

تخصیص توان نوری و سطح مدولاسیون در شبکه‌های نوری با لایه کنترل توزیع‌یافته مبتنی بر محاسبه مسیر متمرکز

میثم یاری بیگی^۱، دانشجوی کارشناسی ارشد؛ لطف اله بیگی^۲، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - تهران - ایران - yaribeygi@email.kntu.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - تهران - ایران - beygi@kntu.ac.ir

چکیده: رشد نمایی تقاضای ترافیک در شبکه‌های نوری لزوم استفاده بهینه از پهنای باند را دربرداشته‌است. افزایش ظرفیت شبکه با بهبود کیفیت سیگنال‌های نوری و امکان انتقال نرخ داده بیشتر با تخصیص مدولاسیون‌های سطح بالا تحقق می‌یابد. از عوامل مهم کاهش کیفیت سیگنال‌های نوری، اثرهای غیرخطی است که محاسبه دقیق آن در شبکه‌های نوری با لایه کنترل توزیع‌یافته ضمن افزایش پیچیدگی با صرف هزینه زیادی همراه است. در این مقاله برای شبکه‌های نوری با لایه کنترل متمرکز یک الگوریتم محاسبه مسیر جدید با در نظر گرفتن مدل نویز گوسی برای بیان اثرهای غیرخطی ارائه می‌شود که علاوه بر تخصیص طول موج با روش ابتکاری، توان مسیره‌های نوری در هر لحظه با هدف بیشینه‌سازی نرخ شانون در کل شبکه، به‌روزرسانی شده تا با تخصیص مدولاسیون‌های سطح بالا، به هر درخواست حداقل مسیر نوری ممکن تخصیص داده شود. نتایج شبیه‌سازی روی شبکه DTG نشان می‌دهد که در مقایسه با روش‌های موجود تعداد مدولاسیون‌های سطح بالا بیشتر شده و گذردهی شبکه به‌طور متوسط به اندازه ۱۳۸/۴ THz افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: شبکه‌های نوری، مسیر نوری، لایه کنترل متمرکز، مدل نویز گوسی، بهینه‌سازی توان، مدولاسیون، گذردهی

Optical Power and Modulation Level Assignment in PCE-based GMPLS Control Plane

M. Yaribeygi¹, MSc Student; L. Beygi², Assistant Professor

1- Faculty of Electrical Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran, Email: yaribeygi@email.kntu.ac.ir

2- Faculty of Electrical Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran, Email: beygi@kntu.ac.ir

Abstract: The tremendous growth in the demand for high data-rates in optical networks makes efficient use of available bandwidth indispensable. Network's throughput can be improved by exploiting high-level modulation formats which allow the transmission of high data-rate and upgrading the quality of optical communication signal which degrades due to transmission impairments. The nonlinearity of optical fibers has been long recognized as one of the most overriding factors limiting the quality of optical communication signal. Accurate evaluation of nonlinearity in generalized multiprotocol label switching (GMPLS) optical networks is more complex and costly. In this paper, we present a novel heuristic joint routing, wavelength and power allocation method for path computation element (PCE) based architecture for GMPLS optical networks such that launch power of the lightpaths are updated continuously, thereby the minimum number of lightpaths are assigned to the demands. The Gaussian noise (GN) model is exploited to capture the nonlinear effect and we focus on maximizing the Shannon sum rate for network. In the DTG network compared to existing methods, numerical results demonstrate that the number of higher order modulation formats is increased and the network throughput is improved about 138.4 THz.

Keywords: Optical network, lightpath, PCE-based GMPLS, gaussian noise model, power optimization, modulation, throughput

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۶/۱۷

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۶/۱۲/۲۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۳/۳

نام نویسنده مسئول: لطفاله بیگی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تهران - خیابان شریعتی - ضلع جنوب شرقی پل سید خندان - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - دانشکده مهندسی برق.

۱- مقدمه

واقعیت سازگار نیست و لازم است الگوریتم‌های مسیریابی محدودیت‌های لایه فیزیکی مسیر را در نظر بگیرند تا ضمن استفاده بهینه از منابع موجود، سیگنال نوری با کیفیت قابل قبولی به گیرنده برسد. محدودیت‌هایی که لایه فیزیکی اعمال می‌کند را خرابی‌ها یا اثرهای لایه فیزیکی می‌نامند که به دو بخش اثرهای خطی و غیرخطی تقسیم می‌شوند [۴، ۵]. اثرهای خطی از نوع ایستا هستند درحالی‌که اثرهای غیرخطی ماهیتی پویا دارند و به شدت به طول مسیرهای نوری و نحوه اختصاص طول‌موج‌ها در لینک‌های میانی مسیر بستگی دارند. ماهیت پویای اثرهای غیرخطی باعث ایجاد محدودیت جدی در تنظیم توان مسیرهای نوری می‌شود به طوری‌که امکان تنظیم توان یک مسیر نوری، به طور مستقل از سایر مسیرها وجود ندارد. اگر توان همه مسیرهای نوری به درستی تنظیم شوند کیفیت آن‌ها که با نسبت سیگنال به نویز (SNR) بیان می‌شود بهبود می‌یابد و در نتیجه می‌توان با اختصاص مدولاسیون‌های سطح بالاتر ظرفیت شبکه را بالا برده و از منابع طیفی موجود به صورت بهینه استفاده کرد. از جمله کارهایی که در رابطه با افزایش ظرفیت انجام شده‌است می‌توان به [۶] اشاره کرد که در آن اثر نرخ کدهای مختلف بر ظرفیت شبکه بررسی شده‌است و دو مدولاسیون کد شده 16-QAM ساده با نرخ ارسال یکسان برای سمبل‌ها و مدولاسیون 64-QAM پیشرفته که در آن احتمال ارسال سمبل‌های با انرژی کمتر بیشتر از احتمال ارسال سمبل‌های با انرژی بیشتر است، برای سه شبکه متفاوت بررسی شده‌است. در این مرجع از مدل نویز گوسی برای بیان اثرهای غیرخطی استفاده شده‌است. در سال‌های اخیر یک مدل نویز گوسی برای اثرات غیرخطی سیگنال‌های WDM ارائه شده‌است [۷]. در مراجع [۸، ۹] برای بیان اثرهای غیرخطی کانال‌ها بر یک‌دیگر و نیز اثر غیرخطی که خود کانال ایجاد می‌کند مدل نویز گوسی با دقت بررسی شده‌است. قبل از مدل نویز گوسی مدل OFDM^۷ برای بیان اثرهای غیرخطی ارائه شد [۱۰]. در [۱۱] مدلی تحلیلی و دقیق از نویز گوسی ارائه شده‌است و برتری این مدل نسبت به مدل OFDM نشان داده شده‌است. در [۱۲، ۱۳] با فرض پر بودن تمام کانال‌ها در همه لینک‌ها و در نظر گرفتن اثرهای غیرخطی با مدل نویز گوسی، توان آرسالی و نوع مدولاسیون طوری اختصاص داده شده‌است که گذردهی شبکه بیشینه شود. در [۱۳] برای بهینه‌سازی توان کانال‌ها در یک لینک نوری، با هدف بیشینه‌سازی SNR کانال‌ها از روش نیوتن-رافسون استفاده شده‌است و برای بهینه‌سازی در سطح شبکه به همه مسیرهای نوری توان یکسانی اختصاص داده شده‌است. در [۱۴] نوع مدولاسیون و سربار کد هم‌زمان باهم طوری اختصاص داده شده‌است که گذردهی شبکه بیشینه شود. در [۱۵] بهینه‌سازی توان کانال‌ها به صورت محدب و با هدف بیشینه‌سازی کمترین حاشیه SNR انجام شده‌است و به مسیرهای نوری با کانال مشابه، توان یکسانی اختصاص داده می‌شود. در واقع در این مرجع شبکه به چند بخش تقسیم شده و بیشترین اثر نویز غیرخطی که یک کانال در هر بخش می‌تواند تجربه کند برای همه کانال‌های آن بخش در نظر گرفته می‌شود. سپس بهینه‌سازی توان در

امروزه با معرفی روزافزون سرویس‌های جدید و افزایش بی‌شمار کاربران اینترنت، حجم ترافیک در شبکه‌های زیرساخت افزایش چشم‌گیری داشته‌است. به طوری‌که تقاضا برای سرویس‌های انتقال داده هر ۱۶ ماه در حال دو برابر شدن است [۱]. سیستم‌های مخابرات نوری به‌عنوان زیرساخت شبکه‌های مخابراتی مطرح هستند. در شبکه‌های نوری از فیبر نوری به‌عنوان رسانه انتقال استفاده می‌شود که قابلیت انتقال داده‌های حجیم در فاصله‌های طولانی را فراهم می‌کند. شبکه‌های نوری در سه سطح شبکه‌های هسته، شبکه‌های شهری و شبکه‌های دسترسی قابل پیاده‌سازی هستند. شبکه هسته زیرساخت شبکه و اتصال مسیرهای با هم را تشکیل می‌دهد که مجموع ترافیک شبکه‌های شهری و دسترسی را حمل می‌کند. در شبکه‌های هسته از روش تقسیم چندگانه‌ی طول‌موج (WDM) استفاده می‌شود [۲]. در این روش کل پهنای باند فیبر به بازه‌های طیفی با طول یکسان تقسیم شده و از آن‌ها برای انتقال ترافیک کاربران استفاده می‌شود. در استاندارد اتحادیه بین‌المللی مخابرات (ITU-T) برای شبکه‌های ایستا^۲ کل پهنای باند فیبر 4 THz در نظر گرفته شده‌است و بازه‌های طیفی 50 GHz تعریف شده‌است که منجر به ایجاد 80 کانال نوری در فیبر می‌شود. هر کانال نوری را معادل یک طول‌موج در نظر می‌گیرند. در شبکه‌های نوری بین هر دو گره همسایه یک لینک نوری وجود دارد که بسته به طول فیزیکی آن به تعدادی گستره^۳ تقسیم می‌شود که در هر گستره یک تقویت‌کننده، توان همه طول‌موج‌ها را تقویت می‌کند. یکی از محدودیت‌های شبکه‌های نوری محدودیت پیوستگی طول‌موج است که طبق آن گره‌های میانی قابلیت تعویض طول‌موج را ندارند و باید در تمام مسیر از یک طول‌موج استفاده شود. بنابراین در شبکه‌های نوری، مسیریابی پیچیده‌تر از شبکه‌های دیگر می‌شود و بحث مسیریابی و تخصیص طول‌موج (RWA)^۴ مطرح می‌شود. مسیریابی و ارائه سرویس در شبکه‌های نوری به دو دسته ایستا و پویا تقسیم می‌شود. در مسیریابی ایستا ماتریس ترافیک درخواست‌ها شامل مبدأ، مقصد و میزان نرخ درخواستی از قبل مشخص است اما در مسیریابی پویا اطلاعات درخواست‌ها از قبل مشخص نیست و انتخاب مسیر بهینه به مراتب دشوارتر می‌شود. ارائه سرویس‌های پویا در شبکه‌های نوری با استفاده از لایه کنترل انجام می‌شود. شبکه‌های امروزی با سه لایه مدیریت، کنترل و انتقال بیان می‌شوند، لایه کنترل و لایه انتقال به‌عنوان قلب شبکه برای انتقال ترافیک عمل می‌کنند. در این شبکه‌ها کنترل و مدیریت شبکه برعهده پروتکل GMPLS^۵ است. این پروتکل به‌صورت توزیع‌یافته در شبکه اجرا می‌شود و با استفاده از آن امکان ایجاد ترافیک جدید و یا حذف ترافیک‌های موجود در شبکه فراهم می‌شود.

در اکثر الگوریتم‌های RWA لایه‌ی فیزیکی با یک مدل ایده‌آل در نظر گرفته می‌شود به طوری‌که امکان ایجاد مسیر نوری تنها با شرط وجود طول‌موج پیوسته در مسیر بررسی می‌شود [۳]. این مدل با

غیرخطی لزوم محاسبه مسیر با معماری متمرکز نشان داده می‌شود. برای این هدف یک توسعه جدید از پروتکل PCE سلسله مراتبی برای شبکه‌های WDM ارائه می‌شود که براساس الگوریتم مسیریابی آن، با روش جدید تخصیص کانال، تخصیص توان بهینه، و مدولاسیون‌های سطح بالا به مسیرهای نوری گذردهی شبکه افزایش می‌یابد.

تخصیص کانال: با تحلیل دقیق مدل نویز گوسی یک الگوریتم ابتکاری برای تخصیص کانال ارائه می‌شود که در آن از بین مجموعه کانال‌های قابل تخصیص به یک مسیر نوری، کانالی اختصاص داده می‌شود که اثر غیرخطی کمتری را تجربه کند.

تخصیص توان بهینه: با ایجاد هر تغییری در شبکه از نظر اضافه‌شدن مسیر نوری جدید یا حذف یک مسیر نوری، هر بار توان کل مسیرهای نوری موجود در شبکه با استفاده از بهینه‌سازی محدب توان و با هدف بیشینه‌سازی نرخ شانون با یک فاصله ثابت از ظرفیت نهایی به‌روزرسانی می‌شوند. در این حالت برخلاف روش‌های قبلی، بهینه‌سازی در بعدی به تعداد کل مسیرهای نوری انجام می‌شود و به هر مسیر نوری یک توان منحصر به فرد اختصاص داده می‌شود. با در نظر گرفتن مدل نویز گوسی، توان مسیرهای نوری به هم وابسته می‌شوند و مسئله بهینه‌سازی توان به مسیرهای نوری با هدف بیشینه‌سازی نرخ شانون برای تمام مسیرها به یک مسئله بهینه‌سازی بدون قید تبدیل می‌شود.

تخصیص مدولاسیون: با توجه به نرخ درخواستی و SNR مسیر نوری که با دو روش قبل به دست می‌آید، مدولاسیون به‌گونه‌ای انتخاب می‌شود که نرخ درخواستی با حداقل مسیر نوری ممکن پاسخ داده شود.

عملکرد روش ارائه‌شده با ارزیابی گذردهی شبکه و مدولاسیون‌های سطح بالا به کمک شبیه‌سازی نشان داده می‌شود به‌طوری‌که با مقایسه با روش‌های موجود گذردهی شبکه و میزان استفاده از مدولاسیون‌های سطح بالا به‌طور چشم‌گیری افزایش می‌یابد.

این مقاله در شش بخش تدوین شده‌است. بخش دوم به اثرهای غیرخطی و مدل نویز گوسی می‌پردازد. در بخش سوم ابتدا ساختار و مفاهیم PCE مرور می‌شود و سپس به الگوریتم پیشنهادی محاسبه مسیر پرداخته می‌شود. در بخش چهارم الگوریتم‌های تخصیص کانال و تخصیص توان بهینه ارائه می‌شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در بخش پنجم ارائه شده‌است و در پایان بخش ششم به نتیجه‌گیری اختصاص یافته‌است.

۲- اثرهای غیرخطی و مدل نویز گوسی

برای بررسی محدودیت‌های لایه فیزیکی و طراحی بهینه شبکه، یک مدل دقیق از لایه فیزیکی موردنیاز است. کیفیت سیگنال‌های نوری به دلیل اختلال‌های ناشی از لایه انتقال کاهش می‌یابد که منجر به محدود شدن نرخ داده ارسالی می‌شود. این کاهش به علت انباشت نویز ناشی از تقویت‌کننده‌ها و اثرهای غیرخطی به دلیل

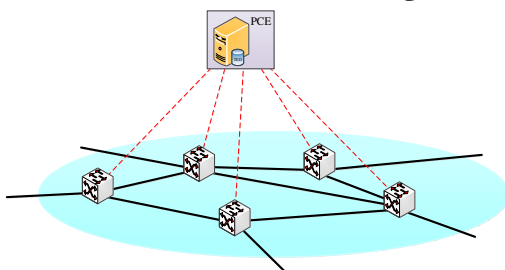
بعدی به تعداد بخش‌های شبکه انجام شده و برای تمام مسیرهای نوری یک بخش، توان بهینه یکسانی به دست می‌آید.

در مراجع مطرح‌شده تاکنون ارائه سرویس و مسیریابی ایستا موردبررسی قرار گرفته‌است. در مرجع [۱۶] توان مسیرهای نوری با استفاده از لایه کنترل با نرخ درخواستی ترافیک‌ها تطبیق داده می‌شود تا مانع از اشباع شدن توان تقویت‌کننده‌های نوری در گستره‌ها شود. در این مرجع مدل نویز گوسی برای بیان اثرهای غیرخطی لحاظ شده‌است اما توان اولیه مسیرها برای بدترین حالت از نظر اثرهای غیرخطی یعنی فرض پر بودن کانال‌ها تعیین شده‌است. در شبکه‌های نوری پویا با افزایش پیچیدگی شبکه‌ها و معرفی مفاهیمی نظیر چندناحیه‌ایی و چندلایه‌ایی بودن و در نظر گرفتن خرابی‌های لایه فیزیکی استفاده از الگوریتم‌های مسیریابی قدیمی کارگشا نبوده و نیاز به معرفی الگوریتم مسیریابی جدید، بیش از پیش احساس می‌شود [۱۷]. رفع این نیازها با استفاده از الگوریتم‌های مسیریابی امکان‌پذیر است که محاسبات پیچیده‌ای در آن‌ها انجام شود و در نتیجه الگوریتم‌هایی نظیر OSPF^۸ و ISIS^۹ که به‌صورت توزیع‌شده در شبکه اجرا می‌شوند قادر به انجام این کار نیستند. برای رفع این مشکلات لایه کنترل مبتنی بر پروتکل PCE^{۱۰} ارائه شده‌است که به‌صورت مرکزی وظیفه مسیریابی و تخصیص منابع را انجام می‌دهد [۱۸]. PCE یک موجودیت در شبکه است که می‌تواند یک گره، یک سرور، یک برنامه یا هر چیزی دیگر از شبکه باشد. وظیفه PCE انجام الگوریتم مسیریابی پویا با دسترسی به توپولوژی شبکه و اطلاعات لینک‌ها و گره‌های موجود در شبکه است. یکی از قابلیت‌های مهم PCE برای مسیریابی این است که برخلاف الگوریتم‌های مسیریابی شبکه‌های توزیع‌یافته که در آن‌ها یک گره از وضعیت کلی شبکه و از وضعیت کلی درخواست‌ها خبر ندارد و در نتیجه نمی‌تواند یک مسیری که از هر نظر بهتر است را پیدا کند، PCE می‌تواند یک بهینه‌سازی کلی انجام دهد و به‌نوعی همه خواسته‌های شبکه را برآورده کند [۱۹].

با توجه به مطالعات انجام‌شده در زمینه مسیریابی، تخصیص طول موج، تخصیص توان و تخصیص مدولاسیون، در مراجع مطرح‌شده تاکنون لایه کنترل مطلع از اثرهای غیرخطی در نظر گرفته نشده‌است و تنها در مرجع ۱۶ فرض پر بودن همه کانال‌ها و در نتیجه تخصیص توان یکسان اولیه به آن‌ها مسئله کنترل توان با استفاده از لایه کنترل مطرح شده‌است.

در این مقاله برای اولین بار بهینه‌سازی تخصیص توان به کانال‌های نوری با استفاده از لایه کنترل انجام می‌شود و به هر مسیر نوری یک توان یکتا با هدف بیشینه‌سازی ظرفیت کل شبکه تخصیص داده می‌شود. ابتدا در لایه فیزیکی اثرهای غیرخطی کانال‌ها بر یکدیگر در یک گستره با استفاده از روابط مراجع قبلی محاسبه می‌شوند، سپس با ذخیره‌سازی آنها یک مدل جدید برای محاسبه توان مسیرهای نوری ارائه می‌شود که امکان تخصیص توان بهینه در لایه کنترل به‌صورت بلادرنگ را فراهم می‌آورد. در گام بعدی با بررسی ماهیت اثرهای

مقصد پیغام RESv را در طول مسیر به سمت گره مبدأ می‌فرستد و این بار اتصال‌های سخت‌افزاری در تمام گره‌های میانی انجام می‌شود. انجام الگوریتم‌های پیچیده مسیریابی در این شبکه‌ها مستلزم صرف هزینه بسیاری است زیرا باید الگوریتم‌های مذکور در تمام گره‌های موجود در شبکه پیاده‌سازی شوند که این امر علاوه بر صرف هزینه زیاد، پیچیدگی موجود در شبکه را نیز به شدت افزایش می‌دهد. برای حل این مشکلات شبکه‌های GMPLS با PCE ارائه می‌شود. PCE برای انجام مسیریابی مشخصاً باید به ساختار شبکه دسترسی داشته و از توپولوژی موجود در شبکه مطلع باشد. این کار با دسترسی به TED^{۱۶} انجام می‌شود. TED مجموعه‌ای از اطلاعات کل شبکه و تمام گره‌ها و لینک‌های موجود در آن می‌باشد که می‌تواند شامل بخش‌های مختلفی از جمله گره‌های موجود در شبکه و لینک‌های بین آن‌ها، پهنای باند لینک‌ها، پهنای باند رزرو نشده لینک‌ها، فاصله فیزیکی گره‌ها با یکدیگر و متریک‌های مربوط به مباحث مهندسی ترافیک باشد. لازم به ذکر است که هر متریک و محدودیت دیگری که قابل استفاده در مسیریابی باشد را می‌توان به TED اضافه نمود [۱۸]. همان‌طور که در شکل ۲ مشخص است در این معماری یک عضو اصلی وجود دارد که تمام وظایفی نظیر ارائه سرویس، مسیریابی و ... را باید انجام دهد که از آن تحت عنوان PCE یاد می‌شود. از طرفی سایر اجزای شبکه که می‌توانند کنترل‌کننده‌های عادی شبکه‌های GMPLS باشند، تحت عنوان PCC^{۱۷} معرفی می‌شوند. پروتکلی که ارتباط بین PCE ها با یکدیگر و همچنین ارتباط بین PCE با PCC را به وجود می‌آورد PCEP می‌باشد. PCC براساس نیاز و در قالب پیام Pcreq درخواست مسیر می‌کند و سپس PCE براساس TED که در اختیار دارد اقدام به محاسبه مسیر می‌کند.



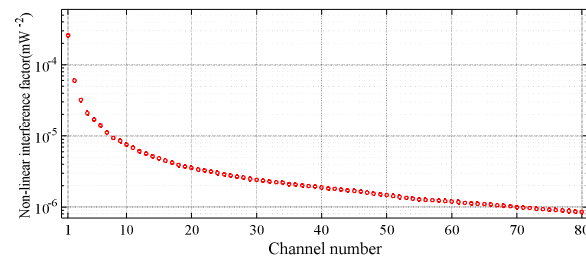
شکل ۲: معماری شبکه‌های نوری با PCE

با توجه به این‌که PCE از وضعیت کلی شبکه و درخواست‌ها اطلاع دارد می‌تواند مسیری که از هر نظر بهتر است را پیدا کند و به نوعی همه خواسته‌های موجود در شبکه را برآورده کند. پس از آن‌که PCE مسیر مورد نظر را پیدا کرد، آن را در قالب پیام Pcrep به اطلاع PCC می‌رساند. در نهایت PCC با اجرای پروتکل RSVP-TE مسیر را برقرار می‌کند [۱۷].

۳-۱- نقش PCE در شبکه‌های چندناحیه‌ای

با افزایش ابعاد شبکه مسئله مسیریابی و مدیریت شبکه به مراتب

به ترتیب XPM سایر کانال‌ها را نشان می‌دهد. شکل ۱ نتایج ذخیره‌شده در بردار NLI_{ref} را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است با افزایش فاصله کانال‌ها ضریب XPM به صورت نمایی کاهش می‌یابد. با استفاده از NLI_{ref} می‌توان اثر غیرخطی هر کانال i در یک گستره را محاسبه نمود. SPM کانال i برابر با درایه اول NLI_{ref} است و برای XPM کافی است براساس فاصله کانال‌های اشغال شده از کانال i درایه متناسب از NLI_{ref} انتخاب شود. به عنوان مثال اگر در یک گستره تنها کانال‌های ۵ و ۱۲ اشغال شده باشند؛ XPM کانال ۵ روی کانال ۱۲ برابر درایه ۷ از NLI_{ref} است.



شکل ۱: ضریب تداخل غیرخطی کانال‌ها در یک گستره

توان نویز غیرخطی یک کانال تابعی از توان خود کانال و توان سایر کانال‌های اشغال شده است. در مقیاس شبکه نویز غیرخطی هر مسیر نوری مجموع نویز غیرخطی است که آن مسیر نوری در لینک‌های مسیر تجربه می‌کند. در واقع برای مسیر نوری i ام در شبکه توان نویز غیرخطی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$n_{p,i}^{NLI}(x) = x_{p,i} \sum_{l=1}^{m_i} \sum_{j=1}^N N_l x_{p,j}^2 NLI_{ref} (ln_i - n_j) \quad (6)$$

که در آن $X_{p,k}$ ، m_k و n_k به ترتیب توان، تعداد لینک‌ها و شماره کانال مسیر نوری k ام، N تعداد کانال‌های WDM و N_l تعداد گستره‌های لینک l ام است.

۳- ساختار و مفاهیم موجود در PCE

در شبکه‌های مرسوم فعلی کنترل و مدیریت شبکه برعهده پروتکل GMPLS است که به صورت توزیع یافته در شبکه اجرا شده و هر گره شبکه الگوریتم‌های مدیریتی مربوط به خود را انجام می‌دهد. این پروتکل از سه بخش اصلی LMP^{14} ، OSPF-TE¹⁵ و RSVP-TE تشکیل شده است. وظیفه LMP تشخیص و مدیریت منابع موجود در هر گره می‌باشد. پروتکل OSPF علاوه بر محاسبه مسیر، وظیفه پخش اطلاعات گره‌ها در شبکه را دارد به صورتی که هر گره در شبکه از توپولوژی کل شبکه اطلاع داشته باشد. پس از این‌که درخواست مسیری در یکی از گره‌ها ایجاد شد و OSPF مسیر مورد نظر را پیدا کرد، پروتکل RSVP-TE در گره مبدأ شروع به ارسال پیغام path در طول مسیر می‌کند تا وجود منابع در گره‌های میانی و گره مقصد بررسی شوند. سپس گره

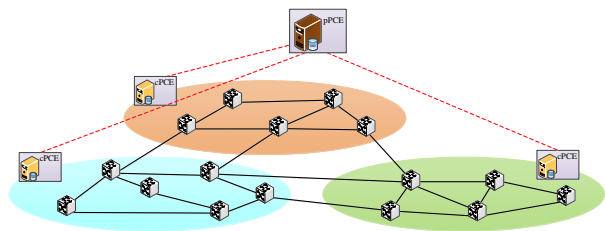
آن‌ها تغییرات ایجاد کند. به همین علت PCE حافظه‌دار و فعال معرفی می‌شود. در PCE حافظه‌دار هر گره علاوه بر دسترسی به TED به LSPDB^{۱۸} نیز دسترسی دارد که در آن اطلاعات همه مسیرهای ایجادشده ذخیره شده‌است. PCE حافظه‌دار برای محاسبه مسیر جدید از LSPDB استفاده می‌کند اما حق ایجاد هیچ‌گونه تغییر در مسیرهای قبلی را ندارد. از طرفی در PCE حافظه‌دار و فعال امکان تغییر در مسیرهای قبلی وجود دارد و بنابراین در هر لحظه می‌توان به‌منظور بهینه‌سازی کلی شبکه در همه مسیرها تغییر ایجاد کرد. این تغییرات می‌تواند پهنای باند اختصاص‌یافته، پارامترهای فرستنده-گیرنده‌ها و حتی حذف مسیرهای قبلی و ارائه یک مسیر جدید به آن‌ها باشد [۱۹].

۳-۲- توسعه PCE سلسله‌مراتبی

در شبکه‌های نوری پویا برای استفاده بهینه از منابع در نظر گرفتن اثرهای غیرخطی می‌تواند بسیار مؤثر واقع شود اما ماهیت پویای اثرهای غیرخطی باعث پیچیدگی این موضوع می‌شود. اثر غیرخطی که مسیر نوری در شبکه تجربه می‌کند به تمام مسیرهای نوری موجود در شبکه که با این مسیر حداقل یک لینک مشترک دارند وابسته است. بنابراین تخصیص توان به یک مسیر نوری قطعاً بر سایر مسیرهای نوری موجود در شبکه تأثیر می‌گذارد.

در شبکه‌های نوری پویا لازم پیاده‌سازی الگوریتمی برای تخصیص توان با در نظر گرفتن اثرهای غیرخطی، وجود یک گره در شبکه است که از همه مسیرهای نوری موجود در شبکه به صورت لحظه‌ای مطلع باشد و بتواند در این مسیرها تغییر ایجاد کند. به‌وضوح مشخص است که این شبکه را می‌توان در قالب معماری PCE سلسله‌مراتبی با pPCE حافظه‌دار و فعال تحقق بخشید. در این‌جا به‌منظور بهینه‌سازی ظرفیت شبکه در هر لحظه و با در نظر گرفتن اثرهای غیرخطی یک الگوریتم جدید برای محاسبه مسیر در معماری PCE سلسله‌مراتبی با pPCE حافظه‌دار و فعال ارائه می‌شود. شکل ۴ روندنمای محاسبه مسیر را نشان می‌دهد. هر گره درخواست محاسبه مسیر را به cPCE ناحیه خود می‌فرستد. این درخواست شامل مبدأ، مقصد و نرخ درخواستی می‌باشد. سپس cPCE درخواست را به pPCE می‌فرستد. از pPCE cPCE مقصد و سایر cPCE هایی که ناحیه مبدأ را به ناحیه مقصد متصل می‌کنند درخواست محاسبه مسیر می‌کند و در نهایت کوتاه‌ترین مسیر انتهایی‌ها را از مبدأ به مقصد پیدا می‌کند. در مرحله بعد با استفاده از الگوریتم ابتکاری تخصیص کانال، از بین مجموعه کانال‌های پیوسته و اشغال‌نشده، به مسیر نوری جدید یک کانال اختصاص داده می‌شود. اگر کانال پیوسته و اشغال‌نشده وجود نداشته‌باشد درخواست مسدود می‌شود. در مرحله تخصیص توان به مسیر نوری جدید و سایر مسیرهای شبکه، به مسیر نوری جدید و همه مسیرهای نوری دیگری که در شبکه وجود دارند و با مسیر جدید و نیز با یک‌دیگر حداقل یک لینک مشترک دارند، توان جدید اختصاص داده می‌شود. الگوریتم

پیچیده‌تر می‌شود. از طرفی ممکن است بخش‌هایی از شبکه که توسط اپراتورهای مختلف مدیریت می‌شود به دلایل امنیتی تمایلی به انتقال اطلاعات به بخش‌های دیگر نداشته‌باشند بنابراین یک شبکه را معمولاً به چند ناحیه تقسیم می‌کنند. با استفاده از PCE می‌توان مسیریابی را در شبکه‌های چندناحیه‌ای انجام داد، برای انجام این کار در هر ناحیه یک PCE قرار می‌گیرد. هر گره با ورود درخواست، به PCE ناحیه خود تقاضای مسیر می‌کند؛ اگر مقصد درخواست در همان ناحیه نباشد PCE باید با سایر PCE ها ارتباط برقرار کرده و از آن‌ها درخواست مسیر کند. مسئله مهمی که در این‌جا مطرح می‌شود نحوه ارتباط PCE ها برای یافتن مسیر بهینه است در واقع چون PCE ناحیه مبدأ از PCE مقصد و نحوه اتصال ناحیه‌ها مطلع نیست نمی‌تواند به‌درستی تصمیم بگیرد که از چه PCE درخواست مسیر کرده و یا از کدام گره گوشه مسیر را ایجاد کند. برای رفع این مشکل معماری PCE سلسله‌مراتبی ارائه می‌شود. در این ساختار که در شکل ۳ نشان داده شده‌است در هر ناحیه یک PCE وجود دارد که از آن تحت‌عنوان cPCE یاد می‌شود. هر کدام از این cPCE ها وظیفه مسیریابی در ناحیه مربوط به خود را دارد اما cPCE ها از طریق یک PCE مرکزی تحت‌عنوان pPCE با هم در ارتباط هستند. در این روش لازم است pPCE نقشه توپولوژی کلی شبکه را داشته‌باشد، ناحیه‌ها و گره‌های موجود در آن‌ها، لینک‌های بین ناحیه‌های مختلف و ویژگی‌های لینک‌ها را بداند که مشخصاً این اطلاعات را از طریق cPCE ها دریافت می‌کند. در این معماری مبدأ درخواست مسیر خود را به cPCE مربوط به ناحیه خود می‌دهد، اگر مقصد در خارج از ناحیه cPCE باشد، cPCE درخواست مسیر را به pPCE می‌فرستد. از طرفی pPCE می‌داند که گره مقصد در کدام ناحیه است و از زنجیره بین ناحیه‌ها و خواص TE-link آن‌ها مطلع است، pPCE درخواست محاسبه مسیر گوشه-به-گوشه و مقصد-به-گوشه را به همه cPCE های نواحی میانی و ناحیه مقصد می‌فرستد. پس از دریافت پاسخ، pPCE بهترین مسیر ممکن را پیدا کرده و از طریق cPCE درخواست‌کننده به اطلاع گره مبدأ می‌رساند و در نهایت گره مبدأ با استفاده از پروتکل RSVP-TE مسیر را برقرار می‌کند [۱۷].



شکل ۳: معماری شبکه‌های نوری با PCE سلسله‌مراتبی

برای اجرای بعضی از الگوریتم‌های مسیریابی لازم است PCE از مسیرهای قبلی ایجادشده اطلاع داشته‌باشد و حتی اگر لازم شد در

مدولاسیون در جدول ۱ به عنوان SNR بحرانی برای مسیر لحاظ می‌شود و از این به بعد با اضافه شدن مسیرهای نوری جدید SNR این مسیر نباید از SNR بحرانی آن کمتر شود. اگر نرخ درخواستی بزرگ‌تر از R_{max} باشد باید یک کانال دیگر به درخواست تخصیص داده شود. در نهایت پس از این که نرخ درخواستی پاسخ داده شد مبدأ، مسیر محاسبه شده را به همراه جزئیات از طریق cPCE ناحیه خود دریافت کرده و با استفاده از پروتکل RSVP-TE مسیر را ایجاد می‌کند تا وضعیت کانال‌های تخصیص یافته به اشغال شده تغییر کرده و تنظیمات سخت‌افزاری در گره‌های مسیر انجام شود. علاوه بر این pPCE توان جدید همه فرستنده-گیرنده‌هایی که توان آن‌ها تغییر کرده را از طریق cPCE ها اعلام می‌کند تا در هر لحظه شبکه در حالت بهینه باشد. این کار با توسعه پروتکل PCEP و اضافه کردن متغیرهای لازم به پیام PCrep انجام می‌شود. انتخاب SNR_{margin} کم تعداد درخواست‌هایی که به علت ایجاد اختلال در دیگر مسیرها مسدود می‌شوند را افزایش می‌دهد این در حالی است که SNR_{margin} بزرگ تضمین می‌کند که هیچ مسیر جدید به خاطر ایجاد اختلال در سایر مسیرها مسدود نشود اما باعث می‌شود از بهره‌ای که این روش ارائه می‌دهد به صورت بهینه استفاده نشود.

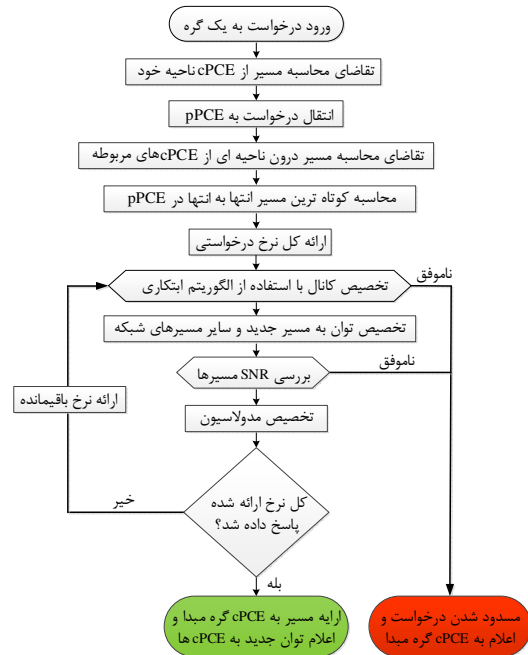
جدول ۱: انواع مدولاسیون‌ها

نوع مدولاسیون	تعداد بیت‌ها (b/sym)	نرخ داده (Gb/s)	SNR مورد نیاز (dB)
PM-BPSK	2	50	5.5
PM-QPSK	4	100	8.5
PM-8QAM	6	150	12.5
PM-16QAM	8	200	15.1
PM-32QAM	10	250	18.1
PM-64QAM	12	300	21.1
PM-128QAM	14	350	23.9
PM-256QAM	16	400	26.8

۴- الگوریتم تخصیص کانال و توان به مسیرهای نوری

با ورود هر درخواست پس از محاسبه مسیر، مجموعه کانال‌های اشغال نشده مسیر که در شرط پیوستگی طول موج صدق می‌کنند با استفاده از اطلاعات TED به دست آورده می‌شوند. سپس باید از بین این مجموعه کانال، یک یا چند کانال به مسیر اختصاص داده شود. بردار کانال‌های پیوسته و اشغال نشده مسیر $PCUC$ ^۹ نامیده می‌شوند. در این بردار شماره کانال‌های قابل تخصیص وجود دارد. متمم $PCUC$ نسبت به بردار کل کانال‌های WDM، بردار کانال‌های اشغال شده مسیر می‌شود که این بردار POC ^{۱۰} نامیده می‌شود. در این جا برخلاف روش‌های معمول مانند First-fit که اولین درایه $PCUC$ را به مسیر اختصاص می‌دهند از یک الگوریتم ابتکاری برای تخصیص کانال استفاده می‌شود تا بهترین کانال از نظر پایین بودن XPM تخصیص داده شود. همان‌طور که در بخش ۲ توضیح داده شد با افزایش فاصله کانال‌ها اثر XPM آن‌ها کاهش می‌یابد و لبه‌های طیف نسبت به مرکز طیف اثر غیرخطی

تخصیص کانال و تخصیص توان در بخش ۴ به صورت دقیق ارائه می‌شود. با تغییر توان یک مسیر نوری SNR آن نیز تغییر می‌کند. در نتیجه پس از تخصیص توان آزمایش بررسی SNR انجام می‌شود. این آزمایش ابتدا برای مسیرهایی که توان آن‌ها تغییر کرده انجام می‌شود به طوری که SNR هر مسیر با SNR بحرانی آن که در مرحله تخصیص مدولاسیون تعیین شده مقایسه می‌شود. اگر SNR مسیری از SNR بحرانی آن کمتر شود؛ مسیر نوری جدید مسدود می‌شود زیرا اضافه شدن آن طبق اثرهای غیرخطی باعث ایجاد اختلال در دیگر مسیرها شده است. با این کار به مسیرهایی که با موفقیت ایجاد می‌شوند تضمین داده می‌شود که هیچ وقفه‌ای به علت اضافه شدن مسیرهای جدید در آن‌ها به وجود نیاید. اگر آزمایش SNR برای همه مسیرها با موفقیت انجام شود، SNR مسیر نوری جدید با حداقل SNR قابل قبول برای تخصیص مدولاسیون در جدول ۱ بررسی می‌شود و اگر کمتر از این مقدار باشد؛ مسیر جدید مسدود می‌شود. تخصیص مدولاسیون برای مسیر نوری جدید با توجه به SNR و نرخ درخواستی انجام می‌شود. جدول ۱ انواع مدولاسیون‌هایی که در مقالات مورد استفاده قرار می‌گیرند را نشان می‌دهد.



شکل ۴: روند نامی محاسبه مسیر

در این جدول FEC-BER برابر با 10×4^{-3} ، نرخ سمبل GBaud ۲۸ و سربار کد ۱۲٪ در نظر گرفته شده است [۱۲]. برای مسیر نوری جدید با توجه به SNR به دست آمده و با در نظر گرفتن حاشیه اطمینانی به اندازه SNR_{margin} ، طبق جدول ۱ ابتدا R_{max} ، حداکثر نرخ که می‌توان با این SNR انتقال داد به دست می‌آید اگر نرخ درخواستی کوچک‌تر یا مساوی با R_{max} باشد، پایین‌ترین سطح مدولاسیونی که بتواند نرخ درخواستی را پاسخ دهد انتخاب شده و SNR مورد نیاز آن

$$SNR_{p,i}(e^y) = \frac{e^{y_{p,i}}}{n_{p,i}^{ASE} + n_{p,i}^{NLI}(e^y)} \quad (10)$$

با اعمال log به طرفین رابطه (۱۰)، رابطه (۱۱) به دست می آید:

$$\log(SNR_{p,i}(e^y)) = y_{p,i} - \log(n_{p,i}^{ASE}) - \log(n_{p,i}^{NLI}(e^y)) \quad (11)$$

در رابطه (۱۱) با توجه به محذب بودن $n_{p,i}^{NLI}$ بر حسب y و ثابت بودن $y_{p,i}$ و $\log(n_{p,i}^{ASE})$ ، تابع $\log(SNR_{p,i}(e^y))$ از نوع مقعر لگاریتمی بر حسب متغیر y می باشد. بنابراین رابطه (۷) در نهایت به صورت زیر می شود:

$$\text{maximize } C(e^y) = 2 \sum_{i=1}^M \log_2(\Gamma SNR_{p,i}(e^y)) \quad (12)$$

جدول ۲: پارامترهای فیبر

متغیر	مقدار متغیر	توضیح
h	$6.624 \times 10^{-34} \text{ j.s}$	ثابت پلانک
c	$3 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$	سرعت نور
λ	1550 nm	طول موج
NF	5 dB	عدد نویز
α	0.22 dB / km	ثابت تضعیف فیبر
L_s	80 km	طول گستره
R	28 GBaud	نرخ سمبل

تابع مقعر لگاریتمی برخلاف توابع محدب لگاریتمی، روی جمع بسته نیستند در نتیجه به جای بیشینه سازی رابطه (۱۲) معکوس آن کمینه می شود. برای کمینه سازی از روش گرادیان کاهشی استفاده می شود. این روش به طور کلی به صورت الگوریتم (۱) است.

- ۱- شروع با یک مقدار اولیه عضو دامنه
- ۲- $x := \nabla f(x)$
- ۳- جست و جوی خط برای تعیین t
- ۴- $x := x + t \Delta x$

این الگوریتم تا زمانی که معیار توقف برآورده نشود تکرار می شود. معیار توقف می تواند تعیین یک سقف برای تعداد تکرارها یا تعیین یک کف برای اندازه گرادیان باشد. برای تعیین t از الگوریتم جست و جوی خط عقب گرد به صورت زیر استفاده می شود:

- ۱- Δx در جهت کاهش f و $\alpha \in (0, 0.5)$ و $\beta \in (0, 1)$
- ۲- $t := 1$
- ۳- تا زمانی که رابطه (۱۳) برآورده شد $t := \beta t$

کمتری تجربه می کنند. در واقع هر چه تعداد کانال های اشغال شده در مسیر نوری کمتر و فاصله آن ها از هم بیشتر باشد اثر غیرخطی کمتر خواهد شد. در این روش فاصله بین کانال های اشغال شده با استفاده از POC محاسبه و کانال جدید وسط دو کانالی که بیشترین فاصله را از هم دارند انتخاب می شود. در حالی که چند زوج کانال یکسان از نظر فاصله بیشینه از هم وجود داشته باشد، کانال جدید وسط زوج کانالی قرار می گیرد که به لبه های طیف نزدیک تر باشد.

اپراتورهای شبکه برای پاسخ به افزایش روزافزون تقاضا برای استفاده از اینترنت باید ظرفیت شبکه را بهبود دهند. یکی از راه های کم هزینه افزایش ظرفیت شبکه استفاده بهینه از منابع موجود در شبکه است. برای افزایش ظرفیت می توان نرخ شانون برای کل مسیرهای نوری موجود در شبکه را بیشینه کرد. در این جا با هدف بیشینه سازی نرخ شانون با فاصله $\Gamma = 10^{-1}$ از ظرفیت نهایی به هر یک از مسیرهای نوری موجود در شبکه یک توان بهینه اختصاص داده می شود. بنابراین هدف بیشینه سازی رابطه (۷) برای M مسیر نوری موجود در شبکه است [۱۵].

$$C(x) = 2 \sum_{i=1}^M \log_2(\Gamma SNR_{p,i}(x) + 1) \text{ maximize} \quad (7)$$

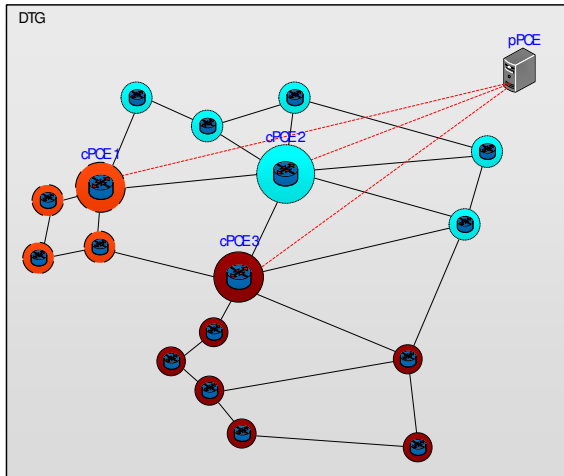
که در آن x توان مسیرهای نوری و متغیر بهینه سازی است. ضریب ۲ مشخص کننده تعداد پلاریزاسیون و $SNR_{p,i}(x)$ معادل SNR مسیر نوری i ام و یک مقدار بزرگ است به طوری که می توان از تقریب $\Gamma SNR + 1 = \Gamma SNR$ استفاده کرد. رابطه (۷) یک مسئله بهینه سازی بدون قید است. برای بیشینه سازی این رابطه ابتدا باید محذب بودن $SNR_{p,i}(x)$ بررسی شود. SNR مسیر نوری i ام به صورت زیر بیان می شود:

$$SNR_{p,i}(x) = \frac{x_{p,i}}{n_{p,i}^{ASE} + n_{p,i}^{NLI}(x)} \quad (8)$$

در این رابطه $n_{p,i}^{ASE}$ توان نویز تقویت کننده ها و یک مقدار ثابت است که از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$n_{p,i}^{ASE} = h \frac{c}{\lambda} 10^{\frac{NF}{10}} e^{\alpha L_s} R \sum_{l=1}^{m_i} N_l \quad (9)$$

m_i تعداد لینک های مسیر نوری i ام، N_l تعداد گستره های لینک l ام و سایر پارامترها در جدول ۲ آورده شده است. $n_{p,i}^{NLI}(x)$ توان نویز غیرخطی است که در بخش دوم با رابطه (۶) ارائه شد. این عبارت محدب نیست اما با تغییر متغیر $x = e^y$ به یک تابع محدب تبدیل می شود. با این وجود همچنان در مورد تابع SNR نمی توان اظهار نظر کرد. با جاگذاری $x = e^y$ در رابطه (۸)، معادله به صورت زیر تغییر می کند:



شکل ۶: ناحیه‌بندی شبکه DTG آلمان در محیط شبیه‌سازی

در هر دو سناریو از روش مسیریابی دایکسترا برای یافتن کوتاه‌ترین مسیر درون ناحیه‌ای استفاده می‌شود. زمان ایجاد درخواست مسیر نوری توسط گره‌های شبکه طبق یک تابع نمایی با پارامتر ۰/۴ می‌باشد و گره درخواست‌کننده به همراه گره مقصد با یک توزیع یکنواخت انتخاب می‌شوند. شبیه‌سازی‌ها با حالت کاملاً خالی از نظر وجود مسیر نوری در شبکه آغاز می‌شوند و آن‌قدر درخواست مسیر نوری در گره‌ها ایجاد می‌شود تا همه کانال‌ها در تمام لینک‌های شبکه اشغال شوند. به منظور ایجاد شرایط یکسان مجموعه درخواست‌هایی که در یک سناریو ایجاد می‌شوند ذخیره شده و برای سناریوی دیگر لحاظ می‌شوند و تمام نتایج شبیه‌سازی میانگین ۵۰ اجرای مختلف می‌باشند. حداقل SNR قابل قبول برای تخصیص مدولاسیون ۸/۵ dB در نظر گرفته می‌شود که طبق جدول ۲ معادل نرخ بیت ۱۰۰ Gb/s است.

تخصیص توان یکسان: روش پیشنهادی در این مقاله با روش‌های موجود برای بررسی اثرهای غیرخطی مقایسه می‌شود. ابتدا در سطح یک گستره و با فرض اشغال بودن همه کانال‌ها، بیش‌ترین توان نویز غیرخطی که یک کانال می‌تواند تجربه کند را محاسبه کرده و براساس آن توان همه کانال‌ها به صورت یکسان و با استفاده از رابطه (۱۴) محاسبه می‌شود [۱۲].

$$p = \sqrt[3]{\frac{n_s^{ASE}}{2X_m}} \quad (14)$$

که در آن X_m بیش‌ترین اثر غیرخطی است که یک کانال می‌تواند تجربه کند و با استفاده از NLI_{ref} به دست می‌آید و n_s^{ASE} توان نویز ASE در یک گستره می‌باشد که با رابطه (۹) محاسبه می‌شود. سپس برای یک گستره SNR همه کانال‌ها با رابطه زیر به دست می‌آید [۱۲]:

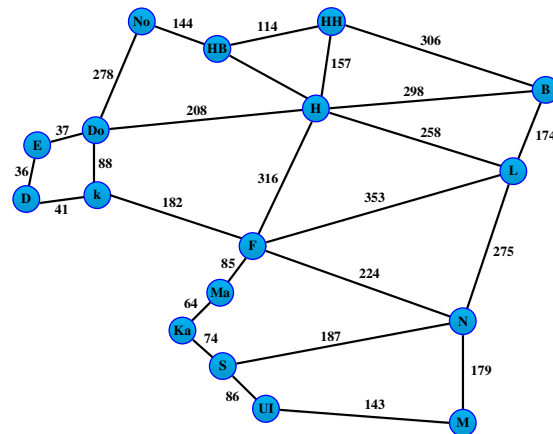
$$SNR_s = \frac{p}{n_s^{ASE} + p^3 X_m} \quad (15)$$

$$f(x + t\Delta x) > f(x) + \alpha t \nabla f(x)^T \Delta x \quad (13)$$

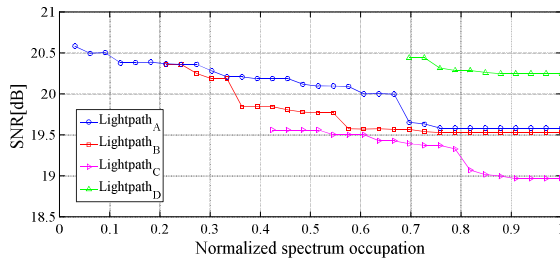
در این جا مقادیر α و β به ترتیب ۰/۱ و ۰/۵ انتخاب شده‌است. محاسبه گرادیان رابطه (۱۲) در پیوست آورده شده‌است.

۵- نتایج شبیه‌سازی

به منظور ارزیابی الگوریتم پیشنهاد شده، در این جا یک شبیه‌سازی از شبکه‌های نوری با استفاده از نرم‌افزار OMNET++ نسخه ۵/۰ ارائه شده و پروتکل توسعه یافته PCE سلسله‌مراتبی با قابلیت محاسبه مسیر طبق الگوریتم پیشنهادی در آن پیاده‌سازی شده‌است. شبیه‌سازی روی شبکه DTG آلمان اجرا می‌شود. همان‌طور که در شکل ۵ می‌بینید این شبکه دارای ۱۷ گره و ۲۶ لینک نوری است. از فیبر تک‌حالت با مقدار پارامترهایی که در بخش‌های ۲ و ۴ گفته شد استفاده شده‌است و طول گستره‌ها نیز ۸۰ کیلومتر می‌باشند. زمان ارسال داده‌ها با تأخیر انتشار نور در فیبر شبیه‌سازی شده‌است. به طوری که برای هر لینک نوری با توجه به طول فیزیکی آن در شکل ۵ یک تأخیر در نظر گرفته شده‌است. شکل ۶ تصویری از محیط شبیه‌سازی را نشان می‌دهد که در آن شبکه به ۳ ناحیه تقسیم شده و در هر ناحیه یکی از گره‌های آن ناحیه انتخاب شده‌است که دارای تعداد لینک‌های بیشتری باشد. نتایج شبیه‌سازی برای دو سناریو تخصیص توان یکسان و تخصیص توان بهینه با روش پیشنهادی به مسیره‌های نوری ارائه می‌شود.



شکل ۵: توپولوژی شبکه DTG آلمان



شکل ۸: تغییر SNR مسیره‌های نوری نسبت به کانال‌های اشغال شده در هر لحظه به تعداد کل کانال‌های موجود در شبکه

الگوریتم تخصیص توان در لحظه ایجاد مسیر نوری A توان mW ۱/۱ به آن اختصاص داده‌است که باتوجه به طول مسیر و وضعیت کانال‌های اشغال شده در مسیر، SNR آن ۲۰/۶۲ dB به دست آمده‌است این درحالی است که در سناریو تخصیص توان یکسان، برای این مسیر نوری SNR ثابت ۱۷/۸۵ dB به دست می‌آید. در نتیجه برای این مسیر نوری SNR به میزان ۲/۷۷ dB افزایش یافته‌است. اما با اضافه شدن مسیره‌های نوری جدید به شبکه، توان بالای مسیر نوری A با توجه به وابستگی توان نویز گوسی مسیره‌های نوری به یکدیگر، باعث بروز اختلال در سایر مسیره‌ها شده و الگوریتم بهینه‌سازی توان، به نحوی توان این مسیر را کاهش می‌دهد که SNR همه مسیره‌ها بیشینه شود. پس از اشغال شدن همه کانال‌های شبکه توان و SNR مسیر نوری A به ترتیب به ۰/۹۷ mW و ۱۹/۶۴ dB می‌رسد که باز هم SNR نسبت به روش تخصیص توان یکسان ۱/۷۹ dB بیشتر است. باتوجه به توضیحات اخیر اگر SNR_{margin} برای مسیر نوری A بیشتر از dB ۰/۹۸ در نظر گرفته شود، تضمین می‌شود که این مسیر نوری به علت اضافه شدن مسیره‌های جدید دچار اختلال نمی‌شود. در واقع هنگام تخصیص مدولاسیون به مسیر نوری A باید SNR آن به جای dB ۲۰/۶۲ مقدار SNR_{margin} - ۲۰/۶۲ در نظر گرفته شود، چون ممکن است SNR به حدی افت کند که دیگر ارسال سیگنال نوری با مدولاسیون تخصیص داده شده کیفیت لازم را در گیرنده نداشته باشد. افت SNR برای مسیره‌های نوری B، C و D به ترتیب ۰/۸۶، ۰/۶۴ و ۰/۲۳ دسی‌بل است که نشان می‌دهد هر چه مسیر نوری دیرتر ایجاد شود افت SNR آن کمتر است. انتخاب SNR_{margin} پایین باعث استفاده بیشتر از بهبود SNR ایجاد شده با روش پیشنهادی می‌شود اما تعداد درخواست‌های مسدود شده به علت ایجاد اختلال در سایر مسیره‌ها افزایش می‌یابد.

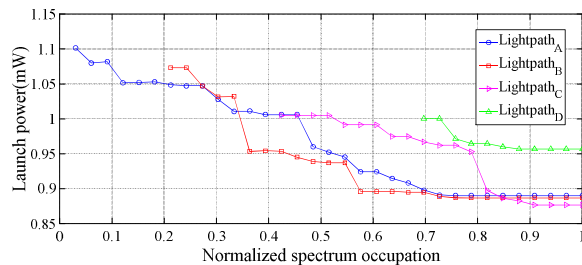
شکل ۹ تغییرات SNR یک مسیر نوری نسبت به کانال‌های اشغال شده شبکه را برای دو حالت تخصیص کانال با الگوریتم ابتکاری پیشنهاد شده در این مقاله و روش First-fit نشان می‌دهد.

در نهایت برای یک مسیر نوری که از k گستره تشکیل شده‌است، SNR با رابطه (۱۶) به دست می‌آید [۱۶]:

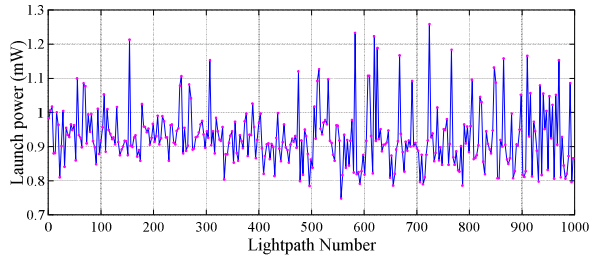
$$SNR_p = \frac{SNR_s}{k} \quad (16)$$

در این سناریو به همه مسیره‌های نوری شبکه طبق رابطه (۱۴) توان یکسان ۰/۷۴ mW تخصیص داده می‌شود و چون حساسیتی نسبت به جای کانال‌ها وجود ندارد از روش First-fit برای تخصیص کانال استفاده شده و برای هر مسیر نوری پس از محاسبه SNR طبق رابطه (۱۶)، تنها شرط بزرگ‌تر بودن SNR از حداقل SNR قابل قبول برای تخصیص مدولاسیون بررسی می‌شود.

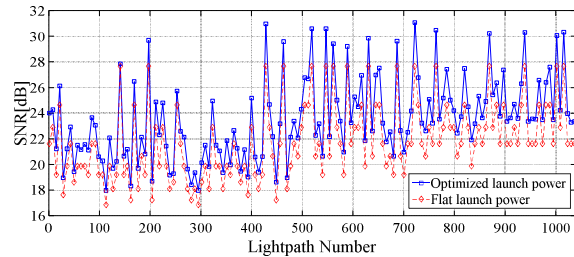
تخصیص توان بهینه: این سناریو روش پیشنهادی در این مقاله را شبیه‌سازی می‌کند که در هر لحظه با هدف بیشینه‌سازی ظرفیت شبکه به مسیره‌های نوری توان بهینه اختصاص داده می‌شود. در شبیه‌سازی‌ها اگر توان یک مسیر نوری بیشتر از ۰/۱ mW تغییر کند، pPCE توان جدید را به گره مبدأ اعلام می‌کند. در بخش ۴ دیده شد که SNR یک مسیر نوری با اضافه شدن مسیره‌های نوری جدید به شبکه کاهش می‌یابد و SNR_{margin} به عنوان یک حاشیه SNR برای رفع این مشکل معرفی شد. شکل‌های ۷ و ۸ به ترتیب میزان کاهش توان و SNR برای ۴ مسیر نوری مختلف در شبکه را نشان می‌دهند. در این دو شکل محور افقی نسبت تعداد کانال‌های اشغال شده در شبکه به تعداد کل کانال‌های موجود در همه لینک‌های شبکه را نشان می‌دهد که با گذر زمان و اضافه شدن مسیره‌های نوری جدید در نهایت این نسبت به یک می‌رسد و از آن لحظه به بعد همه درخواست‌ها به علت نبود کانال مسدود می‌شوند. علاوه بر این مسیره‌های نوری در زمان‌های مختلفی ایجاد شده‌اند به طوری که مسیر نوری A در اوایل شبیه‌سازی ایجاد شده و هنوز کمتر از ۴ درصد کانال‌های کل شبکه اشغال شده‌اند. مسیره‌های نوری B، C و D به ترتیب بعد از اشغال شدن ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد کانال‌های کل شبکه ایجاد شده‌اند.



شکل ۷: تغییر توان مسیره‌های نوری نسبت به کانال‌های اشغال شده در هر لحظه به تعداد کل کانال‌های موجود در شبکه

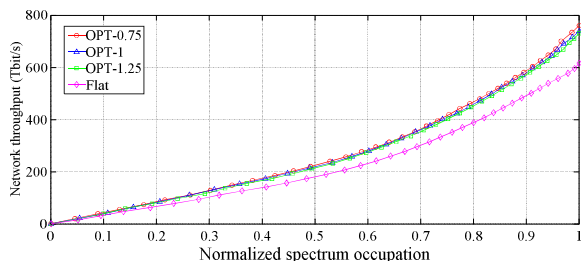


شکل ۱۰: توان مسیره‌های نوری پس از پرشدن همه کانال‌های شبکه

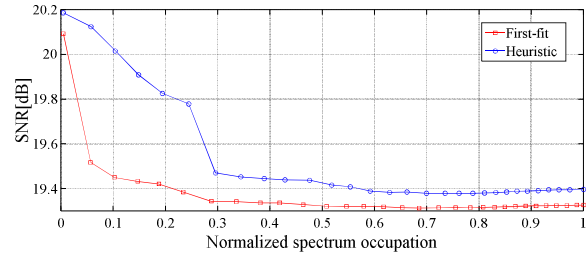


شکل ۱۱: SNR مسیره‌های نوری پس از پرشدن همه کانال‌های شبکه.

شکل ۱۳ تعداد انواع مدولاسیون‌هایی که به مسیره‌های نوری تخصیص داده شده‌است را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود با تخصیص توان بهینه به مسیره‌های نوری تعداد مسیره‌های نوری که از مدولاسیون‌های سطح بالاتر استفاده می‌کنند افزایش یافته‌است. برای مقایسه حالت‌های مختلف روش تخصیص توان بهینه، علاوه بر شکل‌های ۱۱، ۱۲ و ۱۳ باید مسدود شدن درخواست‌ها در هر حالت هم در نظر گرفته شود. در جدول ۳ تعداد درخواست‌های مسدود شده جمع‌آوری شده‌است. در همه سناریوها هیچ درخواستی به علت پایین بودن SNR مسدود نشده‌است. در واقع SNR هیچ مسیره نوری کمتر از ۸/۵ dB به دست نیامده‌است؛ این موضوع را می‌توان در شکل ۱۱ نیز مشاهده کرد. در حالت OPT-0.75 اگرچه گذردهی و میزان استفاده از مدولاسیون‌های سطح بالاتر اندکی بیشتر از دو حالت دیگر است اما تعداد درخواست‌هایی که به علت ایجاد اختلال در مسیره‌های قبلی مسدود شده‌اند ۳۷۳۲ درخواست است که عملکرد مطلوبی برای شبکه نیست. اما با انتخاب ۱/۲۵ dB برای SNR_{margin} به طور قطع این نوع مسدود شدن در شبکه حذف خواهد شد و همچنان بهبود گذردهی شبکه نیز قابل توجه است.



شکل ۱۲: گذردهی شبکه نسبت به کانال‌های اشغال شده در هر لحظه به تعداد کل کانال‌های موجود در شبکه



شکل ۹: مقایسه تغییر SNR یک مسیره نوری نسبت برای دو حالت تخصیص کانال با الگوریتم ابتکاری و روش First-fit

همان‌طور که در شکل ۹ مشخص است در روش First-fit به علت اختصاص کانال‌ها در کنار هم افت SNR با شیب بیشتری نسبت الگوریتم ابتکاری اتفاق می‌افتد که نشان می‌دهد هرچه فاصله کانال‌های مسیره‌های نوری از هم بیشتر باشد اثر غیرخطی کمتری تجربه می‌کنند و در نتیجه افت SNR نیز کمتر خواهد بود که حتی در زمان اشغال شدن تمام کانال‌های شبکه بازم روش First-fit بهتر عمل می‌کند.

در ادامه مجموعه درخواست‌های یکسانی به دو سناریو تخصیص توان بهینه و تخصیص توان یکسان اعمال شده‌است تا تمام کانال‌های شبکه اشغال شوند و پس از اتمام شبیه‌سازی آخرین توان و SNR همه مسیره‌های نوری به ترتیب در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده‌است. در شکل ۱۰ توان مسیره‌های نوری دارای میانگین ۰/۹۶ mW هستند که در مقایسه با توان یکسان ۰/۷۴ mW مربوط به سناریو تخصیص توان یکسان، به گونه‌ای افزایش یافته‌اند تا ظرفیت کل شبکه بیشینه شود. نتیجه تخصیص توان بهینه به مسیره‌های نوری در شکل ۱۱ به خوبی نشان داده شده‌است. در این شکل میانگین و واریانس برای روش تخصیص توان یکسان به ترتیب ۲۱/۷۴ dB و ۸/۲۲ و برای روش تخصیص توان بهینه ۲۳/۵۲ dB و ۱۰/۲۸ است به طوری که میانگین SNR مسیره‌های نوری ۱/۷۸ dB نسبت به روش تخصیص توان یکسان افزایش یافته‌است. بنابراین روش تخصیص توان بهینه در بدترین حالت یعنی اشغال شدن همه کانال‌های شبکه، باز هم نسبت به تخصیص توان یکسان بهتر عمل می‌کند.

با افزایش SNR مسیره‌های نوری امکان تخصیص مدولاسیون‌های سطح بالاتر برای ارسال نرخ داده بیشتر فراهم می‌شود و در نتیجه گذردهی کل شبکه افزایش می‌یابد. شکل ۱۲ گذردهی شبکه را نسبت به تعداد کانال‌های اشغال شده در هر لحظه به تعداد کل کانال‌های شبکه، برای سناریوهای تخصیص توان یکسان و تخصیص توان بهینه با مقادیر مختلف SNR_{margin} نشان می‌دهد. در حالت‌های OPT-0.75، OPT-1 و OPT-1.25 مقدار SNR_{margin} به ترتیب ۰/۷۵، ۱ و ۱/۲۵ دسی‌بل در نظر گرفته شده‌است. در شکل ۱۲ گذردهی نهایی شبکه در سناریوی OPT-1.25 نسبت به تخصیص توان یکسان ۱۳۸/۴ THz افزایش یافته‌است.

پیوست‌ها

برای محاسبه گرادین رابطه (۱۲) ابتدا باید گرادین $n_{p,i}^{NLI}(e^y)$ به‌دست آورده‌شود. رابطه $n_{p,i}^{NLI}(e^y)$ به‌صورت زیر نوشته‌می‌شود.

$$n_{p,i}^{NLI}(e^y) = \sum_{l=1}^{m_i} \sum_{j=1}^N e^{y p_{p,i} + 2y p_{p,j} + \log(N_l) + \log(NLI_{ref}(l_i - n_j l))}$$

$$= \sum_{l=1}^{m_i} \sum_{j=1}^N e^{(a_{i,j}^T)^y + \log(N_l) + \log(NLI_{ref}(l_i - n_j l))}$$

(۱۷)

که در آن $a_{i,j} = e_{p,i} + 2e_{p,j}$ و $e_{p,k}$ برداری به اندازه کل مسیرهای نوری موجود در شبکه است که درایه k ام آن ۱ و سایر درایه‌ها صفر هستند. بنابراین گرادین رابطه (۱۷) به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$\nabla_y n_{p,i}^{NLI}(e^y) = \sum_{l=1}^{m_i} \sum_{j=1}^N T_{a_{i,j}} e^{(a_{i,j}^T)^y + \log(N_l) + \log(NLI_{ref}(l_i - n_j l))}$$

(۱۸)

سپس گرادین $SNR_{p,i}(e^y)$ از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\nabla_y SNR_{p,i}(e^y) = \frac{e_{p,i} e^{y p_{p,i}}}{n_{p,i}^{ASE} + n_{p,i}^{NLI}(e^y)} - \frac{\nabla_y n_{p,i}^{NLI}(e^y)}{(n_{p,i}^{ASE} + n_{p,i}^{NLI}(e^y))^2}$$

(۱۹)

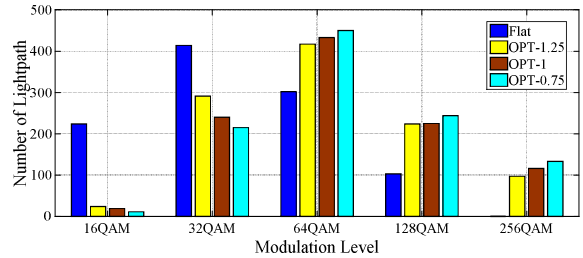
و در نهایت گرادین رابطه (۱۲) برابر است با:

$$\nabla_y C(e^y) = 2 \sum_{i=1}^M \frac{\Gamma \nabla_y SNR_{p,i}(e^y)}{(\Gamma \nabla_y SNR_{p,i}(e^y) + 1) \ln(2)}$$

(۲۰)

مراجع

- [1] E. Hugues-Salas *et al.*, "Next generation optical nodes: The vision of the European research project IDEALIST," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 53, no. 2, pp. 172–181, 2015.
- [2] O. Gerstel, "Elastic Optical Networking: A New Dawn for the Optical Layer," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 50, no. February, p. 12–20, 2012.
- [3] H. Zang, J. P. Jue, and B. Mukherjee, "A review of routing and wavelength assignment approaches for wavelength-routed optical WDM networks," *Opt. networks Mag.*, vol. 1, no. 1, pp. 47–60, 2000.
- [۴] سعید سید طاهری و علی رضا غن‌دلیب، «طراحی و اتانف‌گرهای مبتنی بر بلورهای فوتونی با قابلیت توان‌سازی مناسب برای سامانه‌های مخابرات مخابرات نوری»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۷، شماره ۲، ۱۳۹۶.
- [۵] پرویز امیری، محمود صیفوری، بابک آفرین و آوا هدایتی پور، «طراحی پیش تقویت کننده RGC کم نویز مدار مجتمع CMOS با پهنای باند ۲۰ GHz و بهره ۶۰ dBΩ»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۶، شماره ۲، ۱۳۹۵.
- [6] D. S. Frankel, *Model driven architecture applying MDA*. John Wiley & Sons, 2003.



شکل ۱۳: تعداد مدولاسیون‌های تخصیص داده شده

جدول ۳: تعداد درخواست‌های مسدود شده

سناریو	مسدود به علت ایجاد اختلال در مسیریهای قبلی	مسدود به علت پایین SNR
Flat	0	0
OPT-1.25	0	0
OPT-1	11	0
OPT-0.75	3732	0

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، برای شبکه‌های نوری با لایه کنترل متمرکز الگوریتمی به‌منظور بیشینه‌سازی ظرفیت و استفاده کارآمدتر از منابع محدود شبکه، با در نظر گرفتن اثرهای غیرخطی ارائه شد. اثرهای غیرخطی با مدل نویز گوسی بیان شد و برای محاسبه توان نویز غیرخطی مسیرهای نوری در شبکه‌های پویا ابتدا توان نویز غیرخطی کانال‌ها با استفاده از مدل نویز گوسی در یک گستره محاسبه و به‌عنوان توان نویز غیرخطی مرجع ذخیره شد. مسیرهای نوری که حداقل در یک لینک باهم اشتراک دارند به‌علت اثرهای غیرخطی کانال‌ها برهم باعث ایجاد اختلال در یک‌دیگر می‌شوند به‌طوری‌که یکی از مهم‌ترین عوامل کاهش SNR مسیرهای نوری نویز غیرخطی می‌باشد. تخصیص توان یکتا به هر مسیر نوری با در نظر گرفتن مدل نویز گوسی نیازمند معماری محاسبه مسیر به‌صورت متمرکز است. در این مقاله با توسعه پروتکل PCE برای شبکه‌های متمرکز نوری یک الگوریتم محاسبه مسیر در ساختار PCE سلسله مراتبی ارائه شد که در آن از یک روش ابتکاری برای تخصیص کانال استفاده می‌شود و براساس آن در هر وضعیتی از شبکه بهترین کانال از نظر پایین بودن اثرهای غیرخطی انتخاب می‌شود. تخصیص توان به مسیرهای نوری به‌صورت پویا و با هدف بیشینه‌سازی ظرفیت شبکه در هر لحظه انجام می‌شود و توان لحظه‌ای مسیرهای نوری با توسعه پروتکل PCEP به فرستنده-گیرنده‌های نوری گره‌ها اعلام می‌شود. نتایج شبیه‌سازی با حالتی که به همه مسیرهای نوری یک توان یکسان اختصاص داده می‌شود مقایسه شد و به‌طور متوسط با افزایش ۱/۸۷ dB در SNR مسیرهای نوری ضمن امکان استفاده بیشتر از مدولاسیون‌های سطح بالاتر و در نتیجه کاهش تعداد کانال‌های نوری تخصیص داده شده به درخواست‌ها، گذردهی شبکه ۱۳۸/۴ THz افزایش پیدا کرد.

- [13] S. J. Savory, "Congestion aware routing in nonlinear elastic optical networks," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 26, no. 10, pp. 1057–1060, 2014.
- [14] A. Alvarado, D. J. Ives, S. J. Savory, and P. Bayvel, "On the impact of optimal modulation and FEC overhead on future optical networks," *J. Light. Technol.*, vol. 34, no. 9, pp. 2339–2352, 2016.
- [15] I. Roberts, J. M. Kahn, and D. Boertjes, "Convex channel power optimization in nonlinear WDM systems using Gaussian noise model," *J. Light. Technol.*, vol. 34, no. 13, pp. 3212–3222, 2016.
- [16] M. Kanj, E. Le Rouzic, J. Meuric, B. Cousin, and D. Amar, "Optical power control in GMPLS control plane," *J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 8, no. 8, pp. 553–568, 2016.
- [17] F. Paolucci, F. Cugini, A. Giorgetti, N. Sambo, and P. Castoldi, "A survey on the path computation element (PCE) architecture," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 15, no. 4, pp. 1819–1841, 2013.
- [18] R. Munoz, R. Casellas, R. Martínez, and R. Vilalta, "PCE: What is it, how does it work and what are its limitations?," *J. Light. Technol.*, vol. 32, no. 4, pp. 528–543, 2014.
- [19] F. Agraz Bujan, "Advanced routing mechanisms in ASON/GMPLS networks," 2012.
- [7] A. Carena, V. Curri, G. Bosco, P. Poggiolini, and F. Forghieri, "Modeling of the impact of nonlinear propagation effects in uncompensated optical coherent transmission links," *J. Light. Technol.*, vol. 30, no. 10, pp. 1524–1539, 2012.
- [8] P. Poggiolini and I. Paper, "The GN Model of Non-Linear Propagation in Uncompensated Coherent Optical Systems," *J. Light. Technol.*, vol. 30, no. 24, pp. 3857–3879, 2012.
- [9] P. Poggiolini, G. Bosco, A. Carena, V. Curri, Y. Jiang, and F. Forghieri, "The GN-model of fiber non-linear propagation and its applications," *J. Light. Technol.*, vol. 32, no. 4, pp. 694–721, 2014.
- [10] X. Chen and W. Shieh, "Closed-form expressions for nonlinear transmission performance of densely spaced coherent optical OFDM systems," *Opt. Express*, vol. 18, no. 18, pp. 19039–19054, 2010.
- [11] P. Johannisson and M. Karlsson, "Perturbation analysis of nonlinear propagation in a strongly dispersive optical communication system," *J. Light. Technol.*, vol. 31, no. 8, pp. 1273–1282, 2013.
- [12] D. J. Ives, P. Bayvel, and S. J. Savory, "Adapting transmitter power and modulation format to improve optical network performance utilizing the gaussian noise model of nonlinear impairments," *J. Light. Technol.*, vol. 32, no. 21, pp. 3485–3494, 2014.

زیرنویس‌ها

- ¹ Wavelength Division Multiplexing
- ² Fixed grid
- ³ Span
- ⁴ Routing and Wavelength assignment
- ⁵ Generalized Multi-Protocol Label Switching
- ⁶ Quadrature Amplitude Modulation
- ⁷ Orthogonal Frequency Division Multiplexing
- ⁸ Open Shortest Path First
- ⁹ Intermediate system to intermediate system
- ¹⁰ Path Computation Element
- ¹¹ Four Wave Mixing
- ¹² Self-Phase Modulation
- ¹³ Cross-Phase Modulation
- ¹⁴ Link Management Protocols
- ¹⁵ Resource Reservation Protocol-Traffic Engineering
- ¹⁶ Traffic Engineering Database
- ¹⁷ Path Computation Client
- ¹⁸ Label-Switched Path Data Base
- ¹⁹ Path Continuous Unoccupied Channels
- ²⁰ Path Occupied Channels