فصلنامه علمی تخصصی ایده های نو در علوم، مهندسی و فناوری ، دوره ۶، شماره ۱، بهار ۱۴۰۱، ص ۱۹-۷
ISSN: 2588-3984
http://www.Tajournals.com

عنوان مقاله: شبیه‌سازی و تحلیل اثر پذیری پارامترهای تقویت کننده نوری هیبریدی (HOA) از برخی پارامترهای هرکدام از تقویت کننده‌های رامان و EDFA.
دوره ۶ / شماره ۱ / بهار ۱۴۰۱/ص ۱۹- ۷

شبیه‌سازی و تحلیل اثر پذیری پارامترهای تقویت‌کننده نوری هیبریدی (HOA) از برخی پارامترهای هرکدام از تقویت‌کننده‌های رامان و EDFA.

عطیه جدی‌نیا*[۱]، عباس قدیمی[۲]

[۱] دانشجوی کارشناس ارشد، رشتهٔ افزاره‌های میکرو و نانوالکترونیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد رشت، استان گیلان، ایران.

[۲] استادیار گروه برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان، استان گیلان، ایران.

* نویسنده مسئول: عطیه جدی‌نیا

چکیده

با عبور پالس‌های نوری از فیبر نوری انرژی آنها در بیشتر از یک مسافت مشخص، که تعداد فوتون‌ها در پالس‌ها خیلی کوچکتر از آن باشند که رد یابی شوند، تحلیل می‌رود. پالس‌های نوری در فیبرها توسط تقویت‌کننده‌های فیبر نوری تقویت می‌شوند. در این پایان نامه قسمت‌های تشکیل دهنده تقویت‌کننده ترکیبی شامل تقویت‌کننده آلاییده به اربیوم و تقویت‌کننده رامان تک دمشی و ... با استفاده از نرم افزار به طور دقیق شبیه‌سازی شده و با در نظر گرفتن متغیرهای توان دمش تقویت‌کننده رامان و دوپینگ تقویت‌کننده آلاییده به اربیوم بهرهٔ کل تقویت‌کننده ترکیبی توسط روش‌های بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک و اجتماع ذرات بهینه شده است. فرآیند شبیه‌سازی و بهینه‌سازی با استفاده از نرم افزار MATLAB انجام شده است. این نتایج نشان می‌دهد که در توان‌های بالای دمش، بهره و غلظت اربیوم افزایش می‌یابد. عملکرد بهینه سیستم پیشنهادی و عملکرد ۰/۷ دسیبلی الگوریتم ازدحام ذرات نسبت به الگوریتم ژنتیک را نیز نشان می‌دهد .

واژگان کلیدی: تقویت‌کننده ترکیبی فیبر نوری، تقویت‌کننده رامان، تقویت‌کننده EDFA، الگوریتم ژنتیک، الگوریتم PSO.

مقدمه

مخابرات نوری یکی از جدیدترین روش‌های ارسال اطلاعات است که عمر آن به بیش از ۲۰ سال میرسد. در سیستم‌های مخابرات نوری ارسال اطلاعات با پالس‌های نوری، در فیبر نوری انجام می شود. برای سرعت بیشتر انتقال اطلاعات در این سیستم‌های نوری، سعی بر این است که همه اجزای این سیستم‌ها نوری باشد. با توجه به تلفات فیبرهای نوری یکی از وسایلی که وجود آنها در شبکه‌های طویل فیبر نوری ضروری است، تقویت کننده‌های نوری است. در این پژوهش به شبیه‌سازی و ارزیابی عملکرد تقویت‌کننده نوری هیبریدی پرداخته شده است. هدف از این پژوهش، حل مشکلات موجود در مباحث مربوط به تقویت‌کننده‌های نوری هیبریدی است. به این منظور، چگونگی طراحی و شبیه‌سازی تقویت‌کننده ترکیبی(HOA) و همچنین تغییرات در پارامترهای تقویت‌کننده ترکیبی شبیه‌سازی شده با تغییر برخی از پارامترهای داخلی و خارجی، مورد بررسی قرار گرفته است تا با شبیه‌سازی این ترکیب هیبریدی و اعمال تغییرات در برخی پارامترهای هر کدام از عناصر این ترکیب، حالت بهینه و قابل قبولی از خروجی تقویت‌کنندهٔ هیبریدی به دست آید.

پیشینهٔ پژوهش

برخی از پژوهش‌های صورت گرفته در این حوزه عبارتنداز:

در سال ۱۹۹۸ آقای ماسودا یک HOA (تقویت‌کننده نوری ترکیبی) با گین پهنای باند ۶۵ نانومتر ارائه داد. در این مورد او از یک شمای جدید پمپاژ و اکولایزر گین و تقویت‌کننده رامان با پمپ عقب گرد استفاده کرد [۳]؛ در سال ۱۹۹۹ آقای کاوای توانست ۱۴*۲,۵Gbps سیگنال WDM را به فاصلهٔ ۹۰۰ کیلومتر با استفاده از تقویت‌کننده هیبریدی با بهرهٔ تخت ارسال کند که در این تقویت‌کننده هیبریدی نتایج بهتری نسبت به تقویت‌کننده EDFA مشاهده شد [۴]؛ در سال ۲۰۰۱ آقای توماس یک HOA با ترکیب TDFA و تقویت‌کننده رامان پیوسته ارائه داد که در آن گین بیش از ۲۰ دسیبل و عدد نویز بین ۷ و ۸ دسیبل به دست آمد [۵]؛ در سال ۲۰۰۴ آقایان زیمرمان و اشپیک مان بر روی تختی‌سازی بهره کار کردند که با آلایش‌های مختلف و فیلترهای اکولایزر گین به این مهم دست یافتند [۶]؛ در سال ۲۰۰۵ آقای سئو یک تقویت‌کننده ترکیبی پهن باند ۱۰۵ نانومتر ارائه داد که در آن کانال انتقال سیلیکا و واسطهٔ اول تقویت‌کننده ترکیبی با پوشش اربیوم و هسته ژرمانیوم و واسطهٔ دوم ترکیب EDFA و فیبر جبران‌کننده پاشندگی بود [۷]؛ در سال ۲۰۰۸ آقای تیواری برای بررسی بهره و عدد نویز ترکیب تقویت‌کننده رامان و EDFA پیشنهاد داد. او نشان داد که استفاده از یک پمپاژ اضافه در بهره بسیار موثر است [۸]؛ در سال ۲۰۰۹ مارتینی نشان می‌دهد که در ترکیب رامان – EDFA با دو لیزر پمپ در طول موج‌های ۱۴۲۵ و ۱۴۶۸,۴ نانومتر و توان ۲۹۶,۳ و ۶۱,۳ میلی وات بهترین نتیجه‌ها را خواهیم گرفت [۹]؛ در سال ۲۰۱۱ یوآن به بهینه‌سازی تقویت‌کننده ترکیبی آلاییده به اربیوم – رامان از طریق تجزیه و تحلیل تاثیر برخی پارامترهای فیزیکی روی عملکرد سیستم پرداخت[۱۰]؛ در سال ۲۰۱۴ سینگ و کالر به بهینه‌سازی بهره تقویت‌کننده ترکیبی آلاییده به اربیوم – رامان از طریق استفاده از روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک پرداختند [۱۱]؛ در سال ۲۰۱۵ سینگ و کالر به بهینه‌سازی عملکرد و کارآیی تقویت‌کننده ترکیبی آلاییده به اربیوم – رامان از طریق استفاده از روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک پرداختند [۱۲].

مبانی نظری

در کنار تلاش برای استفاده از تار نوری برای ارسال سیگنال‌های مخابراتی، مغزی کوچک تار نوری کاربردهای فراوانی همچون حسگرهای نوری، تقویت‌کننده‌ها و لیزرهای تار نوری را به ذهن می‌آورد.

کاربرد تقویت‌کننده‌های تار نوری، مهمترین نقش را در گسترش نسل پنجم مخابرات نوری داشته است. با ساخت لیزر و دستیابی به اولین تارهای نوری کم تضعیف، مخابرات نوری و استفاده از نور برای انتقال اطلاعات، با سرعت چشمگیری گسترش یافت.

استفاده از خواص تابشی عنصرهای کمیاب خاک در پذیرنده‌های شیشه‌ای از زمان اختراع لیزر مطرح شده است. به علت ویژگی‌های خاص فیزیکی، این عنصرها قادر هستند که انرژی فوتون‌های ورودی را جذب نموده و این انرژی را به صورت فوتون‌های

نوری در طول موج‌های متفاوتی آزاد نمایند. از این ویژگی میتوان برای تقویت سیگنال در تارهای نوری استفاده نمود. بدین صورت که می‌توان با دمش انرژی نوری به یک محیط آلاییده به عنصرهای کمیاب خاک، محیط را به تابش در طول موج سیگنال ورودی وادار نمود، که این امر منجر به تقویت سیگنال خواهد شد.

تقویت‌کننده‌های تار نوری آلاییده به اربیوم، به دلیل تطبیق کامل با تار نوری معمولی، پهنای باند زیاد، بهره بالا، عدد نویز کم، قدرت خروجی قابل ملاحظه، راندمان و قابلیت اطمینان بالا، قیمت، حجم و وزن کم، امروزه یکی از افزاره‌های اصلی سامانه‌ها و شبکه‌های مخابرات نوری امروزی هستند .

با توجه به ناصاف بودن طیف بهره تقویت‌کننده تار نوری آلاییده به اربیوم، تلاش وسیعی برای صاف کردن این طیف خصوصا برای کاربرد در سامانه‌های WDM شده است. تقویت‌کننده رامان براساس پراش برانگیخته رامان هم به تنهایی قابل استفاده است و هم می‌تواند با استفاده از چند دمش (پمپ) مختلف باعث صاف شدن بهره تقویت‌کننده آلاییده به اربیوم شود.

با توجه به اهمیت فراوان تقویت‌کننده‌های تار نوری در شبکه‌های مخابرات نوری و دیگر کاربردهای بیان شده برای آن، لازم است ابتدا خصوصیات آن‌ها، عوامل موثر و نحوه تاثیرگذاری این عوامل بر خصوصیات این تقویت‌کننده‌ها مورد بررسی قرار گیرند. بنابراین مدل‌سازی این تقویت‌کننده‌ها به منظور تحلیل پارامترهای موثر و نیز نحوه تاثیر این پارامترها در بهره، نویز و قدرت خروجی تقویت‌کننده اهمیت ویژه دارد. برای صاف کردن طیف بهره EDFA از تقویت‌کننده تاری رامان استفاده شده است. برای حصول بهترین نتیجه، از روش الگوریتم ژنتیک و اجتماع ذرات برای بهینه کردن طول موج و قدرت دمش با هدف صاف کردن طیف بهره EDFA استفاده شده است.

تبادل انرژی بین ترازهای عنصرهای کمیاب خاک

انرژی اتم‌های برانگیخته شده در هر یک از ترازهای یک عنصر اربیوم به صورت‌های مختلفی آزاد و یا بین یون‌های موجود در پذیرنده رد و بدل می‌شود، که می‌توان به آزاد شدن انرژی به صورت تابشی و غیرتابشی و انتقال انرژی بین یون‌های مجاور اشاره کرد.

۱- تابش برانگیخته تابشی و غیرتابشی

در هنگام تغییر تراز الکترون‌های برانگیخته یک ماده، انرژی به یکی از دو صورت تابشی و غیرتابشی آزاد می‌شود. در آزادسازی انرژی الکترون‌ها به صورت کاهش تابشی، فوتون نوری و برعکس در کاهش غیرتابشی، انرژی به صورت گرما، صوتی و ... آزاد خواهد شد .

با توجه به این که فقط گذار لیزر بین ترازهای $^4I_{13/2}\rightarrow{}^4I_{15/2}$ به صورت صد در صد تابشی بوده و در سایر ترازهای انرژی، گذار لیزر غیرتابشی است، برای مدل کردن نحوه تقویت سیگنال در تار آلاییده به اربیوم عموماً از مدلی با دو یا سه تراز انرژی، که مدلی نزدیک به واقعیت است، استفاده می‌شود.

۲- جذب حالت برانگیخته

انرژی سیگنال و یا دمش ورودی به یک محیط لیزر، ممکن است توسط اتم‌هایی که قبلاً برانگیخته شده‌اند جذب و منجر به پدیده جذب حالت برانگیخته دمش یا سیگنال شوند. در اثر پدیده تابش خود به خودی تقویت شده دمش، انرژی دمش که دارای فرکانس ν_p است به جای این که جذب اتم‌های تراز پایه عنصرهای کمیاب خاک شود، به علت وجود تراز سومی که فاصله انرژی آن با تراز برانگیخته ($\Delta E=E_3-E_2$)، خیلی نزدیک به انرژی فوتون‌های دمش ($h\nu_p$) است، جذب اتم‌های تراز برانگیخته شده و باعث می‌شود که اتم‌های این تراز به تراز بالاتری منتقل شوند. در اثر پدیده تابش خود به خودی تقویت شده سیگنال نیز به طور مشابه، انرژی سیگنال نوری $h\nu_s$ به علت وجود تراز سوم، جذب تراز شبه پایدار شده و اتم‌های این تراز را به تراز سوم منتقل می‌کند. واضح است که در اثر این دو نوع جذب قدرت دمش و سیگنال، بهره تقویت‌کننده و ضریب تبدیل توان کاهش می‌یابد.

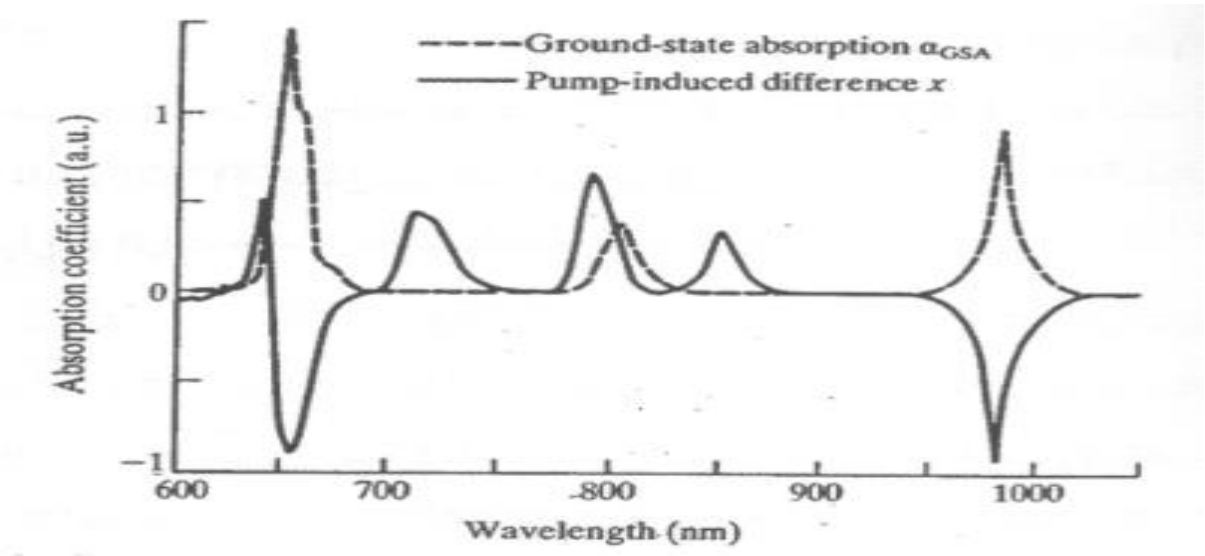
فصلنامه علمی تخصصی ایده های نو در علوم، مهندسی و فناوری ، دوره ۶، شماره ۱، بهار ۱۴۰۱، ص ۱۹-۷
ISSN: 2588-3984
http://www.Tajournals.com

برای بیان توانایی جذب انرژی به وسیله الکترون‌های تراز پایه، به عنوان یک معیار، سطح مقطع جذب حالت زمین و سطح مقطع جذب حالت برانگیخته را به عنوان معیاری برای جذب انرژی توسط الکترون‌های برانگیخته قبلی و $\delta=\sigma_{ESA}/\sigma_{GSA}$ را برای مقایسه این دو سطح مقطع به کار می‌برند.

α_{GSA} و α_{ESA} ضریب‌های انتقال انرژی عبوری، به ترتیب در حالت قطع یا وصل بودن توان دمش است. یک مقدار بزرگ مثبت برای x نشان دهنده زیاد بودن α_{ESA} و در نتیجه بزرگی سطح مقطع جذب حالت برانگیخته است، در حالی که از مقدار $x= -\alpha_{GSA}$ می‌توان نتیجه گرفت که α_{ESA} و در نتیجه سطح مقطع جذب حالت برانگیخته صفر است. به علت مثبت بودن مقدار x در شکل (۲-۱) نتیجه می‌شود که امکان ایجاد جذب حالت برانگیخته در طول موج‌های ۶۳۰، ۷۱۵، ۷۹۰ و ۸۵۰ نانومتر وجود دارد، در حالی که در طول موج ۹۸۰ نانومتر پدیده جذب حالت برانگیخته روی نمی‌دهد.

یکی از طول موج‌های مناسب در EDFAها، طول موج ۹۸۰ نانومتر است. امکان وقوع پدیده جذب حالت برانگیخته در این طول موج وجود دارد ولی با توجه به شکل و مقدار $x= -\alpha_{GSA}$ از شکل (۲-۱)، مشخص می‌شود که در این طول موج به هیچ وجه جذب حالت برانگیخته پدید نمی‌آید. به علت کوتاهی فوق العاده طول عمر اتم در تراز $^4I_{11/2}$، تجمع اتمی این تراز به سرعت و به صورت غیرتابشی به تراز $^4I_{13/2}$ منتقل می‌شود و چون تقریباً هیچ اتمی در تراز باقی نمی‌ماند که دوباره برانگیخته شود، پدیده جذب حالت برانگیخته روی نخواهد داد.

به هر حال پدیده جذب حالت برانگیخته باعث تغییر تجمع اتمی ترازهای انرژی می‌شود و در صورت ایجاد این پدیده، به علت این که تعدادی از الکترون‌ها در تراز بالاتر انرژی قرار می‌گیرند، به کار بردن محیطی با سه تراز انرژی برای مدل‌سازی تقویت نوری مناسب نیست و باید از مدلی با حداقل چهار تراز انرژی استفاده شود، یا تاثیر این پدیده به صورت تغییر پارامترهای اساسی محیط در مدل سه ترازی اعمال شود.



شکل (۲-۱): منحنی α_{GSA} و $x= \alpha_{ESA}-\alpha_{GSA}$ در شیشه آلاییده به اربیوم.

جذب غیر مستقیم انرژی

وقتی غلظت یون‌های کمیاب خاک در یک پذیرنده به مقدار کافی کم باشد، فاصله بین این یون‌ها در شبکه کریستالی پذیرنده، زیاد خواهد بود که این فاصله زیاد از تاثیر متقابل یون‌ها بر هم جلوگیری می‌کند. در این حالت انرژی یون‌ها به صورت تابشی یا

غیرتابشی آزاد می‌شود. اگر غلظت یون‌های کمیاب خاک از یک مقدار آستانه بیشتر شود، فاصله بین یون‌ها کم شده، هر گونه تزویج بین یونی امکان پذیر می‌شود. در این حالت، به علت فاصله کم یون‌ها از هم، انرژی یون‌ها از طریق القای انرژی به یون‌های مجاور، منتقل شده و خواص تابشی یا خواص لیزینگ محیط را کم می‌کند.

پدیده انتقال انرژی بین یون‌ها در پذیرنده‌های مختلف، به صورت‌های متفاوتی صورت می‌پذیرد. در تقویت‌کننده‌های تار نوری که در آن‌ها از ترکیب عنصرهای فعال، مانند Er-Tm، Er-Ho یا Er-Yb استفاده نشده و تنها عنصر فعال موجود در پذیرنده اربیوم است، امکان ایجاد انتقال انرژی با همکاری فقط به صورت واهلش متقابل و تبدیل به بالا با همکاری وجود دارد.

پدیده واهلش متقابل که در اثر آن، یون گیرنده با جذب انرژی از یون مجاور به تراز بالاتری منتقل می‌شود. اگر فاصله انرژی یون دهنده و گیرنده یکسان فرض شود، ممکن است بین دو یون حالت تشدید ایجاد شود. در مواردی حتی ممکن است انرژی دو فوتون از یون دهنده جذب یون گیرنده شده و آن را به تراز انرژی بالاتری با فاصله $۲hv$ منتقل کند. اگر یون‌های دهنده و گیرنده از یک جنس باشند این پدیده به نام خودخفگی نیز شناخته می‌شود. پدیده تبدیل به بالا با همکاری که در اثر این پدیده، یون گیرنده‌ای که در حالت برانگیخته قرار دارد با جذب انرژی hv از یون دهنده به تراز انرژی بالاتری می‌رود و پس از برگشت به یک تراز میانی، یک فوتون آزاد می‌کند. تفاوت عمده بین پدیده‌های جذب حالت برانگیخته و انتقال به بالا با همکاری این است که پدیده جذب حالت برانگیخته در یک یون و در اثر جذب انرژی دمش ایجاد می‌شود، در حالی که پدیده تبدیل به بالا با همکاری در اثر انتقال انرژی بین دو یون مجزا اتفاق می‌افتد.

دو پدیده واهلش متقابل و تبدیل به بالا با همکاری که امکان ایجاد آن در تقویت‌کننده‌های تار نوری وجود دارد را می‌توان به صورت تاثیر بر زمان دوام اتم در تراز $^4I_{13/2}$ کاهش طول عمر نوردهی محیط مدل نمود [۱۵ و ۱۶]. به هر حال این پدیده‌ها به علت تاثیر گذاری بر خواص تابشی و لیزینگ محیط، باعث اتلاف انرژی دمش شده و توان لازم برای شفافیت یا رسیدن به بهره صفر در تقویت‌کننده را افزایش می‌دهد. هم چنین این پدیده ضمن کاهش بازده عملیات دمش، ضریب بهره را نیز کاهش خواهد داد.

تنها راه مقابله با پدیده انتقال انرژی با همکاری محدود ساختن غلظت اربیوم است. یکی از نتایج اعمال این محدودیت عدم امکان کاهش طول EDFA به مقدار دلخواه است.

مدل ریاضی EDFA

در این قسمت، روش مدل‌سازی تقویت نور در تارهای آلاییده به اربیوم بررسی می‌شود. تار نوری آلاییده به اربیوم یک موجبر تک مد برای سیگنال نوری است که در آن از خواص محیط‌های لیزری استفاده شده است، بنابراین برای مدل‌سازی این گونه تقویت‌کننده‌ها اطلاعاتی در مورد اصول پایه الکترومغناطیس، مکانیک کوانتوم، و به طور اساسی تر، فیزیک لیزر لازم است. در معادله‌هایی که برای مدل‌سازی تقویت نوری در EDFA با استفاده از مدلی با سه تراز انرژی به کار می‌رود، جذب حالت برانگیخته، که در آن یک اتم برانگیخته شده می‌تواند با جذب انرژی، مجددا به ترازهای بالاتری برانگیخته شود، در نظر گرفته نشده است. در صورت تاثیر جذب حالت برانگیخته مشخصه‌های تقویت‌کننده، توان دمش جذب ترازهای بالاتر انرژی شده و باید از مدلی با حداقل چهار تراز انرژی استفاده نمود. با توجه به مطالب قبل، به طور ساده می‌توان عملکرد تارهای آلاییده به اربیوم را در اثر عمل جذب و تابش فوتون در یک سامانه لیزری با دو تراز انرژی (دمش دو ترازی با طول موج ۱۴۸۰ نانومتر) دانست.

از جمله پارامترهای مهم درطراحی تقویت‌کننده‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱- بهره و طول بهینه یک تقویت‌کننده تار نوری

به ازای یک توان دمش مشخص، برای داشتن بیشینه بهره، طول تار نوری باید به قدری زیاد باشد که توان دمش با مقدار ذاتی آستانه دمش برابر شود. طول بهینه طولی است که بهره سیگنال کوچک تقویت‌کننده بیشینه می‌شود. طول بهینه به وسیله بیشینه بهره سیگنال در حضور تابش خود به خودی تقویت شده پیش رونده و پس رونده که تابعی از طول موج است، مشخص می‌شود.

۲- اشباع بهره سیگنال و طیف بهره سیگنال کوچک

بهره تقویت‌کننده با افزایش توان سیگنال اشباع می‌شود. با افزایش توان سیگنال و عبور از حالت سیگنال کوچک، بهره کاهش می‌یابد، زیرا توان دمش نمی تواند به سرعتی که سیگنال وارونگی جمعیت را از بین می‌برد، آن را تکمیل کند.

بهره سیگنال کوچک، یعنی توان خروجی که بهره از مقدار سیگنال کوچکش به اندازه ۳ دسی بل کاهش می‌یابد، با توان دمش افزایش می‌یابد، که یکی از مزیت‌های تقویت‌کننده تار نوری آلاییده به اربیوم است.

تقویت‌کننده تاری رامان

همان طور که پیش از این مطرح شد، یکی از مزایای بی نظیر تقویت‌کننده‌های تار نوری آلاییده به اربیوم عرض باند وسیع آن است. این عرض باند صاف نیست که در سامانه چند کاناله WDM مشکل‌زا خواهد بود. در عمل با استفاده از فیلترهای صاف‌کننده بهره، جابجایی طول موج کانال‌ها برای رسیدن به بهره تقریبا یکنواخت در پیونده نوری و استفاده از تقویت‌کننده تاری رامان طیف بهره را صاف می‌کنند. تقویت‌کننده تار رامان که طیف بهره آن قابل کنترل است، به دلیل تطابق با تار نوری و تقویت‌کننده تار نوری، مورد استقبال قرار گرفته و به صورت تجاری در دسترس است.

زمانی که یک میدان نوری قوی به مولکولی برخورد می‌کند، الکترون‌های مقید با فرکانس میدان نوری به نوسان می‌افتند. ممان دو قطبی نوسانگر به وجود آمده، باعث تولید تابش نوری با فرکانسی یکسان با فرکانس نور تابیده شده اما جا به جایی در فاز به سوی ضریب شکست محیط می‌شود. به طور هم زمان، خود ساختار مولکول نیز در فرکانس‌های مختلف ارتعاشات مولکولی به نوسان می‌افتند. بنابراین پرتوهای ناشی از ممان دوقطبی نوسانگر القا شده شامل جمع و تفریق تابش‌های نوری با فرکانس ارتعاش مولکولی است. این ارتعاشات مولکولی به نوبه خود باعث ایجاد تغییر در نور پراکنده شده رامان می‌شوند، که این پدیده همان ایجاد بهره رامان در میدان‌های تابیده شده در فرکانس‌های اطراف فرکانس نوری ممان دو قطبی نوسانگرهای القایی است. به بیان ساده تر می‌توان گفت بهره رامان از انتقال توان از یک پرتو نوری دیگر که در فرکانس پایین تر یا بالاتری قرار دارد نتیجه می‌شود. این انتقال انرژی را می‌توان کار فونون‌های نوری دانست.

طیف بهره رامان با توجه به طول موج دمش تغییر محل می‌دهد و مقدار بیشینه بهره با نسبت عکس به طول موج دمش بستگی دارد.

طیف تقویت رامان را با هر دمشی، در هر طول موجی و در هر نوع تار نوری می‌توان ایجاد کرد. این انعطاف پذیری در مورد طیف تقویت رامان موجب می‌شود که بتوان طیف بهره رامان را با ترکیب تعدادی دمش در طول موج‌های متفاوت، به شکل دلخواه در آورد.

تقویت‌کننده ترکیبی اربیوم - رامان

تقویت‌کننده ترکیبی به تقویت‌کننده‌هایی گفته می‌شود که از ترکیب دو یا چند تقویت‌کننده نوری متفاوت ساخته شده باشند. در چند دهه اخیر تقویت‌کننده‌های نوری مختلفی کشف شده اند که هر کدام دارای مشخصات منحصر به فردی از قبیل بالایی بهره، یکنواختی طیف تقویت و پهنای باند وسیع تقویت هستند. با توجه به مطلوبیت عملکرد هر کدام از تقویت‌کننده‌ها در باند فرکانسی خاص، این فکر به ذهن محققان رسید که برای ساخت تقویت‌کننده‌ای که در پهنای باند بسیار وسیع، خواص عالی داشته باشد، از ترکیب تقویت‌کننده‌های نوری استفاده کنند. تقویت‌کننده‌های ترکیبی را می‌توان از ترکیب ساختارهای متفاوتی از یک نوع تقویت‌کننده نیز ساخت، مانند تقویت‌کننده‌هایی که از ترکیب تقویت‌کننده‌های آلاییده به اربیوم باند C و L ساخته می‌شوند. مهم ترین تقویت‌کننده ترکیبی، تقویت‌کننده تار نوری ترکیبی آلاییده به اربیوم و رامان است.

اساس کار تقویت‌کننده تار نوری ترکیبی آلاییده به اربیوم- رامان را می‌توان در این نکته دانست که بهره تقویت‌کننده تار نوری آلاییده اربیوم در بازه ۱۶۰۰-۱۵۰۰ نانومتر سیری نزولی دارد در حالی که تقویت‌کننده رامان رفتاری عکس دارد. این مساله باعث می‌شود که ترکیب این دو تقویت‌کننده در بازه طول موجی بیان شده طیف نسبتا یکنواختی داشته باشد.

روش‌های بهینه‌سازی

بهینه‌سازی یک روش ریاضی است که توسط آن ایده و ابداع خطور کرده به ذهن را بهبود می‌بخشد. تا جایی که امکان آن باشد که اطلاعات را به صورت الکترونیک به کامپیوتر بدهیم می‌توان کامپیوتر را وسیله‌ای کامل برای اجرای بهینه‌سازی دانست. یک روش بهینه‌سازی خوب روشی است که بتواند به این سوال جواب دهد که آیا جواب بدست آمده برای یک مسیله بهترین جواب است؟ و اگر بهترین جواب نیست بهترین راه حل کدام است.

۱- الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک یک تکنیک جستجو و بهینه‌سازی است که بر اساس ژن‌شناسی و انتخاب طبیعی عمل می‌کند. انتخاب طبیعی فرآیندی است که طی آن گونه‌هایی که نسبت به بقیه گونه‌ها سازگاری بیشتری با محیط دارند احتمال بقای بیشتری خواهند داشت.

۲ - روش اجتماع ذرات

بهینه‌سازی اجتماع ذرات یک فن جستجوی سراسری است. در یک فضای n بعدی از متغیرها، هر دسته از n پارامتر یک تابع را می‌توان به صورت یک نقطه منفرد در نظر گرفت. بنابراین می‌توان مقادیر خروجی تابع هزینه و یا همان هزینه‌ها را به نقطه‌هایی در فضای چند بعدی نسبت داد. این نقطه‌ها در بهینه‌سازی اجتماع ذرات به ذرات معروف هستند. با در نظر گرفتن تغییراتی که در طی گذشت زمان در محل این ذرات رخ می‌دهد می‌توان فرض کرد که هر کدام از این ذرات در حال حرکت در فضا هستند و میتوان به هر کدام از ذرات یک سرعت نسبت داد. علاوه بر این در این روش جمعیتی از ذرات را اجتماع می‌نامند ذرات در فضای چند بعدی پخش می‌شوند و این قابلیت را دارند که براساس هزینه‌هایشان در جهت رسیدن به بهترین جواب و یا ذره از یکدیگر یاد بگیرند.

یافته های پژوهش

شبیه‌سازی و تحلیل اثر پذیری پارامترهای تقویت‌کننده نوری هیبریدی (HOA): در این بخش، با تکیه بر مبانی نظری پس از بررسی طرح پیشنهادی مقالهٔ مرجع، تغییراتی در جهت بهبود تقویت‌کننده‌های نوری EDFA ارایه داده خواهد شد.

طرح پیشنهادی مقاله مرجع برای بهبود بهره تخت:

در این مقاله یک تقویت‌کننده هیبریدی در باند C شبیه‌سازی و بهینه‌سازی شده است. فیبر انتقال ۶۰ متر شامل فیبر تک مد ۳۰ متر و فیبر با پاشندگی معکوس ۳۰ متر است که توسط یک واحد پمپ رامان رو به عقب پمپ می‌شود. این پمپ شامل پمپ‌های ۱۴۴۰ و ۱۴۵۰ نانومتر و توان پمپ ۶۰ و ۱۲۰ میلی وات است و نیز یک EDFA به طول ۸ متر که توسط لیزر دیود در ۹۸۰ نانومتر و ۱۲ میلی وات به صورت رو به جلو پمپ می‌شود. پمپ رو به عقب رامان و رو به جلوی EDFA بهره تبدیل و عدد نویز بهتری را به دست می‌دهد. در سیستم پیشنهادی مقاله از RDF (فیبر با پاشندگی معکوس) به جای DCF (فیبر جبران‌ساز پاشندگی) استفاده شده است. در رامان بر اساس DCF بهره توان پمپ بلا استفاده می‌ماند و تلف می‌شود. این می‌تواند به اثرات غیر خطی قوی در DCF منتهی شود. در این تحقیق بهره تقریبا تخت ۲۱ دسیبل برای رنج طول موج ۱۵۶۵-۱۵۳۰ نانومتر و عدد نویز کمتر از ۷ دسیبل به دست آمده است.

در ادامه نحوه عملکرد تقویت‌کننده‌های آلاییده به اربیوم، رامان، ترکیبی رامان-آلاییده به اربیوم شبیه‌سازی شده و با استفاده از روش مناسب بهینه‌سازی، طیف بهره تقویت‌کننده ترکیبی افزایش می‌یابد.

شبیه‌سازی تقویت‌کننده تار نوری آلاییده به اربیوم:

برای شبیه‌سازی عملکرد تقویت‌کننده تار نوری آلاییده به اربیوم به یک مدل کامپیوتری سریع و کارا احتیاج است. برای شبیه‌سازی تقویت‌کننده تار نوری آلاییده به اربیوم مدل‌های مختلفی وجود دارد. در این تحقیق از مدل گایلز که در بیشتر موارد استفاده می‌شود، برای شبیه‌سازی تقویت‌کننده تار نوری آلاییده به اربیوم استفاده خواهد شد. با صرف نظر از تاثیرات ترازهای بالاتر می‌توان

یک مدل پهن شده به صورت همگن و دو ترازی برای یون‌های اربیوم در نظر گرفت. در این مدل تراز زمین $I_{15/2}$ و تراز برانگیخته $I_{13/2}$ است. با توجه به اینکه دمش تقویت‌کننده EDFA در این شبیه‌سازی ۱۴۸۰ نانومتر است به مدل سه ترازی احتیاج نیست. همچنین مدل دو ترازی برای توصیف انتشار توان نوری در تار نوری آلاییده به اربیوم کافی است چون تقریبا تمام انتقال‌های تابشی بین این تراز اتفاق می‌افتند.

طیف توان نوری دمش و سیگنال یک طیف پیوسته است. اما برای اجرای شبیه‌سازی نمی‌توان از طیف پیوسته استفاده کرد. برای غلبه بر این مشکل طیف نوری را به پرتوهایی با پهنای باندهای فرکانسی Δ_{ν_k} تقسیم می‌کنیم. هر کدام از این پرتوها دارای توان متوسط P_k به مرکز فرکانس ν_k و طول موج λ_k هستند. بنابر این معادله انتشار را می‌توان به صورت N معادله دیفرانسیل معمولی در نظر گرفت که N تعداد کل دمش‌ها و سیگنال‌هاست.

از آنجا که مقدار توان‌های دمش و سیگنال ورودی معلوم است و هدف به دست آوردن مقدار توان‌های خروجی است در این جا یک مسئله مقدار اولیه وجود دارد که باید آن را حل کرد. اگر مسئله دارای دمش‌هایی در دو جهت بود و یا اینکه تابش خود به خودی تقویت شده منتشر شده در دو جهت باید به دست می‌آمد مسئله شرایط مرزی باید حل می‌شد که نسبت به مقدار اولیه دشوارتر است. در اینجا با تقریب‌های مناسب معادله‌های انتشار دمش، سیگنال و نویز به صورت مقدار اولیه حل می‌شوند.

مسائل مقدار اولیه را به روش‌های متفاوتی می‌توان حل کرد. در این جا از روش پیش بینی-اصلاح یک گامی استفاده خواهد شد. در این روش تار نوری آلاییده به اربیوم به قسمت‌های کوچکی تقسیم خواهد شد و توان در هر قسمت با استفاده از مقدارش در قسمت قبلی و انجام یک پیش بینی در قست کنونی محاسبه می‌شود. به طور مشابه توانی که در هر پرتو فرکانسی در طول تار نوری منتشر می‌شود قدم به قدم در حالت پایدار محاسبه می‌شود. در این صورت به راحتی می‌توان معادله را حل کرد.

طول موج دمش در شبیه‌سازی حدود ۱۴۸۰ نانومتر است که با توجه به مطابقت با پنجره سوم مخابراتی انتخاب شده و بر اساس این طول موج دمش مدل دو ترازی به کار برده شده است. هر چند می‌توان بیشتر از یک دمش در هر دو جهت رو به جلو و رو به عقب در شبیه‌سازی به کار برد ولی در این اینجا تنها یک دمش در جهت رو به جلو فرض شده است.

شبیه‌سازی تقویت‌کننده رامان:

در این بخش برای شبیه‌سازی انتشار توان نوری در تقویت‌کننده تاری رامان، روش پیش بینی اصلاح بر اساس رابطه آدام – بشفورت – مولتون است. در سامانه‌های WDM دارای تقویت‌کننده رامان توزیع شده که انتشار سیگنال و دمش در دو جهت صورت می‌گیرد، حتما بررسی انتشار توان در دو جهت باید انجام شود.

بررسی تقویت‌کننده رامان توزیع شده بر اساس دسته‌ای از معادلات معمولی دیفرانسیل تزویج شده در حالت پایدار انجام می‌شود. این معادلات باید تابش خود به خودی رامان و وابستگی حرارتی آن، پراکندگی رامان از جمله بازتاب‌های چند گانه، تابش خود به خودی تقویت شده، پراش برانگیخته رامان، موج‌های استوکس مرتبه بالا و کنش‌های متقابل بین پرتوهای سیگنال و دمش را در بر گیرند.

همان طور که گفته شد برای حل مسیله شرایط مرزی دو نقطه‌ای رامان از روش پیش بینی اصلاح براساس رابطه آدام-بشفورت-مولتون استفاده می‌شود و برای پیش بینی مقادیر اولیه در ابتدا و انتهای تار نوری از الگوریتم شوتینگ استفاده می‌شود.

برای به کار بردن روش پیش بینی اصلاح می‌توان از حالت‌های یک گامی یا تکنیک‌هایی با گام‌های بیشتر استفاده کرد. هر چند تکنیک یک گامی سرعت اجرای برنامه کامپیوتری را زیاد می‌کند اما دقت قابل قبولی ندارد. در تکنیک یک گامی برای پیش بینی تنها از اطلاعات یک گام قبل استفاده می‌شود. در این قسمت برای داشتن دقت مناسب از تکنیک چهار گامی استفاده می‌شود. توان در نقطه z_{j+1} از مقادیرتوان در نقاط z_{j-2} ، z_{j-1} ، z_j و z_{j-3} بدست می‌آید. به همین دلیل این روش را چهار گامی می‌نامند .

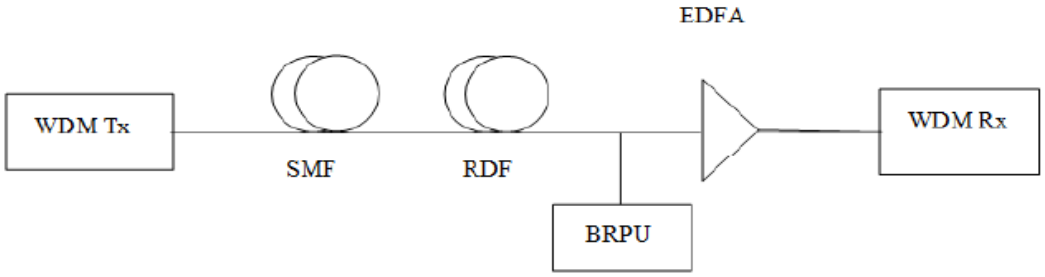
هدف از پیاده‌سازی مدل کامپیوتری این است که با فرض داشتن توان‌های ورودی توان‌های خروجی در دو انتهای تار نوری بدست آیند. شبیه‌سازی محاسبه توان‌ها از یک سر به این صورت شروع می‌شود که توان‌های ورودی از آن سر را داریم و توان‌های خروجی

فصلنامه علمی تخصصی ایده های نو در علوم، مهندسی و فناوری ، دوره ۶، شماره ۱، بهار ۱۴۰۱، ص ۱۹-۷
ISSN: 2588-3984
http://www.Tajournals.com

را به طور منطقی حدس می‌زنیم. با داشتن مقادیر و حدس‌های اولیه به طور گام به گام بقیه مقادیر توان را در طول تار نوری بدست می‌آوریم تا به سر دیگر برسیم. در سر دیگر مثلا سر انتهایی اگر مقدار توان ورودی محاسبه شده با مقدار توان ورودی که در صورت مسیله داشتیم برابر باشد حدس اولیه درست بوده است در غیر این صورت باید حدس بهتری زده شود و مراحل قبل از ابتدا تکرار شود. تکرار مراحل تا وقتی انجام می‌شود که حدس‌های اولیه منجر به یافتن مقادیر ورودی یکسان با مقادیر ورودی موجود در مسیله در سر دیگر شود. روش بیان شده را الگوریتم شوتینگ می‌نامند .

شبیه‌سازی و بهینه‌سازی تقویت‌کننده ترکیبی اربیوم – رامان:

تقویت‌کننده ترکیبی اربیوم – رامان شامل دو قسمت اصلی یعنی یکی از انواع تقویت‌کننده‌های آلاییده به اربیوم و یکی از انواع تقویت‌کننده‌های رامان است. علاوه بر این قسمت‌های اصلی، بخش‌های دیگری مثل تار نوری با پاشندگی معکوس و تار نوری معمولی برای انتقال اطلاعات نیز می‌توانند وجود داشته باشد. در این آرایش برای تقویت‌کننده ترکیبی اربیوم – رامان قسمت اول یک تار نوری تک مد استاندارد به عنوان محیط انتقال است، قسمت دوم یک تار نوری با پاشندگی معکوس است که برای جبران پاشندگی ایجاد شده در تار نوری تک مد لینک مورد استفاده قرار گرفته است. قسمت بعدی یک تقویت‌کننده تاری رامان گسترده و در انتها یک EDFA باند C قرار دارد. در تقویت‌کننده ترکیبی بهتر است که تقویت‌کننده آلاییده به اربیوم در انتها قرار گیرد به این دلیل که این افزاره نسبت به تقویت‌کننده رامان دارای عدد نویز بیشتری است و قرار گرفتن آن در انتها باعث می‌شود که عدد نویز کل کم شود. طرح کلی تقویت‌کننده ترکیبی در شکل (۲-۲) آمده است.



شکل (۲-۲): طرح تقویت‌کننده ترکیبی

مشخصات فیبر و سیستم WDM شبیه‌سازی شده در جدول‌های (۲-۱) و (۲-۲) آورده شده است.

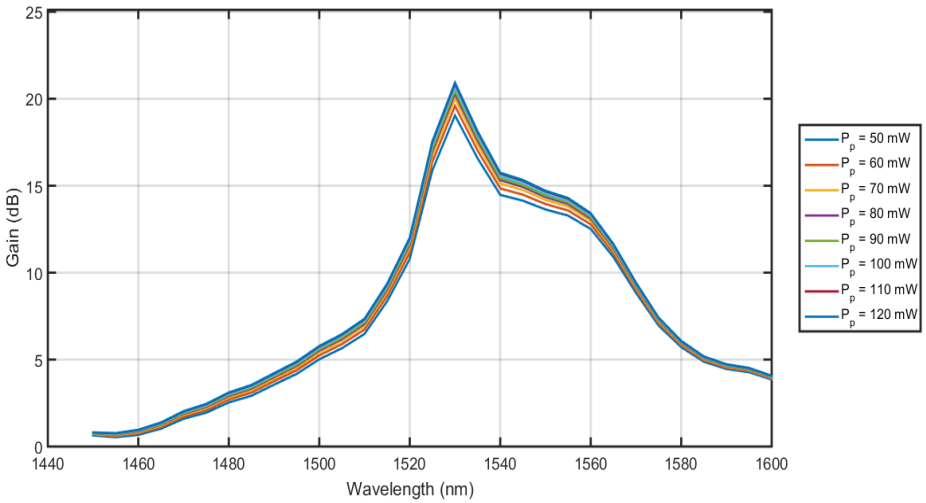
جدول (۲-۱): مشخصات فیبر در بخش‌های مختلف طرح

بخش	نوع تار نوری	تضعیف (dB/km)	پاشندگی (ps/(nm.km))	طول (km)
محیط انتقال	SMF	۰/۲	۱۶	۶۰
با پاشندگی معکوس	RDF	۰/۵	به فرض قابل تنظیم	۷
DFRA	DSF	۰/۲-۰/۵	۰	۶۰
EDFA	SMF	۰/۲	۱۶	۰/۰۰۸

جدول (۲-۲): مشخصات سیستم WDM شبیه‌سازی شده

مشخصات شبکه WDM	مقدار
تعداد کانال‌های سیگنال	۶۶
فرکانس شروع سیگنال (THz)	۱۸۳/۲۵

فرکانس پایان سیگنال (THz)	۱۹۶/۲۵
فاصله فرکانسی کانال‌های سیگنال (THz)	۰/۲
طول موج دمش رامان (nm)	۱۴۸۰



شکل (۲-۳): نمودار بهره در تقویت‌کننده ترکیبی به ازای توان پمپ‌های مختلف

در این جا با در نظر گرفتن پارامترهای شبیه‌سازی نمودار بهره در تقویت‌کننده ترکیبی آورده شده است. دیده می‌شود که در طول موج‌های محدوده ۱۵۶۵-۱۵۳۰ نانومتر (باند C) بیشینه بهره را خواهیم داشت. در واقع با دمش تقویت‌کننده‌ها در طول موج ۱۴۸۰ نانومتر که مطابق با پنجره سوم مخابراتی است محیط را به تابش در طول موج سیگنال ورودی وادار کردیم، که این امر منجر به تقویت سیگنال شده است. ما با در نظر گرفتن متغیر توان دمش در می‌یابیم که هر قدر توان دمش افزایش یابد، بهره کل افزایش می‌یابد. در توان‌های بالا، بهره در طول موج ۱۵۳۰ نانومتر به دلیل سطح مقطع تابش بیشتر نسبت به طول موج ۱۵۵۰ نانومتر بیشتر است .

با در نظر گرفتن اطلاعات بیان شده در جدول‌های بالا، بر روی تقویت‌کننده ترکیبی اربیوم – رامان شبیه‌سازی شده عملیات بهینه‌سازی اجرا می‌شود. دو پارامتری که در این پایان نامه مورد بررسی قرار می‌گیرند توان دمش تقویت‌کننده رامان و نیز غلظت آلاینده در تقویت‌کننده آلاییده به اربیوم است. حال برای دستیابی به بهرهٔ بهینه از روش‌های بهینه‌سازی که در فصل ۳ آمده است استفاده کرده و در انتها نتایج حاصل از بهینه‌سازی به روش‌های الگوریتم ژنتیک و اجتماع ذرات را با هم مقایسه می‌کنیم .

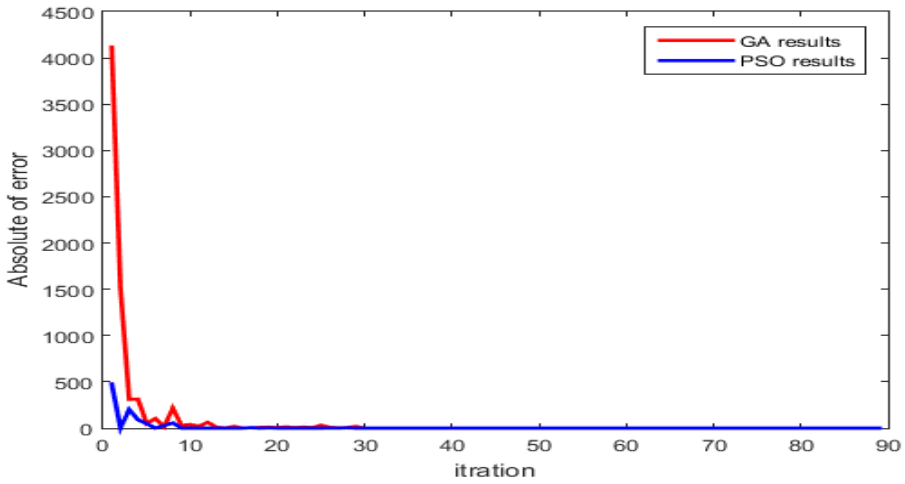
جدول (۲-۳) : نتایج بهینه بدست آمده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی

متغیر	الگوریتم ژنتیک	الگوریتم ازدحام ذرات
غلظت اربیوم در EDFA	۹/۴۵	۹/۷۳
توان دمش پمپ	۴۳۶/۲۴	۴۶۱/۶۹
بهره بهینه	۲۸/۳۷	۲۹/۱۱

جدول فوق نتایج حاصل از اجرای عملیات بهینه‌سازی را با استفاده از دو روش متفاوت نشان می‌دهد. دیده می‌شود که بهره به ازای دمش‌های قوی افزایش می‌یابد و این نتایج بهینه در غلظت‌های ذکر شده اربیوم رخ می‌دهد. غلظت تار نوری آلاییده به اربیوم نیز افزایش می‌یابد تا از تمام توان دمش برای تقویت سیگنال استفاده شود. همانطور که دیده می‌شود بهره بهینه با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات به مقدار حدود ۰/۷ دسی بل از نتیجه الگوریتم ژنتیک بهتر بوده است .

در این بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک تعداد نسل و جمعیت هر دو ۵۰ در نظر گرفته شده است. تعداد تکرار و تعداد ذرات برای الگوریتم ازدحام ذرات نیز ۵۰ در نظر گرفته شده است.

نمودار همگرایی برای دو الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات در شکل زیر آورده شده است.



شکل (۲-۴): نمودار همگرایی دو الگوریتم بهینه‌سازی

نمودار فوق با محور افقی مربوط به تعداد تکرار و نیز محور عمودی قدر مطلق خطا دیده می‌شود. همانطور که دیده می‌شود سرعت همگرایی PSO بیشتر از GA است.

بحث و نتیجه گیری

همگام با افزایش تقاضا برای ظرفیت انتقال بیشتر در سیستم‌های WDM، سرعت کانال، تعداد کانال و طیف بهره می‌بایست ارتقا یابد. واضح است که تکنولوژی WDM یک راه مقرون به صرفه جهت افزایش ضریب انتقال است که از طریق انتقال تعدادی کانال‌های با فاصله کم روی یک تک فیبر محقق می‌شود. هر چند تعداد کانال‌های طول موجی متفاوت که می‌تواند انتقال یابد توسط تضعیف و پهنای باند انتقال فیبر محدود می‌شود. این مشکل از طریق گسترش پهنای باند لینک انتقال مرتفع می‌گردد. تقویت‌کننده‌های فیبر نوری پهن باند و با بهره تخت برای سیستم‌های شبکه نوری WDM با مسافت طولانی و پهن باند محدودهٔ ۱۵۵۰ نانومتر مورد نیاز هستند. به همین دلیل تقویت‌کننده‌های رامان جهت غلبه بر محدودیت‌های بهره و نویز تقویت‌کننده‌های EDFA قدیمی ضروری هستند. تنوع طیفی بهره تقویت‌کننده ممکن است به دلیل ناصافی و ریپل در سیستم‌های انتقال WDM منجر به اشکالاتی در انتقال شود. تجهیزات PASSIVE ممکن است جهت رفع این مشکل استفاده شوند. هر چند این تجهیزات اجزای سیستم و در نتیجه تلف توان و هزینه را بالا می‌برد. راه دیگر استفاده از تقویت‌کننده رامان و EDFA جهت دستیابی به بهره صاف روی پهن باند است. این ترکیب در واقع پهنای باند بهره گسترده و تخت در باند C و L ارایه می‌دهد. استفاده از این ترکیب نویز تابش خود به خودی تقویت شده در انتهای مسیر و اثرات غیر خطی را کاهش می‌دهد. برخی از این اثرات مطلوب نیستند چون نرخ سیگنال به نویز را در گیرنده کاهش می‌دهند. تقویت رامان با نویز کم می‌تواند برای توسعه محدوده در سیستم‌های انتقال WDM مورد استفاده قرار گیرد. این محدوده به چند روش می‌تواند تجهیز شود که از میان آنها می‌توان به افزایش فاصله بین تقویت‌کننده‌ها و افزایش دسترسی کلی سیستم انتقال و افزایش کار آمدی طیفی انتقال اشاره کرد. بهترین طول

محدوده تقویت آن است که تعادلی بین هزینه کم و کارآیی بالا برقرار باشد. محدوده‌های تقویت‌کننده طولانی که نیاز به توان ورودی بالا برای نرخ سیگنال به نویز خوب دارند منجر به افزایش اثرات غیر خطی می‌شود. در این موقعیت یک تعادل خوب بین نرخ سیگنال به نویز بالا و اثرات غیر خطی لازم است. راه حل استفاده از تقویت‌کننده رامان توزیع شده است. در مقایسه با EDFA این نرخ سیگنال به نویز را بهبود می‌بخشد. این دو ترکیب با یکدیگر جهت کنترل اثرات غیر خطی کار میرود. در این پایان نامه قسمت‌های تشکیل دهنده تقویت‌کننده ترکیبی شامل تقویت‌کننده آلاییده به اربیوم و تقویت‌کننده رامان تک دمشی و ... با استفاده از نرم افزار به طور دقیق شبیه‌سازی شده و با در نظر گرفتن متغیرهای توان دمش تقویت‌کننده رامان و دوپینگ تقویت‌کننده آلاییده به اربیوم بهرهٔ کل تقویت‌کننده ترکیبی توسط روش‌های بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک و اجتماع ذرات بهینه شده است. فرآیند شبیه‌سازی و بهینه‌سازی با استفاده از نرم افزار MATLAB انجام شده است. این نتایج نشان می‌دهد که در توان‌های بالای دمش، بهره و غلظت اربیوم افزایش می‌یابد. عملکرد بهینه سیستم پیشنهادی و عملکرد ۰/۷ دسیبلی الگوریتم ازدحام ذرات نسبت به الگوریتم ژنتیک را نیز نشان می‌دهد.

مراجع

- A.W.T Wu and A.J. Lowery, “Efficient multi-wavelength dynamic model for erbium-doped fiber amplifiers,” IEEE J. Quantum Electron. Vol.34, pp. 1325-1331 , .(۱۹۹۸)
- C. headley and G.P. Agrawal, Raman Amplification in Fiber Optical Communication systems, Academic Press, Elsevier Inc.(۲۰۰۵) ,.
- C.Headley, M. Mermelstein, and J.-C. Bouteiller, Raman Amplifiers for Telecommunications-2, Raman Fiber Lasers, Springer Series in Optical Sciences, Vol.90/2, pp.353-382.(۲۰۰۴) ,
- D. R. Zimmerman and L. H. Spiekman, “Amplifiers for the masses : EDFA, EDWA, and SOA amplets for metro and access applications,” J. Lightwave Technol. 22(1), 63–70.(۲۰۰۴)
- E. Desuvire, Erbium-doped Fiber Amplifiers: Principles and Applications, John Wiley & Sons, Inc. New York.(۱۹۹۴) ,
- H. Masuda, S. Kawai, and K. Aida, “Ultra-wideband hybrid amplifier comprising distributed Raman amplifier and erbium-doped fibre amplifier,” Electron. Lett. 34(13), 1342.(۱۹۹۸)
- H. Seo, W. Chung, and J. Ahn, “A novel hybrid silica wide-band amplifier covering S+C+L bands with 105-nm bandwidth,” IEEE Photonics Technol. Lett. 17(9), 1830–1832.(۲۰۰۵)
- J. Bromage, “Raman amplification for fiber communication systems,” IEEE J. Lightwave Technol. Vol. 22, 79-93.(۲۰۰۴) ,
- J. G. Yuan et al., “Impact analysis on performance optimization of the hybrid amplifier (RA + EDFA),” Optik Int. J. Light Electron Opt. 122(117), 1565–1568 .(۲۰۱۱)
- J. Masum-Thomas, D. Crippa, and A. Maroney, “A 70 nm wide S-band amplifier by cascading TDFA and Raman fibre amplifier,” in Optical Fiber Communication Conf. and Exhibit, (OFC).(۲۰۰۱)
- M. M. J. Martini et al., “Multi-pump optimization for Raman+EDFA hybrid amplifiers under pump residual recycling,” in Microwave and Optoelectronics Conf. (IMOC).(۲۰۰۹)

- M. N. Islam, Raman Amplifiers for Telecommunications-1 Physical Principles, Springer Inc., New York.(۲۰۰۴)
- N. Granpayeh, Some Functional Characteristics of Erbium Doped Fiber Amplifiers, PhDThesis, School of Electrical Engineering of New South Wales University, Sydney, N.S.W.Austrailia.(۱۹۹۵) ,
- P. Mislinski, D. Nguyen, and J. Chorstowski, "Effect of concentration on performance of erbium-doped fiber amplifiers," IEEE J. Lightwave Technol. Vol. 15, pp.112-120.(۱۹۹۷) ,
- R.C Eberhart and J.Kennedy, " A new optimizer using particle swarm theory," Proc. 6th Int. Symposium on Micro Machine and Human Science, 39-43.(۱۹۹۵) ,
- S. Kawai et al., "Wide-bandwidth and long-distance WDM transmission using highly gain-flattened hybrid amplifier," IEEE Photonics Technol. Lett. 11(7), 886–888.(۱۹۹۹)
- S. Namiki and Y. Emori, " Ultrabroad-band Raman amplifiers pumped and gain-equkized by wavelength-division-multiplexed high-power laser diodes," IEEE J. Selected Topics Quantum Electron. Vol7, 3-16.(۲۰۰۱) ,
- S. Singh and R. S. Kaler, "Flat gain L-band Raman-EDFA hybrid optical amplifier for dense wavelength division multiplexed system," IEEE Photonics Technol. Lett. 25(3), 250–252.(۲۰۱۳)
- S. Singh and R. S. Kaler, "Optimizing the net gain of a Raman-EDFA hybrid optical amplifier using a genetic algorithm," J. Opt. Soc. Korea 18(5), 442–448 .(۲۰۱۴)
- S. Singh and R. S. Kaler, "Performance optimization of EDFA-Raman hybrid optical amplifier using genetic algorithm," Opt. Laser Technol. 68, 89–95.(۲۰۱۵)
- Sunil P. Singh, "Hybrid Raman/Erbium-Doped Fiber Amplifiers for WDM Transmission Systems." Journal of Optoelectronics Engineering, vol. 4 , no. 1 , 1-4 .(۲۰۱۶) ,
- U. Tiwari, K. Rajan, and K. Thyagarajan, "Multi-channel gain and noise figure evaluation of Raman/EDFA hybrid amplifiers," Opt. Commun. 281(6), 1593–1597 .(۲۰۰۸)