

SVEUČILIŠTE U RIJECI  
POMORSKI FAKULTET U RIJECI

**Dario Nižić**

**MJERENJE POLARIZACIJSKE  
DISPERZIJE U MREŽAMA VELIKIH  
BRZINA PRIJENOSA**

DIPLOMSKI RAD

Rijeka, 2013.

SVEUČILIŠTE U RIJECI  
POMORSKI FAKULTET U RIJECI

**MJERENJE POLARIZACIJSKE  
DISPERZIJE U MREŽAMA VELIKIH  
BRZINA PRIJENOSA**

Kolegij: Optoelektronički sustavi

Mentor: doc. dr. sc. Irena Jurdana

Student: Dario Nižić

Matični broj: 0112027866

Studij: Elektroničke i informatičke tehnologije u pomorstvu

Rijeka, rujan 2013.

## SADRŽAJ:

1. UVOD .....	3
2. POLARIZACIJA SVJETLOSNOG VALA .....	6
2.1 Oblici polarizacije .....	6
2.1.1 Linearna polarizacija .....	7
2.1.2 Kružna polarizacija .....	9
2.1.3 Eliptična polarizacija .....	10
2.2 Nepolarizirana svjetlost .....	11
3. FENOMEN POLARIZACIJSKE DISPERZIJE .....	12
3.1 Širenje impulsa, uzroci i posljedice .....	15
3.2 Velike brzine prijenosa .....	17
4. DVOLOM, UZROCI I POSLIJEDICE .....	18
4.1 Unutarnja naprezanja .....	18
4.2 Vanjska naprezanja .....	19
4.3 Ravnine i osi dvoloma .....	20
5. OSNOVNA STANJA POLARIZACIJE .....	22
5.1 Definicija .....	22
5.2 Kašnjenje, polarizacijska disperzija i proširivanje impulsa .....	23
5.2.1 Bez proširivanja impulsa .....	23
5.2.2 Fiksno kašnjenje i proširivanje impulsa .....	24
5.2.3 Nasumično kašnjenje i rastuće proširivanje impulsa .....	25
5.2.4 Nasumično kašnjenje i rastuće proširivanje impulsa kao funkcija duljine optičkog vlakna .....	26

6. SPECIFIKACIJE POLARIZACIJSKE DISPERZIJE I MEĐUNARODNI STANDARDI .....	28
6.1 Specifikacije za dizajn kabela i linkova.....	28
6.2 Sistemske specifikacije .....	29
6.3 Specifikacije kašnjenja za različite primjene i modulacijske formate.....	31
6.4 Prijedlozi vrijednosti kašnjenja za različite primjene i modulacijske formate	33
6.5 Specifikacije kašnjenja za Ethernet primjene .....	36
7. KOMPENZACIJA POLARIZACIJSKE DISPERZIJE PRILIKOM PROIZVODNJE OPTIČKOG VLAKNA .....	38
8. TESTIRANJE I MJERENJE POLARIZACIJSKE DISPERZIJE.....	40
8.1 Opis dostupnih metoda testiranja.....	43
8.1.1 Fiksni analizator – Fourierova transformacija .....	43
8.1.2 Interferometrička metoda (TINTY/GINTY) .....	46
8.1.3 Analiza mješovitih polarizacijskih stanja .....	48
8.2 Mjerni instrumenti i uređaji .....	51
8.2.1 Širokopojasni svjetlosni izvor FTB-2200 .....	51
8.2.2 Distribuirani analizator polarizacijske disperzije FTB-5600.....	53
8.2.3 Analizator polarizacijske disperzije FTB-5500B .....	55
8.3 Kalibracija instrumenata za testiranje i mjerenje polarizacijske disperzije .....	57
8.4 Nesigurnost testova i mjera polarizacijske disperzije.....	57
9. ZAKLJUČAK.....	59
POPIS SLIKA.....	62
POPIS TABLICA .....	64
LITERATURA .....	65

## 1. UVOD

Neprestana i sve veća potreba za povećanjem brzine i kapaciteta telekomunikacijskih mreža dovela je do upotrebe svjetlovoda. Međutim, daljnji razvoj i povećanje kapaciteta svjetlovodnih mreža donijeli su, između ostalog, i otkrivanje novih nedostataka i ograničenja. Utvrđivanje načela tih nedostataka, kao i razumijevanje posljedica koje uzrokuju, važan je zadatak telekomunikacijskih eksperata ali i cjelokupne znanstvene zajednice.

Problemi kao što su prigušenje i disperzija signala već su jako dobro poznati i elaborirani. Međutim, pri vrlo velikim brzinama prijenosa (engl. Very High Bit Rate - VHBR), parametri vezani uz polarizaciju, kao što su polarizacijska disperzija (engl. Polarization Mode Dispersion - PMD), polarizacijski gubici (engl. Polarization Dependent Loss - PDL) te polarizacijsko pojačanje (engl. Polarization Dependent Gain - PDG), mogu međusobno djelovati uz prisutnu kromatsku disperziju (engl. Chromatic Dispersion - CD) i nelinearne efekte (engl. Nonlinear Effects - NLE). Ovakva vrsta zajedničkog djelovanja više raličitih oblika smetnji dovodi, pak, do novih oblika ograničenja i potrebe za njihovim daljnjim razmatranjem. Prelaskom na brzine prijenosa podataka od 40 Gbit/s i 100 Gbit/s, koristeći nove (napredne) modulacijske formate, napravljeno je puno posla vezanog uz polarizacijsku disperziju i diferencijalno grupno kašnjenje (engl. Differential Group Delay - DGD).

Cilj ovog rada je, uz uvodno opisivanje fenomena polarizacijske disperzije te polarizacije svjetlosti općenito, isticanje uzroka i posljedica polarizacijske disperzije, kao i prikaz suvremenih metoda i mjernih instrumenata koji se koriste pri njenom mjerenju i testiranju sustava. Također, navedeni su i međunarodni standardi vezani uz polarizacijsku disperziju koje telekomunikacijski sustavi moraju poštivati.

Pri izradi ovog rada koristio sam literaturu dostupnu na internetu, uz konzultacije s mentorom.

Rad se sastoji od 9 poglavlja. U uvodnom poglavlju predstavljen je problem te je naveden cilj rada.

Zatim slijedi drugo poglavlje pod naslovom Polarizacija svjetlosnog vala u kojem je opisan koncept polarizacije. Također su prikazani i različiti oblici polarizacije (linearna, kružna i eliptična polarizacija te nepolarizirana svjetlost), uz priložene odgovarajuće slike propagacije vektora električnog polja svjetlosnog vala.

Treće poglavlje nosi naslov Fenomen polarizacijske disperzije u kojem je opisan dotični fenomen, njegovi uzroci i posljedice. Posebna potpoglavlja odnose se na proširivanje impulsa te utjecaj fenomena pri velikim brzinama prijenosa podataka.

Dvolom, uzroci i posljedice, naslov je četvrtog poglavlja. U njemu je pobliže opisana pojava dvoloma. Navedeni su uzroci pojavljivanja u obliku unutarnjih nepravilnosti, koje nastaju već tijekom proizvodnje optičkog vlakna, te vanjskih naprezanja, koja pogađaju optičke kabele tijekom njihova radnog vijeka.

U narednom, petom poglavlju, pod naslovom Osnovna stanja polarizacije, detaljnije je opisan jedan od najkritičnijih parametara vezanih uz polarizacijsku disperziju. Prikazane su posljedice koje ovise o početnom poravnanju osnovnih polarizacijskih stanja, a s obzirom na diferencijalno grupno kašnjenje i proširivanje impulsa, koji pak uzrokuju različite oblike smetnji unutar signala.

Specifikacije polarizacijske disperzije i međunarodni standardi naslov je šestog poglavlja. U njemu se nalaze specifikacije koje se koriste prilikom dizajniranja kabela i linkova, systemske specifikacije te specifikacije kašnjenja ovisno o primjeni i modulacijskom formatu.

Sedmo poglavlje posvećeno je kompenzaciji polarizacijske disperzije prilikom proizvodnje optičkog vlakna. Za primjer je uzet proizvodni proces kojeg je razvila japanska tvrtka OFS Optics, a radi se o svojevrsnom „ugrađivanju“ rotacije unutar optičkog vlakna za vrijeme njegova izvlačenja.

Osmo poglavlje, koje nosi naslov Testiranje i mjerenje polarizacijske disperzije, zapravo predstavlja glavnu temu ovog rada. Na početku poglavlja ukazano je na teškoće s kojima se susrećemo prilikom mjerenja i testiranja polarizacijske disperzije. Zatim su pobliže opisane dostupne metode mjerenja i testiranja. Jedno potpoglavlje posvećeno je predstavljanju i kraćem opisu

karakteristika nekih od mjernih uređaja kanadske tvrtke EXFO, konkretnije, radi se o uređajima FTB-2200, FTB-5600 i FTB-5500B. Pri kraju poglavlja, napisano je nekoliko redaka o kalibraciji mjernih instrumenata te nesigurnosti rezultata samih mjerenja.

Na samom kraju rada nalazi se zaključak, koji donosi sažetak i pregled svih saznanja dobivenih tijekom izrade ovog rada.

## **2. POLARIZACIJA SVJETLOSNOG VALA**

Koncept polarizacije u optici analogan je onome koji se koristi u socijologiji. Na primjer, među slučajno odabranom grupom ljudi koja dolazi na javni sastanak, nije zapaženo nikakvo precizno, definirano ili karakteristično ponašanje, već samo pozadinska buka stvorena individualnim razgovorima. Kaže se da je takva populacija nepolarizirana, što predstavlja definiciju buke, odnosno šuma. Svaki pojedinac koji čini tu populaciju ima svoje osobno mišljenje i sva su ta mišljenja istovremeno prisutna. Međutim, iz vanjske perspektive, populacija se čini kaotičnom, s nedefiniranim mišljenjem ili čak bez mišljenja. Ukoliko javni govor održi snažni, pristrani govornik, slušaoci će početi iskazivati interes. To znači da populacija postaje polarizirana. Za takvu populaciju može se reći da je slabije ili jače polarizirana, ovisno o postotku populacije koji pokazuje interes. Ista načela vrijede i u optici. [1]

Svjetlost je, kao transverzalan elektromagnetski val, sastavljena od magnetskog i električnog polja koji su međusobno okomiti i putuju u istom smjeru koji se naziva os propagacije. Uobičajeni elektronički detektori (prijemnici) reagiraju samo na efekte električnog polja (a ne magnetskog polja) stvorene protokom elektrona kroz određeni materijal. Stoga će u sljedećih nekoliko poglavlja u obzir biti uzeto samo električno polje te njegovo širenje duž staklenog medija, u ovom slučaju, optičkog vlakna.

### **2.1 Oblici polarizacije**

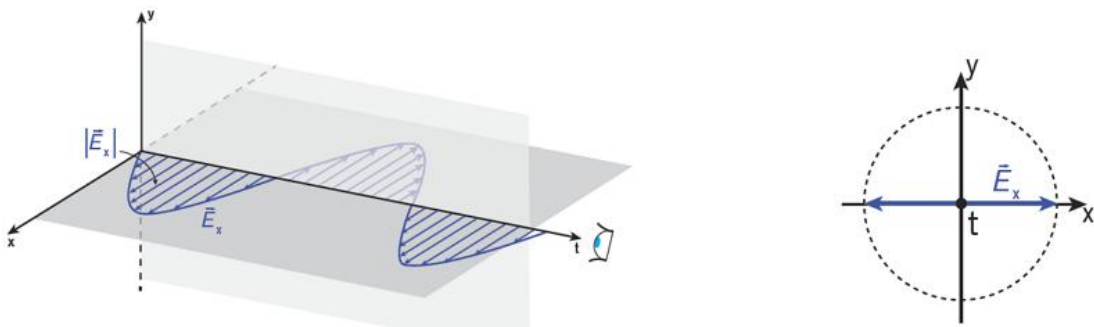
Polarizacija je osobina svjetlosti. Naime, za svjetlosni val se kaže da je polariziran kada je vektor njegovog električnog polja pod specifičnim kutem u odnosu na os propagacije. Polarizacijsko stanje određuje odašiljač svjetlosnog signala, ali je ono definirano s gledišta prijemnika, odnosno promatrača koji gleda u smjeru odašiljača ili izvora svjetlosti.



### 2.1.1 Linearna polarizacija

Ovisno o orijentaciji vektora električnog polja u odnosu na os propagacije, razlikujemo horizontalnu i vertikalnu linearnu polarizaciju.

Ako se vektor električnog polja svjetlosnog vala kojeg promatramo širi isključivo u ravnini  $x - t$ , takav svjetlosni val je horizontalno linearno polariziran. Razlog tome je to što se, gledajući od strane prijemnika prema izvoru, nadolazeći vektor električnog polja kreće lijevo – desno po ravnoj liniji u horizontalnoj ravnini. Slučaj je ilustriran na slici 1.

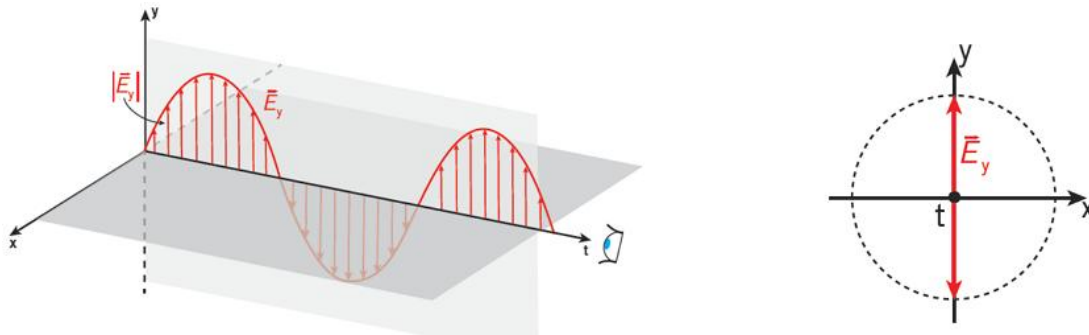


**Slika 1.** Širenje vektora el. polja linearnog horizontalnog polarizacijskog stanja

Napomena: oko predstavlja smjer u kojem promatrač  
ili primatelj gleda

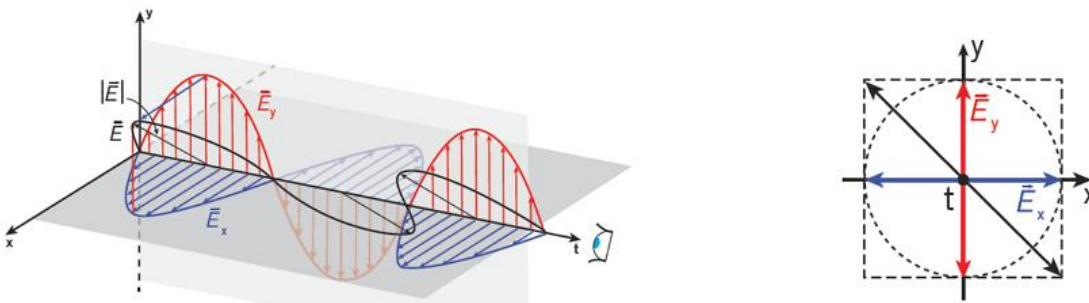
Napomena: os  $t$  je usmjerena od stranice

Svjetlosni val može se širiti i samo vertikalno, u ravnini  $y - t$ . U tom slučaju val je vertikalno linearno polariziran, kao što je prikazano na slici 2.



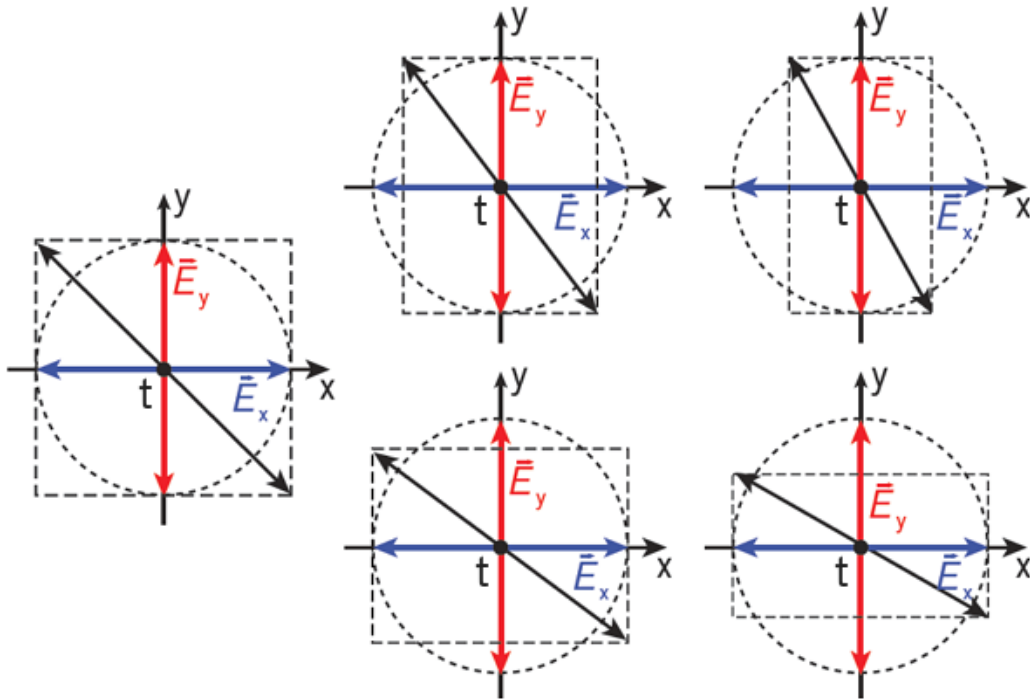
**Slika 2.** Širenje vektora el. polja linearnog vertikalnog polarizacijskog stanja

Moguća je i kombinacija dvaju prethodno navedenih slučajeva. Dakle, konačni val je kombinacija vala u  $x - t$  ravnini i vala u  $y - t$  ravnini te putuje kroz medij pod određenim kutem kao npr.  $\pi/4$  ( $45^\circ$ ), odnosno  $-\pi/4$  ( $-45^\circ$ ) u odnosu na os propagacije što je prikazano na slici 3, ili pod bilo kojim drugim kutem.



**Slika 3.** Širenje okomitih vektora el. polja linearnog polarizacijskog stanja ( $+45^\circ$ )

Ovisno o relativnoj amplitudi oba vektora odgovarajućih električnih polja, konačni vektor imat će proporcionalan polarizacijski kut kao što je ilustrirano na slici 4.

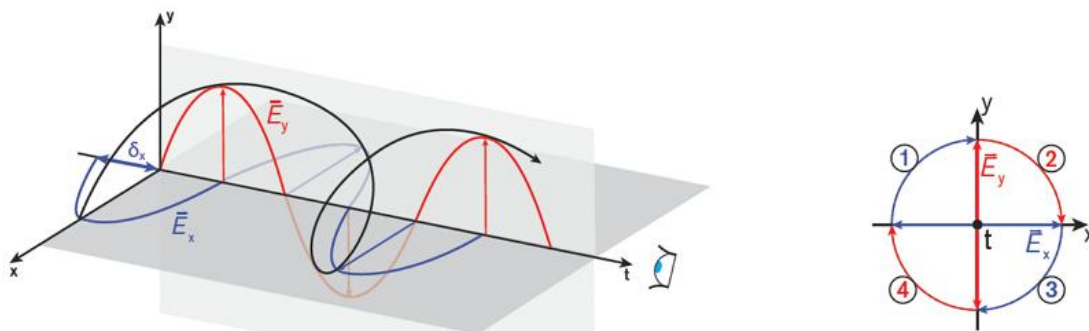


**Slika 4.** Širenje linearnih okomitih vektora el. polja s različitim amplitudama i kutevima

### 2.1.2 Kružna polarizacija

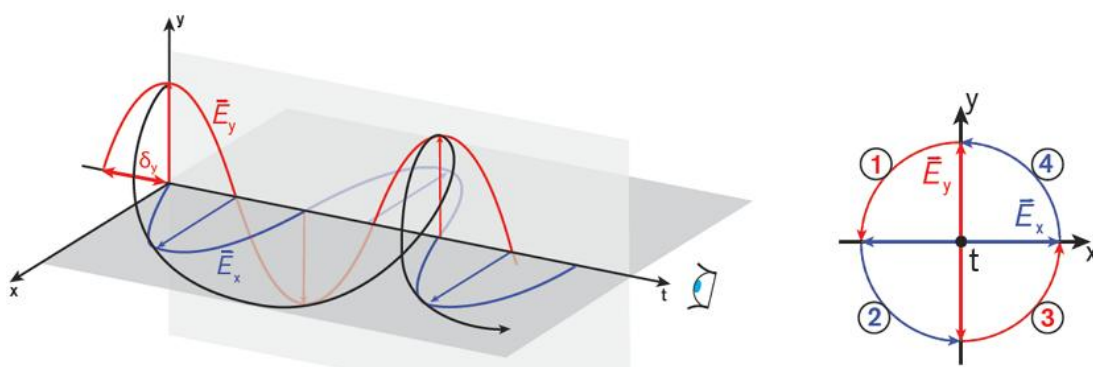
Kada jedan od dva okomita vala propagira izvan faze za  $\pi/2$  ( $90^\circ$ ) u odnosu na drugi, rezultirajući val biva kružno polariziran. Smjer rotacije kružno polariziranog svjetlosnog vala ovisi o predznaku relativnog faznog pomaka između horizontalnog i vertikalnog vala. Važno je napomenuti da su sljedeće definicije utemeljene s gledišta prijemnika, odnosno promatrača koji gleda u smjeru izvora svjetlosti.

Kružno polarizirani rezultirajući val rotirati će u smjeru kazaljke na satu ako relativni fazni pomak iznosi  $+\pi/2$  ( $+90^\circ$ ). U tom slučaju, horizontalni val ( $x - t$  ravnina) kasni za vertikalnim valom ( $y - t$  ravnina) za prethodno navedenu vrijednost (slika 5). Ova vrsta polarizacije naziva se još kružnom polarizacijom u smjeru lijeve ruke. Ako usmjerimo palac lijeve ruke u smjeru širenja svjetlosti, onda savijeni prsti lijeve ruke pokazuju smjer rotacije rezultirajućeg vektora.



**Slika 5.** Rotacija valnog vektora u smjeru kazaljke na satu (s gledišta promatrača)

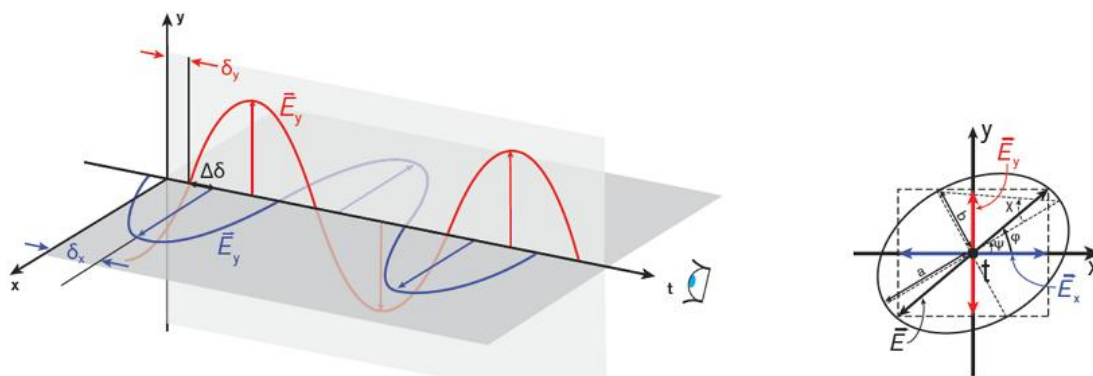
Ako relativni fazni pomak iznosi  $-\pi/2$  ( $-90^\circ$ ), vertikalni val kasni za horizontalnim i rezultirajući vektor rotira suprotno od smjera kazaljke na satu, odnosno, prema ranije opisanom načelu, u smjeru desne ruke (slika 6).



**Slika 6.** Širenje vektora el. polja kružnog polarizacijskog stanja u smjeru desne ruke

### 2.1.3 Eliptična polarizacija

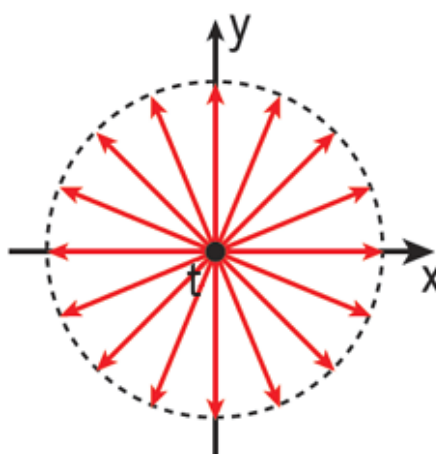
U općenitijem proizvoljnom slučaju, kada je relativni fazni pomak različit od nule i ne iznosi nužno  $90^\circ$ , a okomiti valovi su različitih amplituda, rezultirajući val će biti eliptično polariziran. Opći prikaz eliptično polariziranog vala, s gledišta prijemnika ili promatrača, prikazan je na slici 7. Jasno je, dakako, da ovisno o međusobnom odnosu amplituda dvaju vektora električnih polja te njihovom faznom pomaku, možemo promatrati beskonačan broj različitih primjera.



**Slika 7.** Širenje vektora el. polja eliptičnog polarizacijskog stanja

## 2.2 Nepolarizirana svjetlost

Ako vektor električnog polja svjetlosnog vala propagira u bilo kojoj proizvoljnoj orijentaciji u odnosu na os propagacije, u bilo kojoj točki duž te osi i u bilo kojem trenutku, svjetlosni val nije polariziran. Nalik analogiji s publikom spomenutoj na početku poglavlja. Ovaj slučaj prikazan je na slici 8.



**Slika 8.** Širenje vektora el. polja nepolariziranog svjetlosnog vala (s gledišta promatrača)

### 3. FENOMEN POLARIZACIJSKE DISPERZIJE

Prije nego što se pozabavimo samim fenomenom polarizacijske disperzije, u tablici 1 nalazi se kratak opći pregled različitih problema koji se javljaju u sustavima pri vrlo velikim brzinama prijenosa podataka.

**Tablica 1.** Problemi povezani s VHBR prijenosima

PARAMETAR		PROBLEM
Prigušenje		Prljavi konektor
		Pretjerano savijanje
Disperzija	Kromatska	Stohastički fenomen pri interakciji s polarizacijskom disperzijom
		Zaostala kromatska disperzija postaje kritična
	Polarizacijska	Dodatna ograničenja pri interakciji s polarizacijskim gubicima, polarizacijskim pojačanjem, kromatskom disperzijom i nelinearnim efektima
		Nelinearnost drugog reda postaje veliki problem
Nelinearni efekti	Unutarfazna modulacija (engl. Self-Phase Modulation - SPM) i međufazna modulacija (engl. Cross-Phase Modulation - XPM)	Štetno kod velikih snaga pri interakciji s kromatskom i polarizacijskom disperzijom
	Ramanova optička pojačala	Stimulirano Ramanovo raspršenje uzrokuje dvostruko Rayleighovo povratno raspršenje i višesmjernu interferenciju
	Miješanje četiri vala (engl. Four-Wave Mixing – 4WM)	Uvijek prisutno kod visokosnažnih WDM prijenosa

*Izvor: EFXO – PMD issues in advanced, very high-speed networks, 2012.*

Vratimo se sada na polarizacijsku disperziju. To je jedan od oblika modalne disperzije. U idealnim uvjetima, dvije različite svjetlosne polarizacije unutar jednog optičkog vlakna putuju istom brzinom. U praksi, zbog raznih vrsta nepravilnosti i asimetričnosti koje postoje u jezgri optičkog vlakna, dolazi do razlike u tim brzinama što uzrokuje nasumično širenje optičkih impulsa. Ako se polarizacijska disperzija ne kompenzira, što nije lak zadatak, u konačnici će dovesti do ograničenja brzine kojom se mogu prenositi podaci putem svjetlovoda. [6]

Danas je prihvaćeno da polarizacijska disperzija uzrokuje statističko širenje optičkog impulsa, a moguće je i njegovo izobličenje unutar vremenske domene. Kada takvo širenje signala postane preveliko, impulsi signalnog toka počinju se preklapati što može dovesti do smetnji (engl. Inter-Symbol Interference - ISI). Dijagram oka se postepeno zatvara pa dolazi do značajnog povećanja postotka pogrešnih bitova (engl. Bit Error Rate - BER) što ukazuje na ozbiljnu degradaciju kvalitete signala. Kada kvaliteta signala padne ispod određene razine, sustav signalizira grešku u komunikaciji te nedostatak signala dok se smetnje ne uklone.

Najveći problem polarizacijske disperzije je činjenica da je to stohastički fenomen (statističke prirode) i njegov se opseg može utvrditi jedino pomoću uzorkovanja, razdiobe, te računanjem prosječnih vrijednosti. Kao kod bilo koje statističke ankete, i u ovom je slučaju potreban beskonačan broj uzoraka kako bi dobili potpuno točan rezultat. Budući da je to nemoguće, broj uzoraka potrebno je svesti na praktičan broj. Međutim, treba uzeti u obzir da prosječna vrijednost dobivena računanjem s takvim brojem uzoraka donosi određenu razinu nepouzdanosti. Uz sve navedeno, važno je istaknuti i to da je ovaj fenomen podložan vremenskim varijacijama, što ga čini još težim za razumijevanje.

Polarizacijska disperzija, poput svakog drugog oblika disperzije, okarakterizirana je frekvencijom ili valnom duljinom. Slično kromatskoj disperziji, osnovni karakteristični parametar je indeks loma svjetlosti (engl. Index Of Refraction - IOR). To je indeks širenja svjetlosti u mediju kroz koji se optički signal prenosi, npr. u telekomunikacijskom svjetlovodu. Naknadne varijacije ovog indeksa kao funkcija frekvencije ili valne duljine dovodi do grupnog kašnjenja (engl. group delay), također kao funkcije frekvencije ili valne duljine. [1]

Ipak, postoje dvije temeljne razlike:

- polarizacija širećeg signala
- stohastičko ponašanje, a ne determinističko

Budući da je fenomen polarizacijske disperzije vezan uz polarizaciju svjetlosti, povezan je prema tome i s propagacijskim osima (dvije osi s različitim indeksom loma svjetlosti) koje, u tom slučaju, uzrokuju pojavu dvoloma (engl. birefringence). Za razliku od kromatske disperzije, ne postoji samo jedno grupno kašnjenje, već dva. Razlika između tih dvaju grupnih kašnjenja varira statistički u funkciji frekvencije ili valne duljine. Krivulja koja opisuje varijaciju grupnih kašnjenja može pratiti pravilnu, ravnu funkciju, ali može biti i potpuno nasumična.

Koje god bile karakteristike navedene varijacije, moguće je odrediti njezinu maksimalnu, minimalnu i prosječnu vrijednost nad najširim mogućim frekvencijskim ili valnoduljinskim opsegom.

Dakako, može doći do promjena u fenomenu ovisno o primjeni na:

- dugačkom ili kratkom jednomodnom optičkom vlaknu
- jednostavnoj ili kompleksnoj, aktivnoj ili pasivnoj optičkoj komponenti nekog podsustava ili na mreži male ili velike brzine
- kombinacija gore navedenog u duljini, veličini i količini

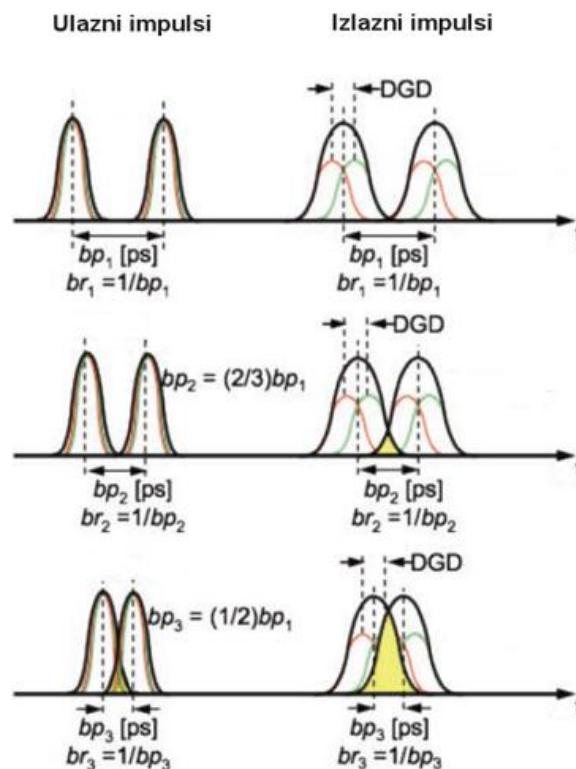
Pri vrlo velikim brzinama prijenosa, fenomen ostaje isti osim što je razmak između odaslanih signalnih impulsa, u vremenskoj domeni, kraći. Učinak se demonstrira u bržim i značajnijim posljedicama na statističko širenje impulsa. Zbog



toga polarizacijska disperzija pri vrlo velikim brzinama prijenosa predstavlja jedan od najkritičnijih i najvažnijih fenomena koje treba uzeti u obzir.

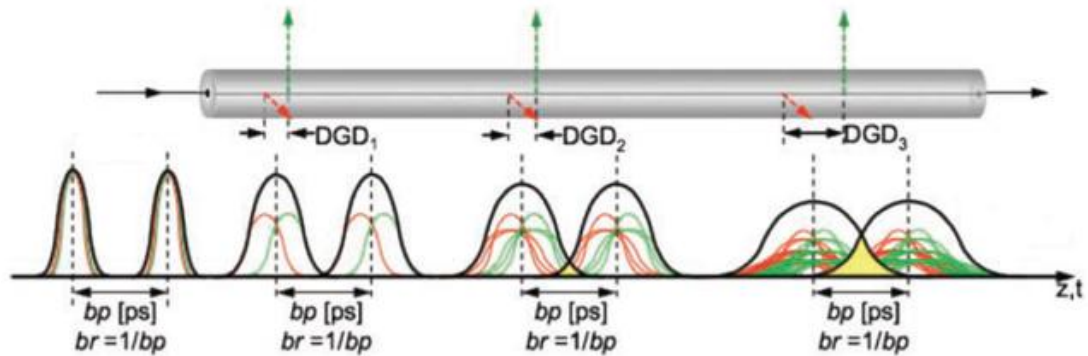
### 3.1 Širenje impulsa, uzroci i posljedice

Utjecaj širenja impulsa, uzrokovanog polarizacijskom disperzijom, na rad mreže sličan je efektu koji izaziva i kromatska disperzija. Ukoliko dođe do prevelikog širenja impulsa, uzastopni impulsi u toku podataka počinju se preklapati što izaziva smetnje (ISI) te povećava postotak pogrešnih bitova (BER) do te mjere da uzrokuje prekid korisnog signala. Štetnost ovog fenomena je još izraženija kod velikih brzina prijenosa, dugih jednomodnih vlakana i/ili s jačim dvolomom, posebice u slučaju starijih izvedbi jednomodnih vlakana te pri slučajnim vanjskim naprezanjima. Slika 9 ilustrira ovaj fenomen.



**Slika 9.** Utjecaj povećane brzine (smanjenog perioda bitova) na ISI smetnje

S povećanjem duljine jednomodnog optičkog vlakna, povećava se i vjerojatnost stvaranja kumulativnog napreznja i preklapanja impulsa te smetnji (ISI) i povećanog postotka pogrešnih bitova (BER), kao što je prikazano na slici 10.

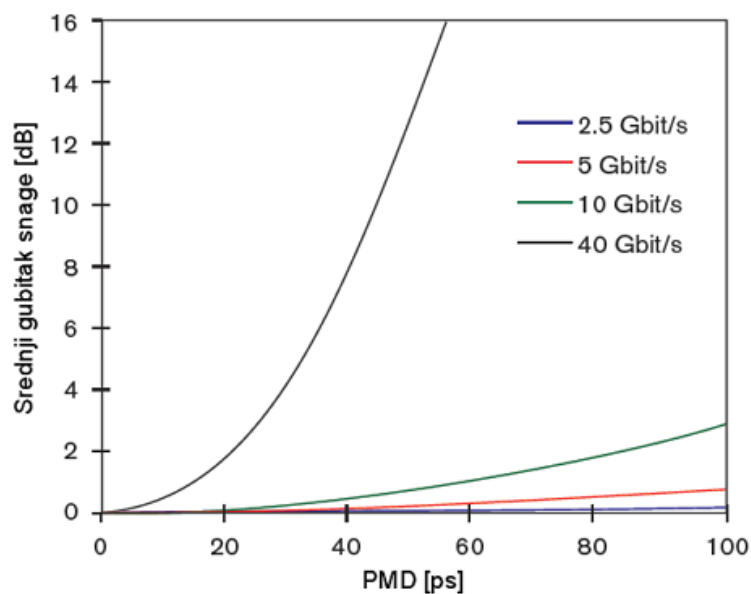


**Slika 10.** Utjecaj povećanja duljine SMF vlakna (uz konstantni period bitova) na ISI smetnje

Širenje impulsa, između ostalog, dovodi i do gubitaka snage. Vrijednost  $DGD_{max}$ , maksimalnog dopuštenog diferencijalnog grupnog kašnjenja, podešena je na način da ne dozvoljava veći gubitak snage od propisanog. Na najgori slučaj gubitka snage, također, utječe i prijenosni format: NRZ (engl. Non-Return to Zero) ili RZ (engl. Return to Zero).

Za primjenu u 40 Gbit/s NRZ mrežama, dopušteni gubitak snage od 1-dB odgovara  $DGD_{max}$  vrijednosti od 7,5 ps, što predstavlja granicu DGD kašnjenja na prijemniku. Ako je dopušteno pola propisanog gubitka,  $DGD_{max}$  se smanjuje, dok se za dvostruku količinu gubitka od propisane,  $DGD_{max}$  povećava, dajući sustavu veću toleranciju na polarizacijsku disperziju. [1]

Na slici 11 prikazana je srednja vrijednost gubitka snage inducirano polarizacijskom disperzijom, kao funkcija polarizacijske disperzije.



**Slika 11.** Srednji gubitak snage uzrokovan PMD-om kao funkcija PMD-a i brzine prijenosa

### 3.2 Velike brzine prijenosa

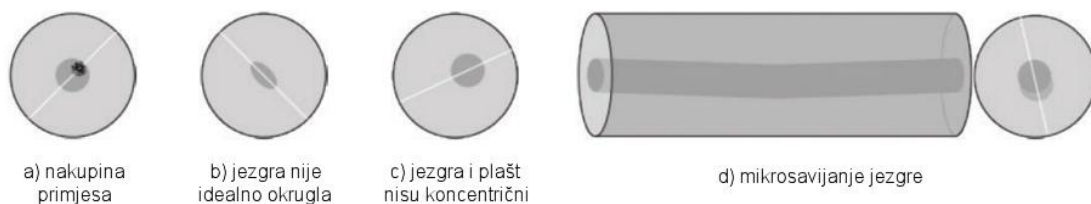
Pri manjim brzinama prijenosa, čak i ako su naprežanja jaka i diferencijalno grupno kašnjenje (DGD) veliko, ne mora nužno doći do efekta polarizacijske disperzije. Međutim, s porastom brzine prijenosa, smanjuje se vremenski razmak (period) između pojedinih impulsa sve dok ne dođe do njihovog preklapanja. Ova situacija dovodi do smetnji (ISI) i povećanja postotka pogrešnih bitova (BER) sve do prestanka podatkovnog prometa. Oba slučaja prikazana su na slici 9.

## 4. DVOLOM, UZROCI I POSLIJEDICE

Dvolom (engl. birefringence) označava dva različita indeksa loma svjetlosti. U optičkom vlaknu do pojave dvoloma dolazi zbog raznih nepravilnosti u jezgri vlakna te se stvara polarizacijska ovisnost u ukupnom indeksu loma optičkog vlakna. Razni oblici nepravilnosti mogu biti uzrokovani nasumičnim ili nametnutim unutarnjim napreznjima ili pak nasumičnim vanjskim napreznjima. Dakle, može se reći da unutarnji i vanjski izvori napreznja stvaraju dvolom u jezgri optičkog vlakna.

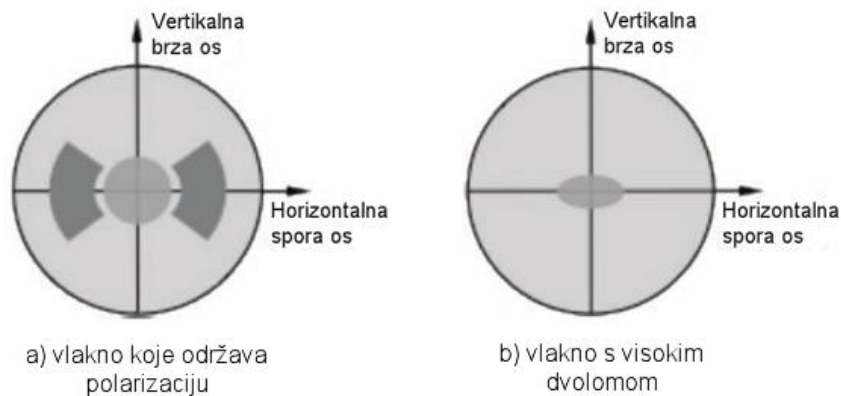
### 4.1 Unutarnja napreznja

Unutarnja napreznja, odnosno nepravilnosti u jezgri, nastaju tijekom procesa dizajna i proizvodnje predforme (engl. preform), izvlačenja samog vlakna te na koncu završnog proizvoda, optičkog kabela. Primjeri na ovaj način nastalih nepravilnosti, prikazani su na slici 12.



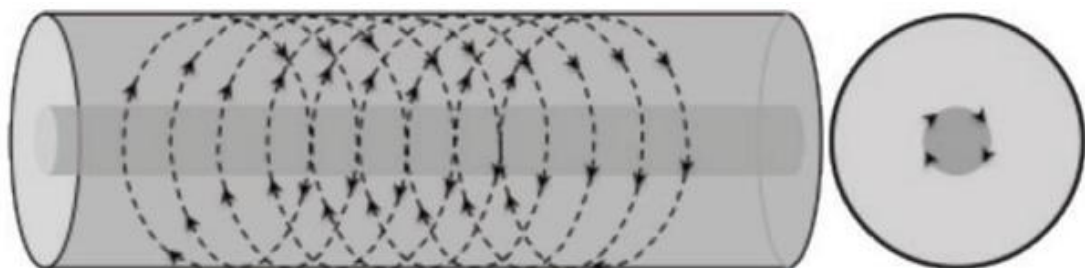
**Slika 12.** Primjeri nasumičnih unutarnjih nepravilnosti u jezgri optičkog vlakna

Nasumična unutarnja napreznja uzrokuju osnovni dvolom vlakna koji je uvijek prisutan, relativno slab i do određene ga je mjere moguće kontrolirati. S druge strane, nametnuta unutarnja napreznja stvaraju relativno jak dvolom. Primjeri se nalaze na slici 13.



**Slika 13.** Primjeri nametnutih unutarnjih nepravilnosti koje uzrokuju linearni dvolom

Uvijanje optičkog vlakna pak, kao na primjeru slike 14, neće uzrokovati pojavu osovinskog naprezanja, što znači da neće doći do polarizacijske disperzije.



**Slika 14.** Primjer uvijanja koje uzrokuje pojavu kružnog dvoloma unutar vlakna

## 4.2 Vanjska naprezanja

Do vanjskih naprezanja dolazi prilikom instalacije optičkog kabela te kasnije utjecajem okoliša za vrijeme rada mreže. Takva naprezanja su slučajna po svojoj prirodi pa je njihov utjecaj teško umanjiti. Iz tog razloga, daju najveći doprinos stvaranju polarizacijske disperzije u optičkim instalacijama. Ukupna veličina i značaj

dvoloma ovisit će o prirodi i uvjetima svih vanjskih naprezanja ili opterećenja koja u tom trenutku djeluju na optičko vlakno.

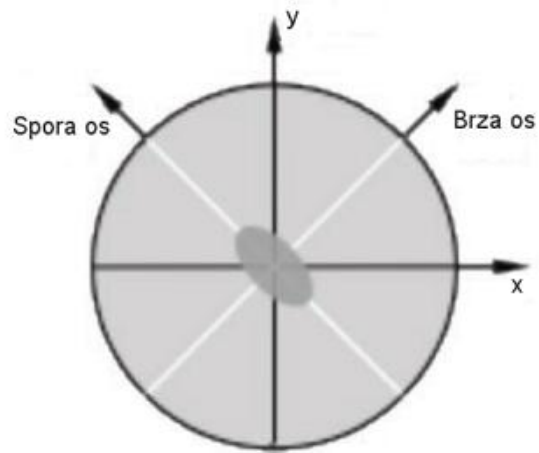
Važno je napomenuti da je polarizacijska disperzija, u praksi, direktno proporcionalna vanjskim naprezanjima te duljini ugrađenih kablskih sekcija, spanova i linkova. Navedeni pojmovi definirani su kao:

- ugrađena sekcija optičkog kabela je udaljenost između dva spoja (engl. splice)
- span (engl.) je udaljenost između dva linijska (engl. in-line) optička pojačala
- link (engl.) je udaljenost između odašiljača (izvora) i prijemnika

Ukoliko se radi o lokalnom, kratkotrajnom opterećenju na kraćem dijelu optičkog kabela (najviše nekoliko metara), kao npr. stiskanje, savijanje i uvijanje vlakna u provlaci ili izvlačenje kabela iz kanala, to najvjerojatnije neće značajno pridonijeti akumulaciji naprezanja na većim udaljenostima (u kilometrima). Cjelokupna polarizacijska disperzija će stoga ostati nepromijenjena ili će, u najgorem slučaju, njena vrijednost minimalno porasti.

### **4.3 Ravnine i osi dvoloma**

Kao što je prethodno opisano, dvolomni materijali sadrže dva različita indeksa loma svjetlosti u dvije različite ravnine koje su okomite na os propagacije svjetlosnog vala. Te ravnine, koje nazivamo polarizacijskima, neće dakle imati potpuno jednake indekse loma svjetlosti. Veći indeks loma uzrokovat će manju faznu brzinu duž pripadajuće ravnine. Ta os ne mora nužno biti x ili y os kao što je prikazano na slici 15, već ovisi o smjeru nepravilnosti. [1]



**Slika 15.** Razlika između x, y osi i brze, spore osi

Val s najmanjom faznom brzinom, koji se širi ravninom u kojoj se nalazi nepravilnost, usporen je u odnosu na drugi val te se njegova polarizacijska os naziva sporom osi. Brza os odgovara manjem indeksu loma i većoj faznoj brzini. Ovakvo usporenje direktna je posljedica dvoloma.

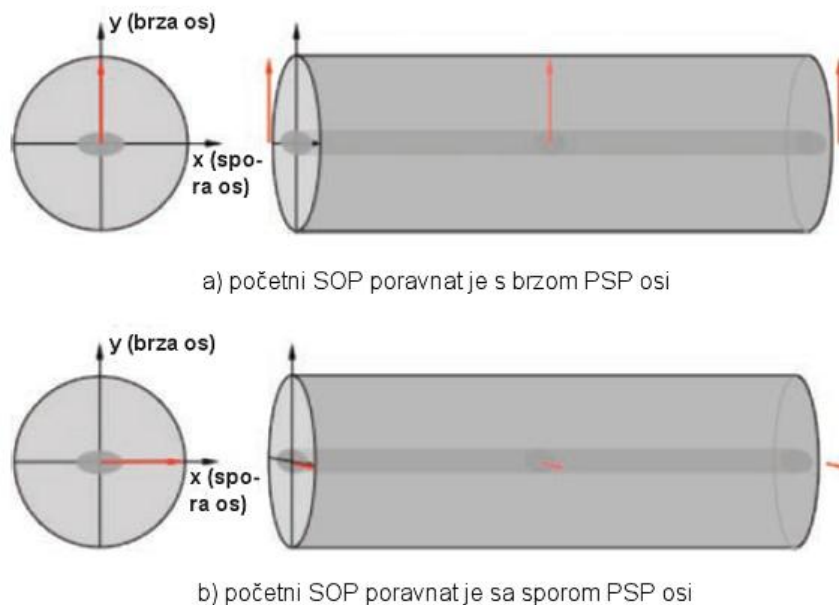
## 5. OSNOVNA STANJA POLARIZACIJE

U ovom poglavlju opisan je jedan od najkritičnijih parametara odgovornih za stvaranje polarizacijske disperzije. Radi se o osnovnim stanjima polarizacije.

### 5.1 Definicija

U dvolomnom mediju, kao što je optičko vlakno, postoje dva različita stanja polarizacije (engl. State Of Polarization - SOP) koja se nazivaju osnovnim polarizacijskim stanjima (engl. Principal States of Polarization - PSP).

Jedno od tih stanja zove se sporo osnovno polarizacijsko stanje. Poravnato je sa sporom osi (veći indeks loma) i donosi najmanju grupnu brzinu što za posljedicu ima najveće propagacijsko kašnjenje. S druge strane, brzo osnovno polarizacijsko stanje daje najveću grupnu brzinu uz najmanje propagacijsko kašnjenje. Ova dva stanja su u pravilu međusobno okomita. [1]



**Slika 16.** Dva primjera nepromjenjenog izlaznog SOP

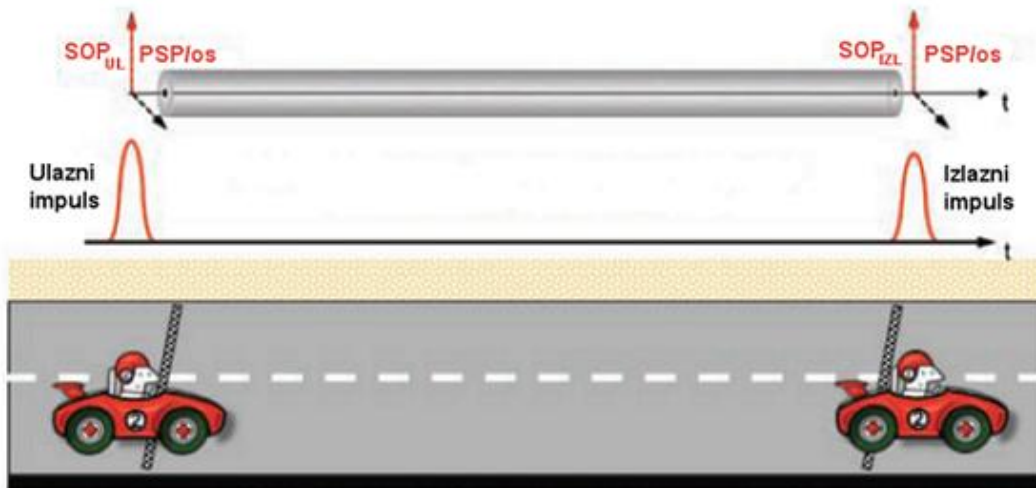


## 5.2 Kašnjenje, polarizacijska disperzija i proširivanje impulsa

Širenje impulsa povezano je s odvajanjem PSP stanja (engl. PSP split) i načinom na koji je pokrenuto impulsno stanje polarizacije u odnosu na osi osnovnih polarizacijskih stanja. PSP split je u vremenskoj domeni povezan s razlikom u grupnoj brzini dvaju osnovnih polarizacijskih stanja te razlikom u njihovom grupnom kašnjenju (DGD). [1]

### 5.2.1 Bez proširivanja impulsa

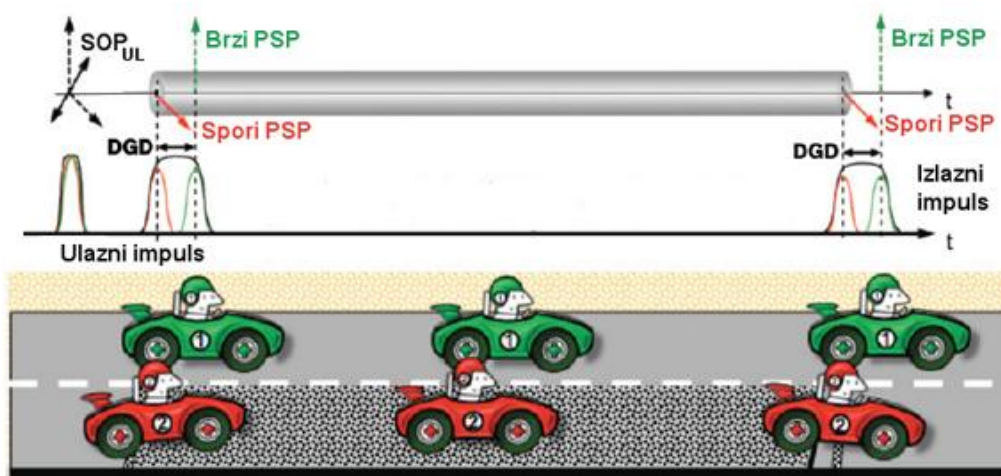
Slika 17 prikazuje da, ako je stanje polarizacije impulsa u ravnini s osi osnovnog stanja polarizacije, impuls nesmetano putuje od ulaza prema izlazu. Na primjer, trkaći automobil koji se kreće sam po idealnoj trkaćoj stazi, putovat će bez ikakvih smetnji.



**Slika 17.** Impuls čiji je SOP poravnat s PSP osi ne doživljava DGD kašnjenje ni proširivanje

## 5.2.2 Fiksno kašnjenje i proširivanje impulsa

Na slici 18 prikazan je ulazni impuls čija je energija podijeljena na dva jednaka dijela za dva osnovna stanja polarizacije. Ako je taj impuls odaslan u optičkom vlaknu koje održava polarizaciju (engl. Polarization Maintaining Fiber - PMF), onda ga na njegovom putu od izvora prema prijemniku ometaju određene nepromjenjive smetnje koje su nametnute dizajnom samog PMF vlakna.



**Slika 18.** Impuls čiji je SOP poravnat s obje PSP osi doživljava fiksni DGD i proširivanje

I u ovom slučaju za primjer se mogu uzeti trkaći automobili. Recimo da jedan automobil vozi na jednoj strani staze na koju je položen vrlo grubi asfalt. Istovremeno, drugi automobil vozi na suprotnoj strani na idealnoj podlozi i bez ikakvih drugih poremećaja. Prvi će automobil, stoga, biti pod neprekidnim utjecajem relativno velike fiksne smetnje koja će ga usporiti u odnosu na drugi automobil za fiksnu, konstantnu vrijednost kašnjenja, sve do kraja utrke.

Ovaj primjer ilustrira sljedeće uvjete:

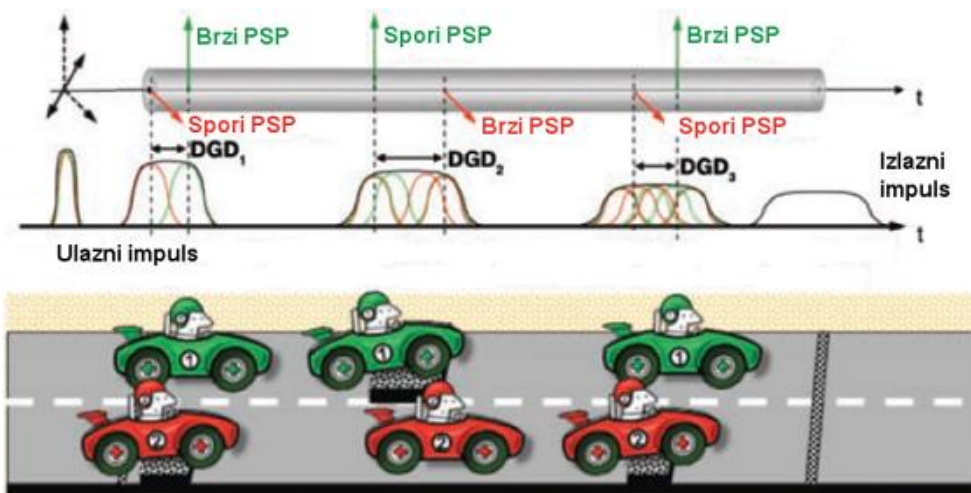
- slučaj PMF vlakna

- sistematičan, konstantan oblik smetnje primjenjen na os (ravninu) jednog od osnovnih polarizacijskih stanja
- stanje polarizacije pri odašiljanju impulsa je poravnato na način da oba osnovna polarizacijska stanja imaju jednaku energiju unutar impulsa
- vrijednost polarizacijske disperzije (srednja vrijednost ili DGD RMS vrijednost) ovisi o duljini vlakna

Na primjeru sa slike 18, poremećaj (dvolom) je konstantan duž cijelog jednomodnog optičkog vlakna.

### 5.2.3 Nasumično kašnjenje i rastuće proširivanje impulsa

U slučaju sa slike 19, poremećaj (dvolom) varira nasumično u svojoj magnitudi i duljini preko cjelokupne duljine optičkog vlakna. Ulazni impuls odaslan je s određenom količinom energije koja je podijeljena na dva osnovna polarizacijska stanja. Impuls, kao posljedicu, doživljava kontinuirano širenje uzrokovano nasumičnim poremećajima koji na njega djeluju od ulaza do izlaza.



**Slika 19.** Slučaj SMF vlakna s nasumičnim spajanjem, DGD kašnjenjem i rastućim proširivanjem impulsa

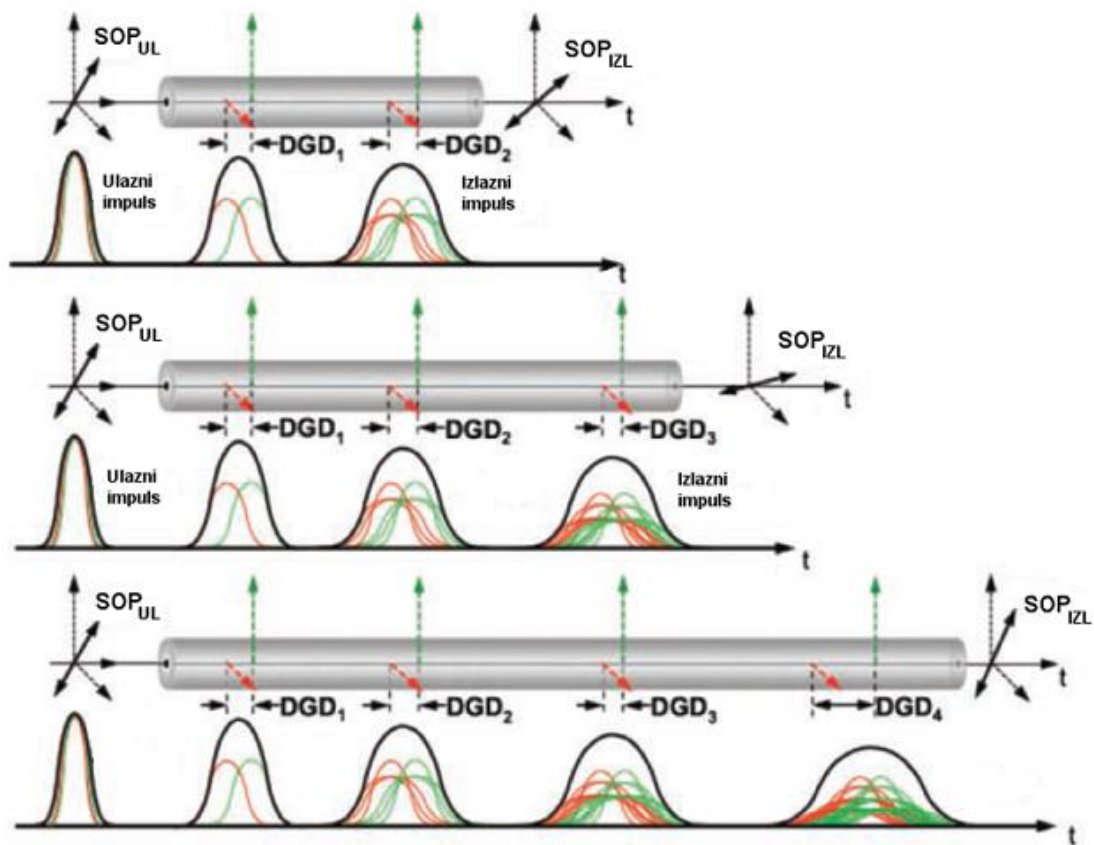
Vratimo se na analogiju s trkaćim automobilima. Dva automobila kreću se stazom, svaki na svojoj strani, te oba nailaze na izbočine na asfaltu. Izbočine se razlikuju u veličini i duljini i pojavljuju se, u nepravilnim razmacima, na cijeloj duljini staze. Budući da se automobili kreću konstantnom brzinom, njihova kašnjenja biti će međusobno usporediva, a njihova će statistička akumulacija odrediti ukupno kašnjenje na kraju utrke.

Ovaj primjer ilustrira sljedeće uvjete:

- slučaj konvencionalnog telekomunikacijskog optičkog vlakna
- nasumični, promjenjivi poremećaji na objema osima osim osnovnih polarizacijskih stanja
- stanje polarizacije pri odašiljanju impulsa podijeljeno je između dva osnovna polarizacijska stanja
- vrijednost polarizacijske disperzije (srednja vrijednost ili DGD RMS vrijednost) ovisi o duljini jednomodnog optičkog vlakna, magnitudi individualnih poremećaja te stupnju slučajnosti (idealno ili poluslučajno)

#### **5.2.4 Nasumično kašnjenje i rastuće proširivanje impulsa kao funkcija duljine optičkog vlakna**

U predhodno opisanom slučaju (slika 19), do širenja impulsa dolazi po cijeloj duljini jednomodnog optičkog vlakna. Slikom 20 prikazano je spomenuto svojstvo na jednomodnom vlaknu različitih duljina.



**Slika 20.** Povećanje širenja impulsa s povećanjem duljine SMF vlakna

Prema slici 20, slučaj polarizacijske disperzije na kratkim duljinama (engl. short-length) događa se na dijelovima optičkih kabela ne većim od 6 km ( $\leq 6$  km), posebice uzimajući u obzir stalni napredak na području smanjivanja polarizacijske disperzije u jednomodnim optičkim vlaknima. Ovaj se slučaj ne odnosi na kratke spojne kabele (engl. patchcords), prenosnike (engl. jumpers) te bilo kakve ostale spojeve vrlo kratkih kabela.

## **6. SPECIFIKACIJE POLARIZACIJSKE DISPERZIJE I MEĐUNARODNI STANDARDI**

Od kada su, uz pomoć novih (naprednih) modulacijskih formata, postignute prijenosne brzine od 40 Gbit/s i 100 Gbit/s, objavljen je čitav niz znanstvenih članaka o specifikacijama polarizacijske disperzije (PMD) i diferencijalnog grupnog kašnjenja (DGD) od strane organizacija poput IEEE (radna skupina IEEE 802.3), ITU-T (radna skupina 15) kao i tehničkog odbora IEC (TC 86).

### **6.1 Specifikacije za dizajn kabela i linkova**

PMD vrijednost dizajna linka,  $PMD_Q$ , koristi se za specifikaciju koeficijenta polarizacijske disperzije (PMD po jedinici duljine) za optičke kabele i linkove.  $PMD_Q$  (koeficijent) predstavlja gornju granicu PMD koeficijenta dugog optičkog kabela s jednomodnim vlaknom unutar definiranog, ulančanog linka koji se sastoji od M kabljskih sekcija. Ta granica određuje se u pogledu razine vjerojatnosti, Q, što je vjerojatnost da će vrijednost koeficijenta polarizacijske disperzije dugog jednomodnog optičkog kabela prerasti  $PMD_Q$  (koeficijent). Za određene vrijednosti parametara M i Q, datih u tablici 2, odgovarajuće  $PMD_Q$  vrijednosti ne smiju biti prekoračene. [1]

Važno je zapamtiti da se za SMF kabele u proizvodnji te za već ugrađene linkove, spanove i kabljske sekcije,  $PMD_Q$  specifikacija mora koristiti pažljivo i vrlo je važno uzeti u obzir određenu neizvjesnost pri mjerenju polarizacijske disperzije.

**Tablica 2.** Preporučene (standardizirane) vrijednosti maksimalnog PMD koeficijenta

Broj kabljskih sekcija (M)	Razina vjerojatnosti (Q)	SMF			PMD <sub>Q</sub> (koeficijent) [ps/km <sup>1/2</sup> ]
		ITU-T		IEC	
		Vrsta	Kategorija	60793-2-50	
20	1 x 10 <sup>-4</sup> Ili 0,01%	G.652	A i C	B1.1	≤ 0,5
			B i D	B1.3	≤ 0,20
		G.653	A	B2	≤ 0,5
			B		≤ 0,20 (proizvođač može s korisnikom dogovoriti veće vrijednosti)
		G.654	A	B1.2	≤ 0,5
			B i C		≤ 0,20
		G.655	A i B	B4	≤ 0,5
			C, D i E		≤ 0,20
		G.656		B5	≤ 0,20
		G.657	A	B6	≤ 0,20
			B		Nije bitno, s obzirom da SMF kabeli dopuštaju vrlo mali radijus zakrivljenosti u instalacijama pristupnih mreža

Izvor: EFXO – PMD issues in advanced, very high-speed networks, 2012.

## 6.2 Sistemske specifikacije

Maksimalno diferencijalno grupno kašnjenje (DGD<sub>max</sub>) koristi se kao specifikacija polarizacijske disperzije u prijenosnim sustavima. DGD<sub>max</sub> je definiran kao vrijednost DGD kašnjenja koje odgovara vjerojatnosti da će prijenosni sustav doživjeti DGD kašnjenje veće od vrijednosti DGD<sub>max</sub> u vremenu naznačenom u tablici 3.

**Tablica 3.** Omjer  $DGD_{max}$  prema  $DGD_{sred}$  i pripadajuće vjerojatnosti

$DGD_{max}/DGD_{sred}$	Vjerojatnost da će $DGD_{sred}$ biti veće od $DGD_{max}$	$DGD_{sred}$ je veće od $DGD_{max}$ (u godini dana)
2,5	$1,5 \times 10^{-3}$	13,1 h
3,0	$4,2 \times 10^{-5}$	22 min
3,1	$2,0 \times 10^{-5}$	10,5 min
3,2	$9,2 \times 10^{-6}$	5 min
3,25	$6,19 \times 10^{-6}$	3,2 min
3,3	$4,1 \times 10^{-6}$	2,15 min
3,4	$1,8 \times 10^{-6}$	56,6 s
3,5	$7,7 \times 10^{-7}$	24 s
3,6	$3,2 \times 10^{-7}$	10,1 s
3,7	$1,3 \times 10^{-7}$	4,1 s
3,75	$8,21 \times 10^{-8}$	2,6 s
3,775	$6,5 \times 10^{-8}$	2,0 s
3,8	$5,1 \times 10^{-8}$	1,6 s
3,9	$2,0 \times 10^{-8}$	0,63 s
4,0	$7,4 \times 10^{-9}$	0,23 s
4,1	$2,7 \times 10^{-9}$	0,09 s
4,2	$9,6 \times 10^{-10}$	0,03 s
4,3	$3,3 \times 10^{-10}$	0,01 s
4,4	$1,1 \times 10^{-10}$	0,0035 s
4,5	$3,7 \times 10^{-11}$	0,0012 s
4,6	$1,2 \times 10^{-11}$	0,00038 s

Izvor: EFXO – PMD issues in advanced, very high-speed networks, 2012.

Zbog statističke prirode polarizacijske disperzije, odnos između maksimalne i srednje vrijednosti DGD kašnjenja može se ustanoviti i definirati kao vjerojatnost, koristeći omjer  $DGD_{max}$  prema  $DGD_{sred}$ , kao što je prikazano u tablici 3.

Međunarodne organizacije koje propisuju standarde osiguravaju potrebnu dokumentaciju o  $DGD_{max}$  specifikacijama sustava za različite primjene i brzine



prijenosa. Iako većina opreme za testiranje mjeri srednju ili rms vrijednost DGD kašnjenja, sustavi koriste  $DGD_{max}$  vrijednost. Uz pomoć tablice 2, moguće je systemske zahtjeve pretvoriti u zahtjeve za testiranje na osnovu prihvatljivog postotka pogrešnih bitova (BER).

U sljedećim potpoglavljima nalazi se pregled  $DGD_{max}$  specifikacija sa 1 –dB gubitka na predajnoj snazi, osim ako nije drugačije naznačeno.

### 6.3 Specifikacije kašnjenja za različite primjene i modulacijske formate

U tablicama 4, 5 i 6 izlistane su  $DGD_{max}$  specifikacije koje se koriste za primjenu na mrežama SDH (engl. Synchronous Digital Hierarchy) / SONET (engl. Synchronous Optical Network), NRZ (engl. Non-Return to Zero) i OTN (engl. Optical Transport Network). Pretpostavljeno je da pri prijenosnoj brzini (u sinhronom transportnom modulu) od 155 Mbit/s ili nižoj, vrijednost  $DGD_{max}$  postaje prevelika da bi predstavljala značajan utjecaj na gubitak snage s obzirom na polarizacijsku disperziju pri takvim brzinama.

**Tablica 4.**  $DGD_{max}$  specifikacije za SDH/SONET NRZ primjene

NRZ primjene		Brzina prijenosa [Gbit/s]		$DGD_{max}$ [ps]
STM-x	OC-x	Točna	Nominalna	
4	12	0,622	0,622	480
8	24	1,244	1,25	240
16	48	2,488	2,5	120
64	192	9,953	10	30
256	768	39,813	40	7,5  (neke kategorije SMF vlakana imaju preveliki PMD koeficijent da bi garantirale ovu vrijednost $DGD_{max}$ )

*Izvor: EFXO – PMD issues in advanced, very high-speed networks, 2012.*

**Tablica 5.** DGD<sub>max</sub> specifikacije za OTN primjene

OTN primjene	Brzina prijenosa [Gbit/s]	DGD <sub>max</sub> [ps]
NRZ OTU1 + FEC	2,666	120
NRZ OTU2 + FEC	10,709	30
NRZ OTU3 + FEC	43,018	7,5 (neke kategorije SMF vlakana imaju preveliki PMD koeficijent da bi garantirale ovu vrijednost DGD <sub>max</sub> )

Izvor: EFXO – PMD issues in advanced, very high-speed networks, 2012.

Napomena: OTU – engl. optical transport unit; FEC – engl. forward error connection

**Tablica 6.** DGD<sub>max</sub> specifikacije za NRZ 25G (OTN NRZ OTL4.4) primjene

Parametar	Jedinica	OTN NRZ OTL4.4 + FEC	
Nominalna brzina prijenosa	Gbit/s	25	
OTN brzina prijenosa		4 x 27,953 (111,810)	
Opseg valnih duljina	nm	1310	
Frekvencijski opseg	THz	229,0 + (0,8 · m); m = 1,2,3	
Vrsta izvora	-	SLM	
Razmak između kanala	GHz	800	
Broj kanala	-	4	
Vrsta SMF vlakna		ITU-T Rec. G.652 [77]	
Maksimalni postotak pogrešnih bitova		1x10 <sup>-12</sup>	
Maksimalni gubitak snage	dB	1,5	2,5
Maksimalno prigušenje	dB	6,3	18
Domet	km	10	40
DGD <sub>max</sub>	ps	8	10,3

Izvor: EFXO – PMD issues in advanced, very high-speed networks, 2012.

Napomena: OTL 4.4 – engl. optical channel transport lane (OTU4 signal koji putuje na četiri kanala što znači 255/227 x 24,883200 Gbit/s po kanalu ili 111,810 Gbit/s ukupno)

## 6.4 Prijedlozi vrijednosti kašnjenja za različite primjene i modulacijske formate

U tablicama 7, 8, 9, 10 i 11 nalaze se razni prijedlozi sistemskih PMD specifikacija pri 40 Gbit/s i 100 Gbit/s. Vrijednosti  $DGD_{max}$  ne bi se trebale interpretirati ni koristiti kao sistemske PMD specifikacije. Ovdje navedene informacije služe samo za demonstraciju nastojanja međunarodnog standardizacijskog društva da što bolje razumije djelovanje polarizacijske disperzije pri vrlo velikim prijenosnim brzinama te pri različitim načinima prijenosa. Neprekidan rad znanstvene zajednice možda, jednog dana, svojim napredcima dovede i do sistemskih PMD specifikacija.

**Tablica 7.** Prijedlog  $DGD_{max}$  vrijednosti za 40 Gbit/s OTN primjene uz različite modulacijske formate

OTN primjena		40G OTU3 + FEC				
Parametar	Jedinica	ODB/ PSBT	NRZ- DPSK	NRZ-p- DSK 66 GHz FSR	P-DPSK	DP-QPSK (koherent- no)
Brzina prijenosa	Gbit/s	43,018				4 x 10,7545
Opseg valnih duljina	nm	1530 – 1565 (C pojas)				
Vrsta SMF vlakna	-	ITU-T Rec. G.652 [77] i G.655 [80]				
$DGD_{max}$ (1 –dB OSNR gubitaka)	ps	5,5/7	8	7	6	75

*Izvor: EFXO – PMD issues in advanced, very high-speed networks, 2012.*

Napomena: ODB (engl. Optical Duo Binary), PSBT (engl. Phase-Shaped Binary Transmission), DPSK (engl. Differential Phase-Shift Keying), FSR (engl. Free Spectral Range), DP-QPSK (engl. Dual Polarization-Quadrature Phase-Shift keying)

**Tablica 8.** Prijedlog  $DGD_{max}$  vrijednosti za 40 Gbit/s OTN primjene uz različite RZ modulacijske formate

OTN primjena		40G OTU3 + FEC			
Parametar	Jedinica	RZ-QPSK	RZ-DQPSK (koherentno)	OPFDM- RZ-DQPSK	RZ- AMI
Brzina prijenosa	Gbit/s	43,018	2 x 21,509	2x 21,509	43,018
Opseg valnih duljina	nm	1530 – 1565			
Vrsta SMF vlakna	-	ITU-T Rec. G.652 [77] i G.655 [80]			
$DGD_{max}$ (1 –dB OSNR gubitaka)	ps	9	18/20	20	9,5

*Izvor: EFXO – PMD issues in advanced, very high-speed networks, 2012.*

Napomena: DQPSK (engl. Differential QPSK), OPFDM (engl. Orthogonal Polarization Frequency-Domain Multiplexing), AMI (engl. Alternate mark inversion)

**Tablica 9.** Prijedlog  $DGD_{max}$  vrijednosti za 100 Gbit/s OTN primjene uz različite modulacijske formate

OTN primjena		100G OTU4				
Parametar	Jedinica	NRZ		ODB/PSBT		
Brzina prijenosa	Gbit/s	4 x	3 x	43,018	4 x	3 x
		27,953 (111,810)	43,018 (130)		27,953 (111,810)	43,018 (130)
Opseg valnih duljina	nm	1530 – 1565				
Vrsta SMF vlakna	-	ITU-T Rec. G.652 [77] i G.655 [80]				
$DGD_{max}$ (1 –dB OSNR gubitaka, BER = $1 \times 10^{-4}$ )	ps	2,9	2,5	7	2,7	2,3

*Izvor: EFXO – PMD issues in advanced, very high-speed networks, 2012.*

**Tablica 10.** Prijedlog  $DGD_{max}$  vrijednosti za 100 Gbit/s OTN primjene uz različite modulacijske formate

OTN primjena		100G OTU4				
Parametar	Jedinica	RZ-DQPSK			DPSK	
Brzina prijenosa	Gbit/s	43,018	4 x 27,953 (111,810)	3 x 43,018 (130)	4 x 27,953 (111,810)	3 x 43,018 (130)
Opseg valnih duljina	nm	1530 – 1565				
Vrsta SMF vlakna	-	ITU-T Rec. G.652 [77] i G.655 [80]			ITU-T Rec. G.652 [77] + DCF (80 km + 12,8 km)	
$DGD_{max}$ (1 –dB OSNR gubitaka, BER = $1 \times 10^{-4}$ )	ps	19	7,3	6,3	9	7,7
					Omjer DGD kašnjenja i trajanja simbola iznosi 10%	

Izvor: EFXO – PMD issues in advanced, very high-speed networks, 2012.

Napomena: DCF (engl. Dispersion-Compensating Fiber)

**Tablica 11.** Prijedlog  $DGD_{max}$  vrijednosti za 100 Gbit/s OTN primjene uz najnaprednije modulacijske formate

OTN primjena		100G OTU4					
Parametar	Jedinica	DP-QPSK		DQPSK		DP-DQPSK	
Brzina prijenosa	Gbit/s	4 x 27,953 (111,810)	3 x 43,018 (130)	4 x 27,953 (111,810)	3 x 43,018 (130)	4 x 27,953 (111,810)	3 x 43,018 (130)
Opseg valnih duljina	nm	1530 – 1565					
Vrsta SMF vlakna	-	ITU-T Rec. G.652 [77] + DCF (80 km + 12,8 km)					
$DGD_{max}$ (1 –dB OSNR, BER = $1 \times 10^{-4}$ )	ps	27	23	18	15,4	36	30,8
					Omjer DGD kašnjenja i trajanja simbola iznosi 10%		

Izvor: EFXO – PMD issues in advanced, very high-speed networks, 2012.

## 6.5 Specifikacije kašnjenja za Ethernet primjene

U sljedećim tablicama prikazane su PMD specifikacije za Ethernet sustave pri različitim prijenosnim brzinama.

**Tablica 12.** DGD<sub>max</sub> specifikacije za 40 Gbit/s i 100 Gbit/s Ethernet primjene

OTN primjena				
Parametar	Jedinica			
Brzina prijenosa	Gbit/s	4 linije x 10,3125 GBd (41,25 Gbit/s)	4 linije x 25,78125 GBd (103,125 Gbit/s)	
Razmak između kanala	nm	20 (CWDM)		
	GHz		800 (DWDM)	
Centralna valna duljina (opseg valnih duljina)	nm	1271 nm (1264,5 – 1277,5) 1291 nm (1284,5 – 1297,5) 1310 nm (1304,5 – 1317,5) 1331 nm (1324,5 – 1337,5)		
Centralna frekvencija (opseg valnih duljina)	THz		231,4 THz (1294,53 – 1296,59) 230,6 THz (1299,02 – 1301,09) 229,8 THz (1303,54 – 1305,63) 229,0 THz (1308,09 – 1310,19)	
Vrsta SMF vlakna	-	IEC 60793-2-50 type B1.1, B1.3, B6		
Domet	km	0,002 – 10	0,002 – 10	0,002 – 30
				0,002 – 401
DGD <sub>max</sub> (2 –dB gubitaka, BER = 1 x 10 <sup>-12</sup> )	ps	10	8	10,3

Izvor: EFXO – PMD issues in advanced, very high-speed networks, 2012.

Napomena: Linkovi dulji od 30 km s jednakim proračunom snage, smatraju se linkovima izrađenima prema planu inženjera. Prigušenje prisutno u takvim linkovima mora biti manje od najgoreg slučaja specificiranog za SMF vlakna tipa B1.1, B1.3 i B6.

**Tablica 13.** DGD<sub>max</sub> specifikacije za 40 Gbit/s serijske Ethernet primjene

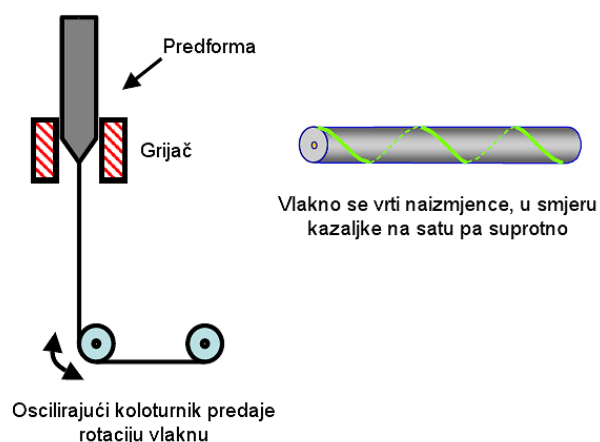
OTN primjena		40GBASE-FR	
Parametar	Jedinica		
Brzina prijenosa	Gbit/s	41,25	
Razmak između kanala	nm	-	
Opseg valnih duljina	Tx	1530 – 1565	
	Rx		1290 – 1330, 1530 – 1565
Vrsta SMF vlakna	-	IEC 60793-2-50 type B1.1, B1.3, B6 [96]	
Domet	km	0,002 – 2	
DGD <sub>max</sub> (2 –dB gubitaka, BER = 1 x 10 <sup>-12</sup> )	ps	0,5	

*Izvor: EFXO – PMD issues in advanced, very high-speed networks, 2012.*

## 7. KOMPENZACIJA POLARIZACIJSKE DISPERZIJE PRILIKOM PROIZVODNJE OPTIČKOG VLAKNA

Mnogi od uzroka polarizacijske disperzije u optičkom vlaknu nastaju upravo tijekom proizvodnog procesa. Za tradicionalno jednomodno vlakno s idealno simetričnim jezgama, koje je izvučeno bez ikakvih nepravilnosti, očekuje se da će imati vrlo nisku razinu polarizacijske disperzije. Međutim, unatoč predostrožnostima poduzetim tijekom proizvodnje, optička vlakna su i dalje vrlo podložna raznim vanjskim izvorima napreznja, efekti kojih su sve kritičniji s povećanjem brzine prijenosa podataka. Sve ovo dovelo je do razvoja tzv. „ugrađenih“ metoda kontrole dvoloma, a samim time i polarizacijske disperzije.

Japanska tvrtka OFS Optics, član grupacije Furukawa, patentirala je tehnologiju kojom se stvara svojevrsna rotacija unutar optičkog vlakna tijekom procesa izvlačenja. Ta ugrađena rotacija smanjuje dvolom miješanjem svjetlosti između dva polarizacijska stanja, što omogućuje vlaknu da izlaže vrlo malu polarizacijsku disperziju. U takvom proizvodnom procesu, oscilirajući koloturnik koji se nalazi na dnu konstrukcije za izvlačenje, predaje vlaknu spomenutu rotaciju. Rotacija se zatim širi sve do vrha niti svježe rastopljenog stakla, prvo u jednom a zatim u drugom smjeru. Kako se staklo hladi tako rotacija unutar optičkog vlakna biva učvršćena (trajna). Kut rotacije i frekvencija oscilacije mogu se mijenjati kako bi se dobile različite karakteristike vlakna ovisno o njegovoj primjeni. [2]



**Slika 21.** Proces proizvodnje optičkog vlakna niske PMD vrijednosti



Pažljiva kontrola procesa proizvodnje optičkog vlakna također je vrlo važna u smanjivanju vjerojatnosti proizvodnje vlakna s velikom polarizacijskom disperzijom. Vrlo precizne proizvodne tehnike su neophodne u nastojanju minimizacije asimetrija u jezgri, plaštu i omotaču optičkog vlakna.

Svođenje defekata poput mjehurića u predformi i zračnih linija u vlaknu, na minimum, od vitalne je važnosti za proces proizvodnje. Također, iako je ovaj proces dizajniran tako da ugradi rotaciju unutar vlakna, sva vanjska naprezanja tijekom eksploatacije moraju biti svedena na najmanju moguću razinu.

## 8. TESTIRANJE I MJERENJE POLARIZACIJSKE DISPERZIJE

Polarizacijsku disperziju teško je izmjeriti i precizno specificirati zbog dva ključna razloga: kao prvo, polarizacijska disperzija je ekstremno osjetljiva na uvjete za vrijeme mjerenja; kao drugo, vrijednost izmjerena na samom optičkom vlaknu može se razlikovati od one izmjerene na optičkom kabelu. Daljnje poteškoće stvara i statistička priroda samog fenomena. Za mrežnog instalatera, od većeg je značaja (interesa) diferencijalno grupno kašnjenje u ugrađenoj skupini povezanih (engl. linked) optičkih vlakana nego u jednom vlaknu.

Cilj proizvođača optičkog vlakna je razviti metodologiju mjerenja kojom će se odrediti kolika će PMD vladati u optičkom kabelu, jednom kad se ugradi. Jednostavno mjerenje polarizacijske disperzije „na špuli“, kako kabel dolazi s proizvodne linije, nije dobar pokazatelj PMD-a u ugrađenom optičkom kabelu. Kod nepredanih optičkih kabela, PMD vrijednost „na špuli“ najčešće je niska zbog randomizacije uzrokovane samim motanjem vlakna. Kada se takvi kabeli odmotaju sa špule, prikazuju veću polarizacijsku disperziju kada se mjeri na ravnoj podlozi bez naprezanja. Suprotno tome, predani optički kabeli, koji često prikazuju sličnu vrijednost PMD-a „na špuli“ kao i nepredani, u stvari imaju nižu PMD vrijednost odmotani (na ravnoj površini i bez naprezanja).

Ako mjerenje PMD „na špuli“ nije pouzdan indikator mrežnih performansi, što onda uzeti u obzir? Međunarodna telekomunikacijska unija (engl. International Telecommunication Union - ITU) preporuča mjerenje na namotu (optičkog vlakna) promjera 30 cm, pri opterećenju manjem od 15 grama. Ali i ovaj promjer savijanja može povećati PMD čak i u najkvalitetnijim optičkim vlaknima. Nadalje, zbog statističke prirode PMD, potrebno je mjeriti na većem broju valnih duljina prije nego se da konačna procjena PMD. [2]

Vrijednost dizajna linka (engl. Link Design Value - LDV) koristan je dizajnerski parametar za procjenu doprinosa optičkog vlakna cjelokupnoj sistemskoj PMD linka u najgorem mogućem slučaju. LDV, ili ranije spomenuti naziv  $PMD_Q$ ,

koristi se za ocjenu utjecaja PMD (uzrokovane samim vlaknom) u ulančanim sekcijama optičkih kabela.

Važno je gledati i izvan okvira aktualnih standarda kada se specificiraju PMD zahtjevi. Zašto? Zato jer se, pri dizajniranju optičkog linka, moraju uzeti u obzir i prijenosna brzina i udaljenost prijenosa. Najstriktnija PMD specifikacija od strane ITU-a preporuča  $PMD_Q \leq 0.2 \text{ ps/km}^{1/2}$ . Ta je specifikacija možda dovoljna za prijenosne brzine od npr. 10 Gbit/s, ali nije dovoljna za mnoge sustave s prijenosnom brzinom koja raste do 40 Gbit/s ili 100 Gbit/s. U mnogim slučajevima, primopredajnici također doprinose sistemskoj polarizacijskoj disperziji, što čini visokobrzinske prijenose još izazovnijima. [2]

Jednom kada je polarizacijska disperzija optičkog vlakna okarakterizirana, potrebna su daljnja razmatranja. Proces kabliranja može podići razinu polarizacijske disperzije u vlaknu putem raznih vrsta naprezanja. Stoga PMD mjeru od proizvođača treba uzeti kao najbolji mogući slučaj. Dizajn kabela mora biti kvalificiran tako da je moguće odrediti njegov utjecaj na polarizacijsku disperziju. Mjerenje na kabelima u namotaju može poslužiti da se dobije idejna slika o tome kako će se ponašati na terenu, ali najbolji rezultati se postižu mjerenjem na već ugrađenim kabelima i uspoređivanjem dobivenih rezultata s propisanim karakteristikama optičkog vlakna. Kada se svi ovi čimbenici uzmu u obzir, jasno je da je vrlo važno koristiti SMF optička vlakna s odgovarajućom tehnologijom za umanjivanje polarizacijske disperzije.

Mjerenje polarizacijske disperzije bilo je predmet raznih aktivnosti i publikacija, uključujući dugačke diskusije na međunarodnim forumima, još od ranih 90-ih. U to su vrijeme operatori počeli proučavati utjecaj polarizacijske disperzije pri brzini prijenosa od 10 Gbit/s koji se manifestirao u obliku nasumičnih ispada mreže. [1]

Od onda, predloženo je mnogo različitih metoda mjerenja i testiranja polarizacijske disperzije. U listi koja slijedi nabrojane su one najvažnije, prema abecednom redu:

- Fiksni analizator (engl. Fixed Analyzer)

- engl. extrema counting (FA-EC) (standardizirana; nedostupna)
  - Fourierova transformacija (FA-FT) (standardizirana; komercijalno dostupna)
- Interferometrička metoda
    - Generalizirana interferometrija (GINTY) (standardizirana; komercijalno dostupna)
    - Tradicionalna interferometrija (TINTY) (standardizirana; komercijalno dostupna)
- Modulacija pomakom faze (MPS) (standardizirana; nedostupna)
  - Poincareova metoda sfernog luka (PS ili SOP) (standardizirana; nedostupna)
  - Polarizacija pomakom faze (PPS) (standardizirana; nedostupna)
  - Scrambling SOP analysis (SSA) (standardizirana; komercijalno dostupna)
  - Evaluacija pomoću Stokesovog parametra
    - Analiza pomoću Jonesove matrice (JME) (standardizirana; komercijalno dostupna)
    - Poincareova sferna analiza (PSA) (standardizirana; nedostupna)

Napomena: Za metode koje su označene kao nedostupne vrijedi da su ili samo objavljene ili su komercijalno nedostupne.

Metode koje su dostupne i primjenjive u terenskim instrumentima za PMD mjerenje i testiranje, opisane su u narednim potpoglavljima.

## 8.1 Opis dostupnih metoda testiranja

U tablici 14 nalazi se pregled metoda testiranja polarizacijske disperzije te njihovih primjena.

**Tablica 14.** Primjenjivost PMD test metoda

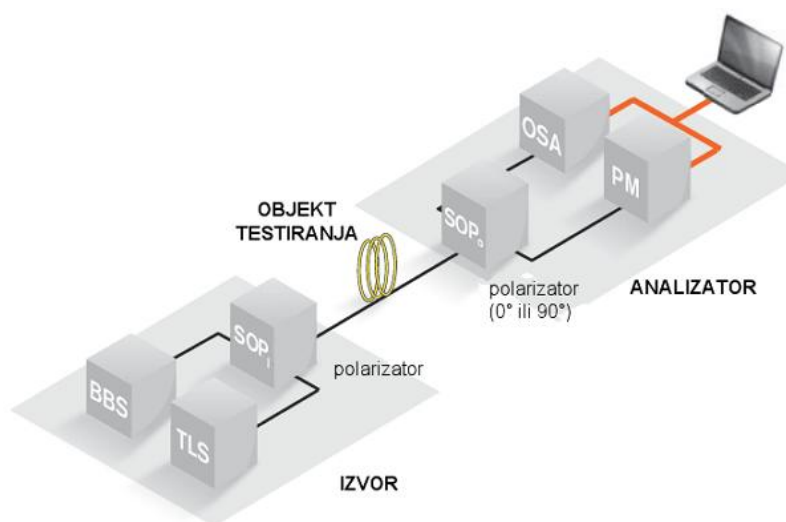
	Dostupne PMD test metode			
	FA-FT	INTY		SSA
		TINTY	GINTY	
Konfiguracija	E2E	E2E	E2E	1E
Uvjet	RMC	RMC	Bilo koji MC	Bilo koji MC
Primjena				
Vlakna i kabeli u tvornici	PMD > 1 ps, dugo vlakno		X	
Pasivne komponente u tvornici				
Pojačala s pumpom u tvornici				
Zračni linkovi na terenu	PMD > 1 ps, dugo vlakno		X	X
Nepojačani linkovi na terenu	PMD > 1 ps, dugo vlakno		X	X
Pojačani linkovi na terenu	TLS/OSA PMD > 1 ps, dugo vlakno		X	

*Izvor: EFXO – PMD issues in advanced, very high-speed networks, 2012.*

### 8.1.1 Fiksni analizator – Fourierova transformacija

Ova metoda (FA-FT) koristi jedno polarizacijsko stanje iz broadband izvora (engl. BroadBand Source - BBS) ili podesivog lasera (engl. Tunable Laser Source –

TLS) a drugo polarizacijsko stanje iz odgovarajućeg analizatora optičkog spektra ili mjerača snage, ovisno o instalaciji, kao što je vidljivo sa slike 22.

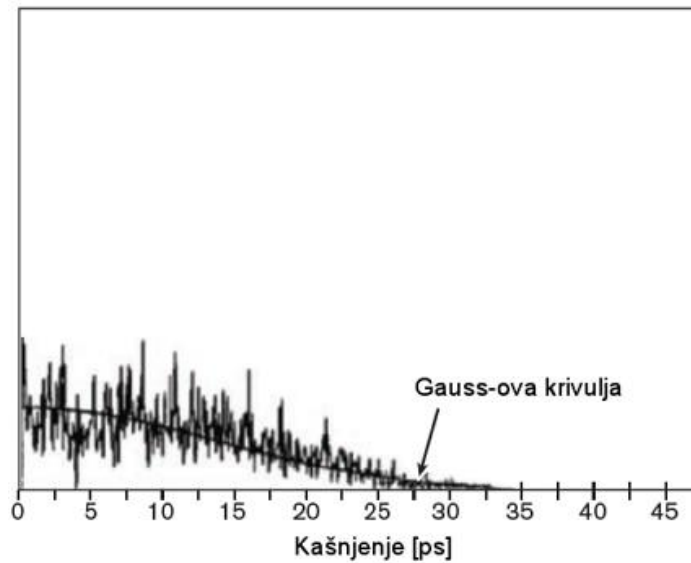


**Slika 22.** Shematski prikaz FA-FT metode testiranja

Korištenjem ove metode mjeri se statistička varijacija snage polarizacijskog stanja koje prolazi kroz, i biva promjenjeno od objekta testiranja tijekom ispitivanja valne duljine (odavde je potekao termin ispitivanja valne duljine).

Slično TINTY metodi, koja će biti opisana nešto kasnije, i ova metoda mora poštivati stroge zahtjeve (isti zahtjevi vrijede i za TINTY metodu pa neće biti ponavljani):

- Ako se koristi broadband izvor (BBS), mora imati Gaussov spektar bez spektralnog mreškanja (engl. spectral power ripples)
- Uparivanje po modovima (interakcija između različitih modova; engl. mode coupling), prikazano na slici 23, mora biti nasumično (nisu dozvoljena mjerenja pri mješovitim uparivanjima)



**Slika 23.** Prikaz dijela FA-FT metode testiranja

- SMF vlakno mora biti vrlo dugo (u kilometrima)
- Rezultirajući interferogram mora biti idealno Gaussovski, s velikim brojem resica (stotine do tisuće)
- Rezultirajući interferogram mora extend to zero barem tri puta njegove RMS poluširine
- Polarizacijska disperzija mora biti velika; ne smiju se vršiti mjerenja na kabelskim sekcijama
- U slučaju broadband izvora nisu dozvoljena mjerenja optičkih pojačala ni uskopojasnih komponenata ili link-ova koji ih sadrže
- Stupanj polarizacije podnesivog laserskog izvora mora ostati visok za vrijeme mjernog perioda
- Frekvencijski razmak mora biti konstantan

- Spektar (BBS izvor) ili domet (TLS izvor) izvora je ograničen na unaprijed definirani fiksni „prozor“, pa je stoga i statistički prosjek ograničen na konačni broj valnih duljina a kao posljedica svega toga, srednja ili RMS vrijednost dolazi s određenom dozom nesigurnosti koja je direktno proporcionalna „prozoru“ spektra

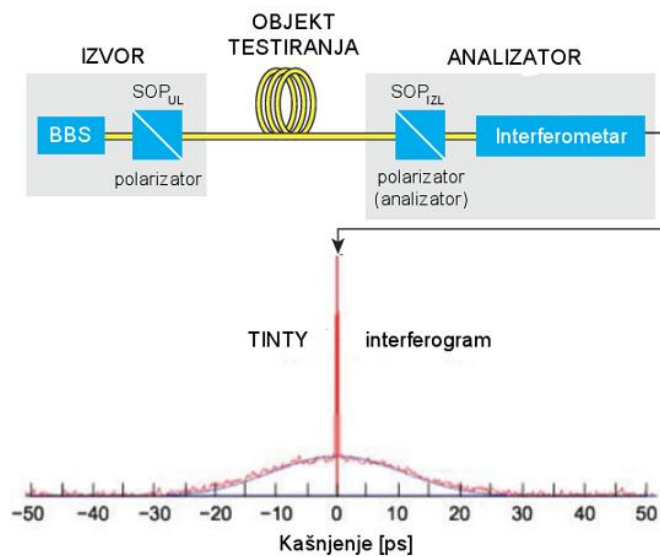
U slučaju nasumičnog uparivanja po modovima (engl. Random Mode Coupling - RMC), kao i u svakoj drugoj metodi testiranja polarizacijske disperzije, „prozor“ svjetlosnog izvora mora biti koliko je moguće širok (obično  $\geq 200$  nm, teoretski do beskonačnosti) da bi se dobio najveći mogući broj statističkih uzoraka. Zahvaljujući tome, statistički prosjek može se odrediti s minimalnom razinom nesigurnosti. Upravo zbog toga je teško dobiti preciznu mjeru polarizacijske disperzije s kratkim SMF vlaknom i niskim PMD-om: nesigurnost jednostavno postaje neprihvatljivo visoka. [1]

### **8.1.2 Interferometrička metoda (TINTY/GINTY)**

Interferometrička metoda testiranja polarizacijske disperzije dijeli se prema dva različita načina analize:

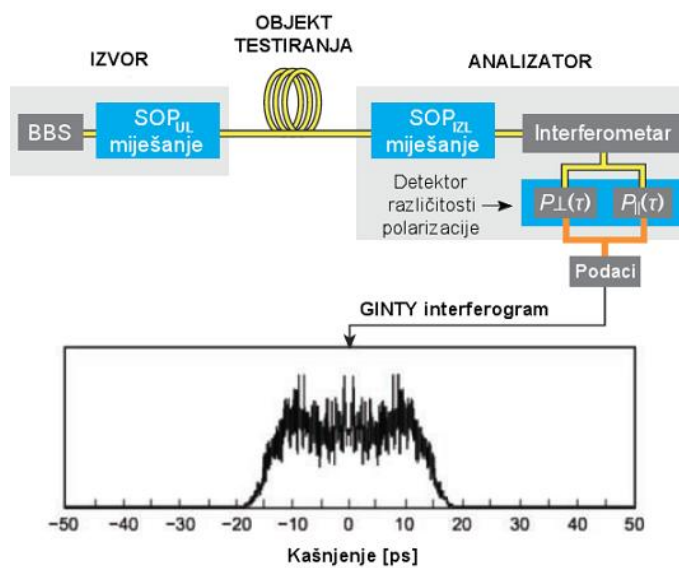
- Tradicionalna analiza ograničena na određeni broj strogih uvjeta za dobivanje  $DGD_{RMS}$  vrijednosti u RMC režimu (velika PMD vrijednost, dugo SMF vlakno) koji su navedeni pri opisivanju prethodne metode
- Neograničena, generalizirana metoda dobivanja  $DGD_{RMS}$  vrijednosti u bilo kojem režimu uparivanja prema modovima (bilo koja vrsta SMF vlakna i bilo koja PMD vrijednost)





**Slika 24.** Shematski prikaz TINTY metode i tipični rezultirajući interferogram

Tradicionalna interferometrička metoda (TINTY), bazirana je na linearno polariziranom broadband izvoru i interferometru (u kojem dolazi do interferencije okomitih polarizacijskih stanja) te polarizirajućem analizatoru koji se nalazi na ulazu u interferometar.



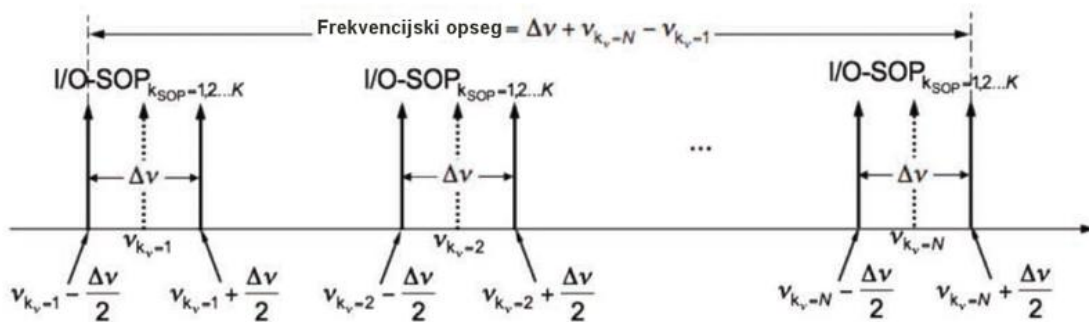
**Slika 25.** Shematski prikaz GINTY metode i tipični interferogram

U slučaju generalizirane interferometričke metode (GINTY), ne postoje ograničavajući uvjeti te se metoda može primjeniti u bilo kojem slučaju počevši od najniže PMD vrijednosti (nula) u vrlo kompleksnom objektu testiranja ili linku s mješovitim uparivanjem po modovima ili svjetlosnim izvorima bilo kakve vrste i spektra.

### 8.1.3 Analiza mješovitih polarizacijskih stanja

Ovom metodom (engl. Scrambled State-of-Polarization Analysis - SSA) mjeri se snaga iz objekta testiranja na dvama kratko razmaknutim frekvencijama (frekvencijski par) od  $k = 1$  do  $N$ , gdje je  $N$  ukupan broj parova na odabranom frekvencijskom rasponu. Svaki par je povezan s pripadajućom grupom ulazno – izlaznih polarizacijskih stanja ako je potrebno dobiti vrijednost DGD kašnjenja, ili s jednim nasumično određenim ulazno – izlaznim polarizacijskim stanjem da bi se dobila PMD vrijednost. [1]

Slika 26 ilustrira koncept frekvencijskih parova, količinu centralnih frekvencija, frekvencijski razmak i frekvencijski domet u SSA implementaciji.



**Slika 26.** SSA koncept frekvencijskih parova

Napomena: Ulazno - izlazna polarizacijska stanja su slučajno i uniformno ispremiješana na svakom frekvencijskom paru

S mjernog stajališta, velik broj ulazno – izlaznih polarizacijskih stanja (u tisućama) smanjuje nesigurnost, ali istovremeno zahtjeva dugo vrijeme potrebno za mjerenje i računanje prosjeka. S druge strane, mali broj ulazno – izlaznih polarizacijskih stanja (u desecima) zahtjeva kraće procesno vrijeme, ali povećava nesigurnost. [1]

S gore opisanim pristupom, SSA se može koristiti u „end-to-end forward“ implementaciji ili u „single-end roundtrip“ implementaciji. Svaka od tih implementacija ima svoju eksperimentalnu konfiguraciju te uvjete primjene.

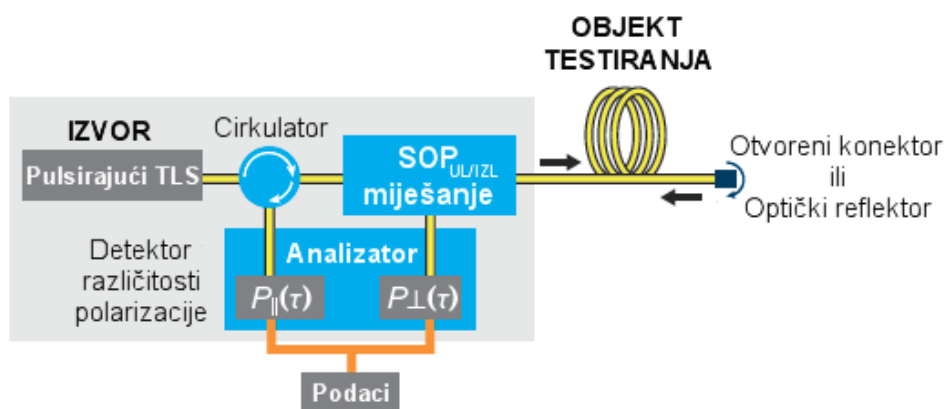
**Tablica 15.** Matrica za eksperimentalnu konfiguraciju SSA metode s korištenjem TLS izvora

Parametar	SSA implementacija	
	End-to-end forward	Single-end roundtrip
SOP	Neovisni nasumično i uniformno miješani ulazni SOP i izlazni SOP	Kombinirani nasumično i uniformno miješani ulazno – izlazni SOP
Svjetlosni izvor	CW TLS	Pulsirajući TLS
Detekcija	Detektor razlika u polarizaciji	

Izvor: EFXO – PMD issues in advanced, very high-speed networks, 2012.

Još jedan način implementacije SSA je kvantitativno mjerenje polarizacijske disperzije ( $DGD_{RMS}$ ) kao funkcije udaljenosti duž instaliranog kabliranog SMF vlakna koristeći „random scrambling polarization optical time domain“ reflektometriju (RS-POTDR). Budući da se ova implementacija zasniva na OTDR

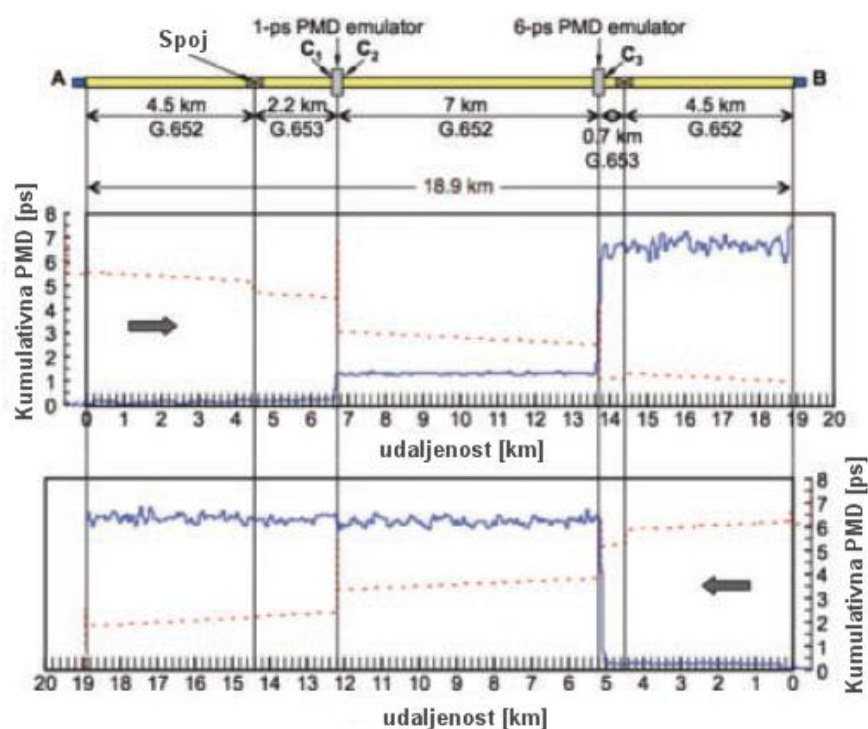
(optička reflektometrija u vremenskoj domeni) tehnici, koristi se „single-end roundtrip“ konfiguracija, kao što je prikazano na slici 27.



**Slika 27.** „Single-end roundtrip“ SSA konfiguracija

I u ovom se slučaju primjenjuje ista SSA teorija, s razlikom da se prosjek računa kao funkcija udaljenosti koristeći određeni daljinski interval od ugrađenog SMF vlakna u obzirom na odabranu širinu pulsa OTDR-a. PMD vrijednost računa se pomoću lokalnih razlika između parova OTDR tragova, koji odgovaraju nasumičnim parovima kratko razmaknutih frekvencija/valnih duljina. [1]

Slika 28 predstavlja primjer rezultata dvosmjernog testiranja, prikazujući kumulativnu polarizacijsku disperziju na SMF vlaknu dugom 18,9 km koje sadrži spojeve i PMD emulatore. Također, s obje strane vlakna korišteni su konektori.



**Slika 28.** Primjer rezultata testiranja SSA metodom u obliku kumulativne PMD kao funkcije udaljenosti

## 8.2 Mjerni instrumenti i uređaji

U sljedećih nekoliko potpoglavlja opisani su neki od mjernih instrumenata i uređaja kanadske tvrtke EXFO, jedne od vodećih svjetskih tvrtki na području testnih i servisnih rješenja za žične i bežične mreže (optika, 3G, 4G (LTE), itd.).

### 8.2.1 Širokopolasni svjetlosni izvor FTB-2200

FTB-2200 širokopolasni svjetlosni izvor je kompaktan, robustan i pouzdan uređaj. Odlikuje ga velika snaga, mogućnost miješanja polarizacije te širokopolasni LED izvor svjetlosti koji pokriva C i L pojaseve. Idealan je za provođenje PMD mjerenja visoke točnosti i posebno je dizajniran za rad s FTB-5500B analizatorom

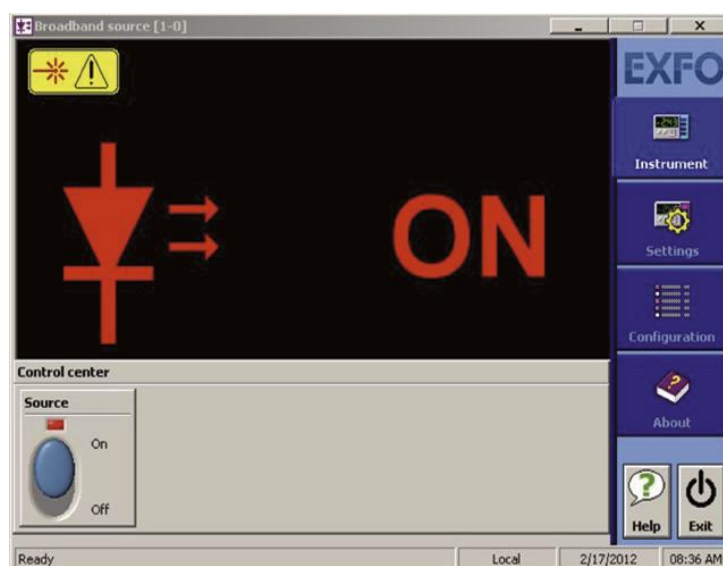
polarizacijske disperzije kako bi omogućio vrlo precizna i vrlo brza PMD mjerenja na terenu. Spreman je za rad na 40 Gbit/s i 100Gbit/s mrežama a napajaju ga baterije. [3]

**Tablica 16.** Karakteristike FTB-2200 svjetlosnog izvora

FTB-2200 SPECIFIKACIJE	
Centralna valna duljina [nm]	1580 ±20
Izlazna snaga [dBm]	7
Vršna spektralna gustoća [dBm/nm]	≥ -12,5
Stabilnost snage (15 minuta) [dB]	± 0,015

Izvor: EXFO, FTB-2200 specification sheet, 2013.

Napomena: Navedene specifikacije vrijede pri temperaturi od 23°C ±2°C i nakon perioda zagrijavanja od 30 minuta. Stabilnost snage izražena je kao srednja vrijednost između maksimalne i minimalne snage izmjerene u tom periodu.



**Slika 29.** Grafičko sučelje FTB-2200 uređaja

## 8.2.2 Distribuirani analizator polarizacijske disperzije FTB-5600

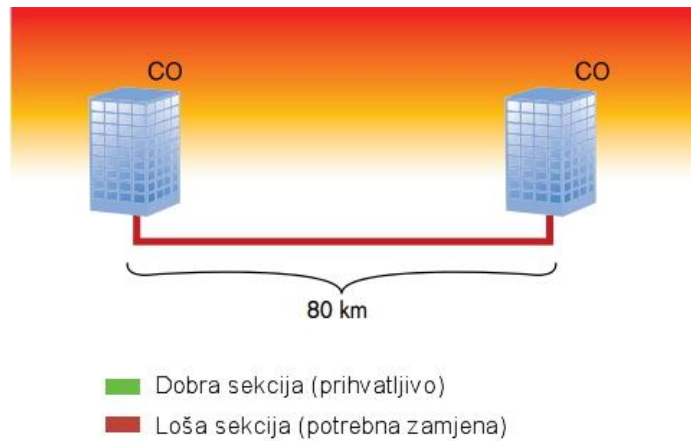
Promet podataka velikim i vrlo velikim brzinama (10, 40 i 100 Gbit/s) sve je rašireniji, što donosi i mnoge izazove u vidu nadogradnje postojećih optičkih infrastruktura. Naime, polarizacijska disperzija dovodi do ograničavanja kvalitete prijenosa, budući da ona raste skupa s povećanjem prijenosne brzine. Do nedavno, mrežni operateri imali su dvije opcije: pokušati pronaći drugo optičko vlakno koje je prilagođeno velikim brzinama prijenosa, ili zamijeniti kompletni link. Budući da prva opcija ne jamči uspjeh (druga vlakna ugrađena u približno isto vrijeme će vrlo vjerojatno prouzročiti slične PMD probleme), druga opcija, iako učinkovita, može biti iznimno skupa.



**Slika 30.** FTB-5600 i njegovo grafičko sučelje

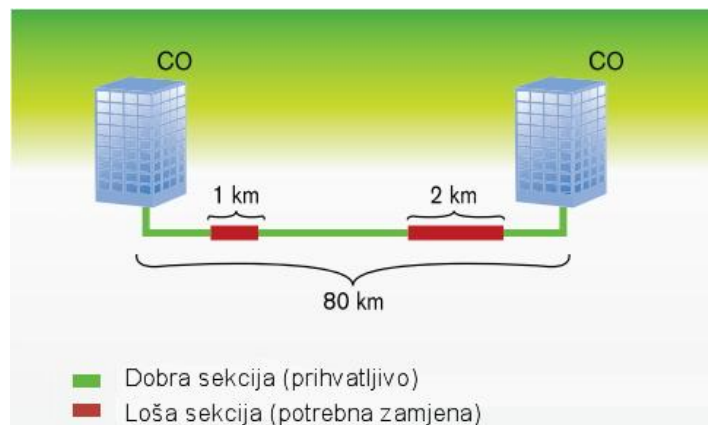
Distribuirani PMD analizator FTB-5600 dodaje i treću opciju, zamjenu samo onih sekcija unutar linka koje stvaraju probleme. Kao prvi proizvod ove vrste na tržištu, ovaj mjerni instrument donosi jasniju i detaljniju sliku polarizacijske disperzije linka. Pritom nije učinkovit ali skup, nego je ekonomičan i pruža dobar omjer uloženog i dobivenog. [4]

Zahvaljujući inovativnom pristupu koji mu omogućuje mjerenje polarizacijske disperzije kao funkcije udaljenosti, FTB-5600 omogućuje mjerenje „korak po korak“.



**Slika 31.** Tradicionalni pristup mjerenju PMD

Takvim pristupom dobije se detaljan prikaz doprinosa svake pojedine sekcije ka ukupnoj polarizacijskoj disperziji linka. Na osnovu takvog mjerenja, mrežni operater može izvršiti ciljanu nadogradnju linka zamjenom samo problematičnih sekcija, umjesto kompletnog linka. Rezultat svega je nadogradnja postojećih optičkih mreža uz znatno nižu cijenu.



**Slika 32.** Rezultat mjerenja distribuiranom PMD analizom

FTB-5600, između ostalog, kreira histogram doprinosa polarizacijskoj disperziji. Histogram trenutno otkriva i ukazuje na jednu ili više sekcija koje čine



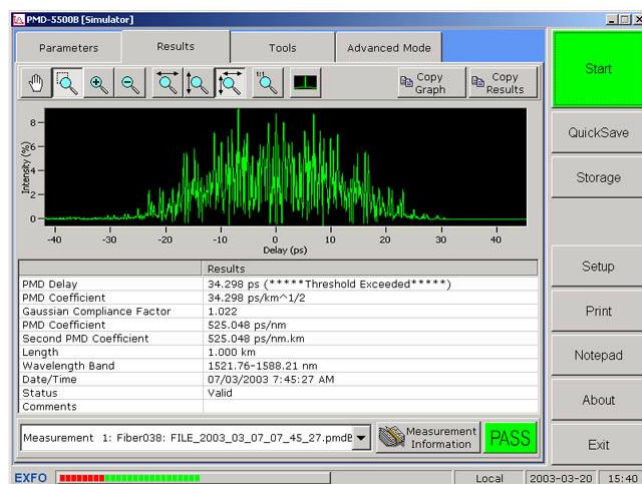
većinu ukupne polarizacijske disperzije. Na primjer, problematična sekcija duga je 5 km i čini više od 96% cjelokupne polarizacijske disperzije linka.

Direktno, putem grafičkog sučelja uređaja, moguće je izvršiti simulaciju efekata koje će izazvati zamjena loših sekcija, što pomaže u donošenju boljih odluka u kraćem vremenu.

Ostale funkcije uređaja uključuju dvosmjernu analizu, mogućnost učitavanja prethodno kreiranih predložaka sekcija, spremanje i selektirano brisanje podataka po potrebi te eksportiranje rezultata mjerenja u programe poput Microsoft Excel-a radi detaljnije analize ili usporedbe. [4]

### 8.2.3 Analizator polarizacijske disperzije FTB-5500B

Polarizacijska disperzija predstavlja značajnu opasnost, kako za starije, tako i za novopostavljene mreže. Budući da se 10 Gbit/s i brži sustavi sve više razvijaju, svijest i zabrinutost zbog polarizacijske disperzije nastavljaju rasti. Pomoću PMD analizatora FTB-5500B moguće je napraviti korak naprijed u tom području. Bilo da je potrebno provjeriti kapacitet nekog starijeg optičkog vlakna ili se pak radi o održavanju mreže, modularni FTB-5500B je brz, pouzdan i spreman za upotrebu u bilo kojem trenutku.



Slika 33. FTB-5500B grafičko sučelje

Ovaj uređaj kvalificiran je za rad na 10 Gbit/s i 40 Gbit/s mrežama te može obavljati testove na ukopanim ili zračnim optičkim vlaknima sa ili bez pojačala. Dinamički opseg mu je veći od 50 dB a PMD opseg se kreće od 0 do 115 ps. PMD mjerenje traje svega 5 sekundi, za bilo koju PMD vrijednost, što povećava učinkovitost i umanjuje troškove testiranja te omogućuje testiranje više optičkih vlakana u kraćem vremenskom roku. [5]

Koristeći jedinstvenu tehnologiju, FTB-5500B omogućuje poznavanje i autokorelacije (engl. auto-correlation) i međukorelacije (engl. cross-correlation). Stoga se može koristiti svjetlosni izvor bilo kojeg spektralnog oblika. Vrh autokorelacije je na taj način uklonjen, a postignuta je veća preciznost i rezolucija mjerenja. Nadalje, moguće je analizirati i signal koji prolazi kroz pojačalo s erbijem dopiranim optičkim vlaknom (engl. Erbium Doped Fiber Amplifier - EDFA) kako bi se dobila vrijednost ukupne polarizacijske disperzije linka. [5]

U višekanalnom prijenosu, od posebnog je značaja polarizacijska disperzija drugog reda. Ta se vrijednost dobije deriviranjem izmjerene PMD vrijednosti. Softver tvrtke EXFO prikazuje vrijednosti kašnjenja i koeficijenta PMD drugog reda. Te vrijednosti omogućuju precizniju karakterizaciju optičkih vlakana i kabela te bolju kontrolu kvalitete prijenosa u sustavima velikih prijenosnih brzina.



**Slika 34.** FTB-5500B ugrađen u platformu

FTB-5500B moguće je ugraditi u zaštitno kućište otporno na udarce i ostale nepovoljne utjecaje.

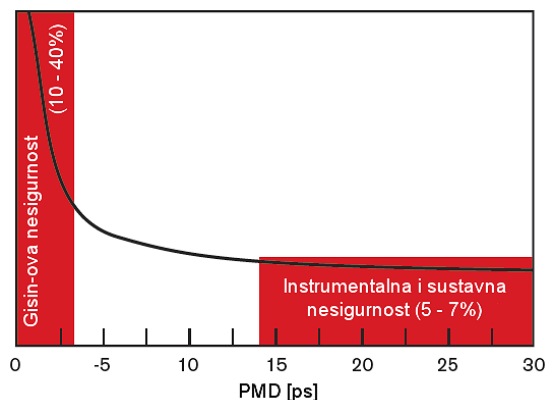
### 8.3 Kalibracija instrumenata za testiranje i mjerenje polarizacijske disperzije

Kalibracija instrumenta za testiranje PMD-a, kao i svakog drugog instrumenta za testiranje, mora biti provedena koristeći proces sljedivosti (engl. traceability) i slijed postupaka koji uključuju niz kritičnih koraka.

Prvi se korak odnosi na korištenje standardnog referentnog materijala (engl. Standard Reference Material - SRM), koji je dizajniran i dostupan od strane međunarodno priznatog nezavisnog nacionalnog mjernog laboratorija (engl. Independent National Metrology Laboratory - INML). Takav referentni materijal dolazi s kalibracijskim certifikatom u kojem je navedena zajamčena PMD vrijednost, i njezina nesigurnost, dobivena od vrijednosti DGD kašnjenja izmjenjenog na fiksnom frekvencijskom (valnoduljinskom) rasponu, u precizno kontroliranim uvjetima okoline. Kako bi dobili navedenu zajamčenu vrijednost, zaposlenici INML-a dizajniraju i izrađuju vlastitu instrumentaciju u vlastitom laboratoriju. [1]

### 8.4 Nesigurnost testova i mjera polarizacijske disperzije

Nesigurnost rezultata testiranja i mjerenja polarizacijske disperzije temelji se na dva elementa, prikazana na slici 35.



**Slika 35.** Primjer karakteristične eksperimentalne nesigurnosti

Prvi element odnosi se na nesigurnost mjerenja s obzirom na odabranu implementaciju instrumenata i postavke parametara mjerne opreme.

Drugi element je osnovna nesigurnost odabranog frekvencijskog (valnoduljinskog) područja i PMD vrijednosti. Ovaj element naziva se Gisinova nesigurnost i često predstavlja ograničavajući faktor u procesu mjerenja i/ili točnosti mjerenja niskih PMD vrijednosti unatoč tome što je relativno mala u apsolutnom pojmu.

## 9. ZAKLJUČAK

U optičkim vlaknima obično postoji mala razlika u propagacijskim karakteristikama svjetlosnih valova s različitim polarizacijskim stanjima. Pojava diferencijalnog grupnog kašnjenja moguća je čak i u optičkim vlaknima koja bi, prema svom dizajnu, trebala biti rotacijski simetrična pa samim time ne bi trebalo doći do stvaranja dvoloma, ujedno i uzroka polarizacijske disperzije. Ovaj efekt može biti posljedica slučajnih nepravilnosti ili savijanja optičkog vlakna, ili pak nekog oblika vanjskog, mehaničkog, opterećanja. Također, u svemu tome ulogu imaju i promjene u temperaturi. Uglavnom zbog utjecaja savijanja, polarizacijska disperzija izmjerena na optičkom kabelu može biti potpuno različita od vrijednosti izmjerene na istom tom optičkom vlaknu (nekabliranom) namotanom na špuli.

Polarizacijska disperzija negativno utječe na prijenos podataka na velikim udaljenostima u optičkim linkovima s jednomodnim optičkim vlaknima a s povećanjem brzine prijenosa posljedice su sve kritičnije. Naime, djelovi prijenosnog signala u različitim polarizacijskim stanjima stići će na određite s malom razlikom u vremenu. Efektivno, doći će do određene razine proširivanja impulsa, što će dovesti do pojave smetnji i degradacije kvalitete primljenog signala a to znači porast postotka pogrešnih bitova.

U principu, mogu se odrediti tzv. osnovna polarizacijska stanja određenog raspona optičkog vlakna i zatim odaslati optički signal u samo jednom takvom stanju. Ako je optička širina pojasa dovoljno mala, neće doći do proširivanja impulsa. Međutim, ova metoda nije dovoljno praktična jer se osnovna polarizacijska stanja s vremenom mijenjaju.

Budući da je polarizacijska disperzija fenomen statističke prirode, na taj način treba opisati i njene posljedice, a pritom treba uzeti u obzir ne samo slučajne i trenutne promjene, već i ovisnost o duljini optičkog vlakna. Za kraće sekcije, utjecaj diferencijalnog grupnog kašnjenja proporcionalan je duljini optičkog vlakna. Međutim, kod duljih sekcija, različiti djelovi optičkog vlakna doprinose u različitim i nepovezanim količinama.

S obzirom da mnoge unutarnje nepravilnosti nastaju tijekom same proizvodnje optičkog vlakna, uloženi su veliki naponi kako bi se usavršili proizvodni procesi pa se tako danas korisnicima nudi niz različitih vrsta optičkih vlakana manje ili veće kvalitete. Osim nastojanja ka postizanju simetrije unutar optičkog vlakna, razvijen je i čitav niz proizvodnih tehnologija kojima se kompenzira polarizacijska disperzija. Jedna od takvih tehnologija, predstavljena u ovom radu, koristi tehniku stvaranja rotacije unutar optičkog vlakna tijekom procesa izvlačenja.

Polarizacijsku disperziju teško je izmjeriti i precizno specificirati zbog dva ključna razloga: kao prvo, polarizacijska disperzija je ekstremno osjetljiva na uvjete za vrijeme mjerenja; kao drugo, vrijednost izmjerena na samom optičkom vlaknu može se razlikovati od one izmjerene na optičkom kabelu. Daljnje poteškoće stvara i, ranije spomenuta, statistička priroda samog fenomena.

Jednom kada je polarizacijska disperzija optičkog vlakna okarakterizirana, potrebna su daljnja razmatranja. Proces kabliranja može podići razinu polarizacijske disperzije u vlaknu putem raznih vrsta naprezanja. Stoga PMD mjeru od proizvođača treba uzeti kao najbolji mogući slučaj. Dizajn kabela mora biti kvalificiran tako da je moguće odrediti njegov utjecaj na polarizacijsku disperziju. Mjerenje na kabelima u namotaju može poslužiti da se dobije idejna slika o tome kako će se ponašati na terenu, ali najbolji rezultati se postižu mjerenjem na već ugrađenim kabelima i uspoređivanjem dobivenih rezultata s propisanim karakteristikama optičkog vlakna. Kada se svi ovi čimbenici uzmu u obzir, jasno je da je vrlo važno koristiti SMF optička vlakna s odgovarajućom tehnologijom za umanjivanje polarizacijske disperzije.

Organizacije, kao što su IEEE ili ITU, propisuju vrlo striktno standarde i specifikacije vezane uz polarizacijsku disperziju kojih se treba pridržavati prilikom dizajniranja i proizvodnje optičkih kabela i linkova, izgradnje novih sustava te različitih mjerenja i testiranja. Neke od dostupnih metoda mjerenja i testiranja polarizacijske disperzije pobliže su opisane u ovom radu.

Za potrebe svih vrsta mjerenja i testiranja polarizacijske disperzije koriste se razni oblici mjernih instrumenata i uređaja. U ovom radu detaljnije je opisano

nekoliko modela iz ponude kanadske tvrtke EXFO, jedne od vodećih svjetskih tvrtki na području testnih i servisnih rješenja za žične i bežične mreže (optika, 3G, 4G (LTE), itd.). Radi se o naprednim uređajima koji korisniku nude velik broj opcija te koriste inovativne tehnologije kako bi ponudili što preciznije mjerne rezultate.

## POPIS SLIKA

Slika 1. Širenje vektora el. polja linearnog horizontalnog polarizacijskog stanja .....	7
Slika 2. Širenje vektora el. polja linearnog vertikalnog polarizacijskog stanja .....	8
Slika 3. Širenje okomitih vektora el. polja linearnog polarizacijskog stanja (+45°) ...	8
Slika 4. Širenje linearnih okomitih vektora el. polja s različitim amplitudama i kutevima.....	9
Slika 5. Rotacija valnog vektora u smjeru kazaljke na satu (s gledišta promatrača) .	10
Slika 6. Širenje vektora el. polja kružnog polarizacijskog stanja u smjeru desne ruke .....	10
Slika 7. Širenje vektora el. polja eliptičnog polarizacijskog stanja .....	11
Slika 8. Širenje vektora el. polja nepolariziranog svjetlosnog vala (s gledišta promatrača) .....	11
Slika 9. Utjecaj povećane brzine (smanjenog perioda bitova) na ISI smetnje .....	15
Slika 10. Utjecaj povećanja duljine SMF vlakna (uz konstantni period bitova) na ISI smetnje .....	16
Slika 11. Srednji gubitak snage uzrokovan PMD-om kao funkcija PMD-a i brzine prijenosa.....	17
Slika 12. Primjeri nasumičnih unutarnjih nepravilnosti u jezgri optičkog vlakna.....	18
Slika 13. Primjeri nametnutih unutarnjih nepravilnosti koje uzrokuju linearni dvolom .....	19
Slika 14. Primjer uvijanja koje uzrokuje pojavu kružnog dvoloma unutar vlakna....	19
Slika 15. Razlika između x, y osi i brze, spore osi .....	21
Slika 16. Dva primjera nepromjenjenog izlaznog SOP .....	22
Slika 17. Impuls čiji je SOP poravnat s PSP osi ne doživljava DGD kašnjenje ni proširivanje .....	23
Slika 18. Impuls čiji je SOP poravnat s obje PSP osi doživljava fiksni DGD i proširivanje .....	24
Slika 19. Slučaj SMF vlakna s nasumičnim spajanjem, DGD kašnjenjem i rastućim proširivanjem impulsa.....	25
Slika 20. Povećanje širenja impulsa s povećanjem duljine SMF vlakna.....	27
Slika 21. Proces proizvodnje optičkog vlakna niske PMD vrijednosti.....	38



Slika 22. Shematski prikaz FA-FT metode testiranja .....	44
Slika 23. Prikaz dijela FA-FT metode testiranja.....	45
Slika 24. Shematski prikaz TINTY metode i tipični rezultirajući interferogram .....	47
Slika 25. Shematski prikaz GINTY metode i tipični interferogram .....	47
Slika 26. SSA koncept frekvencijskih parova .....	48
Slika 27. „Single-end roundtrip“ SSA konfiguracija.....	50
Slika 28. Primjer rezultata testiranja SSA metodom u obliku kumulativne PMD kao funkcije udaljenosti.....	51
Slika 29. Grafičko sučelje FTB-2200 uređaja .....	52
Slika 30. FTB-5600 i njegovo grafičko sučelje .....	53
Slika 31. Tradicionalni pristup mjerenju PMD.....	54
Slika 32. Rezultat mjerenja distribuiranom PMD analizom .....	54
Slika 33. FTB-5500B grafičko sučelje .....	55
Slika 34. FTB-5500B ugrađen u platformu .....	56
Slika 35. Primjer karakteristične eksperimentalne nesigurnosti .....	57

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Problemi povezani s VHBR prijenosima.....	12
Tablica 2. Preporučene (standardizirane) vrijednosti maksimalnog PMD koeficijenta .....	29
Tablica 3. Omjer $DGD_{max}$ prema $DGD_{sred}$ i pripadajuće vjerojatnosti .....	30
Tablica 4. $DGD_{max}$ specifikacije za SDH/SONET NRZ primjene .....	31
Tablica 5. $DGD_{max}$ specifikacije za OTN primjene .....	32
Tablica 6. $DGD_{max}$ specifikacije za NRZ 25G (OTN NRZ OTL4.4) primjene.....	32
Tablica 7. Prijedlog $DGD_{max}$ vrijednosti za 40 Gbit/s OTN primjene uz različite modulacijske formate.....	33
Tablica 8. Prijedlog $DGD_{max}$ vrijednosti za 40 Gbit/s OTN primjene uz različite RZ modulacijske formate.....	34
Tablica 9. Prijedlog $DGD_{max}$ vrijednosti za 100 Gbit/s OTN primjene uz različite modulacijske formate.....	34
Tablica 10. Prijedlog $DGD_{max}$ vrijednosti za 100 Gbit/s OTN primjene uz različite modulacijske formate.....	35
Tablica 11. Prijedlog $DGD_{max}$ vrijednosti za 100 Gbit/s OTN primjene uz najnaprednije modulacijske formate .....	35
Tablica 13. $DGD_{max}$ specifikacije za 40 Gbit/s i 100 Gbit/s Ethernet primjene .....	36
Tablica 12. $DGD_{max}$ specifikacije za 40 Gbit/s serijske Ethernet primjene.....	37
Tablica 14. Primjenjivost PMD test metoda.....	43
Tablica 15. Matrica za eksperimentalnu konfiguraciju SSA metode s korištenjem TLS izvora .....	49
Tablica 16. Karakteristike FTB-2200 svjetlosnog izvora.....	52

## LITERATURA

- [1] EXFO, PMD issues in advanced, very high-speed networks, 2012.
- [2] Mazzaresse D., Minimizing PMD in Cabled Fibers, OFS Optics, 2006., sa web stranice:  
<http://www.ofsoptics.com/resources/MinimizingPMDinCabledFibers.pdf>
- [3] EXFO, FTB-2200 Specification Sheet, 2013., sa web stranice:  
[http://www.exfo.com/Documents/TechDocuments/Specification\\_Sheets/EXO\\_spec-sheet\\_FTB-2200-2\\_en.pdf](http://www.exfo.com/Documents/TechDocuments/Specification_Sheets/EXO_spec-sheet_FTB-2200-2_en.pdf)
- [4] EXFO, FTB-5600 Specification Sheet, 2013., sa web stranice:  
[http://www.exfo.com/Documents/TechDocuments/Specification\\_Sheets/EXO\\_spec-sheet\\_FTB-5600-v4\\_en.pdf](http://www.exfo.com/Documents/TechDocuments/Specification_Sheets/EXO_spec-sheet_FTB-5600-v4_en.pdf)
- [5] EXFO, FTB-5500B Specification Sheet, 2011., sa web stranice:  
[http://www.exfo.com/Documents/TechDocuments/Specification\\_Sheets/EXO\\_spec-sheet\\_FTB-5500B-5800\\_v3\\_en.pdf](http://www.exfo.com/Documents/TechDocuments/Specification_Sheets/EXO_spec-sheet_FTB-5500B-5800_v3_en.pdf)
- [6] web stranica: [http://en.wikipedia.org/wiki/Polarization\\_mode\\_dispersion](http://en.wikipedia.org/wiki/Polarization_mode_dispersion)