ITU-T Manual: "Optical fibres, cables and systems", ITU, 2009.

Cvrkutanje valne duljine je posljedica rada laserskog predajnika. Naime, optički izvor tijekom pobude promjenom optičke snage inicira promjena indeksa loma optičkog vlakna injekcijom slobodnih nosioca u valovod. Posljedica je promjena valne duljina signala. Porast snage znači porast indeksa loma kojeg vidi signal, a to ima za posljedicu smanjenje valne duljine signala (slika 2.6). Dakle, normalno lasersko cvrkutanje ima za posljedicu pomak valne duljine signala na niže valne duljine pri prednjem bridu signala (porast snage, odnosno intenziteta), odnosno obratno za zadnji brid signala. Ako promotrimo interakciju cvrkutanja laserskog izvora i disperzije optičkog vlakna, tada možemo razlikovati dva slučaja. Ukoliko je $\beta_2 > 0$, tj. govorimo o normalnoj disperziji, niže će valne duljine putovati brže, a veće sporije, tj. prednji će dio impulsa putovati brže a stražnji sporije. Konačna je posljedica širenje impulsa, tj. možemo zaključiti da je cvrkutanje laserskog izvora potpomoglo djelovanju disperzije. U modu rada s tzv. anomalnom disperzijom, $\beta_2 < 0$, niže će valne duljine putovati sporije, a više brže. Posljedica je početno skupljanje signala, tj. njegova kompresija, koja traje sve do trenutka, odnosno udaljenosti, kada se prednji i stražnji brid stope. Nakon toga se signal nastavlja širiti. Dakle, glavna je posljedica disperzije optičkog vlakna ograničenje najveće dopuštene brzine prijenosa. Kako je ukupna disperzija suma materijalne i valovodne disperzije, te kako obje mogu poprimiti i pozitivan i negativan predznak, u komercijalnim sustavima se često koristi princip po kojem se nastoji postići nulta disperzija zbrajanjem doprinosa ovih dvaju tipova disperzije. Pri tome treba razlikovati dvije mogućnosti. U prvoj se u postojeće optičke transmisijske sustave, koji mahom koriste vlakna SMF tipa, dodaje element za kompenzaciju disperzije. U najjednostavnijoj izvedbi je to optičko vlakno čiji je ukupni iznos disperzije jednak po iznosu ali suprotan po predznaku ukupnoj disperziji standardnog vlakna. U novijim sustavima, instalirana su vlakna s pomaknutom nultom disperzijom, koja na korištenim valnim duljinama iskazuju zanemarivo malenu disperziju.

2.2.2. Disperzija polarizacijskih modova

Kada se kaže da je vlakno jednomodno, tada se podrazumijeva da istim putuju dva nezavisna moda koja su ortogonalno polarizirana. Kaže se da su ta dva moda degenerirana, tj. sa identičnim karakteristikama grupnog kašnjenja. To je doista slučaj samo kada je vlakno idealno, tj. kružno simetrično na svim svojim dijelovima. Svaka promjena u presjeku vlakna, kao npr. ovalnost nastala tijekom proizvodnje, ukloniti će uvjet degeneriranosti, te izazvati

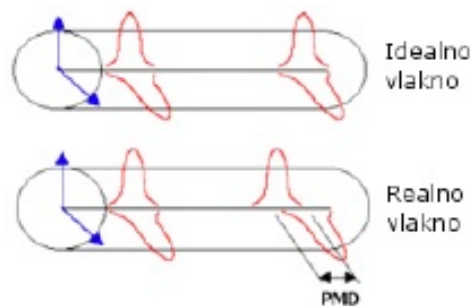
razliku u indeksu loma kojeg „vide“ dva moda (engl. *birefringence*). Stupanj tog izobličenja definiran je kao,

$$B = |n_x - n_y|, \quad (2.8)$$

a osnovna je posljedica periodička izmjena snage između dvije polarizacijske komponente. Period izmjene polarizacije (engl. *beat length*) je,

$$L_B = \frac{\lambda}{B}. \quad (2.9)$$

Dakle, postoji razlika u grupnom kašnjenju ova dva moda, što se naziva disperzijom polarizacijskih modova (PMD). Ako se promatra kratka sekcija optičkog vlakna s eliptičnom jezgrom, ona će uzrokovati da je jedan polarizacijski mod sporiji od drugog. Signal će mijenjati polarizaciju, iz linearne će prijeći u eliptičnu, zatim u kružnu, a onda ponovno u linearnu.



Slika 2.6 Prijenos signala u idealnom i realnom optičkom vlaknu

Izvor: Batagelj, Boštjan: “Disperzija optičnoga vlakna“, Fakultet za elektrotehniku Ljubljana, 2005.

Diferencijalno grupno kašnjenje između dva moda (DGD, engl. *Differential Group Delay*) može se izraziti kao,

$$\Delta\tau = \frac{\lambda}{cL_B} \quad (2.10)$$

Tako primjerice za period izmjene polarizacije od 10m dobivamo DGD iznosa 0.5 ps/km, što opet sugerira da bi signali u dva polarizacijska moda nakon propagacije od 100 km bili pomaknuti međusobno za 50 ps, što bi bilo veoma značajno za signale brzine od 2.5 Gbit/s na više. Naravno, to bi znatno ograničilo maksimalno dopustive udaljenosti. No, kako period izmjene polarizacije opisuje samo lokalnu razliku u indeksu loma dva ortogonalno polarizirana moda, a uzduž optičke niti orijentacija osi koje opisuju lokalnu razliku u indeksu loma se može mijenjati, tj. ono što je bila brža os može postati sporija, može se zaključiti da

se DGD ne akumulira linearno sa dužinom optičke niti. Stoga je prikladnije promatrati akumulaciju DGD kao slučajan proces, gdje se srednja DGD povećava s korijenom udaljenosti. Bolja vlakna postižu vrijednosti u području $0.1-1 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$, što rezultira sa iznosom DGD od samo 5 ps preko optičkog vlakna duljine 10000 km.

2.3. Specifikacije kromatske disperzije u optičkim vlaknima

Promjena brzina valnih duljina i , što je još važnije, stopa te promjene nije linearna, te je prema tome širenje pulsa teže, na nekim valnim duljinama od drugih. Tablice 2.1-2.4 opisuju specifikacije jednomodnih optičkih vlakana (SMF, engl. *Single Mode Fibre*) korištenih u svjetlovodnim telekomunikacijama kao što je definirano u ITU-T (engl. *International Telecommunication Union, Telecommunication standardization sector of ITU*) preporukama.

Tablica 2.1 Specifikacije kromatske disperzije u optičkim vlaknima G.652, G.653 i G.654

ITU-T preporuke		G.652	G.653			G.654		
Parametri vlakna		A/B/C/D	A	B		A	B	C
$\lambda_{0,\min}$	nm	1300	1500	--	--	--	--	--
$\lambda_{0,\max}$	nm	1324	1600	--	--	--	--	--
λ_{\min}	nm	--	1525	--	--	--	--	--
λ_{\max}	nm	--	1575	--	--	--	--	--
λ_{range}	nm	--	--	1460-1525	1525-1625	--	--	--
$D_{\min, \lambda_{\text{range}}}$	ps/(nm*km)	--	--	$[0.085 \cdot (\lambda - 1525)] - 3.5$	$3.5 \cdot (\lambda - 1600) / 75$	--	--	--
λ_{range}	nm	--	--	1460-1575	1575-1625	1550		
$D_{\max, \lambda_{\text{range}}}$	ps/(nm*km)	--	--	$3.5 \cdot (\lambda - 1500) / 75$	$[0.085 \cdot (\lambda - 1575)] + 3.5$	+20	+22	+20
$S_{0,\max}$	ps/(nm ² *km)	0.092	0.085	--	--	--	--	--
$\lambda(S_{\max})$	nm	--	--	--	--	1550		
S_{\max}	ps/(nm ² *km)	--	--	--	--	0.070		
λ_{link}	nm	1550	--	$\lambda_{0,\text{typ}}=1550$		1550		
S_{link}	ps/(nm ² *km)	0.056	--	$S_{0,\text{typ}}=0.07$		TBD		
D_{link}	ps/(nm*km)	+17	--	--		TBD		

Izvor: Recommendation ITU-T G.652, G.653, G.654

Tablica 2.2 Specifikacije kromatske disperzije u optičkim vlaknima G.655

ITU-T preporuke		G.655		
Parametri vlakna		A	B/C	
λ_{range}	nm	1530-1565		1565-1625
λ_{min}	nm	1530		TBD
λ_{max}	nm	1565		TBD
D_{min}	ps/(nm*km)	±0.1	±0.1	±TBD
D_{max}	ps/(nm*km)	±6.0	±10.0	±TBD
$D_{\text{min}}-D_{\text{max}}$	ps/(nm*km)	--	<=5.0	--
$\lambda_{\text{link,range}}$	nm	--	--	--
S_{link}	ps/(nm ² *km)	--	--	--
D_{link}	ps/(nm*km)	--	--	--

ITU-T preporuke		G.655			
Parametri vlakna		D		E	
λ_{range}	nm	1460-1550	1550-1625	1460-1550	1550-1625
λ_{min}	nm	--	--	--	--
λ_{max}	nm	--	--	--	--
D_{min}	ps/(nm*km)	$[7.0 \cdot (\lambda - 1460) / 90] - 4.2$	$[2.97 \cdot (\lambda - 1550) / 75] + 2.8$	$[5.42 \cdot (\lambda - 1460) / 90] + 0.64$	$[3.3 \cdot (\lambda - 1550) / 75] + 6.06$
D_{max}	ps/(nm*km)	$[2.91 \cdot (\lambda - 1460) / 90] + 3.29$	$[5.06 \cdot (\lambda - 1550) / 75] + 6.2$	$[4.65 \cdot (\lambda - 1460) / 90] + 4.66$	$[4.12 \cdot (\lambda - 1550) / 75] + 9.31$
$D_{\text{min}}-D_{\text{max}}$	ps/(nm*km)	--	--	--	--
$\lambda_{\text{link,range}}$	nm	Moguće su različite implementacije, dizajnirane da optimiziraju različite kompromise u snazi, razmaku kanala, pojačanju, duljini veze i brzini. Ove implementacije su primarno varijacije dozvoljene CD, nagiba CD i nelinearnog koeficijenta.			
S_{link}	ps/(nm ² *km)				
D_{link}	ps/(nm*km)				

Izvor: Recommendation ITU-T G.655

Tablica 2.3 Specifikacije kromatske disperzije u optičkim vlaknima G.656

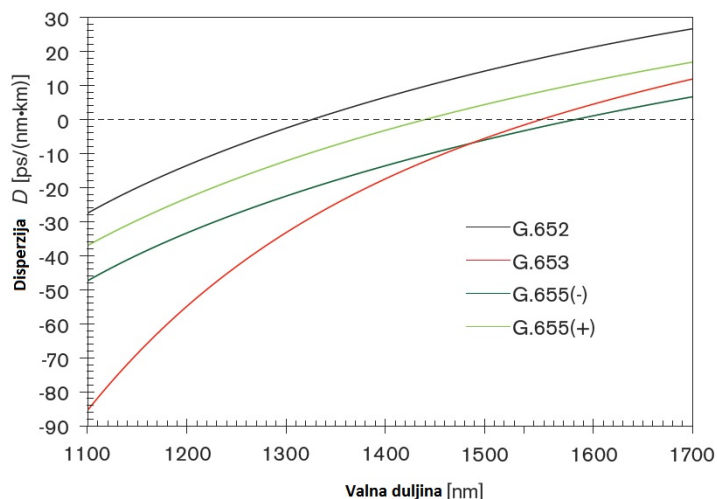
ITU-T preporuke		G.656		
Parametri vlakna				
λ_{range}	nm	1460-1550	1550-1625	
D_{min}	ps/(nm*km)	$[2.60 \cdot (\lambda - 1460) / 90] + 1.00$	$[0.98 \cdot (\lambda - 1550) / 75] + 3.60$	
D_{max}	ps/(nm*km)	$[4.68 \cdot (\lambda - 1460) / 90] + 4.60$	$[4.72 \cdot (\lambda - 1550) / 75] + 9.28$	
$\lambda_{\text{link,range}}$	nm	1460	1550	1625
S_{link}	ps/(nm ² *km)	TBD	TBD	TBD
D_{link}	ps/(nm*km)	--	TBD	--

Izvor: Recommendation ITU-T G.656

Tablica 2.4 Specifikacije kromatske disperzije u optičkim vlaknima G.657

		G.657	
		A	B
$\lambda_{0,\text{min}}$	nm	1300	1250
$\lambda_{0,\text{max}}$	nm	1324	1350
$S_{0,\text{max}}$	ps/(nm ² *km)	0.092	0.11

Izvor: Recommendation ITU-T G.657



Slika 2.7 Kromatska disperzija različitih standardiziranih SMF vlakana

Izvor: ITU-T Manual: "Optical fibres, cables and systems", ITU, 2009.

3. Posljedice i kompenzacija kromatske disperzije

3.1. Širenje impulsa uzrokovano kromatskom disperzijom

Od predajnika, širenje impulsa nastalo zbog kromatske disperzije uzrokovano je:

- Prisutnošću različitih valnih duljina unutar optičkog spektra izvora svjetlosti. Svaki ima različit indeks loma (IOR, engl. *Index Of Refraction*), zbog čega dolazi do faznog i grupnog kašnjenja duž optičkog vlakna.
- Izvor modulacije, koja ima dva učinka (proširivanje / kompresiju):
 - Cvrkut nastaje kada spektar valnih duljina izvora varira tijekom impulsa, pogotovo u početnim i završnim krajevima impulsa. Valne duljine na kraju optičkog prijenosa kasne u odnosu na one na početku, što uzrokuje širenje impulsa. Ali ako je ovo kašnjenje suprotno relativnom grupnom kašnjenju vlakna (RGD, engl. *relative group delay*), može se dogoditi kompresija impulsa. Učinak cvrkutanja je opisan u tablici 3.1.

Tablica 3.1 Učinak cvrkutanja na disperziju i širenje impulsa

Predznak cvrkutanja	Smjer pomaka valnih duljina unutar impulsa		Predznak efekta (cvrkutanje x disperzija)	
	Vrijeme rasta impulsa	Vrijeme raspada impulsa	+	-
+	Prema kraćim valnim duljinama	Prema dužim valnim duljinama	Širenje impulsa	Sužavanje impulsa do minimuma, a zatim širenje
-	Prema dužim valnim duljinama	Prema kraćim valnim duljinama	Sužavanje impulsa do minimuma, a zatim širenje	Širenje impulsa

Izvor: Exfo: "Chromatic Dispersion at High Bit Rates", Exfo, 2012.

Kromatska disperzija utječe na širine izvora spektra i modulaciju predajnika može se uzeti u obzir pazeći na sljedeće hipoteze: maksimalna dozvoljena disperzije i maksimalna udaljenost.

3.1.1. Maksimalna dozvoljena disperzija

Za svaki gubitak snage i vjerojatnost pogreške bita (BER, engl. *Bit Error Rate*), tolerirana međuznakovna interferencija (ISI, engl. *InterSymbol Interference*) rezultirana CD, proširivanjem impulsa, ima svoju gornju granicu. Ta granica je dostignuta kada je širenje impulsa jednako vremenskom prostoru rezerviranom za taj impuls.

Tablica 3.2 Maksimalna dopuštena disperzija za različite NRZ spektralne širine impulsa i gubitke

Gubitak snage [dB]	0.5	1	2
B [Gbit/s]	$(D \times L)_{\text{Max}}$ [ps/nm]		
2.5	47126	18468	29731
10	794	1193	1920
40	50	75	120
100	8	12	19

Izvor: Exfo: "Chromatic Dispersion at High Bit Rates", Exfo, 2012.

U tablici 3.2, maksimalna tolerirana disperzija se povećava sa užiim NRZ (engl. *Non-return-to-zero*) spektrom, posebice pri malim prijenosnim brzinama. Na vrlo velikim prijenosnim brzinama utjecaj spektralnog širenja impulsa nestaje jer maksimalna tolerirana disperzija postaje vrlo mala. U takvim situacijama rezidualna disperzija i njezin smještaj postaju kritični.

3.1.2. Maksimalna udaljenost prijenosa

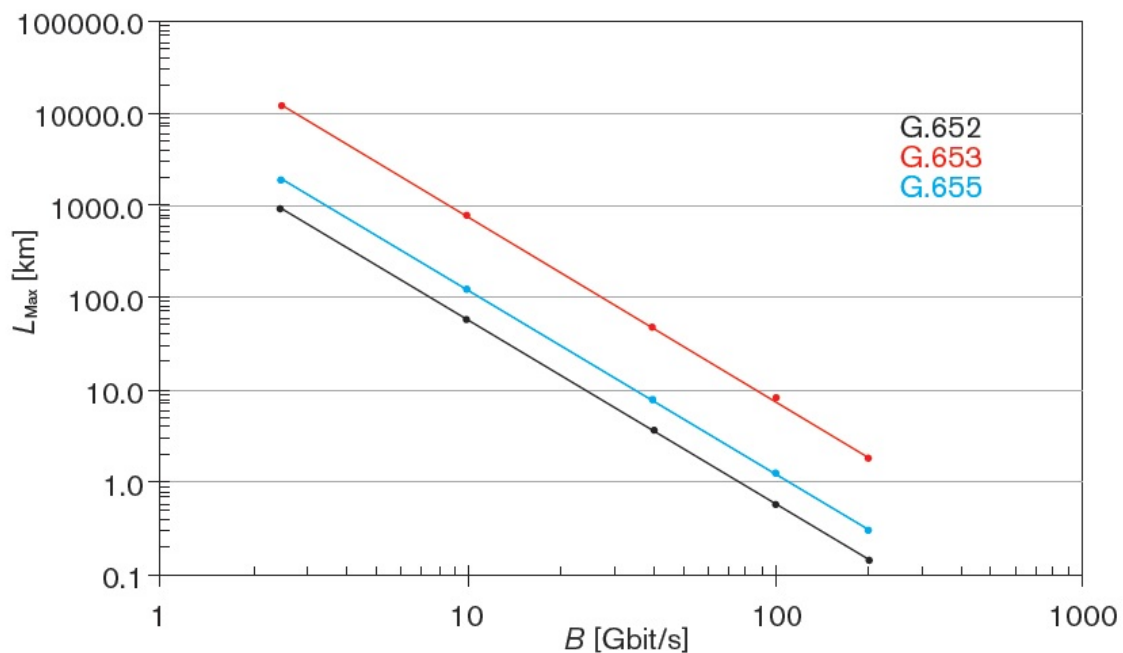
Kad je disperzija tipičnih vlakana poznata, navedeni podaci mogu se iskoristiti za izračun maksimalne udaljenosti prijenosa.

Tablica 3.3 Maksimalna udaljenost prijenosa signala za različite tipove vlakana

L_{\max} [km], $P_{\text{ISI}}=1$ dB	D(1565 nm)[ps/nm.km]		
	Tip vlakna	G.652	G.653
B[Gbit/s]	18.7	1.4	9
2.5	970	12940	2013
10	63	836	130
40	4	52	8
100	0.6	8	1.3

Izvor: Exfo: "Chromatic Dispersion at High Bit Rates", Exfo, 2012.

Kao što je prikazano u tablici 3.3, sasvim je očito da je kod vrlo visokih prijenosnih brzina teško prenijeti signal na veće udaljenosti bez kompenzacija disperzije ili različite prijenosne sheme.



Slika 3.1 Maksimalna udaljenost prijenosa kao funkcija brzine prijenosa

Izvor: Exfo: "Chromatic Dispersion at High Bit Rates", Exfo, 2012.

3.2. Pogoršanje signala uzrokovano kromatskom disperzijom i kompenzacija kromatske disperzije

Na duljim prijenosnim sustavima i sustavima s većom prijenosnom brzinom kromatsku disperziju nesmiemo zanemarivati, zato jer negativno utječe na signal koji prenosimo. Na sreću CD je linearna pojava te se vrlo lako može kompenzirati.

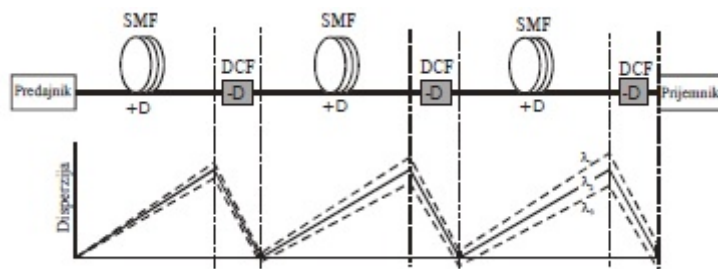
Metode kompenzacije CD mogu se podijeliti u tri skupine:

- Pred-distorzija (engl. *predistorsion*) koja se dodaje na strani predajnika s prilagođavanjem karakteristikama ulaznog optičkog signala. Pred ulazom u optičko vlakno se optičkom impulsu dodaje frekvencijsko cvrkutanje, koje je suprotno od onog koje će signal primiti tijekom prijenosa kroz optičko vlakno.
- Po-kompenzacija (engl. *postdetection*) je napravljena na strani prijemnika na električnom signalu upotrebom adaptivnog odziva za disperzijske pojave. Smanjivanje utjecaja kromatske disperzije elektroničkog filtriranja. Po-kompenzaciju je moguće izvoditi samo kod manjih prijenosnih brzina zbog ograničenja današnjih procesora.
- Linijska (engl. *inline*) kompenzacija kromatske disperzije je optička metoda koja se ostvaruje uzduž prijenosnog puta. Moguće ju je izvesti na bilo kojem mjestu transmisijskog puta koristeći potpuno optičke metode. Od mnogih postojećih metoda, danas se najviše upotrebljava metoda kompenzacije pomoću disperzijskog kompenzacijskog vlakna (DCF, engl. *Dispersion Compensation Fiber*).

Disperzijska kompenzacijska vlakna postala su osnovni dio današnjih optičkih prijenosnih sustava. Pri upotrebi DCF kompenzacije potrebno je zadovoljiti sljedeću jednakost

$$D_V \cdot L_V = -D_K \cdot L_K, \quad (3.1)$$

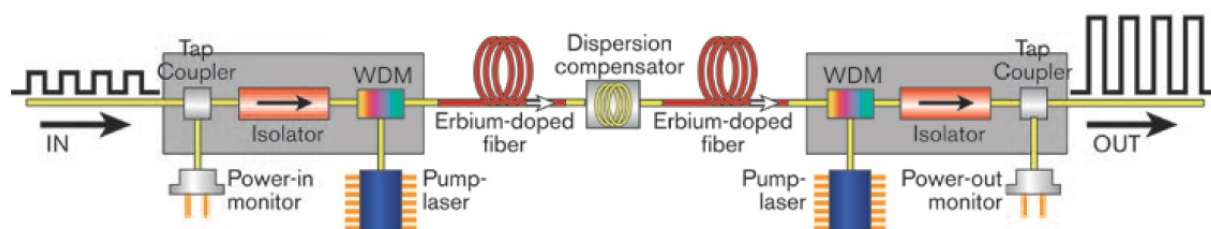
gdje su D_V i L_V kromatska disperzija i duljina prijenosnog vlakna, a D_K i L_K disperzija i dužina DCF-a. Duljina prijenosa L_V i disperzija D_V su parametri koje znamo, što znači da bi se ispunila jednakost (3.1) disperzije D_V i D_K moraju biti suprotnog predznaka. Duljina kompenzacijskog vlakna L_K mora biti što kraća, radi manjeg slabljenja signala, pa se zato koristi DCF sa velikom negativnom disperzijom.



Slika 3.2 Prikaz prijenosne linije sa smanjivanjem disperzije pomoću DC modula

Izvor: Radenković, N.; Marinčić, A.: "Metode kompenzacije disperzije u optičkim sistemima", 2005.

DCF vlakna imaju mali promjer jezgre, što vodi do relativno velike komponente valovodne disperzije. Sveukupna vrijednost koeficijenta disperzije za komercijalno dostupna DCF vlakna leži u području između -80 do -150 ps/nm·km. Zbog slabije vodljivosti unutar jezgre vlakna, DCF unosi veće slabljenje signala, je osjetljivo na mikro zavoje, te se zbog toga neprimjereno za kabliranje i polaganje. Ukupni koeficijent slabljenja signala α_{DCF} tipičnog DCF vlakna iznosi od 0.4 do 0.7 dB/km, što je puno više od slabljenja prijenosnih vlakana koje iznosi oko 0.2 dB/km. Za klasifikaciju pojedinih tipova DCF-a koristi se omjer $|D_K|/\alpha_{DCF}$, koji treba biti što veći. Danas, tipičan omjer DCF-a iznosi >200 ps/nm·km/dB. Dodavanjem modula za kompenzaciju disperzije u optičku vezu unosimo slabljenje, te je stoga potrebno optički signal dodatno pojačati. Iz praktičnih razloga su modul za kompenzaciju disperzije i optičko pojačalo smješteni na istoj lokaciji.



Slika 3.3 Disperzijska kompenzacija unuta optičkog pojačala

Izvor: Exfo: "Chromatic Dispersion at High Bit Rates", Exfo, 2012.

Pri kompenzaciji optičkih mreža s valnim multipleksiranjem (WDM, engl. *Wavelength Division Multiplexing*) važan parametar je širina frekventijskog pojasa. Akumulirana disperzija najviše utječe na WDM signale u vanjskim kanalima optičkog spektra.

DCF vlakna se lako upotrebljavaju za kompenzaciju CD u jedokanalnim, kao i u višekanalnim prijenosnim sustavima. Ako se koristi u višekanalnim sustavima ali WDM okolini sljedeća jednadžba mora biti ispunjena za svaki individualni WDM kanal.

$$D_V(\lambda_i) \cdot L_V = -D_K(\lambda_i) \cdot L_K \quad (3.2)$$

Kako je disperzija $D_V(\lambda_i)$ ovisna o valnoj duljini, akumulirana disperzija bit će različita za svaki individualni kanal. Zato je poželjno da DCF ima veliku negativnu disperziju, ali također i negativni disperzijski nagib, koja zadovoljava uvjete jednadžbe. Kompenzacijska vlakna kod kojih se disperzijski nagib poklapa smanjuju širenje akumulirane disperzije unutar WDM sustava. DCF vlakna s negativnim disperzijskim nagibom omogućavaju mnogo bolje prijenosne udaljenosti, prije nego je potrebno uređivati disperziju pojedinačnog kanala u prijemu.

Pri prijenosnim brzinama većim od 80Gbit/s potrebno je koristiti dinamičku kompenzaciju disperzije na prijemu.

3.2.1. Kompenzacija disperzije

Postoji nekoliko pasivnih i aktivnih načina kako kompenzirati kromatsku disperziju:

1. Pasivni načini kompenzacije CD:

- Disperzijsko kompenzacijsko vlakno (DCF, engl. *dispersion compensation fiber*)
- CD mapiranje
- Braggova rešetka u optičkom vlaknu (FBG, engl. *Fiber Bragg grating*)
- HOM (engl. *High order mode*)
- VIPA (engl. *Virtually imaged phased array*)
- CD-podržani prijenos, kao što su CD mapiranja
- Holey vlakna

2. Aktivni načini kompenzacije CD:

- Nelinearni efekt (NLE, engl. *Nonlinear effect*) i nelinearno-kondicionirani prijenos kao što je soliton prijenos
- Predkompenzacija, npr. predcvrtanje
- Elektronska obrada signala
 - Korekcija faze
 - FEC (engl. *Forward error correction*)

- Spektralna inverzija (invertiranje spektralnih komponenti, obično u sredini raspona sustava)

3.2.2. Disperzijsko kompenzacijsko vlakno u WDM sustavu

Za ilustraciju kompenzacije disperzije, prikazan je WDM sustav i njegovo ponašanje na kompenzaciju CD pomoću DCF-a.

Sustav se sastoji od:

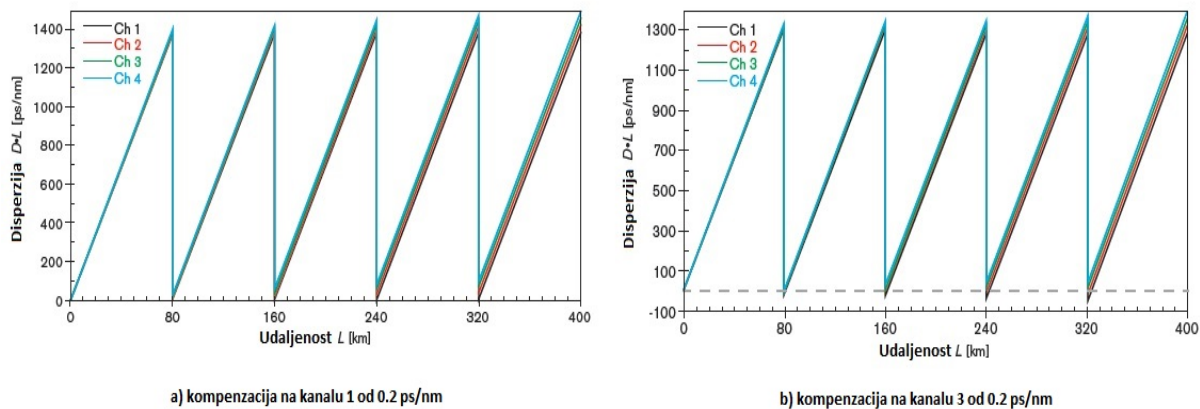
- Broj WDM kanala: 4
- Razmak kanala: 200 GHz
- Oblik modulacije: *unchirped* NRZ
- Duljina veze: 400 km
- Mjesto pojačala i DCF-a: svakih 80 km

Tablica 3.3 Tablični prikaz vrijednosti disperzije za gornji primjer

Broj kanala	f[THz]	λ [nm]	D za λ_0 [ps/(nm*km)]				S=dD/d λ [ps/(nm ² km)]
			D(1300nm)	D(na sredini)	D(1324nm)	% Δ	
1	193.500	1549.31503	+18.166	+17.488	+16.810	4%	0.05906
2	193.300	1550.91804	+18.258	+17.583	+16.907	4%	0.05892
3	193.100	1552.52438	+18.351	+17.677	+17.004	4%	0.05877
4	192.900	1554.13405	+18.443	+17.772	+17.101	4%	0.05862
DCF	--	--	--	-80	--	--	-0.2
G.652	--	1550	--	+17	--	--	0.056

Izvor: Exfo: "Chromatic Dispersion at High Bit Rates", Exfo, 2012.

DCF je izabran tako kako bi dobili točnu kompenzaciju; prvo na kanalu 1 i onda na kanalu 3. Sljedeća slika prikazuje promjenu CD od početka do kraja veze, kada je točna kompenzacija disperzije primjenjena na kanalu 1(slika a) i na kanalu 3(slika b).

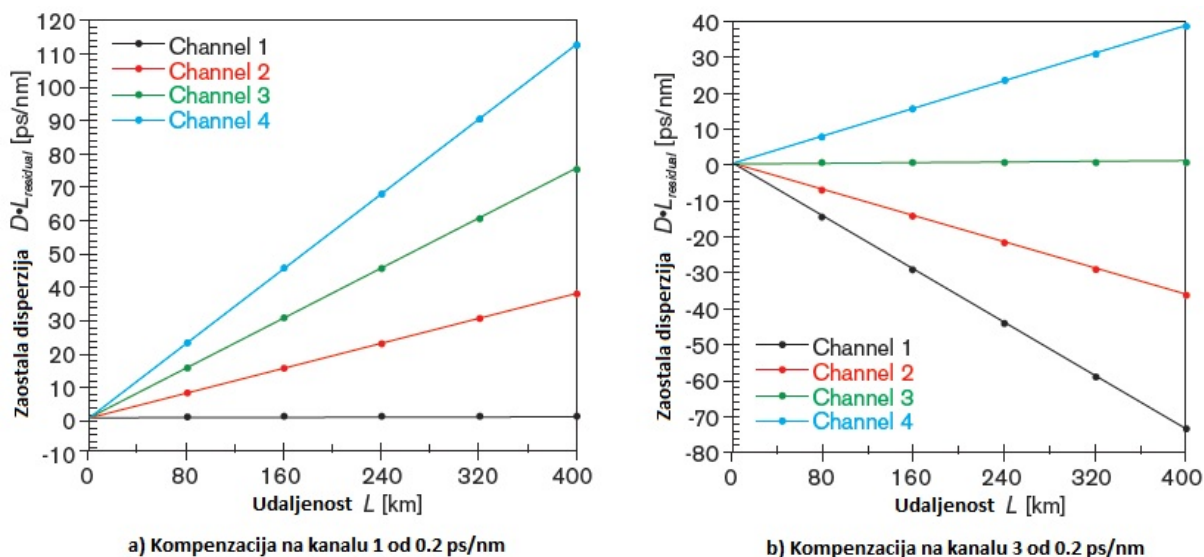


Slika 3.4 Prikaz disperzije sa kompenzacijom primjenjenom na pojedini kanal

Izvor: Exfo: "Chromatic Dispersion at High Bit Rates", Exfo, 2012.

Dok su CD i DCF kosine fiksne vrijednosti, one od valne duljine se razlikuju. To znači da svaki kanal ima različite vrijednosti CD, a kompenzacija se ne primjenjuje jednako. Preostala CD svakog kanala povećava se sa udaljenosti.

Slika 3.5 predstavlja dvije kompenzacijske strategije; pokazuje progresiju preostale CD (ne CD vrijednosti) kao funkciju udaljenosti za svaki kanal kada primjenjujemo točnu kompenzaciju na kanalu 1 ili kanalu 3. Iscrtkana linija pokazuje ukupnu nadoknađenu CD za svaki kanal u vezi. To jednostavno znači da, kad CD kanala prijeđe određenu granicu neće biti omogućen daljnji prijenos signala bez grešaka uzrokovanih kromatskom disperzijom. CD vrijednost kompenziranih kanala je postavljena na 0,2 ps / nm za svaki dio veze.



Slika 3.5 Zaostala disperzija

Izvor: Exfo: "Chromatic Dispersion at High Bit Rates", Exfo, 2012.

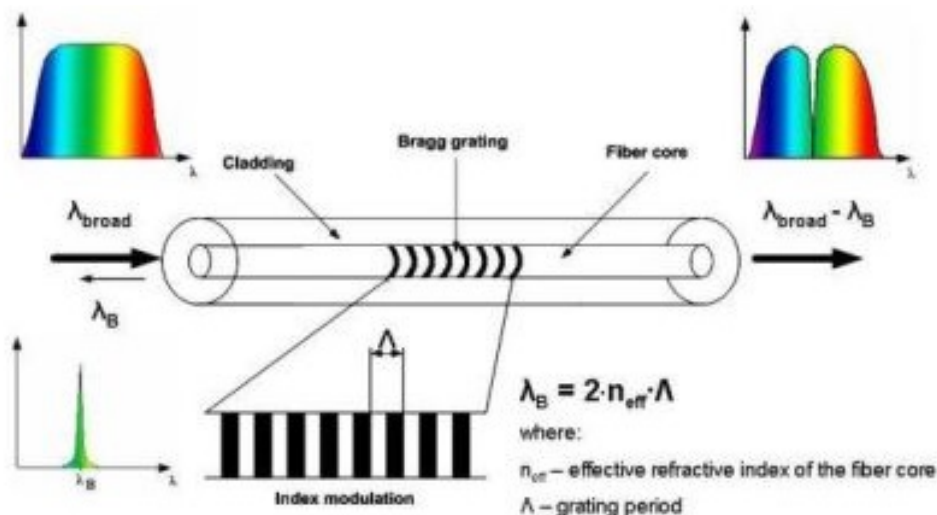
S obzirom na vrijednosti maksimalne podnošljive preostalim CD, 4 kanala neće doći do 80km zbog maksimuma preostale CD za 1-dB gubitak snage. Ustvari, ako se točna naknada primjenjuje na kanalu 1, signal na kanalu 4 jedva bi došao do 100 km za 2-dB gubitka snage. Situacija bi se poboljšala ako bi se točna naknada primjenila na kanal 3. Za 1-dB gubitak snage, kanal 1 bi bio ograničavajući kanala, dosegnuvši oko 100 km, dok bi drugi kanali prenosili do oko 200 km. Naravno, pomoću postadapative kompenzacijske metode na kraju veze prije prijemnika će poboljšati situaciju.

Dok DCF daje potpunu kompenzaciju za CD na fiksnoj valnoj duljini, DCF nije optimiziran da također kompenzira nagib vlakna i prema tome, ne pomaže performansama sustava.

3.2.3. Braggove rešetke

Disperzijsko kompenzacijsko vlakno(DCF) trenutno se koristi kao standardne rješenje za kompenzaciju disperzije kod dugih prijenosnih veza, jer donosi vrlo dobru kompenzaciju disperzije s neznatnim izobličenjem signala. Međutim DCF je također ograničen optičkom ulaznom snagom da izbjegne nelinearna izobličenja signala, ima relativno visoki uneseni gubitak, te je glomazan. Čirpovan FBG (CFBG, engl. *Chirped Fiber Bragg Grating*) eventualno bi mogao zamijeniti DCF kao standardno rješenje za linijsku kompenzaciju disperzije. CFBG ima zanemarivu nelinearnost, mali pad snage i mala veličina. To potencijalno omogućuje jednostavnija erbijem dopirana pojačala (EDFA, engl. *Erbium Doped Fiber Amplifier*), te korištenje kaskadno postavljanje FBG i prijenosnog optičkog vlakna bez pojačala, što bi rezultiralo značajnim smanjenjem troškova.

FBG je optičko vlakno dužine nekoliko centimetara sa periodičnim promjenama indeksa refrakcije. Promjene indeksa refrakcije na pojedinim mjestima duž vlakna se realiziraju kratkotrajnim izlaganjem vlakna jakom snopu ultraljubičastog ili infracrvenog laserskog zračenja uz korištenje odgovarajuće maske. Pri nailasku svjetlosti na promjene indeksa refrakcije javljaju se refleksije, pri čemu će se, prema Braggovom zakonu, u fazi superponirati samo one reflektirane spektralne komponente čija je valna duljina jednaka dvostrukoj periodi rešetke.

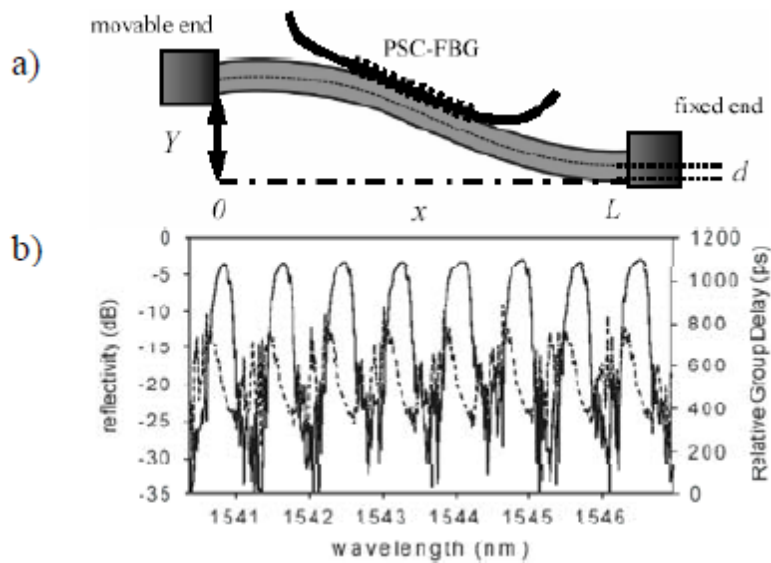


Slika 3.6 Prikaz Braggove rešetke u optičkom vlaknu

Izvor: s Interneta: http://www.immt.pwr.wroc.pl/~gasion/Researches/Optical_sensors/FBG.jpg

Na taj način se mogu realizirati optički filtri valnih duljina. Ako je rešetka čirpovana (engl. *chirped*), tj. perioda rešetke duž vlakna nije konstantan već se smanjuje ili povećava, dolazi do raspodjele refleksije više valnih duljina, ali sa različitim kašnjenjem. Ova činjenica se koristi pri kompenzaciji kromatske disperzije. Dobra osobina CFBG-a je mogućnost podešavanja disperzije kao i multikanalni rad. Disperzija se može podešavati promjenom temperaturnog gradijenta duž CFBG. Zavisnost disperzije od temperaturnog gradijenta nije linearna, ali je rastuća funkcija sa tipičnim opsegom promjene disperzije između -800 i -400ps/nm. Temperaturno kontrolirani CFBG se može koristiti i za kompenzaciju nagiba disperzije, a posebno dobri rezultati se postižu u *dual-grating* konfiguraciji koja se sastoji od dva identična CFBG uz korištenje dva 3-portna cirkulatora. Ključna stvar je da FBG-ovi imaju suprotne smjerove čirpa. Pošto znak disperzije CFBG zavisi od toga sa koje strane se ubacuje svjetlost, opseg podešavanja disperzije je sada između -400 i +400ps/nm pri čemu se nulta disperzija postiže kada je temperaturni gradijent jednak nuli. Također je i zavisnost disperzije od temperaturnog gradijenta linearnija nego u *single-grating* konfiguraciji. Prednost korištenja temperaturno kontroliranog CFBG je kratko vrijeme odziva pri promjeni temperature. Sa druge strane, uvođenje temperaturnog gradijenta u FBG je složeno, a nulta disperzija se ne može postići korištenjem samo jednog FBG. Također postoje i relativno velike oscilacije grupnog kašnjenja (group-delay ripple). Amplituda ovih oscilacija je do 5 ps. FBG se mogu koristiti i za istovremenu kompenzaciju na više kanala što predstavlja pogodnost u WDM primjenama. Također, podešavanje disperzije je moguće postići i

mehanički. Na slici 3.7a je prikazan primjer osmokanalnog kompenzatora disperzije u kome se koristi tzv. *S-bending beam* tehnika. Jedan CFBG dužine 50mm sa periodom rešetke od 1066.7nm i cvrkutom od 0.0477nm/cm, pričvršćen je na zakrivljeni nosač u obliku slova S. Pomicanjem pokretnog kraja nosača naviše i naniže dolazi do istezanja, odnosno skupljanja CFBG čime se mijenja razmak Braggove rešetke, a samim tim i disperzija. Disperzija svakog kanala se može istovremeno mijenjati u opsegu od -1200 do -550ps/nm. Na slici 3.7b punom linijom prikazana zavisnost refleksije, a isprekidanom linijom zavisnost relativnog grupnog kašnjenja od valne duljine.



Slika 3.7 a) S-bending beam tehnika kompenzacije, b) Ovisnost refleksije i relativnog grupnog kašnjenja

Izvor: Radenković, N.; Marinčić, A.: "Metode kompenzacije disperzije u optičkim sistemima", 2005.

3.2.4. Maksimalna devijacija kromatske disperzije

Devijacija kromatske disperzije je također važan parametar kod prijenosa vrlo visokih brzina koji se mora uzeti u obzir prilikom primjene kompenzacije CD. Kod instalacije mreže, mjerena CD od optičke linije se koristi kako bi se utvrdila magnituda kompenzacije unutar prijemnika. Kod definiranja stvarne vrijednosti optičke linije i stvarni vrijednosti kompenzacije unutar prijemnika, u bilo koje vrijeme nakon instalacije, one moraju biti ispod vrijednosti maksimalne preostale CD.

Maksimalna devijacija CD je najveća tolerirana razlika između stvarne vrijednosti optičke linije (od predajnika do prijemnika) i vrijednosti utvrđene u trenutku instalacije. Ova

vrijednost varira između NRZ(engl. *non-return-to-zero*) i RZ(engl. *return-to-zero*) modulacije.

Prilično je zahtjevno odrediti maksimalnu dopustivu preostalu CD u sustavima vrlo velike brzine, jer se puno varijabli mora uzeti u obzir:

- optički izlazna snaga predajnika
- oblik modulacije
- pojačanje linijskih pojačala
- izvedba linijskih pojačala(broj pumpi i broj koraka pojačanja)
- kompenzacijske tehnike
- duljina linije
- tip vlakna

3.2.5. WDM sustavi: tolerancija na rezidualnu kromatsku disperziju

U WDM prijenosnim sustavima, nagib CD vlakna mora se uzeti u obzir, jer CD spektralna varijacija je nelinearna (tj. drugačija CD za svaki WDM kanal), kao što je prikazano na slici 2.7. Svaki WDM kanal karakterizira drugačija CD vrijednost.

U ovom trenutku, još uvijek je prilično teško naći CD-kompenzacijski uređaj koji mogu nadoknaditi nagib CD(tj. kompenzirati svaki pojedinačni kanal DWDM kanala s kompenzacijskim uređajem kako bi dobili stalnu CD neovisno od planiranih valnih duljina).

Prema tome, kada se koriste širokopojasne CD uređaje kao što su DCF vlakna u WDM prijenosnim sustavima, DCF vlakna mogu dobiti točnu naknadu za središnji kanal (ili bilo koji drugi) u planu kanala, dok će bočni kanali doživjeti rezidualnu CD.

U ovom momentu, maksimalno dopuštena rezidualna CD za svaki kanal prijemnika može se ocijeniti. Ove vrijednosti nam ograničavaju broj kanala, razmak kanala, te duljinu veze.

Kad veća zaostala CD karakterizira neke kanale, još uvijek je moguće dobiti prihvatljiva svojstva kroz dodatne kompenzacije(adaptivna kompenzacija CD) koji se koriste nakon demultipleksa i ispred prijemnika s optimalnim vrijednostima za svaki kanal. Tehnologije kao što su podesive ili Braggove rešetke s cvrkutanjem (CFBG) su korisne u tim slučajevima.

4. Modulacija signala i njezin utjecaj na kromatsku disperziju

Odabir najisplativijeg modulacijskog formata nije jednostavan za primjenu kod prijenosa vrlo visokih brzina. To najviše ovisi o tipu modulacije, prisutnosti cvrkuta modulatora i modulacijskom formatu.

Postoje četiri osnovna svojstva signala koji se mogu koristiti za modulaciju:

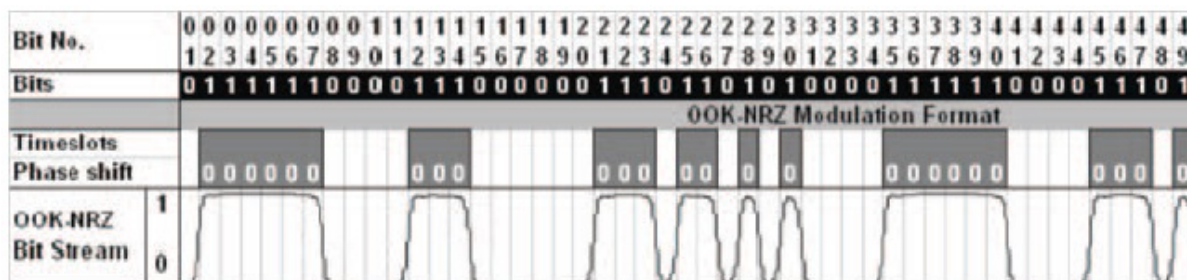
- OOK (engl. *Amplitude On-Off Keying*)
 - NRZ (engl. *NonReturn-to-Zero*)
 - RZ (engl. *Return-to-Zero*)
 - CS-RZ (engl. *Carrier-suppressed RZ*)
 - SSB-RZ (engl. *Single-sideband RZ*)
- Diskretna modulacija faze (PSK, *Phase-Shift Keying*)
- Diskretna modulacija frekvencije (FSK, *Frequency-Shift Keying*)
- Diskretna modulacija polarizacije (PolSK, *Polarization-Shift Keying*)

Kako bi se ograničili linearna i nelinearna mrežna onečišćenja, treba se odabrati modulacijski format sa sljedećim karakteristikama:

- Uski optički spektar koji favorizira DWDM prijenos sa malim razmakom između kanala i tolerira više CD distorzije.
- Konstantna optička snaga koja je manje osjetljiva na nelinearne efekte kao što su SPM (engl. *Self-Phase Modulation*) i XPM (engl. *Cross-Phase Modulation*).
- Više razina signala koje su učinkovitije od binarnih signala s duljim trajanjem simbol, čime se smanjuje CD i PMD distorzije.

4.1. NRZ-OOK modulacija

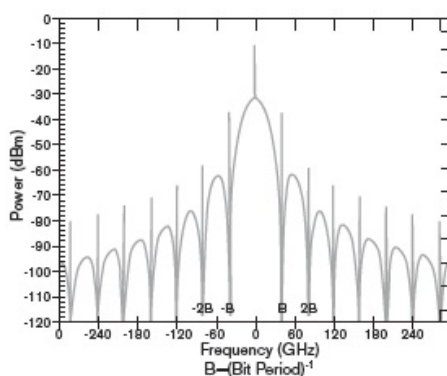
Slika 4.1 prikazuje fazu i valni oblik prijenosa signala baziranog na formatu NRZ modulacije. NRZ se temelji na OOK modulaciji, u kojoj je signal moduliran intenzitetom. Kad laser signal uključen, stvara se bit 1, a kada je laser isključen, bit 0.



Slika 4.1 Primjer NRZ prijenosa

Izvor: Exfo: "Chromatic Dispersion at High Bit Rates", Exfo, 2012.

NRZ format modulacije nudi relativno širok puls u vremenskoj domeni s odgovarajućim uskim spektrom, kao što se vidi na slici 4.2.



Slika 4.2 Primjer VHBR NRZ prijenosnog spektra

Izvor: Exfo: "Chromatic Dispersion at High Bit Rates", Exfo, 2012.

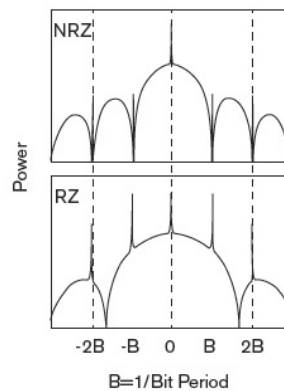
Na frekvencijskoj osi, širina spektra nije tako široka (~ 60 GHz, FW90%M), a nije ni dovoljno uska da podržava DWDM razmak kanala uži od 200 GHz. Ipak, široki NRZ puls ne ide u prilog vrlo visokim brzinama prijenosa i potiče fazne varijacije unutar pulsa, a time i CD oštećenja signala. VHBR NRZ spektralne i impulsne širine nisu u mogućnosti podržati vrlo guste WDM prijenose s jakom CD tolerancijom, pogotovo kada je riječ o zaostaljoj CD u pojačanom sustav s CD kompenzacijom.

VHBR prijenos bez oštećenja obično zahtijeva kraću duljinu impulsa s dovoljnim odnosom signal-šum (OSNR, engl. *Optical Signal to Noise Ratio*), ali također i užim spektrom za smještaj DWDM prijenosa s uskim razmakom kanala. Očito, ovi zahtjevi su za idealni prijenos, u stvarnom svijetu kompromisi moraju biti napravljeni. Prema tome, NRZ možda

nije optimalan za VHBR, a još manje pogodan za DWDM sustava. To znači da se ostali formati modulacije moraju uzeti u obzir.

4.2. RZ-OOK modulacija

RZ modulacije je u preferirana modulacija naprema NRZ modulaciji jer je kod RZ modulacije bit koristi manje vremena u svojem vremenskom prostoru i stoga, poboljšava osjetljivost prijmnika. RZ optički signal je puno tolerantniji na nelinearne efekte od NRZ. Ova karakteristika RZ formata čini širinu impulsa 1 bita užom, dopuštajući malo širenje impulsa, a s time i bolju CD toleranciju, osobito kad je riječ o zaostaloj CD u pojačanom sustavu s CD kompenzacijom.



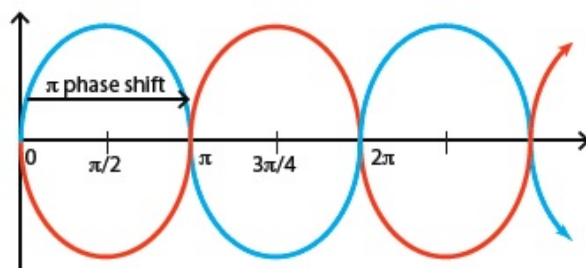
Slika 4.3 Razlika u spektru između užeg NRZ i šireg RZ modulacijskog formata

Izvor: Exfo: "Chromatic Dispersion at High Bit Rates", Exfo, 2012.

Međutim, nedostatak je da niže radni ciklusi znače širi spektar s manje energiju po impulsu za RZ nego za NRZ u njihovom spektru (slika 4.3), čime se povećava OSNR kazna. Povećanje vršne snage nije rješenje zbog povećanog rizika od generiranja nelinearnih efekata, te ograničavanja DWDM prijenosa s uskim razmakom kanalu. Normalan RZ format stoga nije idealno rješenje za VHBR prijenos.

4.3. PSK modulacija

Potencijalno rješenje za učinkovitiju i tolerantniju modulaciju je koristiti fazu vala za prijenos signala i njegove amplitude. Ovaj pristup se zove fazna modulacija (PSK). Promjena polariteta napona modulatora mijenja fazni odgovor vala od 0 do π (+180 °), kao što je prikazano na slici 4.4. Fazni pomak π je izabran zbog praktičnosti i jednostavnosti.



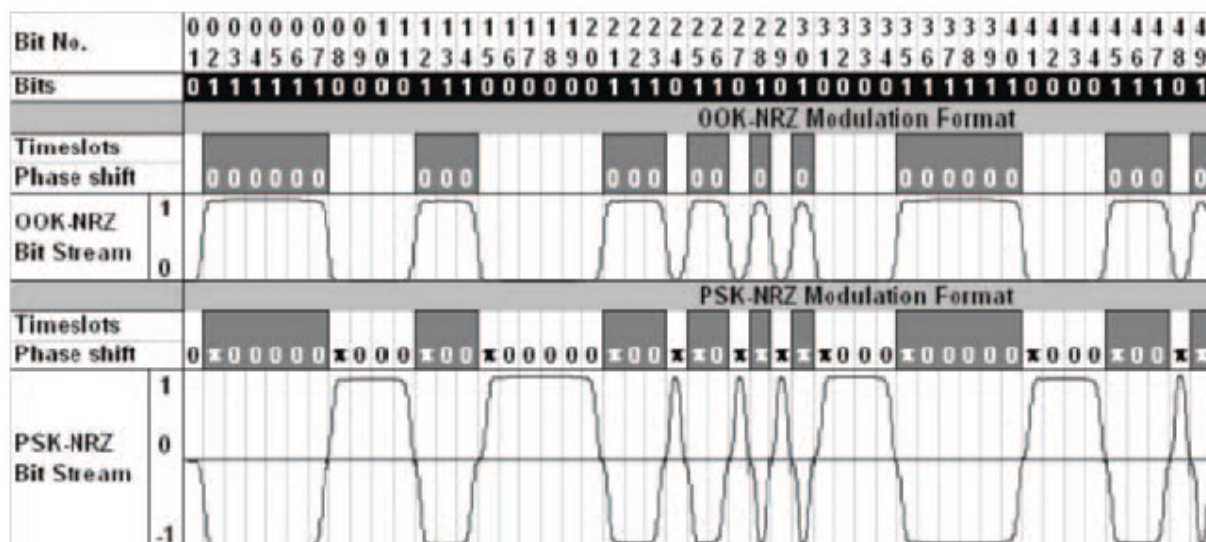
Slika 4.4 Pomak faze vala od 0 do π

Izvor: Exfo: "Chromatic Dispersion at High Bit Rates", Exfo, 2012.

Bit 1 prenosi se pomakom faze nosioca za π u odnosu na prethodnu fazu nosioca, dok se bit 0 prenosi bez faznog pomaka u odnosu na fazu u prethodnom signalnom intervalu.

U PSK, stanje svakog bita određuje stanje prethodnog bita. Ako 0 prethodi 0, onda nema pomaka faze. Isto vrijedi i za dva uzastopna 1 bita. Međutim, kad bit 1 slijedi bit 0, onda postoji 180° ili π pomak faze u odnosu na prethodnu fazu signala. Isto vrijedi i kad bit 0 slijedi bit 1. Znači, kada se faza vala ne mijenja, stanje signala ostaje isto (0 ili 1). Kad se faza vala promjeni za π , stanja signala se mijenja (0 u 1, 1 u 0).

Slika 4.5 ilustrira proces pomaka faze za PSK-NRZ prijenos bitova, u odnosu na NRZ-OOK prijenos bez pomaka faze.



Slika 4.5 PSK primjenjen na NRZ prijenos

Izvor: Exfo: "Chromatic Dispersion at High Bit Rates", Exfo, 2012.

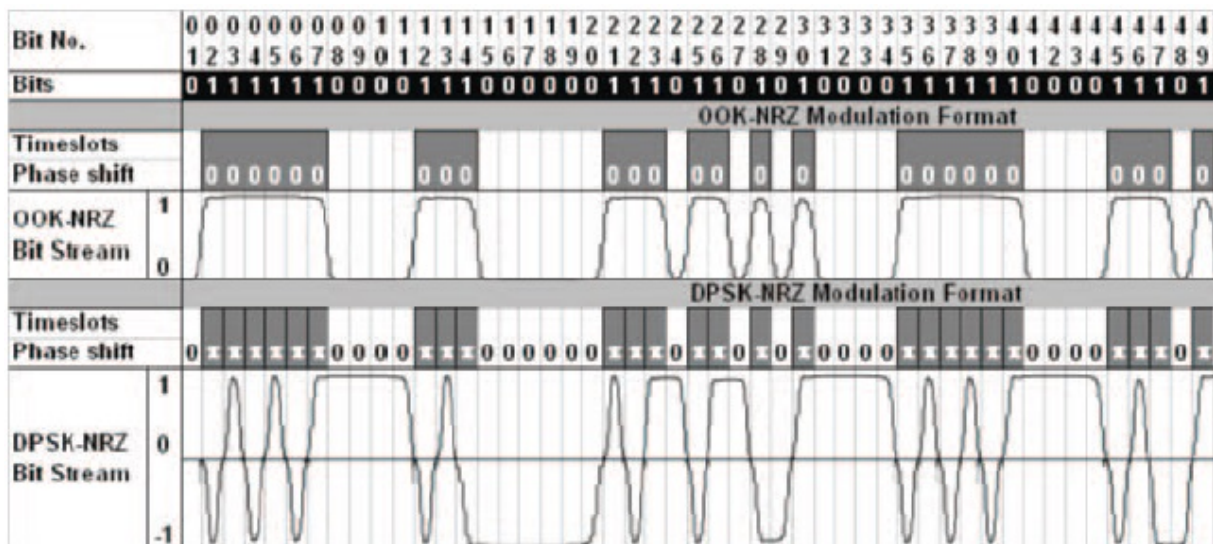
Kao što je prikazano gore, čak i ako modulator registrira pomak faze u valu tijekom 0 bit vremenskog prostora, nitijedan bit nesusreće isti fazni pomak jedan za drugim. Također,

proces ne utječe na amplitudu impulsa jer laser ostaje uključen cijelo vrijeme, te se time prosječno pojača snaga signala za +3 dB. Kontroliranje faze vala pozitivno utječe na CD. Tehnika se također može koristiti s RZ formatom, s manje utjecaja na vršno povećanje snage, kako bi se zadržala ista energija impulsa i održao izvorni OSNR uz kontroliranje vršne snage kako bi se izbjegli nelinearni efekti.

Međutim, nedostatak je stalno mijenjanje polariteta napona modulatora, a to povećava rizik od djelomična prebacivanje, koje utječe na integritet poruke. Ova tehnika obvezuje čvrstu kontrolu nad laserom predajnika i lokalne oscilatorske širine spektra. Međutim, postoje varijacije PSK pristupa koje rješavaju neke od navedenih problema.

4.4. Varijacija PSK modulacije – NRZ-DPSK

Obećavajući modulacije format za VHBR prijenos je diferencijalna fazna modulacija (DPSK). U DPSK, bit 1 se prenosi s π faznim pomakom između uzastopnih 1-1 simbola. Nema promjena faze za bit 0 između 0-0 uzastopnih simbola. Što je još važnije, predajnik je uključen čak i za 0 bitove. U ovom slučaju, fazne razlike određuje vrijednost bita. Slika 4.6 prikazuje DPSK prijenos bitova.



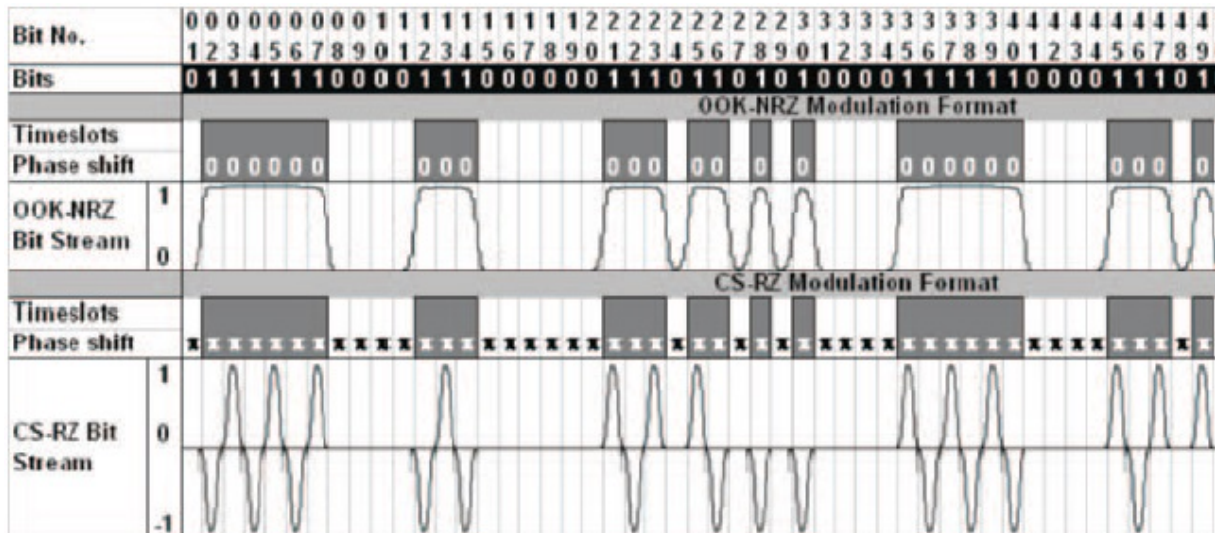
Slika 4.6 DPSK Primjenjen na NRZ prijenos

Izvor: Exfo: "Chromatic Dispersion at High Bit Rates", Exfo, 2012.

RZ-DPSK je bolji format zbog užih impulsa i zato što zadržava sve prednosti od NRZ-DPSK.

4.5. Varijacija PSK modulacije – CS-RZ

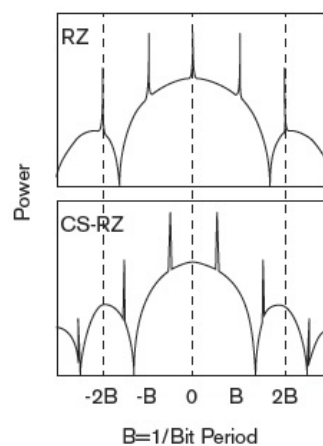
U CS-RZ modulacijskom formatu, svaki vremenski odsječak doživljava fazni pomak, mijenjajući fazu svakog drugog bita. Ovaj proces potiskuje prijenosnu frekvenciju. CS-RZ prijenos je prikazan na slici 4.7.



Slika 4.7 Usporedba između OOK-NRZ i CS-RZ modulacije

Izvor: Exfo: "Chromatic Dispersion at High Bit Rates", Exfo, 2012.

Kad je komponenta prijenosne frekvencije uklonjena, najveća komponenta snage signala nestaje, te tako poboljšava toleranciju na nelinearne efekte. U isto vrijeme, spektralna širina je malo smanjena u odnosu na RZ spektralnu širinu kao što je prikazano na slici 4.8.



Slika 4.8 Razlika u spektru između užeg CS-RZ i šireg RZ modulacijskog formata

Izvor: Exfo: "Chromatic Dispersion at High Bit Rates", Exfo, 2012.

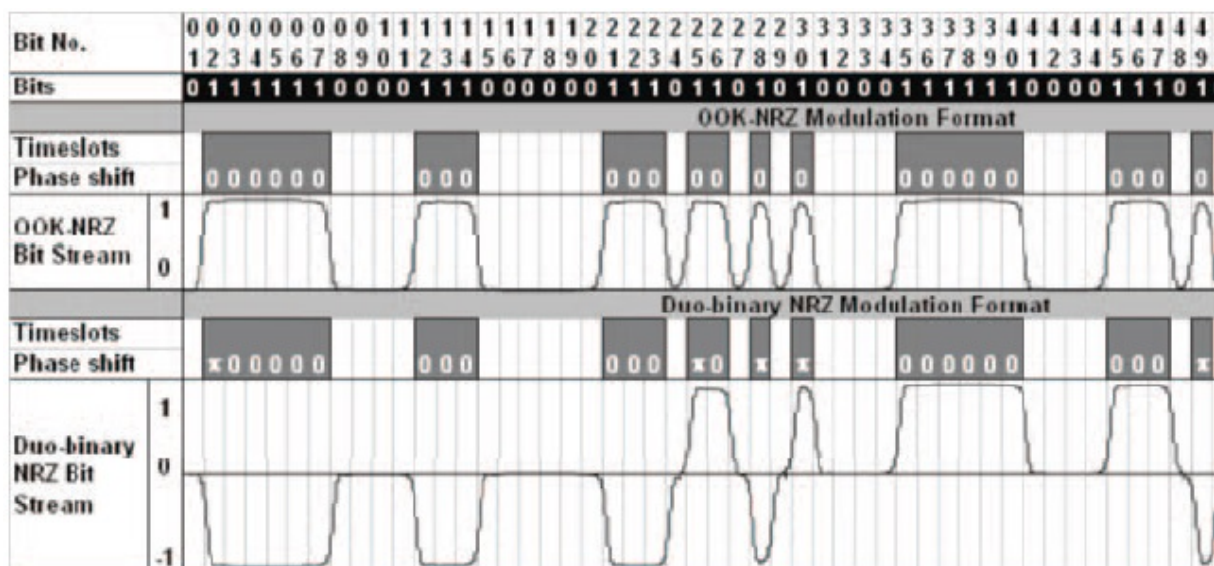
CS-RZ ima veću toleranciju na kromatsku disperziju u odnosu na RZ modulaciju. Još jedna prednost je da je optimalna vrijednost CD kompenzacije gotovo konstantna kod povećanja snage, čime se pojednostavljuje dizajn prijenosne veze.

Iako je ovaj oblik modulacije relativno jednostavan i jeftin za provedbu, njegov impulсни spektar se širi, te stoga još uvijek ograničava DWDM razmak kanala. Stoga provedba ove tehnike na vezama visoke gustoće ili duge staze nije moguća.

4.6. Varijacija PSK modulacije – Duo-binarni

Duobinarni MZM (engl. *Mach-Zehnder Modulator*) oblik modulacije prvotno je predložen da bi se poboljšala tolerancija na CD, jer pomaže smanjivanju propusnost.

U duobinarnom formatu, umjesto da se stalno izmjenjuje polaritet modulatora za promjenu faze, fazni pomak ovisi o tome što prethodi bitu. Na primjer, ako je broj bitova 0 koji prethode bitu 1 neparan, potonji doživljava π fazni pomak (relativna pulsna amplituda = -1), dok kada je broj bitova prije paran, ne postoji fazni pomak (0 faza, relativna pulsna amplituda = 1). 0 bit uvijek je kodiran kada nema svjetlosnog impulsa, ili kada intenzitet impulsa vrlo nizak. Ovakva promjena faza sužava impulsnu spektralnu širinu i uzrokuje destruktivno miješanje CD bitova suprotnih faza, čime se smanjuje učinak CD (slika 4.9).

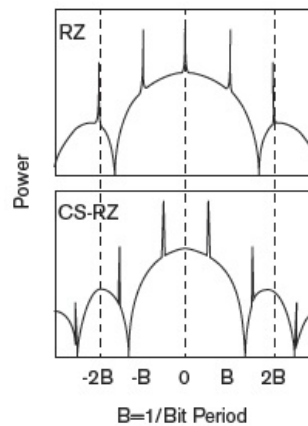


Slika 4.9 Promjena faze u duobinarnom modulacijskom formatu

Izvor: Exfo: "Chromatic Dispersion at High Bit Rates", Exfo, 2012.

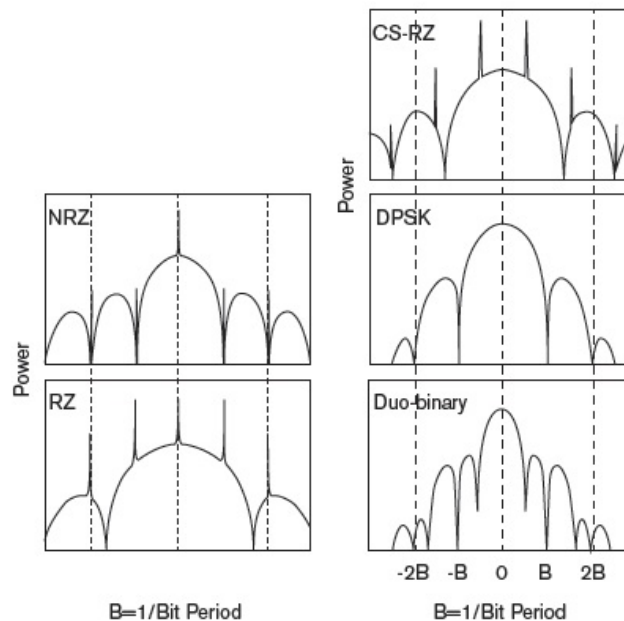
Kao rezultat toga, modulator ne mora prebaciti u fazu naprijed i nazad kao kod PSK modulacije. To znači da je impuls manje iskrivljen, s obzirom na vremensku i frekvencijsku domenu. Uz spektralnu širinu od ~ 30 GHz i prijenosne i bočne pojase potisnute, kao što je prikazano na slici 4.9, pokazalo se je da kod VHBR prijenosa, duobinarni modulacijski format može podržati WDM razmak kanala do 50 GHz. To je jasno iz slike 4.10 da duobinarni format ima užu spektralnu širinu od NRZ modulacije. Nadalje, duobinarni format ima mnogo dublje razine buke od NRZ, na taj način se također osigurava OSNR poboljšanje.

Slika 4.11 prikazuje spektar različitih formata modulacije.



Slika 4.10 Usporedba OOK-NRZ i duobinarnog prijenosnog spektra

Izvor: Exfo: "Chromatic Dispersion at High Bit Rates", Exfo, 2012.



Slika 4.11 Usporedba raznih VHBR modulacijskih formata

Izvor: Exfo: "Chromatic Dispersion at High Bit Rates", Exfo, 2012.

U tablici 4.1 tablički su prikazane spektralne širine modulacijskih formata iz slike 4.11.

Tablica 4.1 Razlika u širinama spektra različitih formata modulacije

Format modulacije FWXM (GHz)	NRZ	RZ	CS-RZ	Duo-binary
X = -40 dB	40	80	90	60
X = -60 dB	100	140	140	90
X = -70 dB	210	230	220	120

Izvor: Exfo: "Chromatic Dispersion at High Bit Rates", Exfo, 2012.

Sljedeća tablica prikazuje granice CD tolerancije pri 100 Gbit/s za različite formate modulacije

Tablica 4.2 Komercijalna implementacija CD tolerancije pri 100 Gbit/s

Parametri	100Gbit/s	Format modulacije						
		OOK	PSBT	DPSK	QPSK	DQPSK	PM-QPSK	PM-DQPSK
Spektralna efikasnost	Bit/s/Hz	0.4	1	0.8	1.6	1.6	3	3
OSNR	dB u 0.1 nm RBW	20	20	17	15.5	18	15.5	18
PMD	ps	1	1	1	2	2	2.5	2.5
CD	ps/nm	15	50	12	35	35	140	140
Složenost sustava		mala	srednja	srednja	srednja	velika	vrlo velika	vrlo velika
Doseg	km	Ograničen šumom optičkog pojačala(ASE)						
Trošak	naprema OOK	--	1.1	1.2	1.5	1.7	1.9	2.1

Izvor: Exfo: "Chromatic Dispersion at High Bit Rates", Exfo, 2012.

5. Mjerenje kromatske disperzije

Postoje dvije situacije u kojima se provodi testiranje CD:

- Laboratorijska mjerenja na optičkim vlaknima i kablovima, uključujući ispitivanja koja su provedena tijekom razvoja, inženjeringa i proizvodnje, kao i tijekom popravaka.
- Terenska mjerenja, uključujući i ispitivanja na namještenim vlaknima da bi se ista kvalificirala za nadogradnju na veće brzine prijenosa.

U oba slučaja, grupno kašnjenje mjeri se kao funkcija valne duljine; CD, nagib CD ili bilo koje druge veličine izvode se iz derivata podataka grupnog kašnjenja (u odnosu na valne duljine). Derivat se najčešće izračunava nakon što su podaci uneseni u matematički model. Ovakav pristup je potpuno ispravan, jer je CD optičkog vlakna deterministička, te se može savršeno modelirati i predvidjeti. Međutim, to se ne mora uvijek odnositi na CD mjerenje veze s različitim komponentama koje predstavljaju različita CD ponašanja.

Postoje dva osnovna načina izračuna CD. Prvi je da se postavi krivulja na podacima grupnog kašnjenja u odnosu na valnu duljinu i pronaći derivat fit funkcije. Ovakav način dobro radi kod malog broja poznatih fit funkcija, posebice kod optičkih vlakana.

Ako je prijenosna linija sastavljena od mješavine vlakana, ili ako neki dijelovi pridonose većoj mjeri CD, onda je poželjno izračunati lokalnu CD, koristeći lokalne derivate na ograničenom broju mjerenja kašnjenja u kratkom rasponu valnih duljina, ili preko dvije susjedne valne duljine, u isto vrijeme.

Prilikom pripreme eksperimentalnog postava, polarizacijski efekti moraju se kalibrirati ili nadoknaditi.

5.1. Upotreba podataka dobivenih mjerenjem

CD-*fitting* model je dostupan i ocrta niz jednadžbi pogodnih za različite kategorije vlakana kao što je prikazano u tablici 5.1.

Tablica 5.1 Specifikacije optičkih vlakana i prilagodba CD

Tip vlakna	Kategorija vlakna	Specifikacije optičkog vlakna			
		ITU-T	IEC	Fit	
SMF	<i>Dispersion un-shifted</i>	G.652 A/B	60793-2-50	B1.1	
		G.652 C/D	60793-2-50	B1.3	
	<i>Dispersion shifted</i>	G.653	60793-2-50	B2	1550nm;za intervale < 35nm: kvadratična, za intervale > 35 nm: 5-uvjetna Sellmeierova ili polinomialna 4. reda
	<i>Cut-off shifted</i>	G.654	60793-2-50	B1.2	1550nm;za intervale < 35nm: kvadratična, za intervale > 35 nm: 5-uvjetna Sellmeierova ili polinomialna 4. reda
	<i>Non-zero dispersion shifted</i>	G.655	60793-2-50	B4	1550nm;za intervale < 35nm: kvadratična, za intervale > 35 nm: 5-uvjetna Sellmeierova ili polinomialna 4. reda
	<i>Non-zero dispersion shifted wideband</i>	G.656	60793-2-50	B5	za intervale > 35 nm: 5-uvjetna Sellmeierova ili polinomialna 4. reda

Izvor: Exfo: "Chromatic Dispersion at High Bit Rates", Exfo, 2012.

5.2. Metode ispitivanja kromatske disperzije

Postoje četiri metode za mjerenje CD koje su standardizirane na međunarodnoj razini:

1. Metoda pomaka faze (PSM, engl. *Phase-Shift Method*)
2. Diferencijalna metoda faznog pomaka (DPSM, engl. *Differential Phase-Shift Method*)
3. Spektralno grupno kašnjenje u vremenskoj domeni (OTDR, engl. *Optical Time-Domain Reflectometer*)
4. Interferometrijska metoda (INTY, engl. *Interferometric method*)

Ove metode su standardizirane u ITU-T preporukama G.650.1 i IEC 60793-1-42 standardu. Budući da se prostor aplikacije za INTY razlikuje od drugih metoda, samo će biti prikazane PSM, DPSM i OTDR metode.

5.2.1. Optički izvori

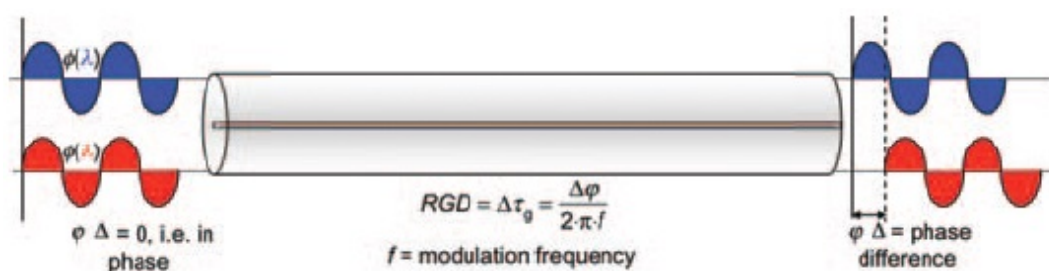
Optički izvori imaju iste karakteristike za bilo koju metodu. Izvor može biti:

- Laser:
 - Dioda-laser niz
 - TLS (engl. *Tunable Laser*)
- BBS (engl. *BroadBand Source*) s filtrom za odabir valne duljine:
 - Raman dobitak od SMF sa Nd: YAG laser
 - Super-LED ili LED
 - ASE (engl. *Amplified Spontaneous Emission*)

Super-LED i ASE izvori mogu biti u kombinaciji za emitiranje u C+L pojasu za mjerenja u širem rasponu spektra. Ispitivanje na dugim vlaknima uvijek će osigurati bolju ponovljivost nego ona na kratkim vlaknima.

5.2.2. Metoda pomaka faze

PSM koristi relativne fazne pomake od moduliranog optičkog izvora različitih valnih duljina kao što je prikazano na slici 5.1.



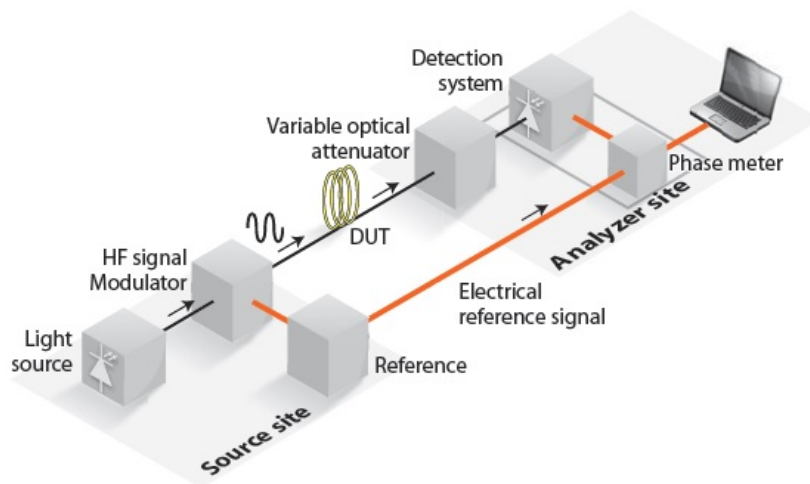
Slika 5.1 Osnove mjerenja PSM metode

Izvor: Laferriere, J.; et al: "Reference Guide to Fiber Optic Testing", JDSU, 2007.

PSM je brza i jednostavna metoda. Relativni fazni pomaci se pretvaraju u relativna vremenska kašnjenja, te se podaci spektralnog grupnog kašnjenja tada postave u jednadžbe definirane za svaki tip vlakna, kako je navedeno u prijašnjoj tablici. Mogu se koristiti sinusna, trapezna ili

kvadratna modulacija vala, obično u frekvenzijskom rasponu od 30 do 100 MHz (što je više moguće) i vrlo visoka spektralna stabilnost. Mjerna nesigurnost je obrnuto proporcionalna modulacijskoj frekvenciji (najviša frekvencija će dati najnižu nesigurnost).

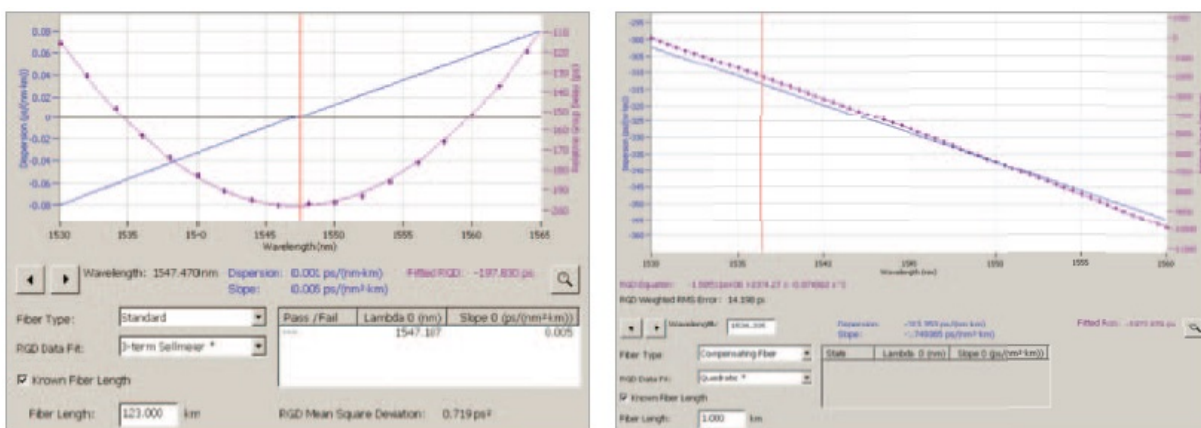
Referentni signal je potreban za ispitivanja na terenu i može se prenositi vlaknom koje se testira pomoću WDM ili sekundarnim tamnim vlaknom. U oba slučaja, PSM metoda je zamorna i skupa. Referentni signal treba fazno vezati za modulirani signal i može biti izveden iz samog moduliranog signala. Za SMF, PSM je referentna metoda ispitivanja (RTM) u IEC i ITU-T. Slika 5.2 prikazuje eksperimentalnu PSM postavu.



Slika 5.2 Shema eksperimentalne PSM

Izvor: Laferriere, J.; et al: "Reference Guide to Fiber Optic Testing", JDSU, 2007.

Najbolje odgovara primjenjuje na RGD skup podataka i disperzije može se izračunati iz fit pomoću jednadžbi navedenih u tablici 5.1. Slika 5.3 prikazuje rezultate dobivene korištenjem PSM metode.

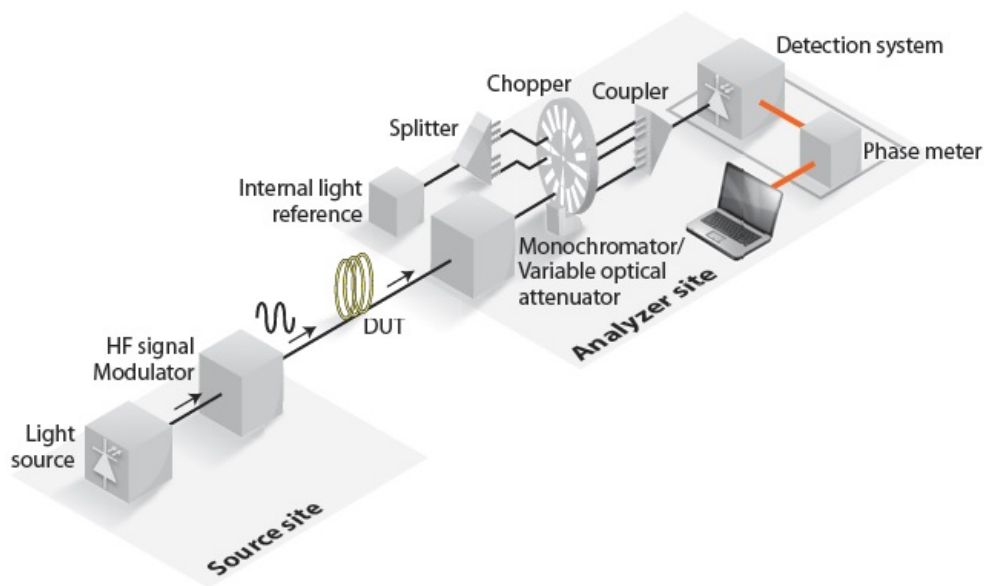


Slika 5.3 Primjer PSM rezultata za G.653 vlakno (lijevo) i DCF vlakno (desno)

Izvor: Exfo: "Chromatic Dispersion at High Bit Rates", Exfo, 2012.

5.2.3. Poboljšanje metode pomaka faze za terenska ispitivanja

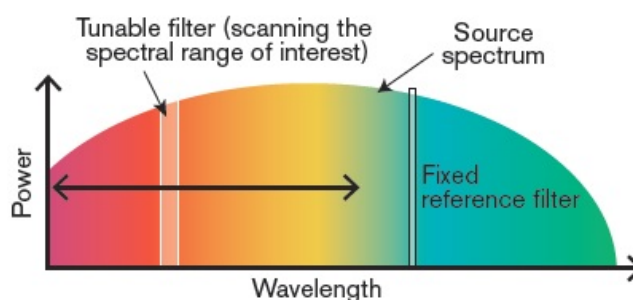
Od uvođenja PSM, mnoga poboljšanja su predložena i ostvarena. Jedno takvo poboljšanje je primjena, na jedan fotodetektor, različitih svjetlosnih signala i intenziteta moduliranih na istoj frekvenciji, odvojeno i zajedno, te izmjeriti vrhunac amplitude modulacija. To smanjuje utjecaj električnih kašnjenja na preciznost mjerenja vremena i izbjegava se potreba za referentnom i sinkronizacijskom linijom tipičnom kod svim konvencionalnih metoda ispitivanja. Primjer tipičnog ispitnog postava je prikazan na sljedećoj slici.



Slika 5.4 Shema testne postave za poboljšanu PSM

Izvor: Laferriere, J.; et al: "Reference Guide to Fiber Optic Testing", JDSU, 2007.

Nakon što je prošao kroz FUT (engl. *Fiber Under Test*), širokopolasni signal ide na rešetku rasute difrakcije podesivog filtra. Ovaj optički filter dijeli signal u dvije ili više optičkih linija. Uz jednu liniju, svjetlo će se optički filtrirati. Ovo filtriranje je podesivo po valnoj duljini. Svjetlost koja putuje uzduž druge linije također se filtrira, ali na fiksnoj referentnoj valnoj duljini kao što je prikazano na slici 5.5. Uporaba dvije referentne linije povećava točnost mjerenja kašnjenja. Što je veći broj valnih duljina na kojima je to učinjeno, točniji su i CD rezultati mjerenja.



Slika 5.5 Skeniranje valnih duljina u poboljšanoj PSM

Izvor: Exfo: "Chromatic Dispersion at High Bit Rates", Exfo, 2012.

Do sada, većina komercijalnih CD mjernih instrumenata odabiru valne duljine izvora na ulazu vlakna koje se testira, umjesto na izlazu. Međutim, pozicija selektora valne duljine na strani izvora znači da prijemnik ne može znati koje valne duljine se šalje kroz FUT. Ovo je ograničenje jer prijemnik i izvor moraju da komuniciraju jedno s drugim tako da se podaci valne duljine zajedno sa podacima vremenskog kašnjenja pretvoriti u CD podatke. Kao rezultat toga, kontrolni signal mora se koristiti unatrag duž vlakna, i tako se sprečava CD mjerenje kroz jednosmjerne uređaje kao što su izolatori i EDFA pojačala koji mogu biti u liniji mjerenja. Drugo tamno vlakno u povratnoj vezi ili neka druga vrsta komunikacije može prevladati taj problem, ali to je zamorno i često neprihvatljivo tijekom terenskih ispitivanja. Nasuprot tome, poboljšana PSM metoda, kao što je prethodno spomenuto, u kojoj je selektor valne duljine na strani prijemnika, ne zahtijeva komunikaciju između dva kraja vlakna, jer je modulirani izvor uvijek aktivan i provodi prijenos punog opsega valnih duljina.

Poboljšana PSM metoda pokazuje da se RGD (a time i CD) može točno izmjeriti. Elektronika detekcije je stoga uvelike pojednostavljena, jer nema potrebe za kontrolom ili kalibriranjem faze elektronskog signala. Pored detekcije linearnosti, drugi ključni čimbenici uključuju nesigurnos apsolutnih valnih duljina i nesigurnost relativnih valnih duljina. Da bi dobili ispravne vrijednosti CD, optička modulacija snage treba biti konstantna preko područja podesivog filtra, što nije slučaj, budući da BBS ima distribuciju spektralne snage. Kako ide kroz FUT, distribucija modulacije snage se mijenja. Ova distribucija bi se trebala mjeriti i koristiti kako bi se izračunala točna središnja valna duljina filtrirane svjetlosti, te nadoknaditi krivulju modulacije snage. Jedan od signala koji se koriste za izračun kašnjenja je filtriran stupnjem modulacije optičke snage podesivog filtra. Atenuacijska krivulja modulacije snage se može mjeriti u isto vrijeme kao i kašnjenja. To omogućava kompenzaciju distribucije modulacije snage.

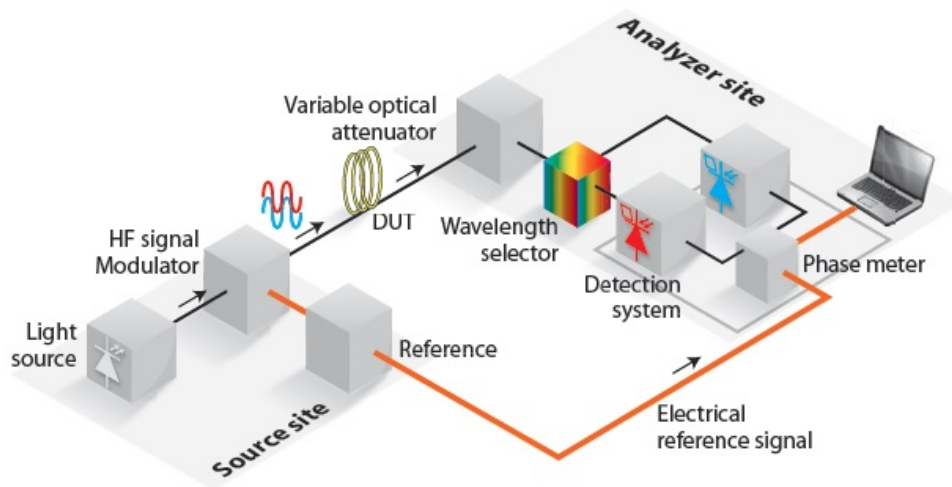
5.2.4. Diferencijalna metoda pomaka faze

DPSM metoda koristi dvije simultano modulirane valne duljine optičkih izvora svjetla kombinirane u vlakno koje se testira. Koristeći sustav dvostruke detekcije za simultano snimanje dva signala valnih duljina je jedina razlika između DPSM i PSM metode. Slika 5. prikazuje postav DPSM metode.

Faza svjetla na kraju vlakna na jednoj valnoj duljini se uspoređuje sa fazom svjetla na izlasku na drugoj bliskoj valnoj duljini. Prosječna CD u intervalu dviju valnih duljina se određuje iz diferencijalnog pomaka faze, intervala valne duljine i duljine vlakana. Razmak valnih duljina između diferencijalnih mjerenja faze obično iznosi između 2 do 20 nm.

CD koeficijent, na valnoj duljini između dvije testirane valne duljine, pretpostavlja se da je jednak prosječnoj CD na intervalu između dvije testirane valne duljine. Dobiveni CD podaci se zatim dodjeljuju u definirane jednadžbe ovisno o tipu optičkog vlakna, kao i kod ostalih metoda mjerenja.

Sveukupno, ova metoda je vrlo slična PSM metodi, samo što je CD dobivena direktno i ova metoda je skuplja.



Slika 5.6 Shema DPSM testne postave

Izvor: Laferriere, J.; et al: "Reference Guide to Fiber Optic Testing", JDSU, 2007.

5.2.5. Metoda spektralnog grupnog kašnjenja u vremenskoj domeni

Metoda spektralnog grupnog kašnjenja u vremenskoj domeni sastoji se od izravnog mjerenja vremenskog kašnjenja između impulsa različitih valnih duljina kroz optičko vlakno poznate duljine. Ova metoda se bazira na mjerenju razlike u vremenu prolaska kroz vlakno između

valnih duljina, te je poznata još kao OTDR (engl. *Optical Time-Domain Reflectometer*) metoda. Ustvari, OTDR metoda mjeri udaljenost do posljednje refleksije na različitim valnim duljinama. Svaka valna duljina doživljava drukčiju udaljenost zbog različitih indeksa loma. Ove varijacije se zatim prenose u vremensku domenu i konačno, postaje kašnjenje u odnosu na valnu duljinu.

Metoda može koristiti impulse svjetla generirane od različitih izvora na više valnih duljina, i većim i manjim od tipične nula-CD valne duljine. Optički impulsi moraju biti kratkog trajanja i dovoljnog intenziteta, kao i imati prostornu i vremensku stabilnost za dobivanje kvalitetnih mjerenja. Uporaba OTDR-a pojednostavljuje odabir trajanja impulsa.

Generator kašnjenja, potaknut optičkim izvorom, pruža zakašnjeli signal uzorkivaču u svrhu kompenzacije razlike u kašnjenju propagacije između testnog i referentnog uzorka. Vremena kašnjenja moraju biti konstantna za vrijeme mjerenja; podrhtavanje faze signala mora biti puno kraće od širine impulsa. Budući da OTDR već sadržava ovu kompleksnu elektroniku, OTDR metoda postaje vrlo jednostavna i jeftina.

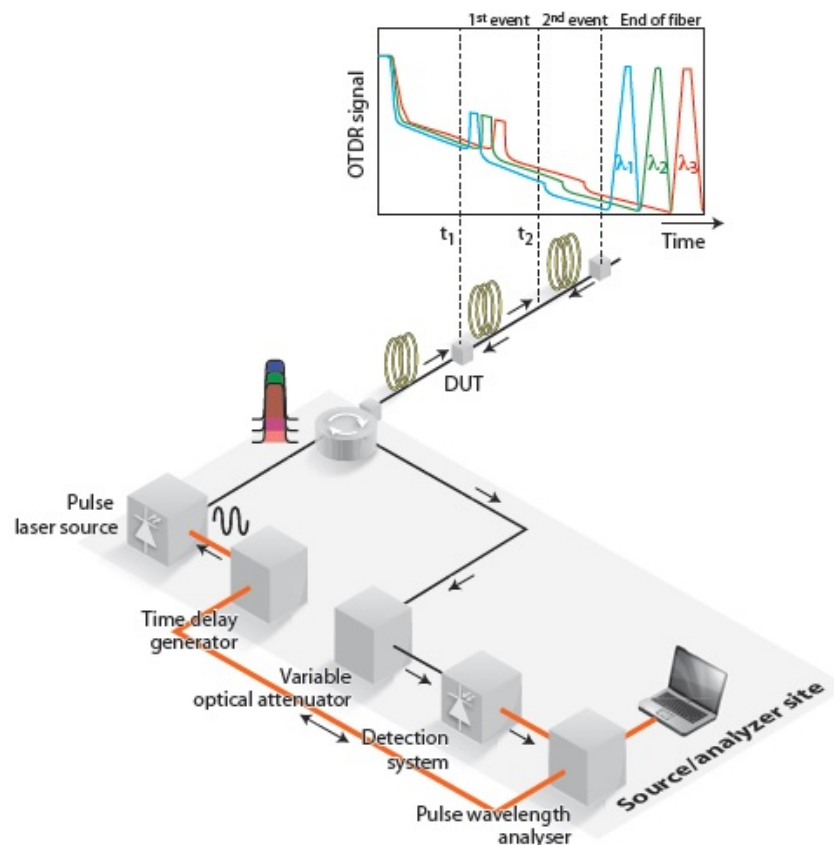
Skup mjerenja se izvodi na kratkom referentnom vlaknu, te se ti referentni podaci oduzimaju od podataka dobivenih kod FUT mjerenja za dobivanje relativnog spektralnog grupnog kašnjenja. Rezultantni podaci spektralnog grupnog kašnjenja se zatim pridružuju u definirane jednadžbe ovisno o tipu vlakna, kao i kod ostalih metoda.

Linearni detekcijski sustav koristi uzorkivač visoke frekvencije, koji je sposoban prikazati relativno vrijeme dolaska optičkog impulsa na kalibriranoj vremenskoj skali. Optički attenuator se može koristiti za održavanje konstantne amplitude signala. Slika 5.7 prikazuje princip rada OTDR metode.

Koeficijent disperzije se dobiva pomoću najpogodnijih vrijednosti odgovarajućih Sellmeier koeficijenata i izračuna CD ili ostalih parametara po potrebi..

S OTDR-om, CD se izračunava pomoću razliku u udaljenosti do posljednjeg događaja. Točnost mjerenja ovisi o sposobnosti za mjerenje posljednje refleksije. Najbolja prednost OTDR metode je da se mjerenje izvodi s jednog kraja. To obično ima ogroman utjecaj na cijenu rada. Većina OTDR-a koristi samo nekoliko valnih duljina u cijelom spektralnog prozoru vlakna (>300nm). Fit jednadžba preporučena za bilo koju vrstu vlakana je 5-uvjetna Sellmeier jednadžba, koja zahtijeva najmanje 5 točaka. Moguće je koristiti manji broj točaka, ali to će zahtijevati neke pretpostavke. Na temelju gušenja vlakana, signali više

zagušenih valnih duljina (1310 nm ili u blizini vrhunca apsorpcije, kao što je 1410 nm, kod konvencionalnog G.652 vlakna) će nestati nakon 70 do 80 km (dinamički raspon od oko 30-35 dB u najboljem slučaju), ostavljajući analizu, za CD aproksimaciju, s 3 točke na cijelom rasponu valnih duljina. Kad neke valne duljine nestanu, druga očitavanja se „utope“ u šumu na kraju traga. Budući da je mjerna ponovljivost funkcija OSNR-a, prosječno vrijeme potrebno za dobivanje prihvatljive ponovljivosti, ne točnosti, povećat će se vrlo brzo ovisno o dužini vlakna. Stjecanje vrijeme može se povećati i do 10 minuta po tragu (obično 40 minuta ukupno). Ograničavajuća udaljenost onda se može procijeniti na oko 70 km. Isto tako, što je kraća udaljenost, to postaje teže mjerenje. U stvari, OTDR će pokazati jaka ograničenja zbog njegove ponovljivosti takta, sinkronizacije i impulsa, a to u konačnici može dovesti do degradacije mjerenja na kratkom vlaknu. Zbog toga je i definirana minimalna udaljenost od 10 km za OTDR mjerenja.



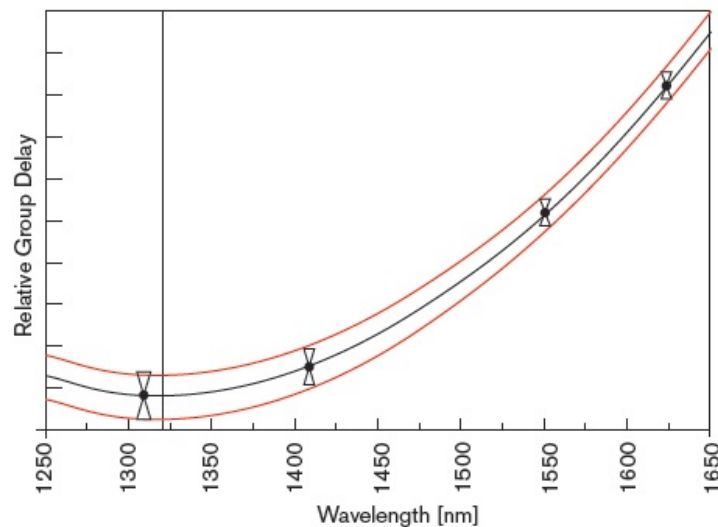
Slika 5.7 Princip rada OTDR metode

Izvor: Laferriere, J.; et al: "Reference Guide to Fiber Optic Testing", JDSU, 2007.

Nesigurnost ovisi o obliku i širini impulsa i broju različitih lasera (broju valnih duljina). Iako je ova metoda pruža bolju prostornu rezoluciju, kratki impulsi će se širiti i iskriviti, što čini

određivanje vremena dolaska vrlo teškim. Ova jednostavna tehnika je relativno netočna kada se koristi u osnovnom obliku. Stoga treba biti poboljšana da dođe na istu razinu nesigurnosti kao i PSM metoda. Na primjer, korištenje više valnih duljina ili podesivog lasera, ali potrebna ulaganja brzo dižu cijenu OTDR metode na otprilike istu razinu relativne cijene kapitala kao kod PSM metode. Međutim, s obzirom da se radi o jednostranoj metodi mjerenja, OTDR metoda još uvijek donosi uštedu kad se radi o terenskim ispitivanjima.

Slika 5.8 ilustrira pitanje mjerene nesigurnosti OTDR metode koristeći set od četiri valne duljine.



Slika 5.8 Problem nesigurnosti kod OTDR metode ($\lambda_0=1320.14\text{nm}$ (vertikalna crta) i $D=16.641\text{ps/nm}\cdot\text{km}$)

Izvor: Exfo: "Chromatic Dispersion at High Bit Rates", Exfo, 2012.

Za SMF, dosad je PSM (DPSM) metoda uglavnom smatrana boljom od metode spektralnog grupnog kašnjenja u vremenskoj domeni (OTDR) zato što nudi točnije mjerenje vremena, te je jača u prisustvu drugih CD mehanizama.

Upotreba podesivog optičkog izvora umjesto nekoliko diskretnih izvora omogućava testiranje puno više valnih duljina, te time nadilazi prije spomenuta ograničenja.

6. Testiranje kromatske disperzije u koherentnim sustavima

Potražnja za većom propusnošću je konstantna, i da bi se izbjeglo ulaganje u nove sustave, većina operatera gleda prema iskorištavanju postojeće infrastrukture. Međutim, postoji problem, jer se standardni prijenos nula i jedinica (OOK) jednostavno nemože više ubrzati na većini sustava.

Da bi riješili taj problem, proizvođači sustava su uveli nove modulacijske formate. Jedan od najpopularnijih je DP-QPSK (engl. *Dual Polarization Quadrature Phase-Shift Keying*). Na nesreću, direktna detekcija korištena kod OOK modulacije neradi kod ovih modulacijskih formata. Iz tog razloga se DP-QPSK nazivaju koherentnim detekcijskim sustavima, što je način dohvaćanja podataka usprkos fizičkim oštećenjima vlakna, kao što su kromatska i polarizacijska disperzija.

Iako je istina da su ovi sustavi tolerantniji na onečićenja signala, nisu imuni na njih. Na primjer, tipična markentinška specifikacija za prosječnu PMD toleranciju iznosi 25 ps. Iako je teoretski to točno, u stvarnom sustavu to neznači puno, jer sustav može imati problema već pri 10 ps. Problem je da kod NRZ modulacije ove vrijednosti PMD će prouzrokovati samo nekoliko bitova s greškom, koji se u većini slučajeva mogu lako kompenzirati pomoću FEC-a. U koherentnom sustavu, ista ta vrijednost PMD-a može prouzročiti pad cijelog sustava koji može trajati par sekundi ili zahtijevati resetiranje sustava.

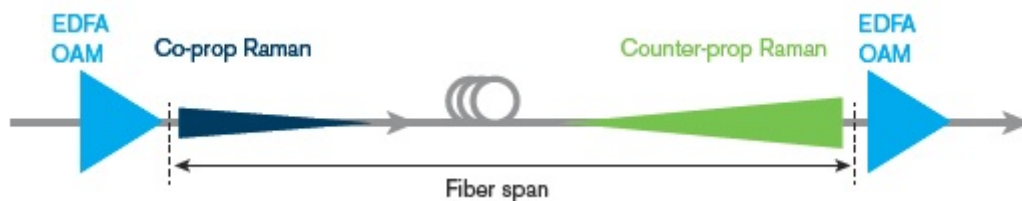
Iako nije savršen, koherentni sustav je puno robustniji i pouzdaniji, te je najekonomičniji način za povećanje propusnosti, pogotovo danas kada se gleda na nadogradnju sustava na 100 Gbit/s.

Budući da pružaju robusnost i pouzdanost, a mogu tolerirati veće fizičke poremećaje, koherentni sustavi se uglavnom koriste na duže staze, tipično na glavnim ili temeljnim linijama. Međutim, to znači da je potrebno dodatno pojačanje signala. Da bi nadogradnja na novi sustav zahtijevala minimalne zahvate na infrastrukturi i osigurati financijsku prihvatljivo rješenje, neka ograničenja moraju se uzeti u obzir. Glavno ograničenje DP-QPSK i koherentne detekcije je optički odnos signal-šum (OSNR). Ove nadogradnje sustava će

zahtijevati veći OSNR. Budući da će ovi rasponi vlakna biti jako dugi i signal će se trebati pojačati, pojačanje signala treba izvesti dodavanjem pojačala sa malim unosom šuma na postojeća pojačala. Ramanovo pojačanje je stoga vrlo popularano u većini koherentnih sustava, jer je cilj Ramana povećanje optičke snage na ulazu EDFA u cilju poboljšanja OSNR-a.

6.1. Ramanovo pojačanje

Dok EDFA pojačalo koristi posebno dopirano vlakno kao sredstvo pojačanja, Raman pojačanje se distribuira preko samog prijenosnog vlakna. Ramanova pumpa može biti postavljena u smjeru širenja signala (tj. spojena na predajnik i direktno pojačava signal na predajniku) ili u suprotnom smjeru širenja signala (tj. spojena na prijemnik, te pumpa energiju "uzvodno" u prijenosnu liniju), te tako daje više pojačanja signalu kada postane slabiji, umjesto direktno na predajniku. Odnos signal-šum se može značajno popraviti, čak za 11 dB, što je kritično za implementaciju koherentnog signala.



Slika 6.1 Ramanovo pojačanje

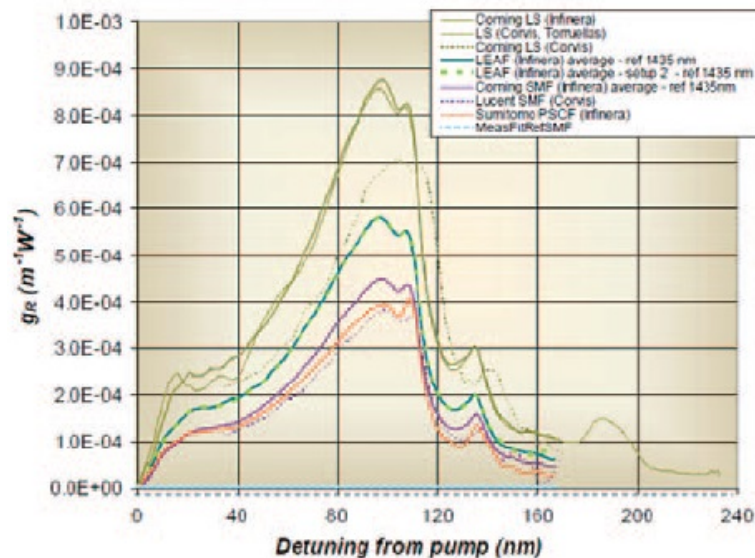
Izvor: Exfo: "Chromatic Dispersion at High Bit Rates", Exfo, 2012.

Budući da Raman koristi prijenosno vlakno kao amplifikacijsko sredstvo, kvaliteta vlakna je vrlo važna. Performanse pojačanja uvelike ovise o kvaliteti vlakna, što uključuje gubitke. Gubici spojeva, Fresnelove refleksije i gušenje vlakna uzeti su u obzir pri fazi planiranja. Loša kvaliteta spojeva i spojnih panela utječe na moguće pojačanje, te se tako smanjuje Raman pojačanje koje ulazi u vlakno. Zbog velike snage koju Raman upumpava u vlakno, prljavi ili loše napravljeni spojevi također dokazano rade probleme, te zahtijevaju čišćenje.

Pojačanje je funkcija efektivne površine vlakna. Budući da Raman koristi prijenosno vlakno kao amplifikacijsko sredstvo, veličina jezgre vlakna je faktor koji utječe na pojačanje. Tako vlakna sa malom jezgrom veću gustoću snage i zato i veće pojačanje, dok vlakna sa većom jezgrom imaju manju gustoću snage što rezultira manjim pojačanjem. Može se zaključiti da uspješna implemetacija Ramana mora uključivati efektivnu površinu vlakna, koja se može

odrediti poznavanjem tipova vlakna. Jednaka količina snage Raman pumpe će dati različito pojačanje kod različitih tipova vlakna.

Uobičajeni postupak je poznavanje tipa vlakna, tj. efektivne površine, kod projektiranja i instalacije Ramanove pumpe. To nam omogućava optimalno podešavanje pumpe, kao što je prikazano na slici 6.2.



Slika 6.2 Ramanovo pojačanje ovisno o tipu vlakna

Izvor: Exfo: "Chromatic Dispersion at High Bit Rates", Exfo, 2012.

6.2. Poznavanje efektivne površine

Kao što je rečeno prije, ključ za pravilno podešavanje Ramanovog pojačala najviše ovisi o tipu vlakna. Tip vlakna mora biti poznat u fazi projektiranja. To obično nije problem kod novih sustava, jer inženjeri obično znaju koji su tip vlakna instalirali. Međutim kod nadogradnji sustava, gdje su početna vlakna instalirana od raznih tehničara, naknadno dodavana, premještana bez potrebne dokumentacije ili nema nikakvih zapisa o tipu vlakna. Tijekom faze projektiranja uvjet je poznavanje tipa vlakna. Ako tip vlakna nije poznat, obično se uzima da je tip vlakna SMF-28, G.652. Kakav utjecaj ima nepoznavanje efektivne površine vlakna? Raman pojačanje će biti nepravilno projektirano.

Kao što je ranije navedeno, ista količina snage pumpe pruža različita pojačanja za različite vrste vlakana. Raman aplikacije su prijenosni sustavi na velike udaljenosti. Postavljanje zahtijeva da se linija konfigurira u nizu od čvora gdje signali predajnika potječu, a zatim, od pumpe do pumpe duž linije. To će uključivati dB gubitak, duljinu vlakna i vrstu vlakna. Ako

je linija dvosmjerna, Ramanove pumpe će biti postavljene u jednom smjeru dok signal ne dođe do kraja i zatim u suprotnom smjeru. Ukoliko je faza planiranja napravljena nepravilno za specifičnu vrstu vlakna, zbog loše ili nepostojeće dokumentacije i krive pretpostavke korištenog vlakna, ishod može biti pad sustava. To zahtijeva ponovno projektiranje, te zahtijeva nove troškove i prepravke. U nekim slučajevima, više vrsta vlakana mogu se koristiti za spajanje predajnika i prijemnika u mreži. To također treba uzeti u obzir jer alati za projektiranje trenutno nepodržavaju unos mješovitih vrsta vlakana, ali identifikacija dominantne vrste vlakana je potrebna u prvih 50 km.

6.3. Testiranje kromatske disperzije

Kao što je navedeno na početku ovog poglavlja, tolerancije na kromatske disperzije u koherentnim sustavima je vrlo visoka, tako da kompenzacija disperzije nije nužno potrebna. Međutim, testiranje kromatske disperzije može pružiti mnogo bolji uvid, pogotovo kod jednostranog mjerenja, kod kojeg se također mjeri duljina vlakna.

Analizatori kromatske disperzije mjere ukupnu kromatsku disperziju vlakana u ovisnosti o valnoj duljini, koja također uključuje CD nagib. S tim parametrima, CD test izračunava Lambda-nulu (valnu duljinu kod koje nema disperzije).

Osim toga, svaki tip vlakna ima potpis, koji uključuje CD koeficijent, CD nagiba i Lambda-nulu.

Koeficijent kromatske disperzije je CD po jedinici duljine, u kilometrima. To podrazumijeva da je točna duljina vlakna poznata. Kad je CD jedinica jednostrana, reflektometar se može koristiti za mjerenje dužine, te time i dobivanje koeficijenta.

Tablica 6.1 Primjer „potpisa“ različitih optičkih vlakana

Tip vlakna	Kratice	Lambda nula	Disperzija na 1550nm [ps/(nm*km)]	Nagib na 1550nm [ps/(nm ² *km)]
Standard single-mode	SM	1300-1324 nm	16-18	~.056
Corning LS	LS	~1570	-3.5 do -0.1	~.07
Dispersion Shifted	DS	~1550	~0	~.07
True Wave Classic	TW-C	~1500	0.8-4.6	~.06
True Wave Plus	TW-P	~1530	1.3-5.8	
True Wave Reduced Slope	TW-RS	~1460	2.6-6	<.05
Corning E-LEAF	E-LEAF	~1500	2-6	~.08
Alcatel Teralight	Teralight	~1440	5.5-9.5	~.058
True Wave Reach	TW-R	~1405	5.5-8.9	<0.45

Izvor: Exfo: "Chromatic Dispersion at High Bit Rates", Exfo, 2012.

Nakon što je operater testirao liniju optičkih vlakana na kromatsku disperziju, ukupni ps/nm ne mora biti potreban za koherentni signal. Međutim, ukupni ps/nm mogu se koristiti s duljinom vlakna, određenom jednostranim mjernim uređajem, za izračun ps/nm*km na 1550 nm. To se također može koristiti s nagibom disperzije i lambda nulom kako bi se utvrdila vrsta vlakna. Na primjer, uvodi se 100 GigE koherentna mreža, koja uključuju Ramanovu pumpu u suprotnom smjeru širenja, te se mora testirati raspon od 40 km na gubitke i kromatsku disperziju. CD mjerenja daju rezultat od 4,48 ps/nm*km i lambda nulom na 1500.27 nm. Na temelju gornje tablice, ova prijenosna linija od 40 km je vjerojatno sastavljena od Corning E-LEAF vlakana i podaci u alatu za projektiranje sugeriraju pojačavanje Ramanove pumpe. Da je tip vlakna bio nepoznat, alat bi pretpostavio da je korišteno standardno jednomodno vlakno, te bi pojačanje bilo puno veće nego što je potrebno i to bi eventualno uzrokovalo FWM (engl. *Four Wave Mixing*) ili druge nelinearne efekte.

Dobar dio današnjih DWDM mreža sadrže Ramanove pumpe. Ramanove pumpe zahtijevaju poznavanje korištenog tipa vlakna kod projektiranja sustava i faze optimizacije da bi mogli

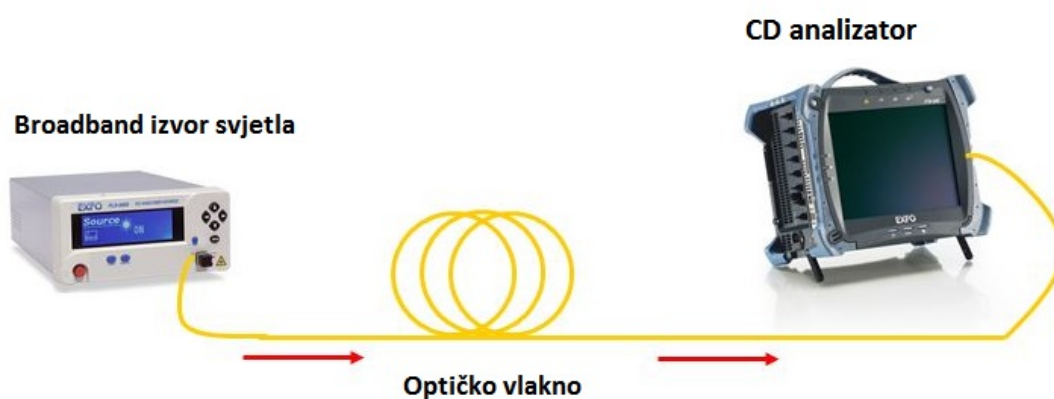
odrediti odgovarajuće pojačanje. Vrlo učinkovit način da se to uradi je mjerenje kromatske disperzije vlakana, dio po dio osnovi. Prednost jednostranih mjernih uređaja je dvojak ovdje: oni automatski mjere duljinu vlakana, i CD koeficijent. To uklanja potrebu za mjerenje s OTDR ili oslanjanje na (potencijalno pogrešne) podatke. Štoviše, mreže s puno raspona preko velikih udaljenosti moraju se okarakterizirati, to s dvostranim ispitivanjem zahtijeva mnogo više truda, ne samo 2 tehničara, nego 2 tehničara koji moraju putovati i uskladiti svoju prisutnost.

Puna svojstva vlakana, uključujući i kromatsku disperziju, ostaju važan korak pri projektiranju sustava koji koriste stara vlakna. To je jednako važno u projektiranju mreža sa koherentnim sustavima detekcije, ali iz posve drugih razloga. Podaci prikupljeni iz testova mogu pomoći uštedjeti dane rada, povećati prihod i značajno smanjiti operativne troškove.

7. Uređaji za mjerenje kromatske disperzije

Uređaji za mjerenje kromatske disperzije dijele se ovisno o metodi mjerenja koju koriste, a samim time dijele se i po načinu mjerenja. Podjela po načinu mjerenja:

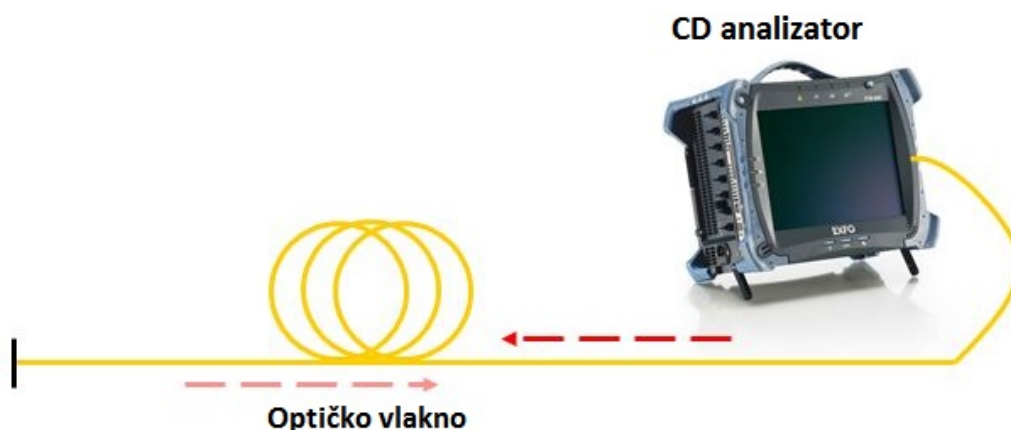
1. DVOSTRANO (engl. *Dual-ended*) MJERENJE



Slika 7.1 Primjer dvostranog mjerenja

Izvor: Exfo: "Dual-Ended and Single-Ended Chromatic Dispersion Test Sets", Exfo, 2011.

2. JEDNOSTRANO (engl. *Single-ended*) MJERENJE



Slika 7.2 Primjer jednostranog mjerenja

Izvor: Exfo: "Dual-Ended and Single-Ended Chromatic Dispersion Test Sets", Exfo, 2011.

Osnovna razlika između ova dva načina mjerenja je odmah vidljiva usporedbom slika 7.1 i 7.2. Da bi izvršili mjerenje kod dvostranog načina mjerenja potreban nam je još jedan uređaj, izvor svjetla, smješten na suprotnom kraju vlakna na kojem se mjeri kromatska disperzija. Jednostrani način mjerenja koristi OTDR tehniku, te mjeri povratne refleksije vlakna koje se mjeri. Koristi kombinacije OTDR valnih duljina da bi izračunao disperziju, odnosno razliku između vremena refleksije različitih valnih duljina.

U nastavku bit će prikazana dva mjerna uređaja, po jedan od svakog načina, njihove prednosti i nedostaci, korisničko sučelje i specifikacije.

7.1. EXFO FTB-5800

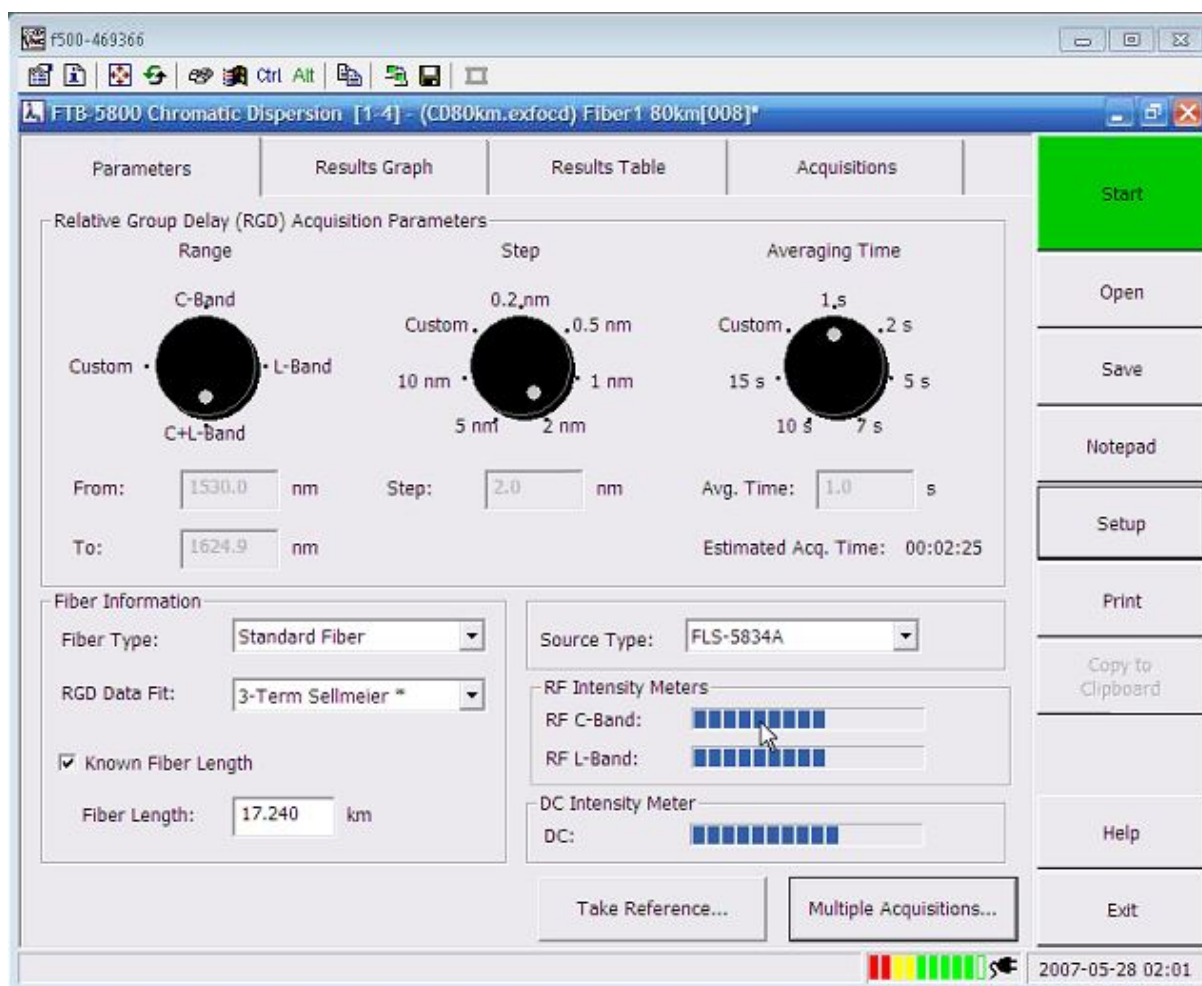
Exfo FTB-5800 spada u grupu uređaja s dvostranim mjerenjem, što znači da bi izvršili mjerenje potreban nam je izvor svjetla. Uređaj koristi visoko preciznu metodu pomaka faze. Pošto su potrebni uređaji na oba kraja mjerenog vlakna, potrebna su i dva tehničara koji će izvršiti mjerenje i to je jedan od najvećih nedostataka naprema jednostranom mjerenju, koji značajno uječe na operativne troškove.

Također postoje i prednosti, a jedna od najvećih je mogućnost testiranja u liniji u kojoj se nalaze EDFA pojačala ili neki drugi elementi koji dopuštaju širenje u samo jednom smjeru.



Slika 7.3 FTB-5800 modul unutar FTB-500 platforme

Izvor: Exfo: "FTB-5500B/FTB-5800", Exfo, 2011.



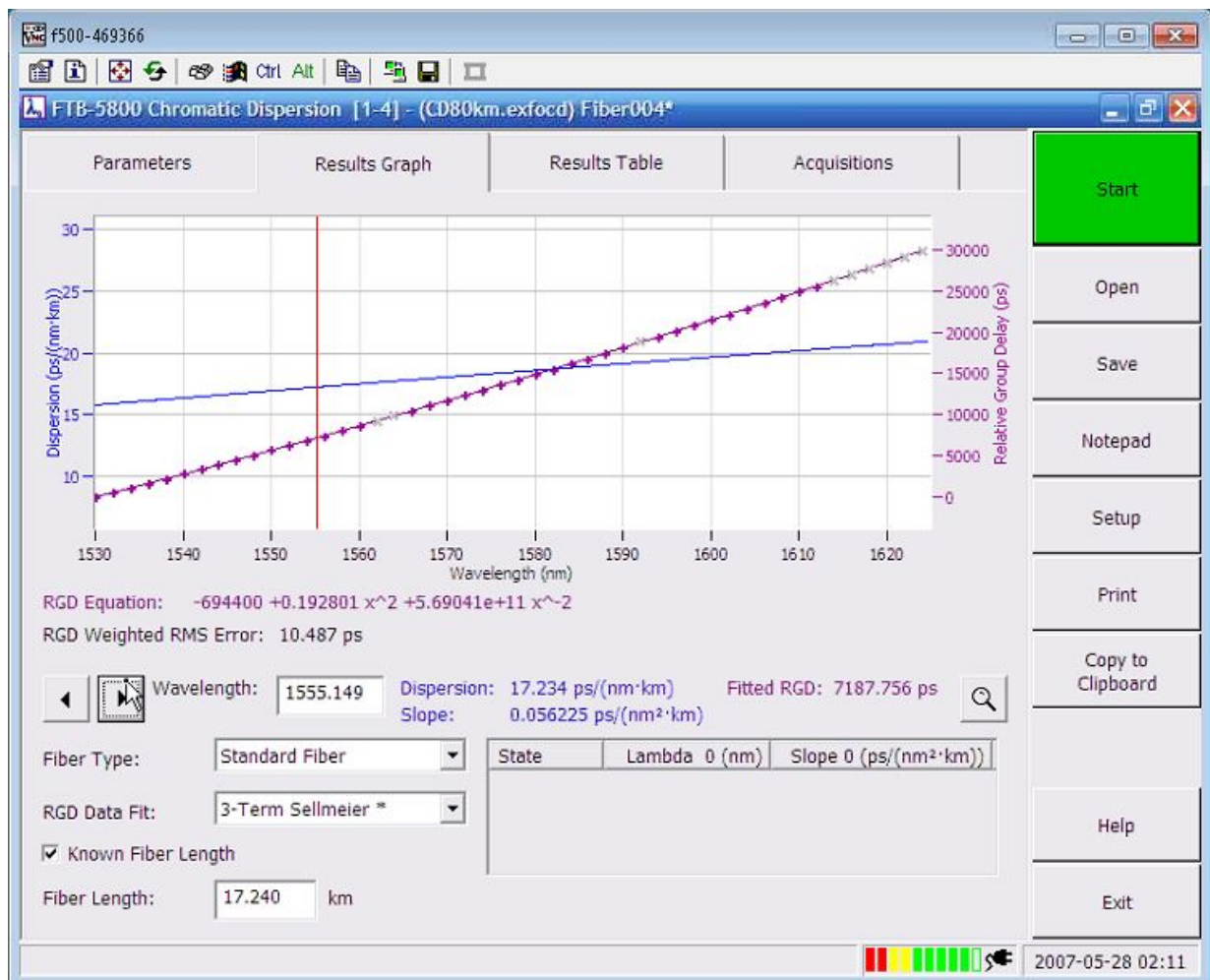
Slika 7.4 Korisničko sučelje FTB-5800

Izvor: Exfo: "Dual-Ended and Single-Ended Chromatic Dispersion Test Sets", Exfo, 2011.

Na slici 7.4 prikazano je korisničko sučelje EXFO FTB-5800 uređaja, koje sadržava sljedeće parametre:

- Područje valne duljine – odabir područja valnih duljina na kojem će se izvršiti testiranja (C, L, C+L)
- Korak valne duljine – određuje koliki će biti korak pri mijenjanju valne duljine unutar prije zadanog područja mjerenja (čim je manji korak to će mjerenje biti preciznije)
- Vrijeme mjerenja po valnoj duljini – određuje vrijeme mjerenja po svakoj točki mjerenja (ako je krivulja dobivena nakon mjerenja pravilnog oblika to znači da smo odabrali dovoljno vrijeme mjerenja, a ako je nepravilnog oblika treba se povećati vrijeme mjerenja po uzorku)

- Vrsta vlakna – odabir vrste vlakna, ukoliko je poznata. Automatski se odabire najbolji *RGD Data Fit*, koji pomoću ekstrapolacije produljuje krivulju na područje u kojem nije izvršeno mjerenje
- Duljina vlakna – unos duljine vlakna, ukoliko nije poznata moguće je unijeti je naknadno nakon mjerenja



Slika 7.5 Rezultati mjerenja FTB-5800

Izvor: Exfo: "Dual-Ended and Single-Ended Chromatic Dispersion Test Sets", Exfo, 2011.

Rezultati mjerenja prikazani su na slici 7.5. Osim grafičkog prikaza mjerenja kromatske disperzije moguć je pregled mjerenja u tabličnom obliku sa svim pojedinim točkama i pripadajućim rezultatima mjerenja.

U tablici 7.1 prikazane su tehničke specifikacije definirane od proizvođača, vezane za mjerenje kromatske disperzije.

Tablica 7.1 Tehničke specifikacije FTB-5800 uređaja

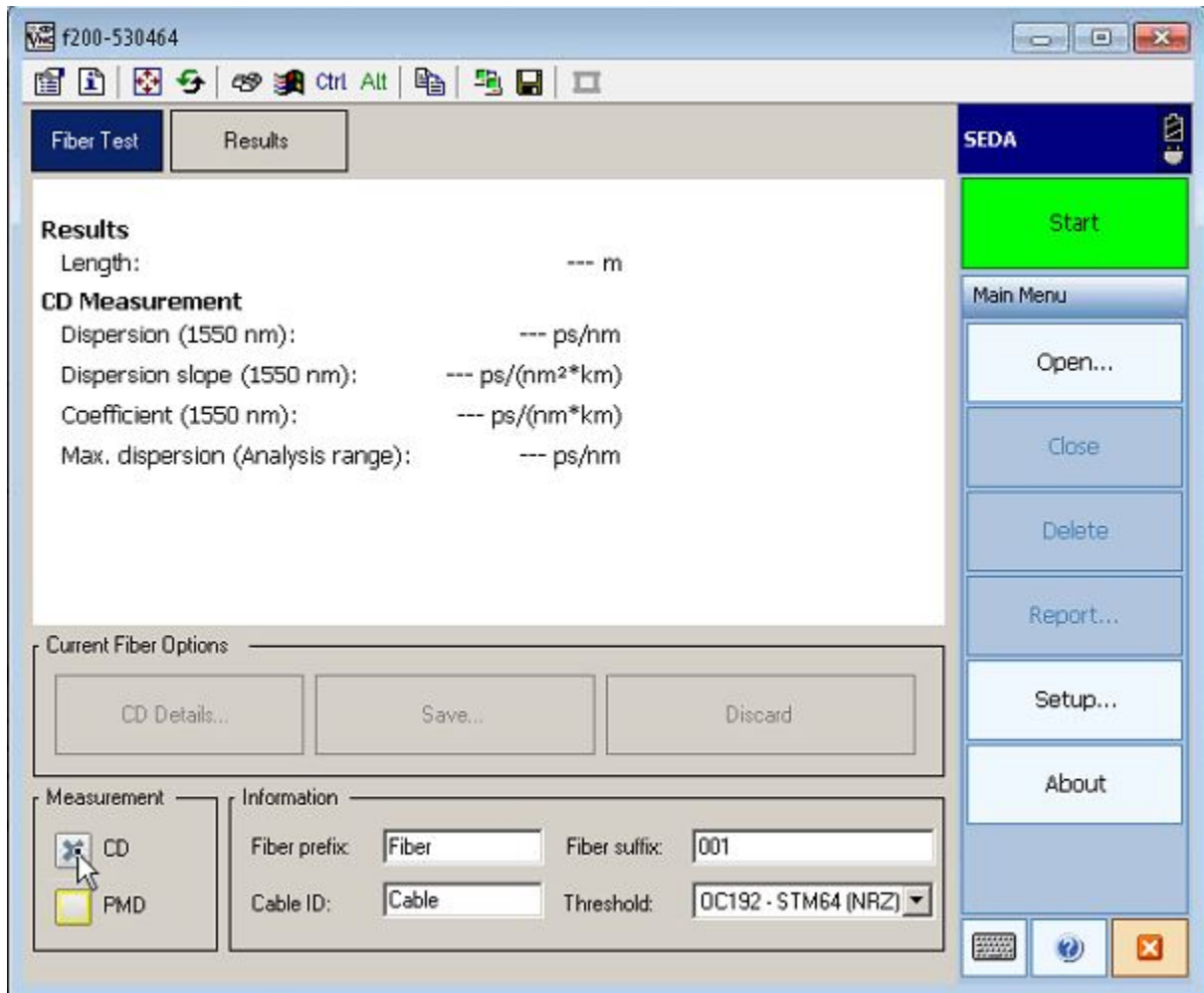
TEHNIČKE SPECIFIKACIJE				
Područje valne duljine (nm)		1530-1625		
Korak valne duljine (nm)	min	0.1		
Broj mjernih točaka	max	950		
Dinamičko područje (dB)		42		
Nesigurnost valne duljine (nm)		0.1		
Nesigurnost disperzije (ps/nm)	20 km G.652	1.6		
	120 km G.652	3.1		
	20 km G.655	1.9		
		20 km	80 km	120 km
Ponovljivost disperzije (ps/nm)		0.04	0.2	1.1
Ponovljivost Lambda-nule (nm)		0.1	0.14	0.8
Ponovljivost nagiba disperzije (%)		0.03	0.05	0.25
Min. dužina vlakna (km)		< 1		
Max. dužina vlakna (km)		> 5400		
Vrijeme mjerenja po točki	min	< 1		

Izvor: EXFO: "FTB-5500B/FTB-5800", Exfo, 2011.

7.2. EXFO FTB-5700

Exfo FTB-5700 je jednostrani uređaj za mjerenje kromatske i polarizacijske disperzije. Omogućava jednom tehničaru izvršavanje mjerenja, bez zastoja u mjerenju uzrokovanog premještanjem tehničara kao kod dvostranog mjerenja, kraća vremena mjerenja, povećanu efikasnost i smanjenje operativnih troškova.

Koristi modificiranu OTDR metodu, te tako ne podržava lociranje oštećenja na vlaknima pošto „gleda“ samo refleksije s kraja vlakna koje se testira. Ovom metodom također odmah dobivamo duljinu vlakna koje se testira, te ukoliko neznamo vrstu vlakna lako je možemo odrediti pomoću lambda nule, nagiba CD i CD koeficijenta na 1550 nm.

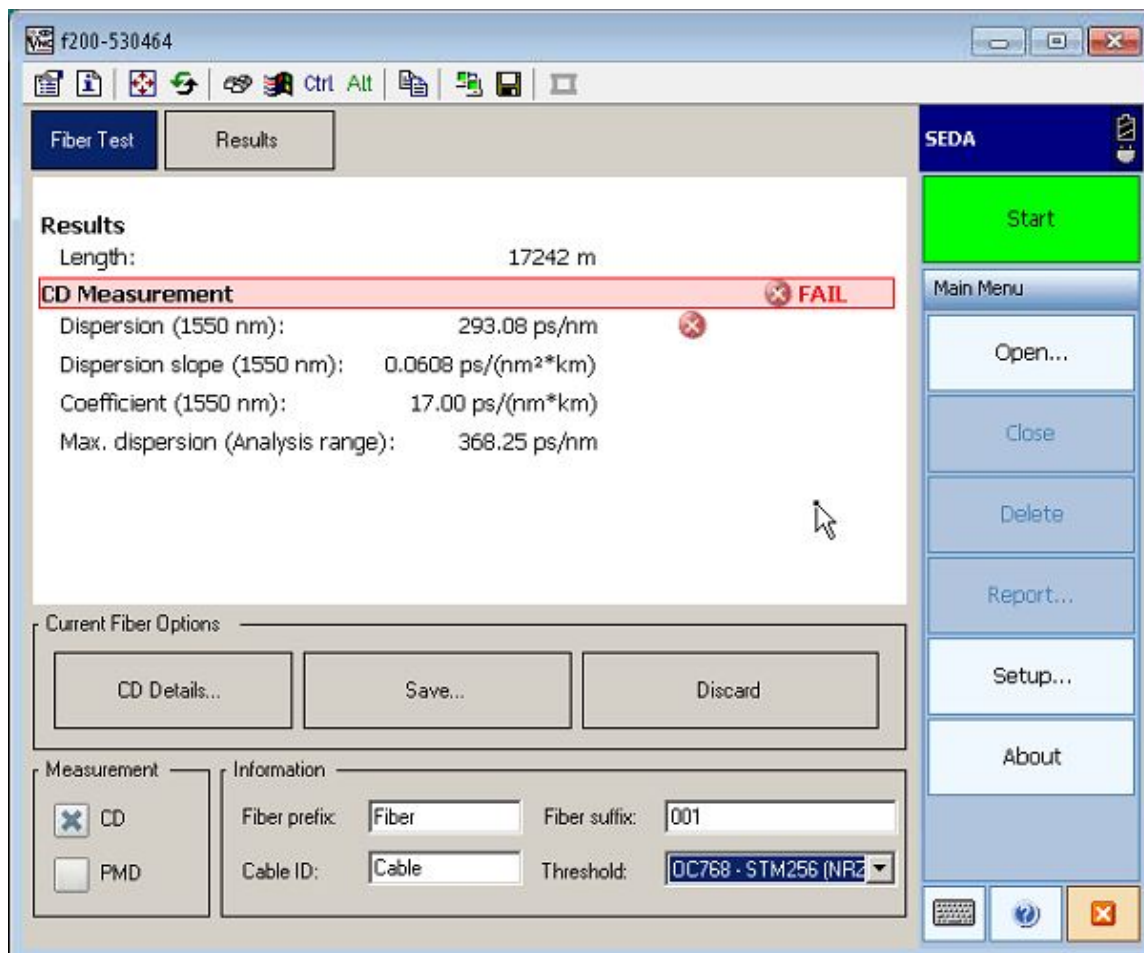


Slika 7.6 Korisničko sučelje FTB-5700

Izvor: Exfo: "Dual-Ended and Single-Ended Chromatic Dispersion Test Sets", Exfo, 2011.

Korisničko sučelje je puno jednostavnije nego kod prethodnog uređaja, te nam nudi samo mogućnost da li želimo testirati kromatsku i/ili polarizacijsku disperziju, te mogućnost postavljanja limita disperzije ovisno o brzini prijenosa. Sučelje je napravljeno tako da se smanji mogućnost greške korisnika i ubrza rad.

Nakon mjerenja program odmah prikazuje da li je kromatska disperzija u vlaknu ispod razine koju smo postavili (limit se može mijenjati i nakon mjerenja). Disperzija se može prikazati grafički i tablično kao i kod prethodnog uređaja.



Slika 7.7 Rezultati mjerenja FTB-5700

Izvor: Exfo: "Dual-Ended and Single-Ended Chromatic Dispersion Test Sets", Exfo, 2011.

Tablica 7.2 Tehničke specifikacije FTB-5700 uređaja

TEHNIČKE SPECIFIKACIJE	
Područje mjerenja valne duljine (nm)	1475-1626
Dinamičko područje (dB)	25
Netočnost udaljenosti (km)	$\pm(0.01 + 1\% \cdot \text{udaljenost})$
CD	
Broj testnih točaka	8
CD nesigurnost (ps/nm)	± 10
Vrijeme mjerenja (s)	40

Izvor: EXFO: "FTB-5700 Single-Ended Dispersion Analyzer", Exfo, 2013.

Kako potražnja za propusnošću mreže raste, sve više i više linkova se nadograđuje na brzine na kojima testiranje disperzije postaje vrlo bitno. Vrlo često, samo par vlakana u svakoj točki prisutnosti (PoP, engl. *Point of Presence*) zahtijevaju testiranje. U takvom scenariju, najviše vremena oduzima transport tehničara iz jednog u drugi PoP. Jednostrano mjerenje ubrzava proces na dva načina. Prvo, tehničar A ne mora čekati tehničara B da dođe na drugi kraj s izvorom svjetla. I drugo, vlakna mogu biti testirani u više smjerova, te tako posao koji je prije mogao potrajati satima se može obaviti u nekoliko minuta, sa smanjenjem broja transporta i operativnih troškova.



Slika 7.8 Primjer ROADM mreže

Izvor: Exfo: "FTB-5700 Single-Ended Dispersion Analyzer", Exfo, 2013.

Tipično, jednostrano mjerenje omogućuje potpunu karakterizaciju mreže u 66% manje vremena nego bilo koje druge tradicionalne metode mjerenja. Na tablici 7.3 je prikazan utjecaj na broj premještanja tehničara za mrežu prikazanu na prethodnoj slici.

Tablica 7.3 Tablični prikaz broja kretanja tehničara za mrežu na slici 7.8

Tip mjerenja	Broj tehničara	Broj premještanja tehničara
Dvosmjerno	2	19
Jednosmjerno	1	6

8. Zaključak

Potražnja za većom propusnošću je dovela do nečuvane revolucije u svijetu prijenosa podataka. Opsjednutost brzim i pouzdanim prijenosom diljem svijeta gura pružatelje mrežnih usluga prema širenju svjetskih mreža za transport gigabajta informacija između svih elektroničkih uređaja na zemlji i šire.

Optička vlakna naš su omiljeni medij za terabitne „autoceste“ jer omogućuju da višestruke valne duljine prenose milijarde nizova binarnih podataka brzinom svjetlosti. Nažalost, ovaj medij neće pružiti beskonačnu propusnost zbog raznih intrinzičnih svojstva.

Brzina svjetlosti koja putuje kroz optičko vlakno nije konstantna s valnom duljinom. Različite valne duljine će putovati na različitim brzinama, šireći signal različitih obojene svjetlosti putuju na različitim brzinama unutar vlaknima. Ova varijacija kašnjenja između valnih duljina naziva se kromatska disperzija.

Kromatska disperzija se može iskazati u pikosekundama po nanometru (ps/nm). Linearna kromatska disperzija (CD koeficijent) se mjeri u pikosekundama po nanometru i kilometru (ps/nm·km).

Svaki prijemnik ima svoju toleranciju na kromatsku disperziju u (ps/nm), ovisno o laseru, modulaciji, a što je najvažnije, brzini prijenosa. Brzine prijenosa su od prije nekoliko godina povećale se od 2,5 Gbit/s do današnjih 100 Gbit/s, smanjujući vrijeme po bitu iz 400 ps na 10 ps. U slučaju od brzine prijenosa od 100 Gbit/s, imamo 1 ps (10%) za prebaciti iz "0" na "1" i obrnuto. Prema tome, danas nema mjesta za kašnjenje.

Bez kompenzacije, tipični doseg preko standardnog optičnog vlakna 10 Gbit/s signala iznosio bi 80 km, dok bi signal od 40 Gbit/s dosegao samo 4 km prije nego što bi došlo do grešaka pri prijenosu.

Srećom, razvijene su različite metode pomoću kojih se suprotstavlja ograničenjima kromatske disperzije. Najčešće metode kompenzacije kromatske disperzije su korištenje disperzijsko kompenzacijskog vlakna, soliton prijenosa, električnog cvrkutanja, itd. Pošto su neke od ovih metoda prilično skupe, vrlo je bitno imati precizna mjerenja kromatske disperzije.

Neprecizna mjerenja uzrokovat će podkompenzaciju ili prekompenzaciju kromatske disperzije, te će to utjecati na budžet za disperziju i dovesti do različitih problema (povećani troškovi kompenzacije (\$/ps/nm), FWM, neučikovitu kompenzaciju kromatske disperzije, pogrešan odabir oblika kompenzacije, itd.).

Mjerenje je vrlo važan dio kod nadogradnje sustava na veće prijenosne brzine, jer nam omogućava uvid u stanje mreže, te tako sprečava moguće komplikacije i dodatne troškove nastale povećavanjem brzine prijenosa podataka na mrežama koje to ne mogu podnijeti.

U budućnosti brzine prijenosa će se povećavati, a samim time će i tolerancija na kromatsku disperziju biti manja. Međutim, u isto vrijeme razvijat će se nove metode kompenzacije i mreže tolerantnije na kromatsku disperziju. Najidealnije bi bilo kad bi optički izvori emitirali točno na jednoj odabranoj valnoj duljini, onda uopće nebi dolazilo do širenja signala i izbjegli bi se svi problemi koje donosi kromatska disperzija.

Literatura

- [1] ITU-T Manual: "Optical fibres, cables and systems", ITU, 2009.
- [2] Batagelj, Boštjan: "Disperzija optičnega vlakna", Fakultet za elektrotehniko Ljubljana, 2005.
- [3] Recommendation ITU-T G.652: "Characteristics of a single-mode optical fibre and cable", ITU, 2009.
- [4] Recommendation ITU-T G.653: "Characteristics of a dispersion-shifted, single-mode optical fibre and cable", ITU, 2010.
- [5] Recommendation ITU-T G.654: "Characteristics of a cut-off shifted single-mode optical fibre and cable", ITU, 2012.
- [6] Recommendation ITU-T G.655: "Characteristics of a non-zero dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable", ITU, 2009.
- [7] Recommendation ITU-T G.656: "Characteristics of a fibre and cable with non-zero dispersion for wideband optical transport", ITU, 2010.
- [8] Recommendation ITU-T G.657: "Characteristics of a bending-loss insensitive single-mode optical fibre and cable for the access network", ITU, 2012.
- [9] Radenković, N.; Marinčić, A.: "Metode kompenzacije disperzije u optičkim sistemima", 2005.
- [10] Exfo: "Chromatic Dispersion at High Bit Rates", Exfo, 2012.
- [11] Laferriere, J.; et al.: "Reference Guide to Fiber Optic Testing", JDSU, 2007.
- [12] Exfo: "Dual-Ended and Single-Ended Chromatic Dispersion Test Sets", Exfo, 2011.
- [13] Exfo: "FTB-5500B/FTB-5800", Exfo, 2011.
- [14] Exfo: "FTB-5700 Single-Ended Dispersion Analyzer", Exfo, 2013.

Skraćenice

ASE	<i>Amplified Spontaneous Emission</i>
BBS	<i>BroadBand Source</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
CD	<i>Chromatic Dispersion</i>
CFBG	<i>Chirped Fiber Bragg Grating</i>
CS-RZ	<i>Carrier-Suppressed-RZ</i>
DCF	<i>Dispersion Compensating Fiber</i>
DCM	<i>Dispersion Compensation Module</i>
DFB	<i>Dispersion Flatened Fiber</i>
DGD	<i>Dispersion Group Delay</i>
DPSK	<i>Differential PSK</i>
DPSM	<i>Differential Phase Shift Method</i>
DP-QPSK	<i>Dual Polarization Quadrature Phase-Shift Keying</i>
DSF	<i>Dispersion Shifted Fiber</i>
DUT	<i>Device Under Test</i>
DWDM	<i>Dense WDM</i>
EDFA	<i>Erbium Doped Fiber Amplifier</i>
FBG	<i>Fiber Bragg Grating</i>
FEC	<i>Forward Error Correction</i>
FSK	<i>Frequency-Shift Keying</i>
FWM	<i>Four Wave Mixing</i>
GVD	<i>Group Velocity Dispersion</i>
HOM	<i>High Order Mode</i>

IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
INTY	<i>Interferometric method</i>
IOR	<i>Index Of Refraction</i>
ISI	<i>Inter-Symbol Interference</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
MZM	<i>Mach-Zehnder Modulator</i>
NLE	<i>NonLinear Effect</i>
NRZ	<i>NonReturn-to-Zero</i>
OOK	<i>On-Off Keying</i>
OSNR	<i>Optical Signal to Noise Ratio</i>
OTDR	<i>Optical Time-Domain Reflectometer</i>
PMD	<i>Polarization Mode Dispersion</i>
PolSK	<i>Polarization-Shift Keying</i>
PSK	<i>Phase-Shift Keying</i>
PSM	<i>Phase Shift Method</i>
RGD	<i>Relative Group Delay</i>
RTM	<i>Reference Test Method</i>
RZ	<i>Return-to-Zero</i>
SMF	<i>Single-Mode Fiber</i>
SPM	<i>Self-Phase Modulation</i>
SSB-RZ	<i>Single-SideBand-RZ</i>
TLS	<i>Tunable Laser</i>
VHBR	<i>Very High Bit Rates</i>
VIPA	<i>Virtually Imaged Ohased Array</i>
WDM	<i>Wavelength Division Multiplex</i>
XPM	<i>Cross-Phase Modulation</i>

Popis slika

Slika 2.1 Širenje impulsa pri putovanju kroz optičko vlakno	2
Slika 2.2 ISI uzrokovan širenjem impulsa	3
Slika 2.3 Koeficijent disperzije u ovisnosti o valnoj duljini.....	5
Slika 2.4 Koeficijent disperzije za standardno (SMF), DSF i DFF optičko vlakno	6
Slika 2.5 Interakcija cvrkutanja laserskog izvora i disperzije optičkog vlakna.....	6
Slika 2.6 Prijenos signala u idealnom i realnom optičkom vlaknu	8
Slika 2.7 Kromatska disperzija različitih standardiziranih SMF vlakana	11
Slika 3.1 Maksimalna udaljenost prijenosa kao funkcija brzine prijenosa	14
Slika 3.2 Prikaz prijenosne linije sa smanjivanjem disperzije pomoću DC modula.....	16
Slika 3.3 Disperzijska kompenzacija unuta optičkog pojačala	16
Slika 3.4 Prikaz disperzije sa kompenzacijom primjenjenom na pojedini kanal	19
Slika 3.5 Zaostala disperzija.....	19
Slika 3.6 Prikaz Braggove rešetke u optičkom vlaknu.....	21
Slika 3.7 a) S-bending beam tehnika kompenzacije, b)Ovisnost refleksije i relativnog grupnog kašnjenja.....	22
Slika 4.1 Primjer NRZ prijenosa	25
Slika 4.2 Primjer VHBR NRZ prijenosnog spektra	25
Slika 4.3 Razlika u spektru između užeg NRZ i šireg RZ modulacijskog formata	26
Slika 4.4 Pomak faze vala od 0 do π	27
Slika 4.5 PSK primjenjen na NRZ prijenos	27
Slika 4.6 DPSK Primjenjen na NRZ prijenos	28
Slika 4.7 Usporedba između OOK-NRZ i CS-RZ modulacije	29
Slika 4.8 Razlika u spektru između užeg CS-RZ i šireg RZ modulacijskog formata	29

Slika 4.9 Promjena faze u duobinarnom modulacijskom formatu	30
Slika 4.10 Usporedba OOK-NRZ i duobinarnog prijenosnog spektra.....	31
Slika 4.11 Usporedba raznih VHBR modulacijskih formata	31
Slika 5.1 Osnove mjerenja PSM metode.....	35
Slika 5.2 Shema eksperimentalne PSM.....	36
Slika 5.3 Primjer PSM rezultata za G.653 vlakno (lijevo) i DCF vlakno (desno)	36
Slika 5.4 Shema testne postave za poboljšanu PSM	37
Slika 5.5 Skeniranje valnih duljina u poboljšanoj PSM.....	38
Slika 5.6 Shema DPSM testne postave	39
Slika 5.7 Princip rada OTDR metode.....	41
Slika 5.8 Problem nesigurnosti kod OTDR metode ($\lambda_0=1320.14\text{nm}$ (vertikalna crta) i $D=16.641\text{ps/nm}\cdot\text{km}$).....	42
Slika 6.1 Ramanovo pojačanje	44
Slika 6.2 Ramanovo pojačanje ovisno o tipu vlakna.....	45
Slika 7.1 Primjer dvostranog mjerenja	49
Slika 7.2 Primjer jednostranog mjerenja	49
Slika 7.3 FTB-5800 modul unutar FTB-500 platforme	50
Slika 7.4 Korisničko sučelje FTB-5800	51
Slika 7.5 Rezultati mjerenja FTB-5800.....	52
Slika 7.6 Korisničko sučelje FTB-5700	54
Slika 7.7 Rezultati mjerenja FTB-5700.....	55
Slika 7.8 Primjer ROADM mreže	56

Popis tablica

Tablica 2.1 Specifikacije kromatske disperzije u optičkim vlaknima G.652, G.653 i G.654	9
<i>Izvor: Recommendation ITU-T G.652, G.653, G.654</i>	
Tablica 2.2 Specifikacije kromatske disperzije u optičkim vlaknima G.655	9
Tablica 2.3 Specifikacije kromatske disperzije u optičkim vlaknima G.656.....	11
Tablica 2.4 Specifikacije kromatske disperzije u optičkim vlaknima G.657.....	11
Tablica 3.1 Učinak cvrkutanja na disperziju i širenje impulsa.....	12
Tablica 3.2 Maksimalna dopuštena disperzija za različite NRZ spektralne širine impulsa i gubitke	13
Tablica 3.3 Maksimalna udaljenost prijenosa signala za različite tipove vlakana.....	14
Tablica 3.3 Tablični prikaz vrijednosti disperzije za gornji primjer	18
Tablica 4.1 Razlika u širinama spektra različitih formata modulacije	32
Tablica 4.2 Komercijalna implementacija CD tolerancije pri 100 Gbit/s.....	32
Tablica 5.1 Specifikacije optičkih vlakana i prilagodba CD.....	34
Tablica 6.1 Primjer „potpisa“ različitih optičkih vlakana	47
Tablica 7.1 Tehničke specifikacije FTB-5800 uređaja	53
Tablica 7.2 Tehničke specifikacije FTB-5700 uređaja	55
Tablica 7.3 Tablični prikaz broja kretanja tehničara za mrežu na slici 7.8.....	56