وزارت ارتباطات و فناوری اطلاعات
شرکت ارتباطات زیرساخت

عنوان مقاله: **مزایای بهره برداری از شبکه‌های نوری الاستیک**

تهیه کننده/گان:	رشته تحصیلی	رشته شغلی	اداره کل/دفتر
فرهاد رضوانی قدیمی	برق	مدیرکل زیرساختهای فناوری اطلاعات و ارتباطات	مهندسی عملیات شبکه
بکتاش حکمت	برق	کارشناس زیرساختهای فناوری اطلاعات و ارتباطات	مهندسی عملیات شبکه

عنوان حوزه تحقیقاتی مورد نیاز شرکت: شبکه‌های نوری انعطاف پذیر

شماره ردیف حوزه تحقیقاتی مورد نیاز شرکت: ۳۳

چکیده–این مقاله نشان می‌دهد که چگونه الگوی جدید شبکه‌های نوری الاستیک (EON) ، درک ما را از شبکه تغییر می‌دهد. همچنین نحوه عملکرد EON را شرح داده و فواید بالقوه آن را تشریح می‌کند و در ادامه مثالهای کاربردی آورده می‌شوند و نشان می‌دهد که چگونه فن آوری گرید منعطف شبکه، می‌تواند برای انعطاف پذیری شبکه‌های چند لایه به عنوان یک برتری برای شبکه های شهری و سرانجام برای اتصال مرکز داده به خدمت گرفته شود.

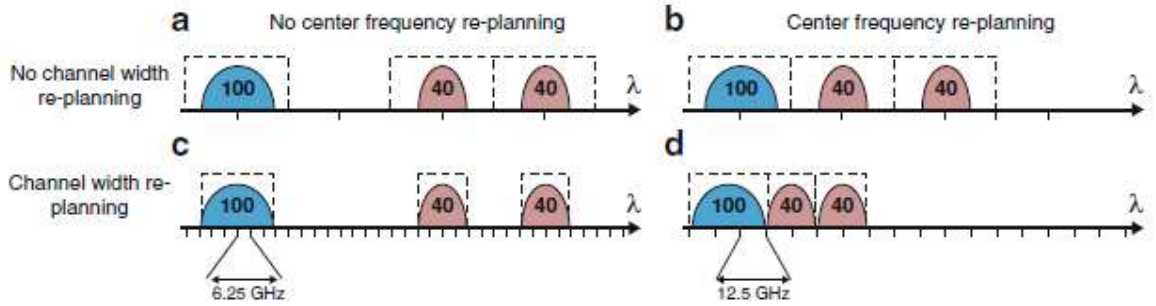
کلید واژه- شبکه‌های نوری انعطاف پذیر، DWDM، فناوری BVT، گرید منعطف

۱- مقدمه

در این بخش، ویژگیهای EON را که مسیری جدید در روش درک شبکه‌ها را ارایه می‌کند بطور خلاصه آورده می‌شود. به طور خاص، هدف ما دو جنبه دارد: نخست مشخص کردن نحوه عملکرد EON و سپس اثبات سودمندی این پلتفرم.

۱-۱- گرید منعطف در مقابل EON

اغلب در ادبیات، اصطلاحات "گرید منعطف"، "بدون گرید" یا EON به صورت قابل جایگزین برای تعیین سیستمها (و شبکه‌هایی که از چنین سیستمهایی بهره می‌برند) استفاده می‌شوند که مطابق با فاصله کانال در شبکه گرید ITU-T نیستند. سیستمهای EON با فاصله کانال ۱۰۰/۵۰ گیگاهرتز متمایز می‌شوند، که نتیجه دو موضوع مهم از محدودیتهای فن آوری سیستمهای قدیمی WDM است: (الف) استفاده از کدینگ NRZ و مدولاسیون OOK به عنوان قالب اصلی مدولاسیون، و (ب) سختی در جدا کردن پهنای باندهای طیفی در کل باند C در پنجره سوم میرایی فیبر سیلیسیومی. استقرار سیستمهای NRZ OOK با نرخ خط ۱۰ گیگابیت بر ثانیه و بالاتر با محدودیت کانال قابل توجهی همراه است (عمدتا پراکندگی و ویژگیهای غیر خطی فیبر) در حالی که برای ایجاد اطمینان از جداسازی نوری کافی برای افزودن/کاستن شدن سیگنال، نیاز به فاصله حداقل ۲ تا ۳ برابر پهنای باند کانال است. با این حال ، همانطور که از شکل ۱ مشاهده می‌شود، درک یک سیستم واقعی "بدون گرید" بسیار دشوار است. در EON می‌توان مشاهده کرد که پهنای باند کانال ممکن است باریکتر شود و پهنای باند کمتری را اشغال کند و/ یا ممکن است فرکانس مرکزی کانال جابجا شود (در فرایندی مشابه آنچه که به عنوان "تبدیل طول موج در سیستمهای قدیمی WDM وجود داشت) اما همیشه یک گام اساسی، بدلیل محدودیت های فن آوری دیمالتیپلکسینگ نوری مورد استفاده، در بهره برداری از پهنای باند نوری وجود دارد. این "گام طیفی" بطور معمول کسر صحیحی از فاصله استاندارد شبکه ۱۰۰ گیگاهرتز به عنوان مثال ۶,۲۵ یا ۱۲,۵ گیگاهرتز است. علاوه بر این ، اصطلاح گرید منعطف در توصیف ذات این سیستمها از دقت کمتری برخوردار است چون نشان می‌دهیم، این پهنای باند کانال نوری است که متفاوت است، و این پهنای باند نوری در EON ها با توجه به گریدهای باریک بکار رفته، بصورت موثری مورد بهره برداری قرار می-گیرند(شکل ۱).



شکل ۱. عملکرد WDM با شرایط گرید ITU-T و مدهای EON

توصیه نامه [1] ITU-T REC G.694.1 اصطلاحات زیر را تعریف می‌کند.

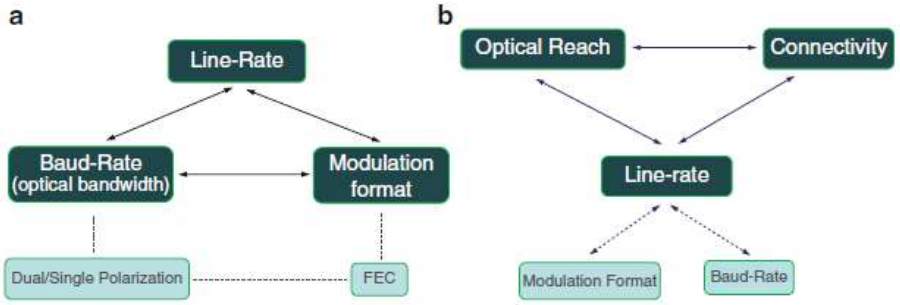
- گرید فرکانسی: گرید فرکانسی، مجموعه‌ای مرجع از فرکانسها است که برای مشخص کردن فرکانسهای مرکزی اسمی مجاز استفاده می‌شود که ممکن است در تعریف برنامه‌های کاربردی استفاده شود.
- شکاف فرکانسی: محدوده فرکانس اختصاص داده شده به یک شکاف است که در دسترس برای سایر شکافها در گرید انعطاف پذیر نیست. شکاف فرکانس با فرکانس مرکزی اسمی و عرض شکاف آن تعریف می‌شود.
- پهنای شکاف: پهنای کامل شکاف فرکانس در گرید انعطاف پذیر.

برای گرید DWDM انعطاف پذیر، شکافهای فرکانسی مجاز، دارای فرکانس مرکزی اسمی در گرید ۶,۲۵ گیگاهرتز در اطراف فرکانس مرکزی ۱۹۳,۱ تراهرتز و عرض شکاف چند برابر ۱۲,۵ گیگاهرتز هستند که در شکل ۱ مشاهده می‌شود. هر ترکیبی از شکافهای فرکانسی تا زمانی که هیچ دو شکاف فرکانسی همپوشانی نداشته باشند مجاز است.

۱-۲- شفاف سازی EON

برای توضیح در مورد ویژگیهای EON، باید مقادیر زیر نخست معرفی شوند:

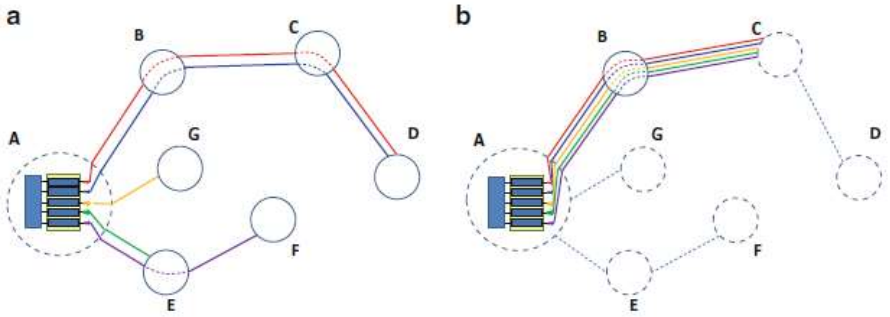
- نرخ باود: نرخ نمونه برداری است که در مبدا انجام می‌شود و در برآورد اولیه، با پهنای باند الکترونیکی سیستم انتقال برابر است. نرخ باود یک پارامتر مهم سیستم وابسته به فن آوری است. این پارامتر پهنای باند نوری گیرنده و همانطوریکه در بخش قبلی بحث شد، حداقل عرض شکاف مورد نیاز برای جریان (های) داده مربوطه را مشخص می‌کند.
- قالب مدولاسیون: برای نرخ باود معین، قالب مدولاسیون تعداد بیت معادلی را تعیین می‌کند که هر نمونه در حال انتقال است.
- نرخ خط: به طور موثر، آن نرخ اطلاعاتی است که برای انتقال جریان داده بین یک مبدا و یک گره مقصد (مجاور یا از راه دور) استفاده می شود. نرخ خط به تعدادی از پارامترهای زیر سیستم، به خصوص فرکانس مرکزی نامی، نرخ باود و قالب مدولاسیون و همچنین به پلاریزاسیون مالتی پلکسینگ و نوع FEC مورد استفاده همانطوریکه در شکل ۲ الف به صورت شماتیک دیده می‌شود وابسته است.



شکل ۲. ارتباط پارامترها در EON ها الف) سطح زیرسیستم ب) سطح سیستم

مثال: سیستمی را با نرخ باود ۵۰ گیگا نمونه بر ثانیه در نظر بگیرید که در آن از قالب مدولاسیون QPSK استفاده شده است که مطابق با دو بیت بر نمونه است. میزان اطلاعات معادل ۱۰۰ گیگابیت بر ثانیه و پهنای باند الکتریکی سیستم ۵۰ گیگاهرتز است. دو پلاریزاسیون باید بطور همزمان مدوله شوند، در این حالت نرخ خط در هر حامل ۲۰۰ گیگابیت بر ثانیه خواهد بود، اگرچه نرخ اطلاعات واقعی، تا زمان استفاده از FEC تا حدودی کمتر است. با توجه به پهنای عرض شکاف ۱۲,۵ گیگاهرتز در [1] ITU-T REC G.694.1 ، شکاف فرکانسی می‌تواند به اندازه ۵۰ گیگاهرتز باشد. در عمل، ممکن است شکاف فرکانسی بزرگی با پهنای باند اضافی در هر طرف سیگنال، برای اطمینان از جداسازی کافی نوری برای تسهیل در افزودن/کاستن و تغییر طول موج در گره‌های میانی نیاز باشد. باند محافظ واقعی مورد نیاز، بستگی به پاسخ پالس متقابل نوری متغیر پهنای باند (BV-OXCs) دارد اما برای سیستم های مبتنی بر LCoS ، ۱۲,۵ گیگاهرتز در هر طرف سیگنال کافی است.

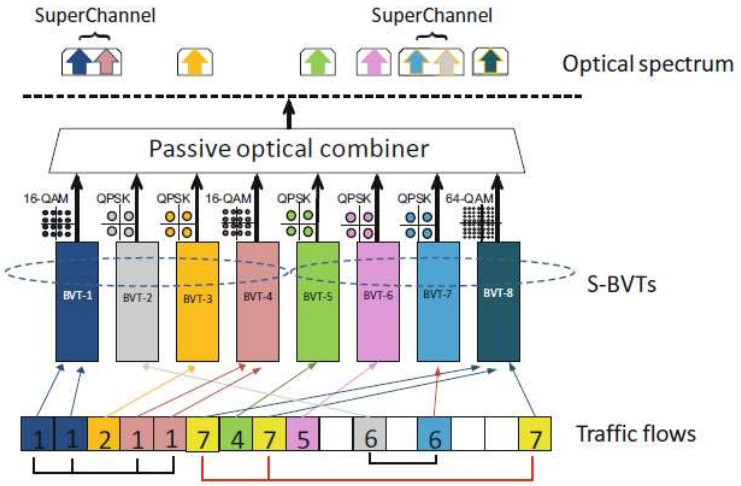
تفاوت مهم EON ها نسبت به شبکه های WDM/WSON در زیر آمده است: فرض کنید نیاز به انتقال جریان داده یک ترابیت بر ثانیه باشد. با در نظر گرفتن مثال قبلی، یک سیستم با پنج حامل با سرعت ۲۰۰ گیگابیت برثانیه مورد نیاز است. در این حالت، هنگامی که چندین جریان به صورت یک واحد ایجاد شده و بدون اضافه شدن یا کم شدن در گره‌های میانی، از مبداء به گره مقصد منتقل می‌شوند(این کانال بطور معمول سوپر کانال نامیده می‌شود)، چنین سیستمی با پنج حامل نیازی به باند محافظ طیفی برای جدا کردن کانالهای فرعی مربوطه ندارد. این عمل بخشی از روند متداول در EON هایی است که موازنه ای بین تعداد خطوط ارتباطی و تجمیع ظرفیت ارتباط در آنها صورت می‌گیرد: با کمک شکل ۳ می‌توان مشاهده کرد که همانند مثال قبلی پنج حامل وجود دارد که هر یک از آنها ۲۰۰ گیگابیت بر ثانیه را حمل می‌کند. در شکل ۳ الف هر یک از این حاملها برای اتصال گره منبع A به چهار گره دیگر استفاده می شود: از A تا D با استفاده از دو حامل مستقل که در مجموع ۴۰۰ گیگابیت، Aتا G با یک حامل ۲۰۰ گیگابیت ،A تا E با یک حامل ۲۰۰ گیگابیت و A تا F یک حامل ۲۰۰ گیگابیت، از طرف دیگر، همانطور که در شکل ۳ب نشان داده شده است، از پنج حامل فقط برای اتصال گره A تا گره C استفاده می‌شود، اما این بار با یک سوپر کانال با سرعت کل یک ترابیت بر ثانیه. در حالت اخیر، هیچ باند محافظی برای جدا کردن پنج حامل لازم نیست، در حالی که در مورد قبلی (شکل ۳-۳ الف) حامل به سمت گره های Fو حاملهای به سمت گره D احتیاج به داشتن باند محافظ جانبی بدلیل امکان اتصال نوری به ترتیب در گره های ترانزیتی E ، B و C دارند.



شکل ۳. موازنه بین تعداد ارتباطات و ظرفیت لینک الف) درجه ارتباط برابر چهار ب) درجه ارتباط برابر یک

سرانجام ، همانطور که به صورت شماتیک در شکل ۲ ب نشان داده شده است، یک EON نه تنها موازنه در نرخ خط و بلکه موازنه در مسافت دسترسی نوری نیز ایجاد می‌کند: برای نرخ باود داده شده، استفاده از شکل مدولاسیون یکسان نرخ باود را افزایش ولی میزان مسافت دسترسی نوری را کاهش می دهد. نتیجه اینکه در صورت ثابت بودن شکل مدولاسیون و متغیر بودن باود نتیجه یکسان است، اگرچه تخریب عملکرد فیزیکی به دلایل مختلف در هر مورد می‌تواند اتفاق افتد. با این وجود، در یک سیستم با سرعت باود متغیر - که به عنوان یک سیستم با پهنای باند نوری متغیر نیز شناخته می شود- از نظر فن آوری برای مهندس چالش برانگیزتر است.

برای نشان دادن پیامدهای ویژگیهای جدید معرفی شده با EON ها، یک گره EON را در نظر بگیرید. همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است، ترافیک مشتری گره به BVT ها ارسال می‌شود- به طور معمول با استفاده از فریمر/سوئیچ OTN/MPLS- اما تعداد جریانهای اختصاص داده شده به آنها بصورت پویا تغییر می‌کند.



شکل ۴. مثالی از گره با هشت BVTs که به دو S-BVTs تقسیم شده است

در مثال ما، گره مجهز به دو ترنسپوندر با پهنای باند متغیر و قابل تقسیم به دو بخش است (S-BVTs) که هر بخش شامل چهار ترنسپوندر پهنای باند متغیر (BVTs) است. جریانهایی با ظرفیت های مختلف وجود دارد، بنابراین این جریانها با استفاده از زیر سیستم های الکترونیکی S-BVT (در شکل نشان داده نمی شود) به جریانهای با نرخ اسمی یکسان تجزیه می شوند. به عنوان مثال، گروهی که چهار جریان دارد با عنوان "۱"، گروه با سه جریان با عنوان "۷" ، گروه با دو جریان با عنوان "۶" و جریانهای انفرادی با عنوان "۲" ،

"۴" و "۵ " مشخص می‌شوند. BVT ها ممکن است از اشکال مختلف مدولاسیون مانند QPSK ، 16-QAM و 64-QAM پشتیبانی - کنند، همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است. برای این منظور، انتخابهای زیر انجام می‌شود: جریان "۲ "، " ۴ " و "۵" به ترتیب با استفاده از QPSK به3-BVT ، 5-BVT و 6-BVT فرستاده می‌شوند. سه جریان "۷" دوباره مالتیپلکس شده و جریانی با ظرفیت بزرگتر می‌سازند و سپس به 8-BVT منتقل می‌شوند و به همین دلیل، این BVT با 64-QAM مدوله شده است. سرانجام، چهار جریان "۱" در دو جریان بزرگتر مالتیپلکس شده و به ترتیب به 1-BVT و 4-BVT هدایت می‌شوند که با استفاده از شکافهای فرکانسی مجاور با 16-QAM مدوله شده و در این حالت، یک سوپر کانال شکل می‌گیرد. دو جریان "۶" مالتیپلکس نمی‌شوند ولی در عوض، آنها مستقیماً به 2-BVT و 7-BVT با استفاده از QPSK که دوباره تشکیل یک سوپر کانال می‌دهند، منتقل می‌شوند. سرانجام، چهار جریان ترافیک ورودی دیگر (در شکل ۴ با رنگ سفید نشان داده شده است) وجود دارند که از آنجا که هیچ BVT دیگری در دسترس نیست استفاده نمی‌شوند.

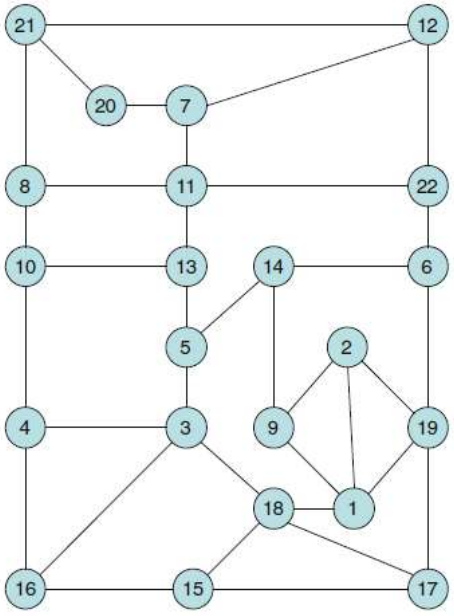
در این مثال، تعاملات ارتباطی زیر را مشخص می کنیم: ما جریانهای "۷" را انتخاب کرده‌ایم که با هم گروه تشکیل داده تا به یک BVTواحد هدایت شوند و BVT هایی را آزاد کنند که می توانند توسط جریانهای دیگر مورد استفاده قرار گیرند. در سطح شبکه، این معادل اضافه کردن منابعی است که برای دستیابی به اتصال گره بالاتر استفاده می‌شود. بنابراین، این عمل با استفاده از 64-QAM که باعث کاهش فاصله دسترسی نوری می شود امکان پذیر است. از طرف دیگر، اگر شخصی مایل به افزایش مسافت دسترسی نوری باشد، سه جریان "۷" باید 16-QAM را به کار گیرند، اما این کار با هزینه یک BVT اضافی انجام می‌شود، و "منابع اتصال" گره را یک درجه کاهش می‌دهد. برای افزایش بیشتر میزان مسافت دسترسی نوری، جریانهای "۲" ، "۴" و "۵" از QPSK استفاده می‌کنند، اما این عمل میزان ارتباط گره را بدلیل استفاده از شکافهای فرکانسی پهن کاهش می‌دهد.

این مثالها ارتباط متقابل پارامترهای مختلف شرح داده شده در شکل ۲ و همچنین موازنه بین فاصله دسترسی، اتصال و ظرفیت در EON را نشان میدهد.

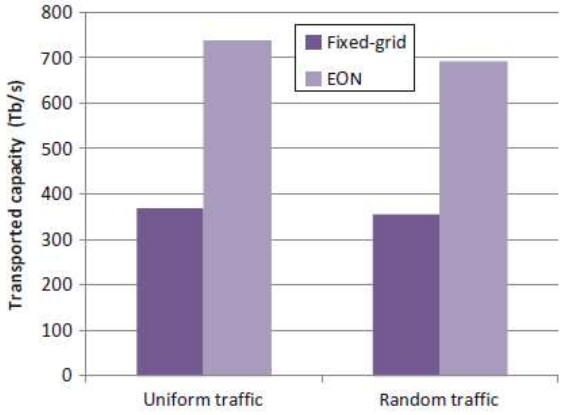
سرانجام، برای ارائه نتایج کمی، دو سناریو را با کمک شبکه ۲۲ گرهی نشان داده شده در شکل ۵، با مسیرهای مشخص انتها به انتها، در شبکه ثابت و EON مقایسه می‌کنیم. سناریوی اول ماتریس ترافیکی یکنواختی را فرض می‌کند، در حالیکه در حالت دوم، از ماتریس ترافیک ایجاد شده با استفاده از اعداد تصادفی با توزیع غیر یکنواخت استفاده می‌شود.

شبکه ثابت دارای فاصله کانال ۵۰ گیگاهرتز است و از فرستنده گیرنده ۱۰۰ گیگابیت بر ثانیه استفاده می‌کند، در حالی که EON ی که در بالا توضیح داده شد، فقط از مدولاسیونهای QPSK و 16-QAM و مالتیپکسینگ قطبی شده (به ترتیب با فاصله دسترسی ۲۰۰۰ کیلومتر و ۵۰۰ کیلومتر) با ۲۵ گیگاهرتز باند محافظ بین سوپر کانالها استفاده می‌کند. برای هر لینک فرض می شود از یک جفت فیبر تکی که در آن می‌توان چهار تراهرتز از پهنای باند اختصاص داد استفاده کند.

در این مثال، حداکثر ظرفیت انتقال از طریق شبکه در هر حالت، با استفاده از مسیریابی کوتاهترین راه و اختصاص اولین طول موج/طیف محاسبه می شود[۲]. نتایج در شکل ۶ نشان داده شده است. شکل نشان می دهد که حتی با این رویکرد ساده، EON ظرفیت انتقال برای هر دو سناریوی ماتریس ترافیک را، در مقایسه با مورد شبکه گرید ثابت دو برابر می‌کند.



شکل ۵. ۲۲ گره BT در شبکه مرکزی



شکل ۶. حداکثر ظرفیت انتقالی بدست آمده برای هر سناریو برای شبکه با گرید ثابت و EON بر روی ۲۲ گره در شبکه مرکزی

۲- ویژگیهای شبکه بندی پیشرفته در بهره برداری از شبکه منعطف

چندین سناریو کاربردی وجود دارد که برای افزایش توانایی EON ها در شبکه‌های ارتباطی نوری مدرن امکان پذیر است. به ویژه، قابلیت کشسانی EON ها همراه با ایده همکاری چند لایه‌ای در واکنش به خرابی شبکه.

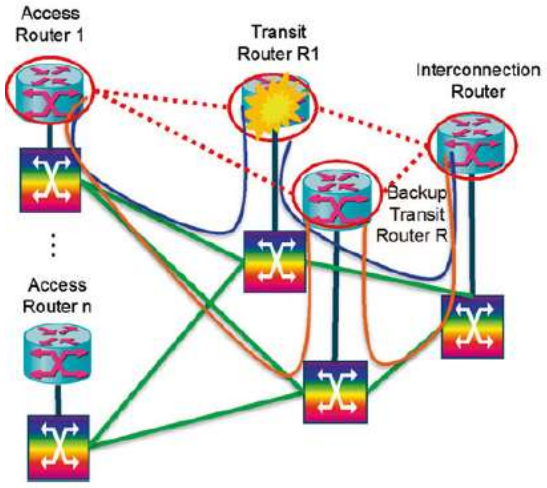
۲-۱- ارتجاع چند لایه‌ای

ترافیک اینترنت در ستون فقرات شبکه ملی اپراتورهای اروپایی با نرخ سالانه بین ۳۰ تا ۳۵ درصد رشد می‌کند. در این شرایط، اپراتورها در صدد اضافه کردن ظرفیت انتقال جدید برای اتصال روترهای ستون فقرات شبکه خود بر روی لایه سریع DWDM هستند.

امروزه، لایه DWDM از فناوری با گرید ثابت تشکیل شده است. گفته می‌شود در دو یا سه سال آینده، فناوری منتخب ممکن است مبتنی بر گرید منعطف باشد.

در شبکه‌های پاکتی سنتی، لایه IP / MPLS است که هنگام خرابی، مانند قطع فیبر، واکنش نشان میدهد. خرابی شبکه در لایه نوری ممکن است باعث ایجاد تغییر ناگهانی، غیرقابل اجتناب و پویا در مورد ترافیک حمل شده شود. در حقیقت، این روزها بیشترین ترافیک پویا در شبکه‌های ستون فقرات و تجمیع، در کنار ترافیک ثابت و قابل پیش بینی است. هنگام تجمیع ترافیک به میزان بالا در این شبکه‌های سلسله مراتبی، ترافیک پویا غیرقابل پیش بینی ناشی از خرابی، بسیار بیشتر از پویایی ناشی از رفتار مشتریان (به عنوان مثال خدمات برنامه ریزی شده) اتفاق می‌افتد. پیروی از رویکرد سنتی برای داشتن واکنش ارتجاعی به خصوص بر روی لایه پاکت ممکن است باعث استفاده نسبتاً بد از اینترفیس‌های روتر و ترنسپوندر شود که لایه معادل طول موج در لایه نوری است. دلیل این امر موارد زیر است: اینترفیس‌های IP ، از طریق ترافیکی بارگیری می شوند که دارای پاکتهایی هستند که به طور تصادفی به گره می‌رسند. ارسال پاکتها ها نیز تحت یک فرایند تصادفی قرار می‌گیرد. بنابراین، چند برابر کردن چندین جریان در کنار هم، بهره موثر بالا می‌رود. با این وجود ترافیک بسته‌ها از نظر آماری بر روی طول موج چند برابر است و این طول موجها ممکن است تنها در شبکه های IP / MPLSبا تکیه بر مکانیسم های بازیابی L3 فقط تا ۵۰٪ پر شوند. در صورت بروز خرابی، ظرفیت ۵۰٪ باقی مانده ی طول موج بعنوان پشتیبان رزرو می شود. بدون هیچگونه اقدامات متقابل پویا بر روی لایه DWDM ، پایداری نوری معمولاً با ایجاد مسیر پشتیبان دوم اطمینان می یابد و بصورت 1 +1 از اولین مسیر اصلی جدا می‌شود. این عمل همراه با استفاده از اینترفیس دوم ترانسپوندر است و سبب استفاده از طول موج و لینکهای بیشتری در کل شبکه می‌شود. این ناکارآمدی‌های ذاتی، سبب هزینه های بالای سرمایه‌گذاری شده و سود کل شبکه را پایین می‌آورد. بنابراین می توانیم دریابیم که سازوکارهای ارتجاعی با تکیه بر لایه IP/MPLS به طور انحصاری ساده بوده و بطور گسترده با شبکه تطبیق یافته، اما مقرون به صرفه نیستند.

در معماری شبکه انتقال همگرا که اخیراً پیشنهاد شده است (به معنای ادغام دستگاه های لایه پاکت، به عنوان مثال روترها و تجهیزات انتقال نوری، به عنوان مثال OXC یا ROADMs)، اپراتورها کمک می‌کنند تا در شبکه‌ای که ارتجاع پذیری چند لایه خودکار وجود دارد، استفاده از اینترفیس بطور قابل توجهی بالا رود. مهمترین عامل ایجاد این روش جدید، تقسیم ترافیک به کلاسهای خدماتی مختلف است. به عنوان مثال، خدمات تلویزیون، خدمات VoIP یا تراکنشهای مالی از کاربردهای مهم و ضروری هستند که باید به موقع و با نسبت از دست دادن پایین پاکت ارایه شوند. همراه با خدمات بیشتر، آنها در کلاس ترافیکی با اولویت بالاتر قرار می‌گیرند. در مقابل، ایمیل و FTP از ترافیکهای کلاس بهترین تلاش (BEST-EFFORT)، هستند که ممکن است با تاخیر یا از بین رفتن بسته مواجه شوند. ایده اصلی در مورد ارتجاع پذیری چند لایه (MLR) پذیرش دوره‌های طولانی‌تر از دست دادن پاکت برای ترافیک با بیشترین تلاش است. با این حال، ترافیک با اولویت بالا، اولویت خود را حفظ می‌کند و به همان روشی که امروز ارائه می‌شود ارائه می-گردد. با برخورداری از کلاسهای خدمات مختلف با ترافیک نابرابر، ظرفیت ترافیک کلاس با بیشترین تلاش پس از یک تأخیر قابل توجه، بهبود می‌یابد. در واقع، این زمان بازیابی بین چند ثانیه تا چند دقیقه است. و این در مقایسه با مکانیسم های ارتجاع پذیری IP مانند Fast Reroute (FRR) بسیار زیاد است و از طرف دیگر، در مقایسه با قطع کابل نوری یا خرابی فیزیکی لینک، بسیار کوتاه است. در لایه انتقال، مفهوم MLR بر پایه فناوری فوتونیک تحقق یافته توسط ROADM های چند درجه‌ای با پورت های بی رنگ و بدون جهت تکیه دارد (شکل ۷). در اینجاست که سوئیچینگ محافظتی از نظر کمترین هزینه، با سوییچینگ محافظ لایه پاکت مقایسه می-شود. مطالعات متعددی امکان سنجی و برتری فنی و اقتصادی مفهوم MLR را تحت سناریوهای شبکه عملی (به عنوان مثال[3]) اثبات کرده‌اند. در حال حاضر، چندین اپراتور از این رویکرد پیروی می‌کنند و شبکه مرکزی بر پایه MLR را به بازار عرضه می‌کنند. مفهوم کلی با وجود فناوری گرید ثابت می‌تواند کار کند ولی EON می‌تواند پیشرفتهای بیشتری را به همراه داشته باشد.



شکل ۷. بازسازی چند لایه‌ای با استفاده از روتر ترانزیتی پشتیبان دور

حالت یک: ارتجاع پذیری چند لایه‌ای مبتنی بر فرستنده گیرنده‌های کشسان با نرخ منعطف

به عنوان یک واکنش در برابر خرابی، شبکه نوری معمولی سعی می‌کند با پیدا کردن یک مسیر پشتیبان که باعث جلوگیری از عدم کارایی لینک می‌شود، بازیابی شود. هنگام مسیریابی مسیر پشتیبان از طریق شبکه نوری صلب، مسیر جایگزین جدید ممکن است با مشخصات مسافت دستیابی بیشتری باشد. با وجود شکل مدولاسیون ثابت و مشخص، ممکن است مسیر نوری جدید در دسترس نباشد که نتیجه آن از بین رفتن کل ظرفیت طول موج (به عنوان مثال ۱۰۰ گیگابایت در ثانیه) است. این نقیصه کاملاً بزرگی برای یک اپراتور بشمار می‌رود و ممکن است باعث ایجاد تنگناهای بیشتر در سایر نقاط شبکه شود.

یک مورد کاربردی امیدوار کننده در آینده، استفاده از فرستنده گیرنده‌های قابل تنظیم با نرم افزار، با بهره گیری از موازنه ظرفیت - مسافت (شکل ۲)، برای تنظیم قالب مدولاسیون با توجه به مسافت مورد نیاز است. از نظر عملی، این به معنای کاهش ظرفیت اینترفیس اصلی است. فرض کنید ظرفیت اصلی ۴۰۰ گیگابیت بر ثانیه با ۲ × ۲۰۰ گیگابیت بر ثانیه که هرکدام از 16-QAM استفاده می‌کنند محقق شود، پس از سوئیچ کردن به QPSK این امکان وجود دارد که به جای از دست دادن کل ظرفیت اینترفیس، ظرفیت ۲ × ۱۰۰ گیگابیت بر ثانیه فراهم شود.

بنابراین، پایین آمدن خودکار نرخ خط موجود، حداقل بخشی از ظرفیت اصلی را برای استفاده بیشتر توسط روترهای IP فراهم می‌کند. این نوع خاصیت ارتجاعی فوتونی ممکن است صرفه جویی مقدار قابل توجهی از CapEx را در مقایسه با مورد فرستنده گیرنده در شبکه ثابت-مسافت در دسترس که در آن امکان تولید مجدد سیگنال میانی ضرورت دارد، در اختیار اپراتور قرار دهد. به همین دلیل است که اینترفیسهای با نرخ منعطف، بدلیل اهمیت بالا برای کاهش هزینه پیاده سازی همواره در نظر گرفته می شوند.

بر حسب حجم ترافیک و کلاسهای خدمات، اپراتور گاهی ممکن است برخی اوقات دوباره نیاز به استفاده از ظرفیت کامل در مسیر پشتیبان داشته باشد. این کار می‌تواند با استفاده از یک BVT نرخ منطف اضافی با مدولاسیون QPSK و 100 × 2 گیگابیت بر ثانیه انجام شود. اما این اینترفیس اضافی همیشه مورد نیاز نخواهد بود، به ویژه هنگامی که از دست دادن پاکتها در ترافیک از نوع بهترین تلاش، حداقل ترافیک قابل قبول مطابق با توافق نامه سرویس سطح (SLA) را برآورده سازد. بنابراین، ممکن است پس از برطرف کردن خرابی، اینترفیس اضافی پشتیبان خاموش شود یا برای اهداف دیگر مورد استفاده قرار گیرد.

اخیراً، رویکرد جدیدی منتشر شده [۴] که از مدولاسیون نمادین در حوزه زمان بهره می‌برد. با این رویکرد، اختلاف قابل توجه بین QPSKخالص و 16-QAM خالص (به عنوان مثال به ترتیب ۲۰۰۰ کیلومتر و رسیدن به ۵۰۰ کیلومتر) با مقادیر مسافت دستیابی متوسط می‌تواند حداقل شود. این مساله به خصوص برای اپراتورهای متعهد در کشورهای کوچک و متوسط که در آنها مسافت بین

مراکز اصلی معمولی فقط در شکاف دستیابی فوق الذکر قرار دارند مهم است. مطالعات فنی و اقتصادی برای تعیین کمی این نوع از فرستنده گیرنده‌های با نرخ منعطف ادامه دارد.

حالت دو: قابلیت جداسازی فرستنده گیرنده برای ارتجاع چند لایه‌ای

با توجه به غیرقابل پیش بینی بودن ترافیک، به عنوان مثال سرویسهای ابری از یک طرف و ترافیک ناگهانی پاکتها از طرف دیگر، همیشه در شبکه‌های امروزی مقدار قابل توجهی ظرفیت متروک وجود دارد که به طور پیوسته، ترافیکی با ظرفیت ثابت بین گره‌ها ایجاد می‌کنند و همین کار سبب عدم استفاده کامل از اینترفیسها بر روی لایه نوری می‌شود. به خصوص در روزهای اولیه شبکه انتقال نوری، استفاده از اینترفیسها به طور ذاتی کم است.

در این شرایط، ترنسپوندر با ظرفیت بالا (به عنوان مثال ۴۰۰ گیگابیت در ثانیه یا یک ترا بیت در ثانیه) را می‌توان به صورت منطقی و فیزیکی در چندین ترنسپوندر مجازی در نقاط مختلف مقصد قرار داد که بلحاظ الکترونیکی این نرخ بیت توافقی ممکن است برای بهبود اقتصادی شبکه بسیار مفید باشد. در روز اول، حتی یک S-BVT ممکن است ظرفیت کافی را برای ارائه خدمات به کلیه مقصدها با نرخ بیت نسبتاً کم مثلاً ۱۰۰ گیگابیت در ثانیه فراهم کند[۵]. بعدها وقتی میزان ترافیک افزایش می‌یابد، ممکن است هر کدام با نرخ بیت بالاتری فقط به چند مقصد سرویس دهند. و اینکه ممکن است آن بتواند تنها یک جریان عظیم ترافیکی را فقط به یک مقصد واحد پشتیبانی کند. انتظار می رود همه این موارد به صورت الکترونیکی کنترل و تنظیم شود.

فرآیند برش طیفی توسط روترهای IP مرتبط کنترل و هدایت می‌شود. آنها کلاسهای خدمات مختلف را کنترل می‌کنند و به آنها برشهای پهنای باند طیفی اختصاص می‌دهند که سبب انعطاف پذیری قابل توجهی می‌شود. در صورت بروز خرابی در لایه نوری، انتظار می رود درمان متناسب با کلاسهای خدمات مفید و موثر باشد. برنامه کنترل یکپارچه، تخصیص ترافیک با اولویت بالا و بهترین تلاش را به طور نابرابر به زیر کریرهای نوری را بهینه می‌کند. علاوه بر پارامترهایی مانند هزینه مسیر، تأخیر، و گروه‌های ریسک مشترک، ممکن است بهینه سازی بسته به پارامترهای مختلف خاص EON ، مانند دسترسی به برش های طیفی یا وضعیت فیبر نیز انجام شود.

در نتیجه، مرحله تکامل بعدی ممکن است بررسی تناسب S-BVTs در یک MLR واقعی بر اساس تمایز کلاس خدمات باشد. برای هر دو مورد برنامه معرفی شده در بالا، معماری شبکه حداقل به سه ترکیب اصلی نیاز دارد:

۱- در مرحله اول، لایه DWDM با ROADM های بدون رنگ، بی جهت و بدون گرید منعطف، خدمات سریعتر را ارائه می‌دهد. همچنین این دستگاه‌های فوتونی برای سوییچینگ در لایه فیزیکی (L0) استفاده می‌شوند.

۲- در مرحله دوم، برنامه کنترل بسته نوری یکپارچه، بر اساس نرم افزاری منعطف از جمله مسیریابی و اختصاص طیف (RSA) به جای مسیریابی و انتساب طول موج (RWA) ، عملکردهای سیگنالینگ و همچنین انتخاب مسیر الاستیک در صورت خرابی شبکه را ارائه می‌کند. راه حل کارآمد برنامه کنترل یکپارچه، فقط شامل مقدار مناسب تبادل اطلاعات بین لایه پاکت و لایه نوری الاستیک را نیز می‌شود.

۳- در مرحله سوم، رابطی استاندارد پیکربندی کلیه روترهای IP را با استفاده از پروتکل یکسان امکان پذیر می‌سازد. وجود برنامه کنترل چند لایه‌ای ممکن است پیکربندی MPLS و تجهیزات GMPLS را از طریق UNI سهولت دهد. با این حال، خدمات لایه IP نیاز به پیکربندی هایی دارند که فراتر از قابلیتهای برنامه کنترل هستند. پس از خرابی، اضافه کردن مسیرهای جدید یا تغییر متریکهای موجود در لایه IP می‌تواند به بهینه‌سازی توپولوژی IP کمک کند. تلاشهایی برای استاندارد سازی از طرف گروه‌های کاری مانند Internet Engineering Task Force (IETF)، Network Configuration Network (NETCONF) و Interface to the Routing system(I2RS) انجام شده است، اما هنوز توسط همه فروشندگان روتر پشتیبانی نمی‌شود.

۳- گرید منعطف در شبکه های شهری(مترو)- منطقه ای: ارائه ترافیک به سرورهایBRAS

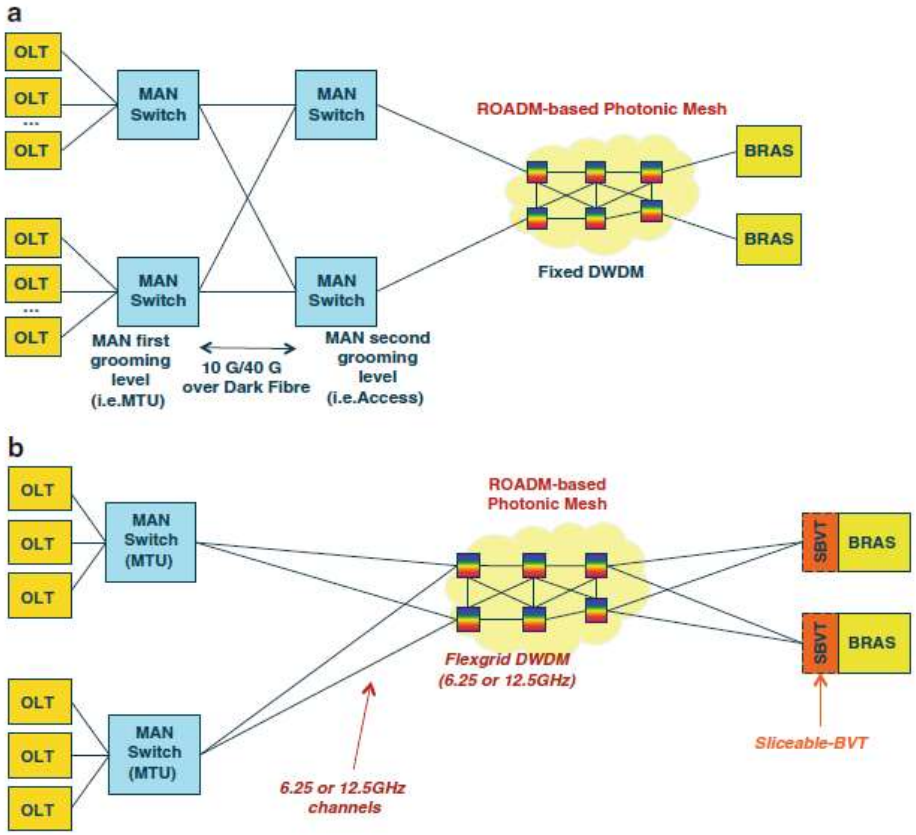
معماری مترو در حال حاضر از دو سطح اصلی جمع آوری ترافیک تشکیل شده است: (۱) سطح اول(با نام کاربری چند لایه یا سطح MTU) ترافیک را از کاربران نهایی (پایانه‌های خط نوری، OLTها) جمع می‌کند، در حالی که (۲) سطح دوم (به نام سطح دسترسی) ترافیک MTUها را عمدتا از طریق اتصالات فیبر جمع می‌کند(یعنی فیبر تاریک). عملکرد IP، یعنی طبقه بندی ترافیک، مسیریابی، تأیید اعتبار، و غیره، در سرورهای دسترسی از راه دور پهن باند (BRAS) که معمولاً بعد از سطح دوم جمع شدن ترافیکی قرار دارند، اجرا می شود.

در سالهای گذشته، اپراتورهای اصلی شبکه اروپا زیرساختهای نوری خود را به شبکه‌های منطقه‌ای گسترش داده‌اند. به عنوان یک نتیجه، پیشنهاد شده است بستری از BRAS ها واقع در، به عنوان مثال، دو سایت ترانزیت در هر منطقه (سایت دوم برای هدف افزونگی است) بر خلاف چندین BRAS منطقه‌ای ایجاد شود. در این روش، نیاز به تجهیزات IP و هزینه های مرتبط CAPEX و OPEXکاهش می‌یابد. سرورهای متمرکز می‌توانند با توجه به مفهوم عملکرد مجازی شبکه (NFV) و در مراکز داده خصوصی یا عمومی منطقه، فیزیکی یا مجازی باشند. در سناریو متمرکز (شکل ۸ الف) شبکه فوتونیک منطقه‌ای، ظرفیت انتقال را از سطح تجمیع دوم به سمت BRAS های دور فراهم می‌کند. سناریوی ارایه شده در منطقه A از شبکه تلفن اسپانیایی [6] Telefonica است که دارای ۲۰۰ سوئیچ MTU ، لایه دسترسی با ۶۲ سوئیچ تجمیع و یک شبکه انتقال نوری شامل۳۰ عدد ROADM است که به دو سایت BRASاز طریق آن شبکه متصل می‌شوند.

از آنجا که فن آوری گرید منعطف بعنوان جایگزین WDM در شبکه مرکزی/بک بن در نظر گرفته شده است[6,7]، تمرکز منطقه-ای BRAS به نظر می‌رسد موردی مناسب و جالب برای بررسی کاربرد فناوری گرید منعطف در منطقه و کلان شهرها (MAN) باشد. سناریوی مورد بررسی فرض می‌کند که از ترنسپوندرهای گرید منعطف در سوئیچ های MTU و سرورهای SBVT استفاده شده است. بدین ترتیب سطح تجمع بدلیل استفاده از تکه‌ای بودن طیفی فناوری گرید منعطف از بین می رود. این سناریو در شکل ۸ب ارائه شده است.

از آنجا که شبکه مترو با شبکه بک بن کاملاً متفاوت است، ممکن است فناوری فرستنده گیرنده همسان (CO) که در برنامه‌های شبکه بک بن مورد استفاده قرار می گیرد برای مترو مناسب نباشد. از طرف دیگر استفاده از فناوری دیگری مانند ترنسپوندرهای تشخیص مستقیم (DD) بجای CO در شبکه مترو، ارزشمند است.

حال جزئیات سناریوی متمرکز BRAS را بررسی می‌کنیم. ما شبکه نوری منطقه‌ای متشکل از گره‌های ROADM شامل WDM یا گرید منعطف و لینکهای فیبر را فرض می‌کنیم. این شبکه از ترافیک ایجاد شده توسط مجموعه ای از سوئیچ های MTU پشتیبانی می‌کند که در سلسله مراتب پایین تری بوده و به شبکه نوری منطقه‌ای متصل هستند. هر سوئیچ MTU برای تحمل خطا به دو ROADMمختلف متصل است. نحوه اتصال سوئیچ MTU به ROADM ها با توجه به سناریوهای شبکه WDM یا گرید منعطف تغییر می‌کند، اما از آنجا که ما روی شبکه منطقه‌ای نوری متمرکز شده‌ایم، این مساله هیچ اهمیتی ندارد. در عوض، دو ROADM ، اصلی و پشتیبان از طریق دو مسیر نوری به دو گره BRAS مرکزی متصل می‌شوند، و دو مسیر انتخابی برای اهداف حفاظتی هستند.



شکل۸. (الف) روش WDM (ب) روش گرید منعطف برای برقراری BRAS متمرکز منطقه‌ای

دو مساله وجود دارد: (۱) محل گره های BRAS داده شده و هدف این است که حداکثر طول مسیر را، در کلیه مسیرهای اولیه و پشتیبان به حداقل برساند. و (۲) حداکثر مسافت مسیر (محدود شده توسط ترنسپوندرهای مورد استفاده) مشخص شده و هدف این است که تعداد مکانهای BRAS (که می تواند از ۲ بیشتر باشد) به حداقل برسد. برای حل مشکلات مرتبط، ما الگوریتم های بهینه (ILP)و اکتشافی را توسعه داده و از آنها استفاده کردیم تا الزامات مسافت انتقال برای منطقه A از شبکه Telefonica را بیابیم[6].

ما از نتایج خود به عنوان الزامات انتقال استفاده کردیم تا یک مدل مناسب برای انتقال دهنده DD را تهیه کنیم. اولین کار، S-BVT مبتنی بر OFDM بود که در [۸] ارائه شده است. رویکرد نقص فیزیکی بهبود یافته و قوی با OFDM چند باندی در [۹] ارائه شده است، جایی که عملکرد به صورت عددی مورد ارزیابی بر طبق الزامات انتقال قرار گرفته و به طور تجربی در شبکه مشی فوتونی چهار گرهی ADRENALINE اثبات شده است. S-BVT پیشنهادی قادر به ارائه MTU بصورت N*M است: آرایه‌ای از مدولاتورها که برشهای به تعداد N تولید می‌کنند که می‌توانند به سمت مقصدهای مختلفی هدایت شوند و هر بلوک ساختاری BVT (هر یک از N مدولاتور) تنها به M عدد MTU با استفاده از تنها یک منبع لیزر ترکیب شده با DD ساده و مقرون به صرفه خدمات میدهد. تعداد M عدد MTU در هر برش MB-OFDM (مطابق با حامل نوری منفرد) توسط پهنای باند DAC و اجزای اپتوالکترونیکی (۱۰ گیگاهرتز در [9]) محدود شده، و N = 8 و M = 5 با استفاده از فناوری فعلی (با فرض اجزا با عنوان مثال ۲۰ گیگاهرتز) امکانپذیر است.

برای مقایسه دو سناریو شبکه ارائه شده در شکل۸، ما یک تحلیل تکنیکی و اقتصادی انجام دادیم. به طور خاص، سناریوهای مورد بررسی عبارتند از: (۱) مبتنی بر فناوری WDM ، و (۲) مبتنی بر گرید منعطف، با دو نوع ترانسپوندر: با همسانی (CO) ، و با تشخیص مستقیم(DD) . هزینه سناریوی اول (WDM) را محاسبه می‌کنیم و از آن به عنوان مرجع برای محاسبه هزینه اجزای مورد استفاده در

سناریوهای گرید منعطف برای دستیابی به ۳۰٪ صرفه‌جویی هزینه هدف استفاده می کنیم. محاسبات هزینه براساس مدل هزینه ارائه شده در [۸] است.

سناریوی یک- راه حل WDM: شبکه نوری از ROADM ها تشکیل شده است و ترافیک سوئیچهای MTU قبل از ورود به شبکه WDMدر سطح دوم سوئیچها تجمیع می‌شود. با در نظر گرفتن دامنه TID مرجع برای منطقه A، ما ۲۰۰ سوئیچ MTU و ۶۲ سوئیچ تجمیع داریم. هر سوئیچ MTU ، ترافیک C = 10 Gbps را ارسال می‌کند و برای پشتیبانی به دو سوئیچ تجمیع مختلف متصل می-شود. با فرض توزیع برابر بار در سوئیچهای تجمیع، هر سوئیچ در مجموع به 10*14 گیگا بیت بر ثانیه (برای لینکهای بالا و پایین دست) نیاز دارد. ما همچنین فرض می‌کنیم که ارتباط بین MTU ها و سوئیچهای تجمیع شده با فرستنده گیرنده خاکستری ده گیگابیت بر ثانیه با برد کوتاه انجام شده و ارتباط بین سوئیچ ها و سرورهای BRAS با فرستنده گیرنده رنگی ده گیگابیت بر ثانیه انجام می‌شود (از طریق شبکه منطقه ای WDM). در محاسبه هزینه، اضافه می کنیم هزینه: (۱) گیرنده فرستنده سوئیچ MTU (کوتاه برد) را (۲) سوئیچ های تجمیع (با ظرفیت ۱۴۰ گیگابیت بر ثانیه، فرستنده گیرنده‌های در MTU و فرستنده گیرنده‌های رنگی در شبکه WDM (۳) فرستنده گیرنده‌های (رنگی) در BRAS . طبق مدل هزینه ، کل هزینه در این سناریو [8] به مقدار 219.82 ICU است (IDEALIST Cost Unit[6,10]).

سناریوی دو- راه حل گرید منعطف: فرض می‌کنیم که شبکه WDM را با شبکه گرید منعطف جایگزین کنیم و بنابراین در محاسبه هزینه، هزینه سوئیچی که می‌تواند طول موج را انتخاب کند (WSS) را اضافه می‌کنیم. ما دو متغیر را برای فرستنده گیرنده‌ها بررسی می‌کنیم: (الف) CO و (ب) DD .

برای مورد (الف)، فرض می‌کنیم که از فرستنده گیرنده کوتاه برد خاکستری ده گیگابیت برثانیه در MTU ها و BVT های گرید منعطف همسان صد گیگابیت برثانیه (ماکسپوندرهای 18*10) در درگاه های افزودن/کاستن در شبکه منطقه‌ای گرید منعطف و-S BVT چهارصد گیگابیت برثانیه همسان در سرورهای BRAS (کار در۴۰۰ گیگابیت بر ثانیه) استفاده کنیم. فرض می‌کنیم که هر ROADM بطور یکسان بارگیری شود، بنابراین بعنوان سوئیچ MTU چهارده‌تایی عمل می‌کند. بنابراین، هر ROADM از دو BVT گرید منعطف استفاده می‌کند. در گره‌های BRAS ، یک ۴۰۰S-BVT گیگابیت بر ثانیه به دو ROADM مختلف سرویس میدهد، پس در کل ما به ۱۵ عدد S-BVT نیاز داریم. برای به دست آوردن ۳۰٪ صرفه جویی بیشتر از سناریوی WDM، هزینه ۴۰۰ SBVTs گیگ باید کوچکتر مساوی یک دهم ICU باشد، که دستیابی به آن غیرممکن است.

برای مورد (ب)، فرض می کنیم فرستنده گیرنده MB-OFDM ده گیگابیت برثانیه DD در MTU ها و S-BVT DD MB-OFDM در سرورهای BRAS (پشتیبانی از N = 8 جریان ، و هر جریان در خدمت M = 5 تعداد MTU با سرعت ده گیگابیت بر ثانیه) باشند. همانطور که در بالا گفته شد، فرض خواهیم کرد که هر ROADM به طور مساوی بارگذاری شده است، بنابراین در خدمت ۱۴عدد MTUاست. بنابراین، هر ROADM به سه جریان DD S-BVT نیاز دارد و در کل، ما به ده عدد DD S-BVT نیاز داریم. برای دستیابی به صرفه جویی در هزینه بیش از ۳۰ درصد بیشتر از شبکه WDM ، هزینه S-BVT-DD ۴۰۰ گیگ باید کوچکتر مساوی ۲,۹ ICU باشد، که بسیار امیدوار کننده است، زیرا انتظار می رود S-BVT با همان نرخ همسان، هزینه‌ای در حدود سه ICU سال ۲۰۱۵ [۶] بوده و هزینه DD S-BVT بسیار پایین تر خواهد بود.

نتیجه اینکه، مقایسه بین WDM و شبکه گرید منعطف MAN، نشان داد که ترنسپوندرهای گرید منعطف CO که برای شبکه های مرکزی پیش بینی شده‌اند گران هستند، در حالی که ترنسپوندرهای مستقیم DD به نظر می رسد یک راه حل امکانپذیر برای استفاده در گرید منعطف در MAN باشند.

۴- برنامه‌ریزی برای شبکه چند لایه‌ای جهت بهینه سازی هزینه و انرژی

افزایش انعطاف پذیری EON ها نه تنها برای صرفه جویی در طیف بلکه در هزینه و مصرف انرژی شبکه قابل توجه است. در حال حاضر، شبکه نوری و روترهای IP در لبه‌های آن، با توجه به هر دو حوزه فناوری بطور معمول ابعادی ندارند، اما این عمل برای EON ها

بسیار ناکارآمد به نظر میرسد. EON ها روش خوبی در استفاده از ترانسپوندرهای قابل تنظیم (با پهنای باند متغیر) بوجود می‌آورند که دارای چندین گزینه پیکربندی هستند و در نتیجه پارامترهای مختلف انتقال مانند سرعت، طیف و دستیابی به مسافتهای نوری به راحتی حاصل می‌شود. بنابراین، تصمیمات گرفته شده در شبکه نوری اغلب بر ابعاد روترهای IP در لبه های آن تأثیر می‌گذارند. این برخلاف سیستمهای سنتی WDM با گرید ثابت است که در آن وابستگی متقابل بین دو لایه ضعیف تر و با پویایی کمتری بود. در EONها، برای مثال می توانیم هر دو لایه را به طور مستقل ابعاد بندی کنیم، به طور مثال به صورت سلسله مراتبی، اما اگر هر دو لایه به طور مشترک برنامه ریزی شوند ، فضای گسترده ای برای بهینه سازی و افزایش وجود دارد. این دستاوردها علاوه بر دستاوردهای حاصل از عملیات شبکه چند لایه مانند ترمیم نیز حاصل می‌شود.

برای نگاه دقیق تر به مسئله برنامه ریزی چند لایه، شبکه را به شرح زیر مدل می‌کنیم. فرض می کنیم شبکه نوری متشکل از ROADMهایی است که از فن آوری گرید منعطف استفاده می‌کنند، که با یک یا چند فیبر متصل است. به هر سوئیچ نوری، صفر، یک یا چند روتر IP / MPLS وصل شده‌اند و این روترها لبه دامنه شبکه نوری را تشکیل می‌دهند. گیرنده فرستنده‌های کوتاه برد به روترهای IP/MPLS وصل می‌شوند و این انعطاف پذیری (قابل تنظیم) به ترنسپوندرها در ROADM ها منتهی می‌شود. برای تبدیل پاکتهای الکتریکی منتقل شده از روتر IP به حوزه نوری از ترانسپوندر استفاده می‌شود. فرض می‌کنیم که تعدادی از پارامترهای انتقال ترانسپوندرهای انعطاف پذیر قابل کنترل هستند، و بر سرعت، طیف و میزان برد نوری آنها تأثیر میگذارد که می‌توانند انتقال دهند. در مقصد مسیر نور، پاکتها به سیگنالهای الکتریکی تبدیل می‌شوند و توسط روتر IP/MPLS مربوطه هدایت و مدیریت می‌شوند. این می-تواند: به (۱) مقصد نهایی، که در این صورت ترافیک بیشتر به شبکه های سلسله مراتبی دست پایین مقصد نهایی خود هدایت شود. یا (۲) هاپ میانی، که در این صورت ترافیک دوباره وارد شبکه نوری خواهد شد تا در نهایت به مقصد حوزه خود هدایت شود. توجه داشته باشید که اتصالات بصورت دو طرفه هستند و بنابراین در توضیحات فوق مسیرهای نوری عکس نیز نصب شده‌اند و ترانسپوندرهای استفاده شده بطور همزمان به عنوان فرستنده و گیرنده عمل می‌کنند.

به دنبال مدل هزینه در [۶] و داده های مربوط به آن ([11] Cisco CRS-3) ، روتر IP/MPLS را به عنوان یک وسیله مدولار، که داخل (یک یا چند) شاسی نصب شده مدل می‌کنیم. شاسی تعداد مشخصی از اسلات (به عنوان مثال ۱۶) را با سرعت انتقال اسمی (به عنوان مثال ۴۰۰ گیگابیت در ثانیه) فراهم می‌کند. در هر اسلات، یک کارت خط با سرعت مربوطه قابل نصب است و هر کارت خط تعداد مشخصی از پورتها را با سرعت مشخص (مثلاً ۱۰ پورت ۴۰ گیگابیت بر ثانیه) فراهم می‌کند. مدل روتر مرجع ارائه شده در [۶] دارای ۱۶ عدد اسلات در هر شاسی، و انواع مختلفی از شاسی (fabric card, fabric card chassis) است که می تواند در کل برای اتصال تعداد ۷۲ کارت خط استفاده شود.

به دنبال بیان مدل فوق، در مسئله برنامه ریزی برای شبکه چند لایه، مشکلاتی در دو لایه بوجود می‌آیند: (۱) مسیریابیIP (IPR)، (۲) سطح مسیریابی و مدولاسیون (RML)، و (۳) دسترسی به طیف (SA). در مساله IPR، در مورد نصب ماژولها در روترهای IP/MPLSتصمیم می‌گیریم که، چگونه ترافیک را روی مسیرهای نوری (اتصالات نوری) تقسیم کنیم، و کدام روترهای IP/MPLS میانی برای رسیدن به حوزه مقصد نصب شوند. در مساله RML، تصمیم می‌گیریم که چگونه مسیرهای نوری را مسیریابی کنیم و همچنین تنظیمات انتقال ترانسپوندرهای انعطاف پذیر مورد استفاده را انتخاب کنیم. در SA، اسلاتهای طیف را به مسیرهای نوری اختصاص میدهیم، از همپوشانی اسلاتها (اختصاص همان اسلات به بیش از یک مسیر نوری) اجتناب کرده و از این که هر مسیر نوری از همان قطعه طیف (اسلاتهای طیف) در کل مسیر خود استفاده کند (محدودیت تداوم طیف) اطمینان پیدا می‌کنیم. از تنوع مساله IPRبه عنوان زیبا سازی ترافیکی نام برده می‌شود، در حالی که به مشکل RMLSA تطبیق فاصله‌ای RSA نیز گفته می‌شود. همانطور که قبلاً بحث شد تطبیق فاصله‌ای، وابستگی های متقابل بین مسیریابی در RML نوری لایه‌های IP و تخصیص طیف ایجاد می‌کند، و سبب دشواری در جدا کردن مشکلات فرعی می‌شود، مگر اینکه بتوانیم کارآیی را قربانی کرده و CAPEX و OPEX بالاتری بپردازیم.

چندین الگوریتم برای حل تغییرات مساله برنامه ریزی چند لایه، که در بالا توضیح داده شده است، توسعه داده شده است که شامل الگوریتم های بهینه و اکتشافی است [۱۲ - ۱۴]. هدف این است که هزینه CAPEX را به حداقل برسانیم، همچنین برخی از الگوریتم ها نیز طیف مورد استفاده و / یا مصرف انرژی را در نظر می‌گیرند[۱۵].

یافته ها در [۱۲] نشان می‌دهد که با EON نسبت به شبکه WDM می‌توانیم صرفه جویی حدود ۱۰٪ در سال ۲۰۲۰ برای یک شبکه ملی Deutsche Telecom ، و یک شبکه پن اروپایی (GEANT) ، بدست آوریم. توجه داشته باشید که این صرفه جویی برای سناریوهای محافظه کارانه محاسبه می‌گردد که در آن فرض می‌شود ترانسپوندرهای انعطاف پذیر (BVT) ٪۳۰ هزینه بالاتری نسبت به هزینه ترانسپوندرهای ثابت با حداکثر سرعت انتقال برابر (۴۰۰ گیگابیت در ثانیه) دارند. در کل برنامه ریزی شبکه چند لایه، بر خلاف برنامه ریزی برای IP و سلسله مراتبی شبکه نوری، می تواند صرفه جویی ۱۵٪ هزینه برای توپولوژی هایی مانند GEANT را نشان دهد که دارای تنوع گسترده‌ای در طول مسیر هستند، در حالی که این صرفه جویی برای شبکه های ملی کمتر است، که در آن اکثریت اتصالات با پارامترهای پیکربندی ترانسپوندرهای مشابه برقرار می‌شوند و از گزینه‌های افزایش در انتقال BVT ها استفاده نمی‌شود. درصد صرفه جویی در مصرف انرژی که در [۱۵] مشاهده شد ۲۵٪ بیشتر از صرفه جویی مربوط به هزینه بود زیرا در این حالت ما سطح مصرف انرژی مرجع مشابهی را برای BVT ها و ترانسپوندرهای ثابت در نظر گرفتیم.

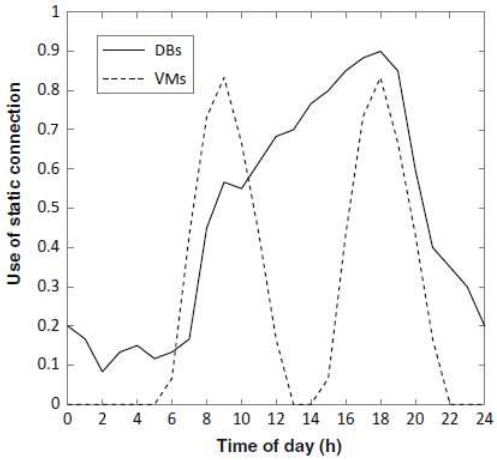
۵- اتصال مراکز داده

۵-۱- انگیزه

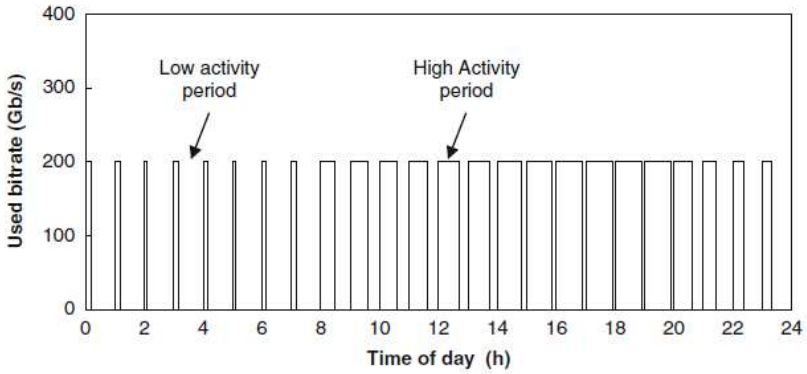
همانطور که در بالا معرفی شد، شبکه‌های انتقال در حال حاضر مانند لوله‌های بزرگ ثابتی هستند که بر اساس پیش بینی ظرفیت، پیکربندی شده‌اند. منطقی بودن آن ضامن تقاضای ترافیک و تعهد در کیفیت خدمات است. سناریو مبتنی بر ابر با مراکز داده (DC) وابسته به هم [۱۶] را در نظر بگیرید، ظرفیت هر اتصال نوری بین DC با توجه به مقدار داده‌های پیش بینی شده برای انتقال، از قبل انتخاب می‌شود. پس از بهره برداری، الگوریتم های برنامه ریزی فعال شده در مدیر منابع محلی DC، به صورت دوره‌ای سعی در بهینه سازی برخی عملکرد هزینه و سازماندهی انتقال داده‌ها میان DC ها (به عنوان مثال مهاجرت ماشین مجازی (VM) و همگام سازی پایگاه داده (DB))، به عنوان تابعی از نرخ بیت موجود دارد. از آنجا که ترافیک DC با گذشت زمان بسیار متفاوت است، پیکربندی اتصال استاتیک به دلیل ظرفیت انتقال اتصالات با تعداد بالا هزینه های زیادی را حتی در دوره هایی که مقدار داده برای انتقال کم است اضافه می‌کند.

شکل ۹ میزان بیت مورد نیاز نرمالایز شده را در طول روز برای مهاجرت VM و هماهنگ سازی DB بین DC نشان میدهد. توجه داشته باشید که هماهنگی DB عمدتا مربوط به فعالیتهای کاربران است، در حالی که مهاجرت VM مربوط به سیاستهای خاصی است که در الگوریتم های برنامه ریزی اجرا شده در داخل مدیران منابع محلی اجرا می‌شود.

شکل ۱۰ بیانگر میزان استفاده از میزان بیت در طول روز برای هماهنگ سازی DB است، هنگامی که نرخ بیت اتصال نوری استاتیک بین دو DC بر روی ۲۰۰ گیگابیت بر ثانیه تنظیم شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در دوره‌های عادی چنین ارتباطی آنچنان مورد استفاده قرار نمی‌گیرد، در حالی که در دوره‌های با فعالیت بالا از اتصال بطور مداوم استفاده می‌شود. توجه داشته باشید که اپراتورهای شبکه نمی‌توانند



شکل ۹. استفاده از اتصالات استاتیک برای مهاجرت VM و هماهنگ سازی DB در طول روز



شکل ۱۰. نرخ بیت بر روی اتصال نوری استاتیک ۲۰۰ گیگابیت بر ثانیه استفاده شده در طول روز

در دوره‌های عادی، منابع استفاده نشده را به مشتریان دیگر اختصاص دهند، و این در حالی است که منابع بیشتری برای کاهش زمان انتقال در دوره‌های با فعالیت بالا مورد استفاده قرار می‌گیرند.

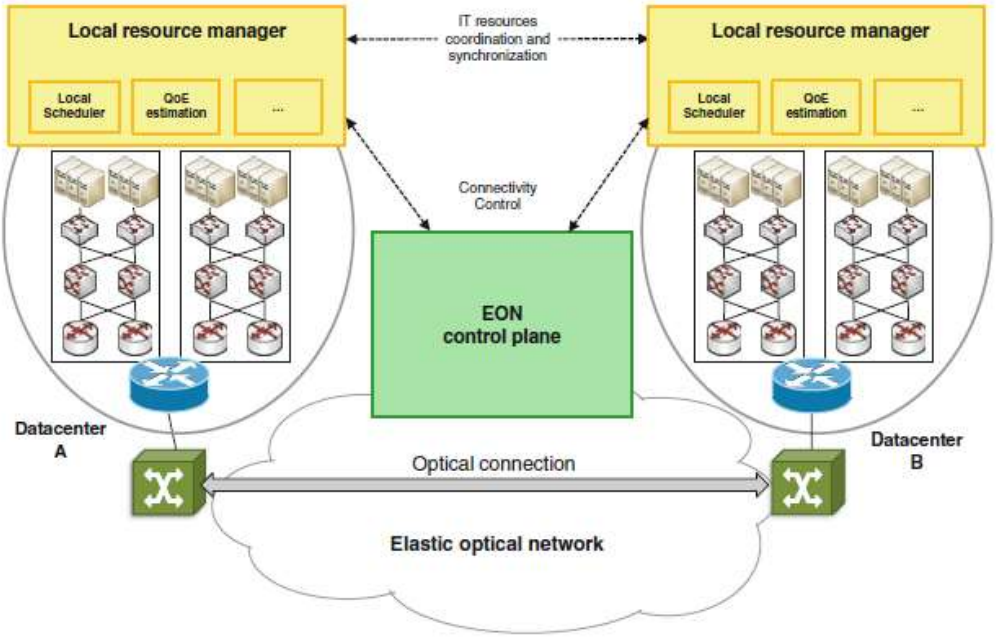
با توجه به موارد ذکر شده در بالا، واضح است که اتصال بین DC به مکانیسمهای جدیدی نیاز دارد تا بتواند پیکربندی و سازگاری شبکه انتقال را برای کاهش میزان پهنای باند پیش بینی شده فراهم کند. برای بهبود استفاده از منابع و صرفه جویی در هزینه‌ها، به اتصالی پویا بینDC ها نیاز است.

۵-۲- نیازمندی‌های اتصال پویا

برای رسیدگی به ابر پویا و تعامل در شبکه و امکان ایجاد اتصال در صورت تقاضا، شبکه انتقال ابری آماده در [۱۷] معرفی شده است. یک شبکه انتقال ابر آماده برای اتصال DC ها با مکانهای پراکنده جغرافیایی می‌تواند از مزایای EON که نرخ بیت مورد تقاضا را فراهم می‌کند بهره ببرد. اتصالات نوری را می‌توان با استفاده از پهنای باند طیفی مورد نیاز کاربران ایجاد کرد. علاوه بر این، با استقرار EONدر هسته شبکه، ارائه دهندگان شبکه می‌توانند استفاده از طیف را بهبود ببخشند، بنابراین به یک راه حل مقرون به صرفه برای پشتیبانی از خدمات خود دست می‌یابند.

شکل ۱۱ معماری شبکه مرجع و کنترل ابری را نشان میدهد که برای پشتیبانی از شبکه‌های انتقال ابر آماده استفاده می‌شود. مدیران منابع محلی در DC ها برنامه کنترل عملیات اتصال به EON را تعیین کرده و نرخ بیت مورد نیاز را مشخص می‌کنند.

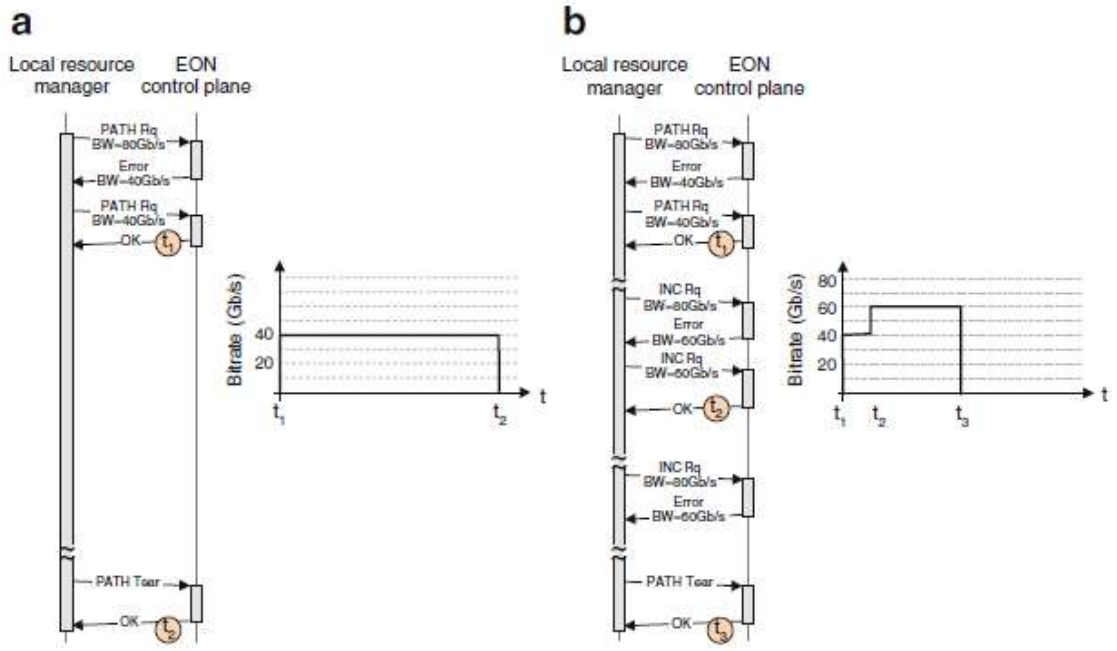
برخلاف اتصال استاتیک فعلی، اتصال پویا به هر مدیر منبع DC اجازه میدهد، از طریق اتصال نوری زمانیکه انتقال داده‌ها لازم است به DC راه دور وصل شود و همچنین در صورت تکمیل شدن انتقال داده‌ها، درخواست آزاد سازی اتصالات را کند. علاوه بر این، دانه‌ای بودن خوب طیف نوری و گسترده بودن نرخ بیت در EON باعث می‌شود که نرخ بیت واقعی اتصال نوری با اتصال انجام شده مورد نیاز مطابقت داشته باشد. بعد از درخواست اتصال و مذاکره در مورد ظرفیت آن به عنوان تابعی از منابع شبکه فعلی موجود، از نرخ بیت حاصل، به کمک برنامه ریزی الگوریتمها برای ساماندهی انتقال می‌توان استفاده کرد.



شکل ۱۱. معماری پشتیبانی از اتصالات بین DC ها

با استفاده از معماری نشان داده شده در شکل ۱۱، مدیران منابع محلی قادر به درخواست ارتباطات نوری بصورت دینامیکی با برنامه کنترل کننده کنترل EON و مذاکره در مورد نرخ بیت آن هستند. شکل a۱۲ توالی پیام بین مدیر منابع محلی و برنامه کنترل EONبرای ایجاد و قطع شدن اتصال نوری را نشان میدهد. هنگامی که ماژول مربوطه در مدیریت منابع محلی محاسبه اتمام انتقال داده را انجام داد، درخواستی برای اتصال نوری به DC راه دور ارسال می‌شود. به عنوان مثال، مدیر منابع محلی درخواستی را برای اتصال ۸۰ گیگابیت بر ثانیه ارسال می‌کند. عملیات داخلی در برنامه کنترل EON برای پیدا کردن مسیر و منابع طیفی برای آن درخواست انجام می‌شود. با فرض اینکه منابع کافی برای میزان بیت درخواستی در دسترس نباشد، الگوریتم در برنامه کنترل EON حداکثر نرخ بیت را می یابد و در t1، پاسخی را همراه با اطلاعات به مدیر منبع مبدأ ارسال می‌کند. با دریافت حداکثر نرخ بیت در دسترس، در این مثال ۴۰ گیگابیت بر ثانیه، مدیر منابع، مشخصات انتقال را مجدداً محاسبه کرده و اتصال جدیدی را با نرخ بیت موجود در دسترس درخواست می‌کند. پس از اتمام انتقال، مدیر منابع محلی پیامی را به برنامه کنترل EON ارسال می‌کند تا اتصال را قطع کرده و منابع مورد استفاده آزاد کند (t2) تا بتوان آن به هر اتصال دیگری اختصاص داد.

با این وجود، دسترسی به منابع در زمان درخواست در رویکرد اتصال پویا تضمین نمی‌شود، و نبود منابع شبکه ممکن است منجر به زمان انتقال طولانی شود، زیرا انتقال در مدت زمان مطلوب امکان پذیر نیست. توجه داشته باشید که نرخ بیت اتصال قابل مذاکره مجدد نیست و همچنان در طول زمان اتصال ثابت باقی می ماند. برای کاهش تأثیر عدم دسترسی به منابع اتصال مورد نیاز، نویسندگان در [۱۸] پیشنهاد کردند از اتصال الاستیک پویا استفاده کنند. در مدل اتصال الاستیک پویا، هر مدیر منابع محلی اتصال به DCدور را کنترل می‌کند تا بتواند انتقال داده را در کمترین زمان انجام دهد. مدیر منابع نه تنها عملیات شروع و قطع کردن اتصالات بلکه سرعت انتقال را نیز کنترل می‌کند. مدیر منابع محلی می‌تواند درخواست افزایش در نرخ بیت اتصالات از قبل ایجاد شده را داشته باشد. شکل b۱۲ پیام های رد و بدل شده بین مدیر منابع محلی و برای کنترل EON برای شروع و قطع یک اتصال نوری و همچنین افزایش نرخ بیت آن را نشان می‌دهد.



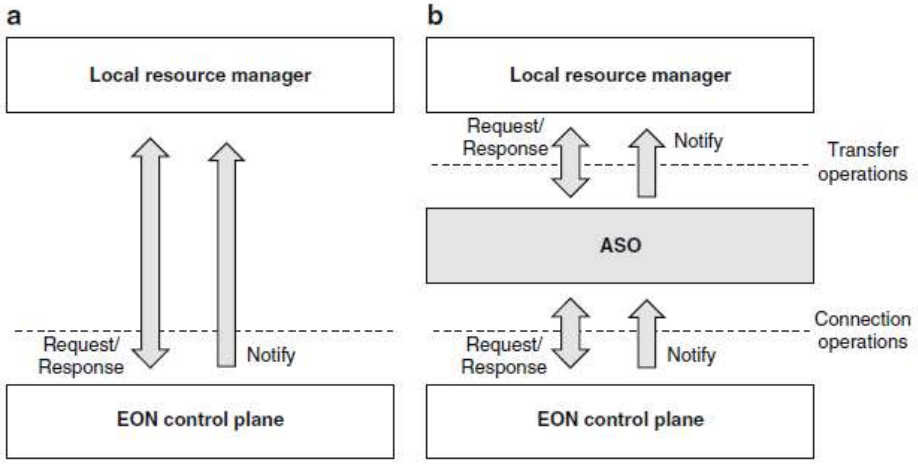
شکل ۱۲. معماری پشتیبانی از اتصالات بین DC ها

در مثال در شکل ۱۲ b پس از برقراری اتصال در t1 با کمتر از نرخ بیت اولیه درخواست شده (یعنی ۴۰ گیگابیت در ثانیه به جای ۸۰ گیگابیت در ثانیه درخواست شده)، مدیر منابع محلی درخواستهای تجدیدنظر دوره‌ای را برای افزایش نرخ بیت اتصال ارسال می کند. در این مثال، برخی از منابع پس از برقراری اتصال آزاد می‌شوند. درخواست افزایش میزان بیت اتصال دریافت می‌شود و می‌توان منابع اضافی را به اتصال اختصاص داد (t2) که باعث کاهش زمان انتقال می‌شود. در این مثال، اتصال به ۶۰ گیگابیت در ثانیه افزایش می‌یابد. توجه داشته باشید که این برای هر دو اپراتور DC سودمند است، بدلیل اینکه عملکرد بهتری میتوان بدست آورد، و اپراتور شبکه، از منابع استفاده نشده را بلافاصله مورد استفاده قرار می‌دهد.

شایان ذکر است، گرچه برنامه‌ها کنترل کاملی بر فرایند اتصال دارند، اما منابع شبکه فیزیکی در بین تعدادی از مشتری‌ها مشترک هستند. بنابراین، برقراری اتصال و عملیات ارتجاعی به دلیل کمبود منابع در شبکه می‌توانند مسدود شوند. از این رو، برنامه ها باید نوعی درخواست‌های دوره ای را پیاده سازی کنند تا نرخ بیت اختصاص داده شده را افزایش دهد. این درخواست‌های مکرر می‌تواند بر عملکرد برنامه کنترل EON تأثیر منفی بگذارد و از دستیابی به نرخ بیت بالاتر اطمینان حاصل نشود.

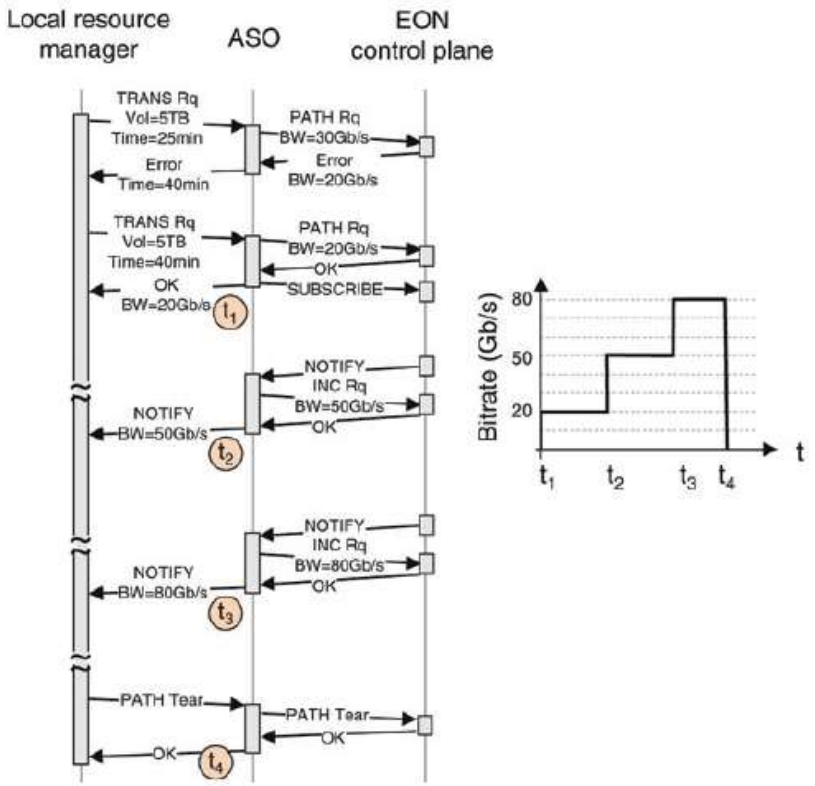
۵-۳- نیازمندی‌های حالت انتقال

با هدف بهبود مدیریت شبکه و منابع ابری، نویسندگان در [۱۹] پیشنهاد دادند از شبکه تعریف شده نرم افزاری (SDN) استفاده کنند، و عنصر جدیدی به نام Oraclestrator Application Application (ASO) بین مدیران منابع محلی و برنامه کنترل EON اضافه کنند. مدیران منابع میتوانند عملیات انتقال را با استفاده از اطلاعات بومی خود درخواست کنند (به عنوان مثال حجم داده و حداکثر زمان برای انتقال)، و توسعه دهندگان برنامه را از درک و برخورد با مشخصات و پیچیدگی های شبکه آزاد کنند. لایه ASO مستقر در بالای برنامه کنترل EON یک لایه انتزاعی به شبکه زیرین فراهم می‌کند که اینترفیسی را برای درخواست آن دسته از عملیات انتقال، که تبدیل به درخواست اتصال در شبکه می شوند را فراهم می‌کند. شایان ذکر است در مواردی که درخواست های اتصال به ASO ارسال می شوند، ASO به عنوان یک پروکسی بین مدیر منابع محلی و شبکه عمل می‌کند. شکل ۱۳ معماری کنترلی را که از درخواست های حالت پویا و انتقال پشتیبانی می‌کند، نشان می‌دهد.



شکل ۱۳. معماری کنترل پشتیبان: الف) اتصالات پویا و ب) درخواستهای حالت انتقال

ASO درخواستهای انتقال را به درخواستهای اتصال ترجمه می‌کند و آنها را به برنامه کنترل EON که مسئولیت شبکه را بر عهده دارد ارسال می‌کند. اگر در زمان درخواست، منابع کافی وجود نداشته باشد، اعلان ها هر بار که منابع خاصی آزاد شوند (شبیه به قطع کامپیوترها) از برنامه کنترل EON به ASO ارسال می‌شوند. پس از دریافت اعلان، SDN تصمیم می‌گیرد که آیا نرخ بیت مربوط به انتقال را افزایش دهد یا خیر، و به مدیر منابع محلی مربوطه تغییرات در نرخ بیت را اعلام می‌کند. این مدل اتصال برای inter-DC حرکتی است موثر از مدل الاستیک پویا به مدل انتقال شبکه محور. شکل ۱۴ نمونه ای از پیامهای درخواستی برای عملیات انتقال که بین مدیر منابع محلی، ASO و برنامه کنترل EON را رد و بدل شده را نشان می‌دهد.



شکل ۱۴. درخواست حالت انتقال

مدیر منابع محلی برای انتقال پنج ترابایت از داده در ۲۵ دقیقه، درخواست حالت انتقال را به ASO می‌فرستد. واحد ASO پس از دریافت درخواست، آن را به پیامهای اتصال به شبکه ترجمه می‌کند، درخواستی را به برنامه کنترل EON می‌فرستد تا با در نظر گرفتن خط مشی‌های محلی و SLA فعلی، بزرگترین عرض طیف موجود را پیدا کند، سپس پاسخی را با بهترین زمان اتمام برای انتقال مقدار مورد نیاز داده ها، که در این مثال ۴۰ دقیقه است به مدیر منبع ارسال می‌کند. مدیر منابع، انتقال داده‌ها را ترتیب داده و با زمان تکمیل پیشنهادی درخواست انتقال جدید را ارسال می‌کند. یک اتصال جدید برقرار شده و ظرفیت آن در پیام پاسخ در زمان t1 ارسال می‌شود. علاوه بر این، SDN از برنامه کنترلی EON درخواست می‌کند تا از منابع بیشتری که در مسیر ارتباط در دسترس هستند مطلع شود. الگوریتم های مستقر در برنامه کنترل در دسترس بودن طیف در لینک های فیزیکی مربوطه را مانیتور می‌کنند. هنگامی که در دسترس بودن منبع، امکان افزایش نرخ بیت اختصاص داده شده برای برخی از اتصالات را فراهم می‌سازد، کنترلر SDN بطور مستقل عملیات اختصاص طیف بصورت الاستیک را انجام می‌دهد تا از زمان اتمام انتقال تعهد شده اطمینان حاصل کند. هر بار که کنترل کننده SDN با انجام عملیات طیف الاستیک، مقدار کمی از هر اتصال را تغییر می‌دهد، یک اعلان به مدیر منبع که شامل اطلاعات توان خروجی است ارسال می‌شود. در این مثال، برخی منابع شبکه آزاد می شوند و برنامه کنترل، بخش SDN را آگاه می‌کند. به شرط آنکه بتوان آن منابع را به اتصال اختصاص داد، نرخ بیت تا ۵۰ گیگابیت در ثانیه افزایش یافته و EON مدیر منابع را از افزایش نرخ بیت در t2 آگاه می‌سازد. سپس مدیر منبع DC می‌تواند انتقال را به عنوان تابعی از توان واقعی خروجی هنگام تفویض و اطمینان از تکمیل زمان انتقال به SDN بهینه کند. به همین ترتیب، در زمان t3 منابع شبکه دیگر آزاد می‌شوند و در دسترس قرار می‌گیرند. ظرفیت اتصال به ۸۰ گیگابیت بر ثانیه افزایش می‌یابد. سرانجام، در زمان t4، اتصال قطع شده و منابع شبکه مربوطه آزاد می‌شوند.

سرانجام، مدل پیشنهادی مبتنی بر شبکه، فرصتی را برای اپراتورهای شبکه برای پیاده سازی سیاستها فراهم می آورد تا بطور پویا نرخ بیت اتصالات مجموعه‌ای از مشتریان را مدیریت کرده و همزمان SLAهای خود را برآورده سازند[20] .

برای نتیجه گیری باید گفت، EON میتواند زیرساخت هایی را برای اتصال DC ها ایجاد کند. الزامات در این زمینه اساسا مربوط به ایجاد ظرفیت برای پشتیبانی از اتصالات پویا و الاستیک هم در بخش کنترل و هم در بخش داده است، زیرا ترافیک بین DC ها در طول روز به شدت متفاوت است.

۶- نتیجه گیری

این مقاله به خلاصه‌ای از ویژگیهای EON می‌پردازد که در حال باز کردن افق‌های جدید در درک شبکه بندی آن است. نحوه عملکرد EON به طور ساده و پتانسیلهای بالقوه آن تشریح شدند. فواید EON با استفاده از موارد استفاده آن اثبات شد، و توضیح داده شد که چگونه فن آوری گرید منعطف می تواند برای انعطاف پذیری در شبکه چند لایه، سرویس دهی به شبکه‌های مترو و سرانجام اتصال به مراکز داده سودمند باشد.

مراجع

1. ITU-T G.694.1, Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid, February 2012.
2. R. Ramaswami, K.N. Sivarajan, Routing and wavelength assignment in all-optical networks.IEEE/ACM Trans. Netw. **3** (5), 489–500 (1995).
3. M. Gunkel, A. Autenrieth, M. Neugirg, J. Elbers, Advanced multilayer resilience scheme with optical restoration for IP-over-DWDM core networks—how multilayer survivability might improve network economics in the future, in *International Workshop on Reliable Networks Design and Modeling (RNDM)* , 03.10.2012, St. Petersburg, Russia, 2012
4. Curri et al., Time-division hybrid modulation formats: Tx operation strategies and countermeasures to nonlinear propagation, in *Proceedings OFC, 2014.*
5. A. Autenrieth, J. Elbers, M. Eiselt, K. Grobe, B. Teipen, H. Grießer, Evaluation of technology options for software-defi ned transceivers in fi xed WDM grid versus fl exible WDM grid optical transport networks, in *Proceedings ITG Photonic Networks* , 2013
6. F. Rambach, B. Konrad, L. Dembeck, U. Gebhard, M. Gunkel, M. Quagliotti, L. Serra, V. López, A multilayer cost model for metro/core networks. J. Opt. Commun. Netw. **5** , 210– 225 (2013).
7. O. Gerstel, M. Jinno, A. Lord, S.J. Ben Yoo, Elastic optical networking: a new dawn for the optical layer? IEEE Commun. Mag. **50** (2), S12–S20 (2012).
8. M. Svaluto et al., Experimental validation of an elastic low-complex OFDM-based BVT for flexi-grid metro networks, in *ECOC* , 2013.
9. M. Svaluto et al., Assessment of fl exgrid technologies in the MAN for centralized BRAS architecture using S-BVT, in *ECOC* , 2014.
10. Idealist deliverable D1.1, Elastic optical network architecture: reference scenario, cost and planning
11. Cisco CRS-3, http://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/routers/carrier-routing- system/data_sheet_c78-408226.html.
12. V. Gkamas, K. Christodoulopoulos, E. Varvarigos, A joint multi-layer planning algorithm for IP over fl exible optical networks. IEEE/OSA J. Lightwave Technol. **33** (14), 2965–2977 (2015).
13. O. Gerstel, C. Filsfi ls, T. Telkamp, M. Gunkel, M. Horneffer, V. Lopez, A. Mayoral, Multilayer capacity planning for IP-optical networks. IEEE Commun. Mag. **52** (1), 44–51 (2014).
14. C. Matrakidis, T. Orphanoudakis, A. Stavdas, A. Lord, Network optimization exploiting grooming techniques under fi xed and elastic spectrum allocation, in *ECOC* , 2014.
15. V. Gkamas, K. Christodoulopoulos, E. Varvarigos, Energy-minimized design of IP over fl exible optical networks. Wiley Int. J. Commun. Syst. (2015). doi: 10.1002/dac.3032.
16. I. Goiri, J. Guitart, J. Torres, Characterizing cloud federation for enhancing providers' profi t, in *Proceedings IEEE International Conference on Cloud Computing* , 2010, pp. 123–130.

17. L. Contreras, V. López, O. González De Dios, A. Tovar, F. Muñoz, A. Azañón, J.P. Fernandez-Palacios, J. Folgueira, Toward cloud-ready transport networks. IEEE Commun. Mag. **50** ,48–55 (2012).
18. L. Velasco, A. Asensio, J.L. Berral, V. López, D. Carrera, A. Castro, J.P. Fernández-Palacios, Cross-stratum orchestration and fl exgrid optical networks for datacenter federations. IEEE Netw. Mag. **27** , 23–30 (2013).
19. L. Velasco, A. Asensio, J.L. Berral, A. Castro, V. López, Towards a carrier SDN: an example for elastic inter-datacenter connectivity. OSA Opt. Express **22**, 55–61 (2014).
20. A. Asensio, L. Velasco, Managing transfer-based datacenter connections. IEEE/OSA J. Opt. Commun. Netw. **6** , 660–669 (2014).

APSK	Amplitude and phase-shift keying
AWG	Arrayed-Waveguide Gratings
BV-OXCs	Bandwidth Variable Optical Cross Connect
BVT	Bandwidth Variable Transponder
CAPEX	Capital expenditure
CO	Coherent detection
DB	Database
DC	Data center
DD	Direct Detection
EON	Elastic Optical Network
FRR	Fast Reroute
FTP	File transfer protocol
ITU-T	International Telecommunication Union
LCoS	Liquid-Crystal-On-Silicon
MLR	Multi-layer resilience
NRZ	Non-return-to-zero
OOK	On-off-keying
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QPSK	Quaternary Phase Shift Keying
RML	Routing and Modulation Level
ROADM	Reconfigurable OADM
RSA	Routing and Spectrum Assignment
RWA	Routing and Wavelength Assignment
S-BVT	Sliceable BVT
SDN	Software Defined Network
SLA	Service Level Agreement
VM	Virtual Machine
WSON	Wavelength switched optical networks