



KNO-1104-4603

عوامل ایجاد کننده پاشندگی در فیبر نوری و نحوه جبران سازی

سیده مهسا سرائی^۱ msaraee72@yahoo.com

دانشجوی دکتری مهندسی برق مخابرات میدان دانشگاه شهید بهشتی

چکیده: شبکه‌های ارتباطی بر پایه فیبرهای نوری امروزه به یک فناوری کلیدی تبدیل شده و در آینده می‌تواند نقش مهمی در ارتباطات بی‌سیم ایفا کند. شبکه‌های فیبر نوری به دو صورت آنالوگ و دیجیتال پیاده سازی می‌شوند که حالت آنالوگ تحت تاثیر نویز و موارد خطی قرار گرفته و حالت دیجیتال تحت تاثیر پاشندگی و ویژگی غیرخطی ناشی از نرخ انتقال بالا قرار می‌گیرد. برای پاشندگی و غیرخطی به جبران سازی نیاز است که در این مقاله به مواردی چون DCF، FBG، OPC و... اشاره می‌شود. به طور مثال DCF دارای ویژگی‌های پاشندگی متضاد با پاشندگی لینک اصلی داشته و به این شکل اثرات پاشندگی را جبران می‌کند. یا در FBG به واسطه ساختار پریودیکی که دارد با بازتاب طول موج خاصی در زمان رسیدن به خروجی تاخیر ایجاد می‌کند.

کلید واژه‌ها: پاشندگی، جبران سازی، فیبر نوری، مخابرات

۱. مقدمه

با ظهور فیبرهای نوری، مخابرات با تحول بزرگی رو به رو شد. هنگامی که سیگنال از فیبر عبور می‌کند، با پاشندگی^۱ مواجه می‌شود که می‌تواند منجر به کاهش کیفیت آن شود. جبران سازی پاشندگی فرایندی چالش برانگیز بوده و می‌تواند به تضعیف پاشندگی و بهبود کیفیت سیگنال کمک کند.

در این مقاله ابتدا به معرفی مسئله پاشندگی و عوامل ایجاد کننده آن پرداخته و سپس روش‌های مقابله با آن را معرفی می‌کنیم. جبران سازی پاشندگی جهت ضمانت قابلیت اطمینان یک سیستم ارتباط نوری بسیار حائز اهمیت است. با افزایش نرخ اطلاعات و مسافت تبادل آن، اثرات پاشندگی قابل توجه شده و قاعدتا راه‌های جلوگیری و جبران آن نیز سخت تر شده‌اند. بدون جبران سازی، کیفیت سیگنال کاهش یافته، که باعث افزایش BER و کوتاه‌تر شدن مسافت انتقال داده می‌شود. در واقع جبران سازی با کاهش اثرات اعوجاج، سیگنال را حفظ می‌کند.

¹ Dispersion



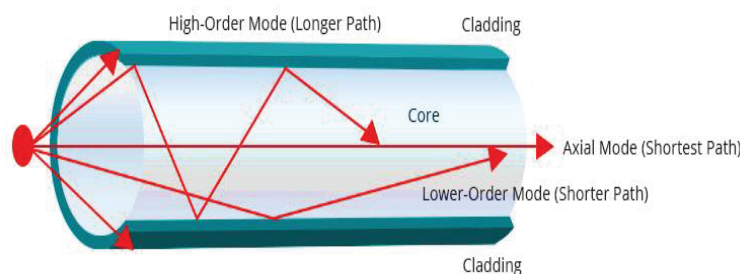
۲- پاشندگی

پاشندگی به معنای پخش شدگی پالس در طی عبور آن از فیبر نوری است. در حین انتشار پالس نور در فیبر، مولفه‌هایی چون روزنه عددی^۲، قطر هسته، پروفایل ضریب شکست، طول موج و پهنای خطر لیزر باعث پهن شدگی پالس می‌شوند. پاشندگی در طول فیبر افزایش می‌یابد و اثرات کلی آن بر عملکرد سیستم نوری با عنوان ISI^۳ شناخته می‌شود.

پاشندگی به طور کل به سه دسته تقسیم می‌شود: پاشندگی مدال^۴، پاشندگی کروماتیک^۵ و پاشندگی قطبش مد^۶.

۲-۱- پاشندگی مدال

سیگنال در فیبرهای چند مده و موجبرها در طی زمان ناشی از پدیده‌ای به نام پاشندگی مدال دچار پخش شدگی می‌شود. این به علت سرعت متفاوت مدهای مختلف منتشر شده است. نور تحت زوایای مختلفی وارد فیبر نوری شده و به طبع مسیرهای متفاوتی را طی می‌کند. برخی از پرتوهای نور از مرکز فیبر عبور می‌کنند که به مدهای axial معروفند، در حالی که برخی دیگر با برخورد به مرز هسته^۷ و غلاف^۸ فیبر یک مسیر زیگزاگی را در فیبر طی می‌کنند (شکل ۱). نمونه اول باعث پاشندگی نمی‌شود ولی نمونه دوم به واسطه اینکه هر پرتو با زاویه متفاوتی به مرز برخورد کرده و مدهای مرتبه بالاتر مدهایی هستند که دارای زوایای تیزی هستند؛ مدهای مرتبه بالا پاشندگی بیشتری ایجاد می‌کنند.



شکل ۱: انواع مسیر طی شده پرتو نور در فیبر

۲-۲- پاشندگی کروماتیک (CD)

این نوع پاشندگی ناشی از سرعت متفاوت پرتوهای نور است که به دو دسته پاشندگی ماده^۹ و موجبری^{۱۰} تقسیم می‌شود.

پاشندگی ماده به واسطه وابستگی طول موج به ضریب شکست ماده هسته است. وابستگی ثابت انتشار مد به طول موج سیگنال، شعاع هسته، تفاوت ضریب شکست هسته و غلاف منجر به پاشندگی موجبری می‌شود. با این حال در طول موج‌های خاصی (طول موج نوری)، این دو پاشندگی اثر یکدیگر را خنثی می‌کنند (شکل ۳).

² Numerical Aperture

³ Inter Symbol Interference

⁴ Modal Dispersion

⁵ Chromatic Dispersion

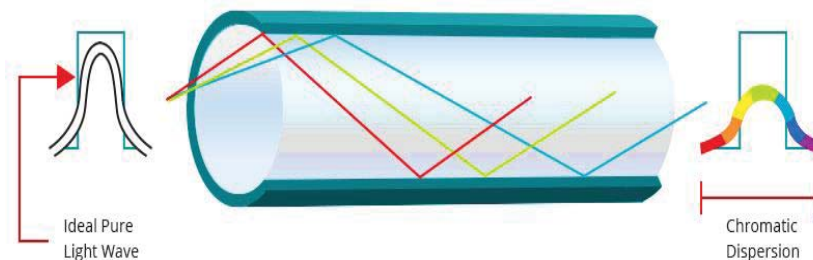
⁶ Polarization Mode Dispersion

⁷ Core

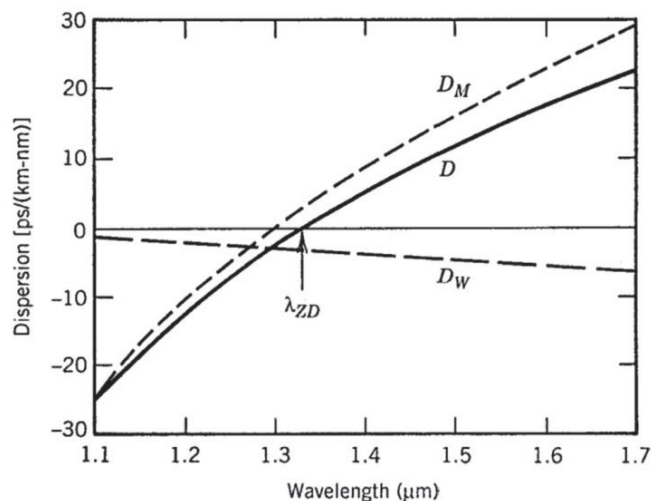
⁸ Cladding

⁹ Material Dispersion

¹⁰ Waveguide Dispersion



شکل ۲: پاشندگی کروماتیک (CD)

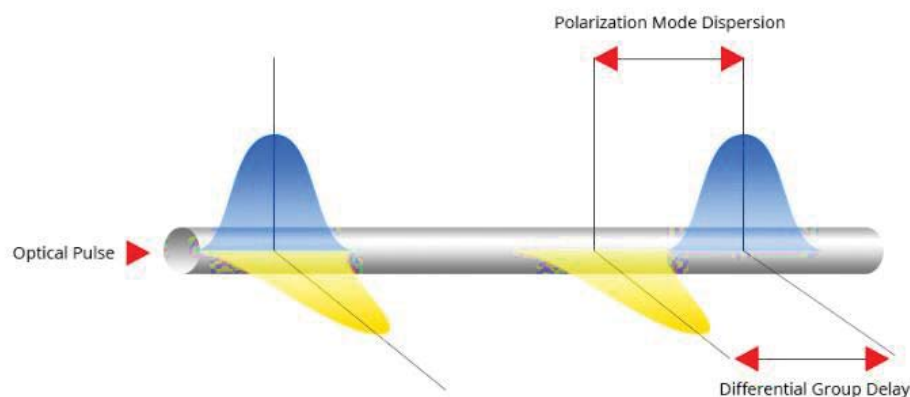


شکل ۳: پاشندگی کل (D)، پاشندگی ماده (DM) و پاشندگی موجبر (DW) تابعی از طول موج که در طول موج نوری ۱/۳ نانومتر اثر DM و DW خنثی شده است.

۲-۳- پاشندگی قطبش مد (PMD)

وابستگی قطبش ویژگی‌های موج نور منتشر شده در فیبر نوری با عنوان پاشندگی قطبش مد (PMD) ظاهر می‌شود. ویژگی‌های انتشاری امواج نوری با حالات قطبش مختلف در فیبر نوری به مقدار اندکی تغییر می‌کند. اگر به نور به دید موجی از انرژی نگاه شود، دارای دو محور عمود بر هم با نام نیروی Electromotive و نیروی Magnetomotive خواهد بود. PMD زمانی اتفاق می‌افتد که انرژی در این دو محور با نرخ متفاوتی حرکت کند (شکل ۴).

با این حال PMD در شبکه‌هایی با سرعت کمتر از ۲/۵ Gbps حتی در مسافتی بیش از ۱۰۰۰ کیلومتر قابل نظر کردن خواهد بود. زمانی این اثر قابل توجه است که سرعت بیش از ۱۰ Gbps شود.



شکل ۴: پاشندگی قطبش مد (PMD)

۳- جبران سازی پاشندگی

به منظور حذف پهن شدگی پالس نوری، جبران سازی پاشندگی بهترین راهکار ممکن برای این امر است؛ از جمله روش‌های جبران سازی به شرح زیر هستند:

- 1- Dispersion Compensation Fibers (DCF)
- 2- Fiber Bragg Grating (FBG)
- 3- Optical Phase Conjugation Techniques (OPC)
- 4- Electrical PMD
- 5- Optical PMD
- 6- DDGD¹ and PMF² Technique

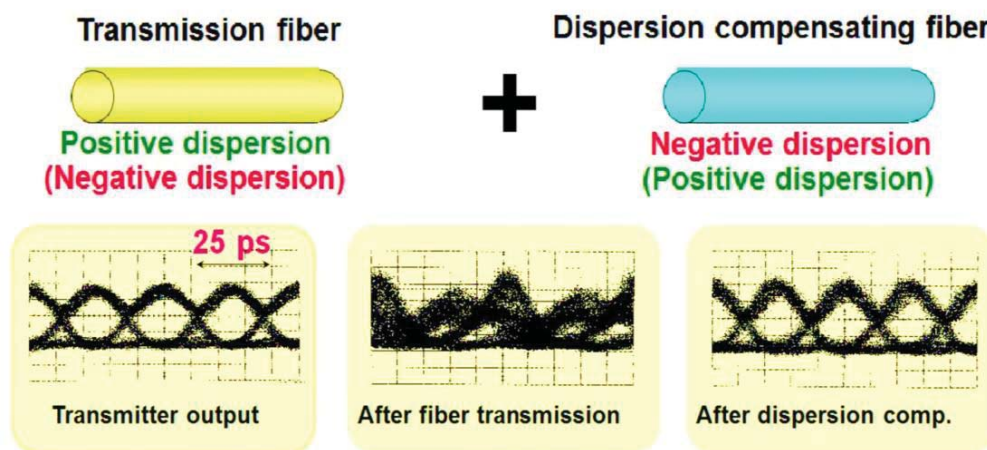
۳-۱- فیبرهای جبران ساز پاشندگی (DCF)

یکی از ساده ترین روش‌های جبران پاشندگی است. مفهوم اساسی پشت این روش این است که یک لینک فیبر نوری با ویژگی‌های بخصوص و پاشندگی متضاد ساخته شده و این لینک به فیبر انتقال نوری متصل می‌شود. با توجه به شکل ۵ این لینک می تواند اثر پاشندگی خط انتقال را خنثی و به عبارت دیگر جبران کند به این صورت که پاشندگی منفی، اثر پاشندگی مثبت را از بین برده و برعکس.

¹ Deterministic Distributed Gradient Descent
¹ Polarization Maintaining Fiber

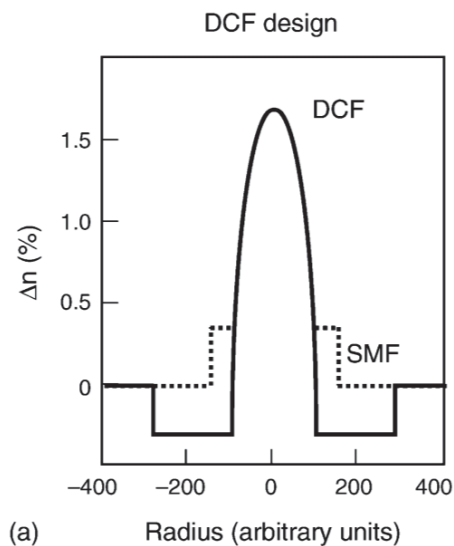
¹

²



شکل ۵: فیبر جبران ساز پاشندگی

از مزایای این روش این است که می توان آن را به راحتی ساخت. DCF جبران سازی پیوسته ای در طی فیبر به همراه دارد. با این حال مساحت مقطع هسته DCF بسیار کوچکتر از^۱ SMF استاندارد بوده که این باعث اعوجاج زیاد در سیگنال نوری بر اثر اثرات غیرخطی می شود. البته این اثرات غیرخطی را می توان با کاهش توان ورودی تقریباً از بین برد.



شکل ۶: نسبت سطح مقطع هسته DCF نسبت به SMF استاندارد

این نوع جبران سازی به سه روش اعمال می شود:

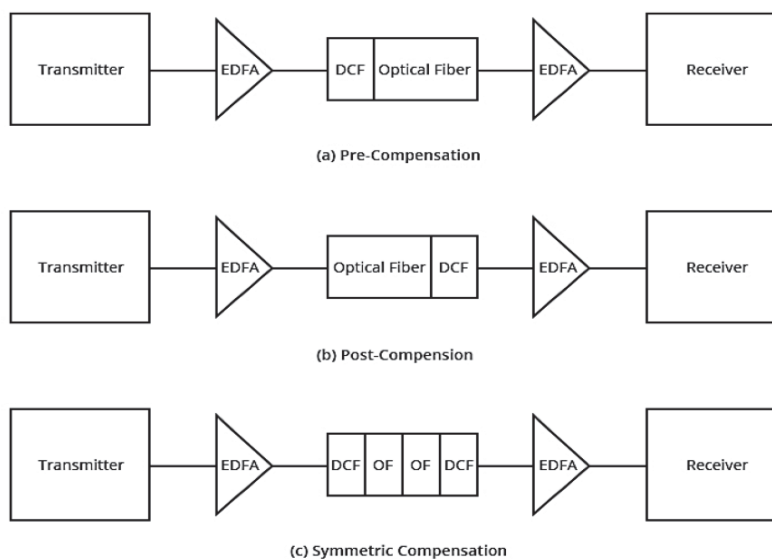
¹ Single Mode Fiber



الف) روش پیش-جبران سازی: در این روش DCF پیش از SMF قرار می‌گیرد. در این صورت ویژگی‌های پالس ورودی در فرستنده، قبل از این که به لینک فیبر ارسال شود، تغییر کرده و به این شکل اثرات پاشندگی جبران می‌شود.

ب) روش پس-جبران سازی: در این روش DCF بعد از SMF قرار می‌گیرد. به منظور جبران کردن اثرات پاشندگی، این روش ویژگی‌های پالس نوری را در گیرنده تغییر می‌دهد.

ج) روش جبران سازی ترکیبی یا متقارن: این روش ترکیبی دو روش بالا است که جهت جبران سازی سیستم از هر دو روش استفاده می‌شود. این روش به طور موثری اثرات غیرخطی را کاهش داده و نسبت به دو روش دیگر BER کمتری دارد.



شکل ۷: روش های اعمال DCF

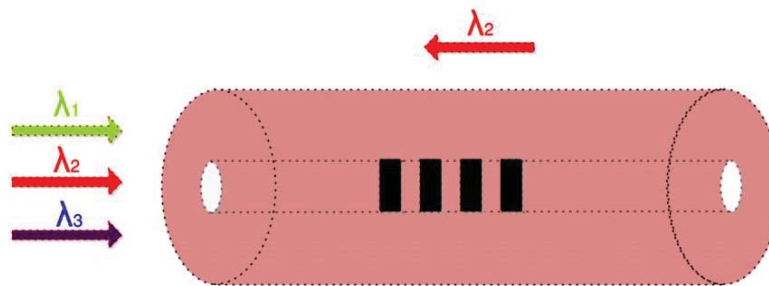
۲-۳- توری پراش فیبر Bragg (FBG)

یک قطعه بازتابی متشکل از فیبر نوری است که شامل مدولاسیونی از ضریب شکست هسته در یک طول مشخص است. توری پراش پرتو نوری از فیبر را بازتاب می‌دهد که طول موج آن متناسب با دوره تناوب توری پراش باشد (شکل ۸). طول موج بازتاب شده طول موج Bragg نامیده شده که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\lambda_B = 2n\Lambda$$

که در آن n ضریب شکست میانگین مد، Λ دوره تناوب توری پراش است.

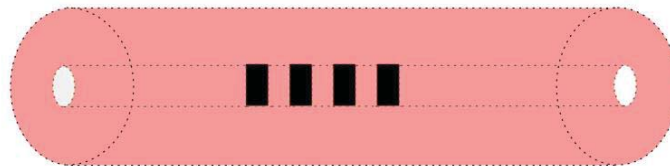
دوره تناوب توری پراش درواقع فاصله بین دو بزرگترین ضریب شکست مجاور است.



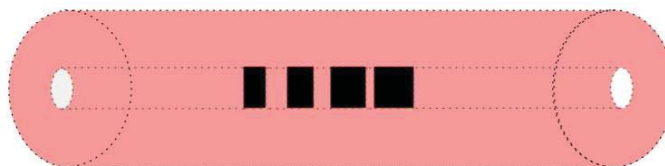
شکل ۸: توری پراش فیبر Bragg

استفاده از توری پراش Bragg برای جبران سازی پاشندگی یک روش قابل اعتماد بوده زیرا المان های پسیو نوری بوده، Insertion Loss کم داشته و مقرون به صرفه هستند.

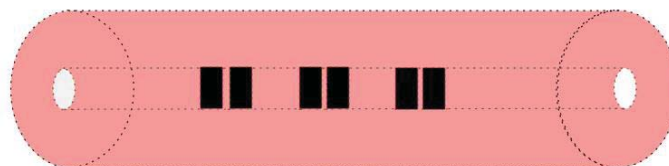
ساختار FBG می تواند با توجه به مقدار ضریب شکست یا دوره تناوب توری پراش متفاوت باشد. FBG به سه دسته تقسیم می شود: Uniform، Chirped و Superstructure. در حالت Uniform فاصله بین هر یک از توری ها مقدار ثابتی است و ضریب شکست به طور متناوب تغییر می کند (شکل ۹). در حالت Chirped فاصله بین توری ها ثابت نبوده و باند توقف پهنی دارد و تدریجاً تغییر می کند (شکل ۱۰). در حالت Superstructure توری ها به صورت گروه گروه در یک الگوی یکنواختی تکرار می شود (شکل ۱۱).



شکل ۹: توری Uniform



شکل ۱۰: توری Chirped



شکل ۱۱: توری Superstructure

۳-۳- OPC) Optical Phase Conjugation



در یک سیستم فیبر نوری، سیگنال نوری که از منبع نور (مثل لیزر) به سمت گیرنده ارسال می‌شود، در اثر پراکندگی و اثرات غیرخطی به تدریج دچار تغییرات فاز و کشیدگی زمانی می‌شود. این پدیده باعث ایجاد مشکلاتی مانند تداخل بین پالس‌ها و کاهش کیفیت سیگنال در طول مسیر می‌شود.

OPC با استفاده از یک دستگاه خاص (مثل تقویت‌کننده پارامتریک نوری یا OPA) فاز سیگنال ورودی را معکوس می‌کند و سپس این سیگنال معکوس فاز در ادامه مسیر حرکت می‌کند. این عمل معکوس کردن فاز موجب می‌شود که اثرات پراکندگی و غیرخطی که در مسیر اول رخ داده‌اند، در مسیر دوم با یکدیگر جبران شوند.

فرض کنید سیگنال ورودی به فیبر به صورت زیر باشد:

$$E(x, t) = A(x, t)e^{j\varphi(x, t)}$$

این پالس در طول مسیر فیبر نوری تحت تأثیر پراکندگی گروهی (GVD) و اثرات غیرخطی قرار می‌گیرد و دچار تغییراتی در فاز می‌شود. فاز این سیگنال با استفاده از OPC معکوس شده که به صورت زیر است:

$$E_{opc}(x, t) = A(x, t)e^{-j\varphi(x, t)}$$

اثر این معکوس فاز به شرح زیر است:

پراکندگی گروه (GVD): در مسیر اولیه، پراکندگی گروهی باعث می‌شود که پالس نوری پهن‌تر شود و فاز آن تغییر کند. با معکوس کردن فاز در OPC، اثرات پراکندگی گروهی که به صورت خطی در طول فیبر ایجاد شده‌اند، جبران می‌شوند.

اثر غیرخطی: اثرات غیرخطی مانند خودمدولاسیون فازی (SPM)، اثرات درهم‌کنش بین مدهای مختلف فیبر (XPM) یا اثر چهارموجی (FWM) در مسیر انتقال ایجاد می‌شوند. معکوس فاز این اثرات را نیز تا حدی جبران می‌کند.

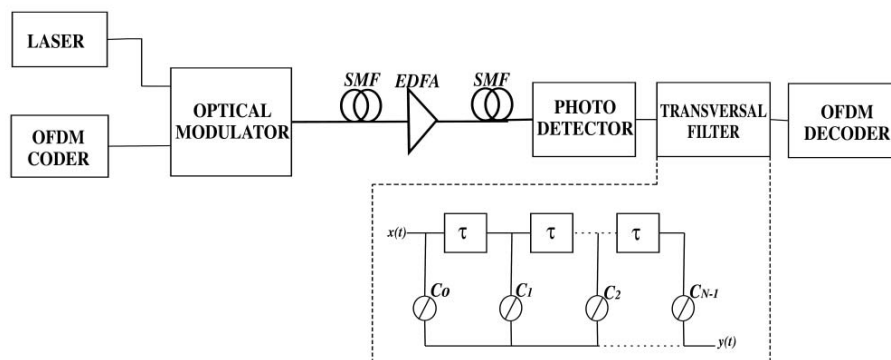
۴-۳- جبران سازی الکتریکی PMD

اکولایزر الکتریکی PMD نوعی روش پسا-جبران سازی است که اثرات PMD با استفاده از فیلتر transversal در سمت گیرنده یکسان‌سازی می‌شود. با توجه به رابطه زیر سیگنال $x(t)$ با استفاده از خط تاخیر tapped به چندین بخش شکسته شده و سپس خروجی از ترکیب آن‌ها بدست می‌آید:

$$y(t) = \sum_{m=0}^{N-1} c_m x(t - m\tau)$$

در این رابطه τ مقدار تاخیر، m وزن هر تاخیر و N تعداد tapها است. برای بهبودی عملکرد BER سیستم، یک الگوریتم کنترلی برای تنظیم ضرایب وزن به کار گرفته می‌شود. اثر PMD کاملاً با این روش جبران نمی‌شود زیرا این روش تاخیر بین دو^۱ PSP را در نظر نمی‌گیرد.

¹ Principle States of Polarization

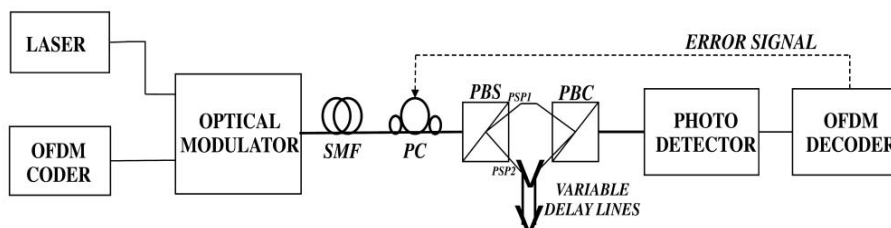


شکل ۱۲: جبران سازی الکتریکی PMD

۵-۳- جبران سازی نوری PMD

این جبران سازی با استفاده از خط تاخیر متعدد بر روی لینک فیبر اعمال می‌شود. سیگنال معوج شده با استفاده از کنترل کننده قطبش (PC) و جداساز قطبش پرتو (PBS) به دو مولفه PSP تقسیم می‌شود. دو مولفه قطبش پس از اینکه به یکی از مولفه ها تاخیر قابل تنظیم - از طریق یک خط تاخیر متغیر - اعمال شد مجدد توسط PBC با هم ترکیب می‌شوند.

سیگنال خطا از طریق یک حلقه فیدبک بدست آمده تا کنترل کننده قطبش با توجه به تغییرات محیطی در فیبر PSP تنظیم شود. افزایش پهنای پالس یا کاهش پارامتر PMD باعث بهبودی عملکرد جبران ساز PMD می‌شود. عیب این روش این است که تنها اثرات PMD مرتبه اول را می‌تواند جبران کند.



شکل ۱۳: جبران ساز نوری PMD

۶-۳- روش DDGD و PMF

به منظور جبران سازی PMD در سیستم‌های تک کانال و چندکانال از روش توزیع گرادیان نزولی قطعی (DDGD) و فیبر حافظ قطبش (PMF) استفاده می‌شود. از این دو روش به منظور اجتناب از معایب جبران سازهای الکتریکی است. در DDGD، جبران سازی با جداسازی سیگنال نوری به دو مولفه قطبش سریع و آهسته بدست می‌آید. سپس یک تاخیر قطعی، با در نظر گرفتن PSP به منظور جلوگیری از پهن‌شدگی پالس، به مولفه با قطبش سریع اعمال می‌شود.



هدف PMF این است که تحت هر شرایطی حالت قطبش ارسالی^۵ (SOP) نور را حفظ کند. با توجه به بررسی‌های انجام شده، DDGD اثرات PMD (تا ۴۵ ps) را در سیستم تک کانال در نرخ ۴۰ Gbps جبران می‌کند. در مقابل در سیستم‌های چندکاناله، از PMF برای جبران سازی اثرات PMD استفاده می‌شود. نتایج شبیه‌سازی‌ها حاکی از آن است که با افزایش تعداد کانال در WDM و DWDM از میزان جبران سازی PMD کاسته می‌شود. مزیت این روش این است که مستقل از طول موج است و عیب آن این است که برای جبران سازی سیستم‌های تک کانال و چندکانال به دو روش جداگانه نیاز است.

۴- نتیجه‌گیری

ارتباطات فیبر نوری به خاطر مزیتی که نسبت به روش انتقال الکتریکی دارند به طور گسترده‌ای جایگزین سیم‌های مسی شده‌اند. با این حال با توجه به اینکه سیگنال حین عبور از فیبر در طی زمان دچار پخش‌شدگی و پهن‌شدگی می‌شود، نیاز است روش‌هایی اتخاذ شوند تا اثرات پاشندگی را جبران کرده و تا جایی که ممکن است در خروجی سیگنالی مطلوب دریافت کرد. از این رو روش‌های بیشمار معرفی شده که در این مقاله به چندی از آن‌ها اشاره شده است.

۵- منابع

- [1] T. Ilavarasan¹ · M. Meenakshi¹, 'An Overview of Fiber Dispersion and Nonlinearity Compensation Techniques in Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing Systems', 31 March 2015
- [2] A E Willner, Y-W Song, J Mcgeehan and Z Pan, B Hoanca, 'Dispersion Management', 2005
- [3] Prof. Amit. Raikar¹, Prof. Amol. Jirage², Prof. Ashwini. Narake³, 'A Survey: Dispersion Compensation Techniques for Optical Fiber Communication', March 2019
- [4] Atheer A. Sabri¹ · Noor J. Jihad¹ · Wael A. H. Hadi¹, 'Performance Analysis of Different Dispersion Compensation Techniques in Optical Fiber Communications System', January 2024

¹ State of Polarization