



Providing a new multi-path algorithm for reducing spectrum fragmentation in Elastic Optical Networks

* Yaghoub khorasani¹, Ebrahim Chegini²

1. Department of Communication Engineering, Tabriz University of Technology, Tabriz, Iran

2. Department of Electronics, K. N. Toosi, Tehran, Iran

Key words:

*Elastic Optical Network
Fragmentation
Bandwidth
Energy Consumption*

Abstract

Elastic optical networks (EON) are a suitable and promising platform to address the growing global traffic demand, and many researchers have conducted extensive studies to improve parameters such as energy consumption and crosstalk in these networks. One of the key challenges in flexible optical networks is spectrum fragmentation. To address this challenge, two general approaches have been proposed: reactive and proactive. Multi-path routing is one of the strategies under the reactive approach. In this strategy, the requested spectrum of each demand is divided into smaller segments, and each segment is transmitted to the destination via an independent path. While spectrum fragmentation in such algorithms is significantly reduced, some existing algorithms fail to utilize the available bandwidth optimally due to inefficient spectrum partitioning. This leads to reduced bandwidth efficiency. This paper proposes a novel multi-path algorithm that fully utilizes the available bandwidth. Simulation results demonstrate that the proposed algorithm not only reduces the blocking probability of incoming requests but also significantly improves bandwidth efficiency compared to similar approaches.



ارائه الگوریتم چند مسیره جدید برای کاهش پراکندگی طیف در شبکه های نوری منعطف

یعقوب خراسانی^{۱*}، ابراهیم چگینی^۲

۱- دکتری، دانشگاه صنعتی تبریز (سهند)، y_khorasani99@sut.ac.ir

۲- دکتری، دانشگاه خواجه نصیر، echgini@kntu.ac.ir

*Yaghoubkhorasani@gmail.com

واژگان کلیدی

چکیده

شبکه های نوری منعطف، بستر مناسب و امیدبخشی برای پاسخ به ترافیک در حال رشد جامعه جهانی است. محققان زیادی برای بهبود پارامترهای شبکه های نوری منعطف مانند مصرف انرژی، همسویی و .. تحقیقات زیادی انجام داده اند. یکی از چالشهای موجود در شبکه های نوری منعطف تکه تکه شدن طیف است. برای مقابله با این چالش، دو راهکار کلی واکنشی و فعال مطرح شده است. راهکارهای چند مسیره، یکی از راهکارهای زیرمجموعه راهکارهای واکنشی است که نتایج رضایت بخشی از خود نشان داده است. در این راهکار، مقدار طیف درخواستی هر تقاضا، به چندین طیف کوچکتر شکسته می شود و هر طیف کوچک توسط یک مسیر مستقل به مقصد ارسال می شود. مقدار تکه تکه شدن طیف در این گونه الگوریتم ها، بسیار کم است اما برخی از الگوریتم های موجود به علت تقسیم غیر بهینه طیف، از پهنای باند موجود، استفاده بهینه نمی کنند که این موضوع باعث کاهش کارایی پهنای باند می شود. در این مقاله راهکاری جدیدی از نوع چند مسیره ارایه می گردد که از پهنای باند به صورت کامل استفاده می کند. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که نه تنها احتمال مسدودی درخواست های ورودی در الگوریتم پیشنهادی کاهش یافته است بلکه کارایی پهنای باند نیز نسبت به راهکارهای مشابه به مقدار قابل توجهی بهبود پیدا می کند.

شبکه های نوری منعطف
تکه تکه شدن طیف
پهنای باند
مصرف انرژی

می شود که در سال های آینده نیز رشد درخواست های اینترنتی با همین شیب ادامه دار خواهد بود.

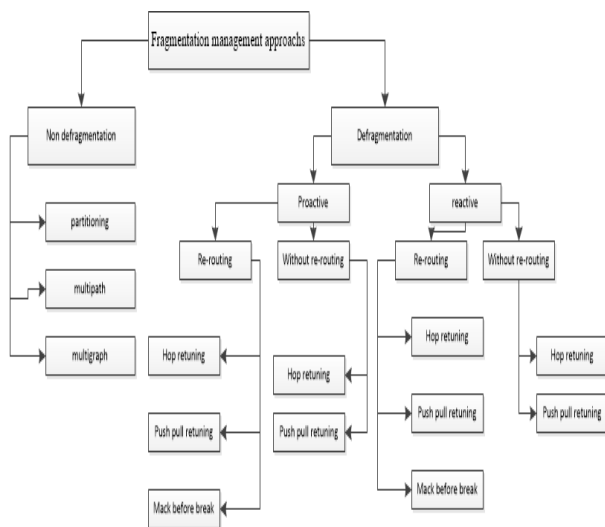
۱- مقدمه

دلایل زیادی را می توان برای این رشد سریع درخواست های اینترنتی شمرد، اما از مهم ترین این عوامل می توان به گسترش اینترنت اشیا، محاسبات ابری و رسانه های تعاملی و همچنین رسانه های تعاملی اشاره کرد. مسلماً با افزایش و گسترش عوامل فوق، درخواست های اینترنتی در سال های آینده با

امروزه نیازهای بشر با سرعت زیادی در حال تغییر است. نیاز به تبادل اطلاعات یکی از مواردی است که سرعت رشد آن در سال های اخیر، با شتاب چشمگیری افزایش یافته، به طوری که از سال ۱۰۱۲ تاکنون، رشد درخواست های اینترنتی در هر سال، دو برابر سال قبل شده است و پیش بینی

تکه تکه شدن طیف است [۳]. در EON به علت تخصیص پویا طیف و رعایت کردن محدودیت های پیوستگی و مجاورت پدیده تکه تکه در طیف رخ می دهد که در صورت عدم مدیریت، باعث هدر رفت منابع و کاهش بهره وری از طیف می شود [۴].

در شکل ۱ راهکارهای احتیاطی مقابله با تکه تکه شدن طیف به صورت زیر دسته بندی شده است [۵]. توجه داشته باشید که رویکردهای بدون یکپارچه سازی، و یکپارچه سازی متقابل نیستند. می توان طرحی را با در نظر گرفتن هر دو رویکرد بدون یکپارچه سازی و یکپارچه سازی ایجاد کرد. در رویکردهای بدون یکپارچه سازی، اقدامات احتیاطی لازم، برای جلوگیری از تکه تکه شدن قبل از ایجاد مسیر نوری انجام می شود [۶].



شکل ۱: راهکارهای مقابله با تکه تکه شدن طیف در شبکه های نوری منعطف [۵]

• راهکارهای بدون یکپارچه سازی

در رویکردهای بدون یکپارچه سازی [۷-۹]، قبل از تخصیص طیف به هر ارتباط، اقداماتی انجام می شود تا از تکه تکه شدن طیف جلوگیری شود. رویکردهای بدون یکپارچه سازی، [۱۰-۱۲] مورد توجه محققان قرار گرفته است زیرا هزینه های سرمایه ای و هزینه های عملیاتی را کاهش می دهند. با این حال، این رویکردها از نظر حجم ترافیک قابل قبول نیست زیرا نسبت به

رشد سریع تری نسبت به سال های گذشته روبه رو خواهد شد که باید از هم- اکنون بستر لازم را برای پاسخ به درخواست های آینده فراهم نمود.

کابل مسی یکی از قدیمی ترین بسترهای انتقال اطلاعات است که هنوز در برخی از موارد از آن استفاده می شود. کابل های مسی دارای پهنای باند کمی هستند، به همین علت در مواقعی که حجم اطلاعات زیاد است استفاده از کابل های مسی پیشنهاد نمی گردد. یکی دیگر از کانال های مهم ارتباطی، کانال ارتباطی بی سیم است. امکان انتقال اطلاعات به صورت بی سیم باعث فراهم شدن پویایی در ارتباط و فراهم کردن بستر موبایل در ارتباطات شده است. استفاده از تلفن همراه، بی سیم، پیجر و غیره، از جمله امکاناتی هستند که به خاطر استفاده از این کانال خلق شده است. کانال ارتباطی بی سیم دارای استانداردهای متفاوتی هست که هر کدام در باند فرکانسی مشخصی کارایی دارد. از مزایای شبکه های بی سیم می توان به گسترش محدوده ارتباط نسبت به شبکه های باسیم، هزینه کم و کارایی بیشتر نسبت به شبکه های سیمی اشاره کرد. اما در کنار این مزایا امنیت ارتباط، موضوع بسیار مهمی است که در این گونه از کانال ها مورد بحث است.

در سال های اخیر با ظهور شبکه های نوری منعطف (EON) و گسترش آن، انعطاف زیادی از نظر حیطه ی زمانی و مکانی و همچنین نوع مدولاسیون و اندازه پهنای باند تخصیصی به هر تقاضا به صورت کاملاً پویا فراهم شده است. انعطاف در فرکانس و امکان استفاده از مدولاسیون های مختلف و سطوح مختلف از آن ها، باعث انعطاف در پهنای باند و بهینه کردن استفاده از منابع طیف است [۱].

یکی از تفاوت های شبکه های نوری منعطف با شبکه های نوری نسل قبل (WDM^1)، ثابت نبودن تقسیم بندی طیفی است. در شبکه های WDM تقسیم بندی طیفی ثابت و برای هر کانال ۵۰ گیگاهرتز در نظر گرفته شده است. ثابت بودن اندازه طیفی هر کانال دو مشکل اساسی را به دنبال دارد. اول اینکه در مواردی که انتقال اطلاعات به پهنای باند بیشتر از ۵۰ گیگاهرتز نیاز دارد، این شبکه قادر به پاسخ نیست و دوم اینکه در مواقعی که انتقال اطلاعات به پهنای باند کم نیاز داشت، این شبکه هدر رفت پهنای باند دارد [۲].

یکی از موضوعات مهمی که باعث هدر رفت منابع و افزایش مقدار مسدودی (Blocking Rate) در شبکه های نوری منعطف می گردد، پدیده

¹ Wavelength Division Multiplexing

ارائه الگوریتم چند مسیره جدید برای کاهش پراکندگی طیف در شبکه های نوری منعطف، یعقوب خراسانی و ابراهیم چگینی

احتمال مسدودی درخواست های ورودی را نسبت به الگوریتم های [۱۴] و [۱۳] کاهش میدهد بلکه بهره وری حداکثری پهنای باند را به دنبال دارد.

در الگوریتم های چند مسیره بر اساس روش مشخصی اسلات های هر هسته بلوک بندی می شوند. پس از ورود درخواست جدید، مقدار اسلات درخواستی مد نظر قرار می گیرد و این مقدار به ۲ یا چند درخواست کوچکتر شکسته می شود. جهت توضیح شفاف تر مثال ۱ را در نظر بگیرید.

مثال ۱: فرض کنید در یک شبکه EON تعداد هسته ها برابر ۳ و تعداد اسلات های هر هسته ۳۰۰ باشد. در این شبکه بر اساس الگوریتم چند مسیره، اسلات های هسته اول به بلوک های ۱۰۰ تایی، هسته دوم به بلوک های ۵۰ تایی و هسته سوم به بلوک ۱، بلوک بندی شوند (هسته ای با بلوک ۱ مورد نیاز است). فرض کنید درخواستی به این شبکه وارد شود که تعداد اسلات درخواستی آن ۲۵۳ باشد. برای پاسخ به این درخواست، ۲ بلوک از هسته ۱، یک بلوک از هسته ۲ و سه بلوک از هسته ۳ استفاده می شود.

سیاست بلوک بندی در این گونه روش ها دارای اهمیت فراوانی است. در برخی از الگوریتم های چند مسیره، نحوه بلوک بندی آنها باعث، عدم مقیاس پذیری و یا کاهش بهره وری طیف می شود لذا هدف این مقاله ارائه الگوریتم چند مسیره ای است که سیاست بلوک بندی مورد استفاده در آن به صورت بهینه عمل کند.

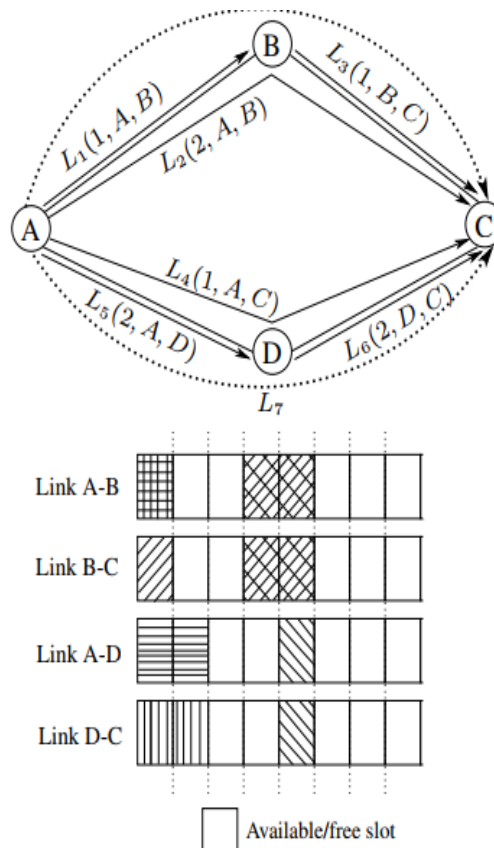
سازماندهی مطالب در این مقاله به این ترتیب است که در بخش ۱ مقدمه ای از شبکه های نوری منعطف مطرح گردید. در بخش ۲ الگوریتم پیشنهادی مطرح می شود. نتایج آزمایشگاهی در بخش ۳ ارائه می گردد و نهایتاً بخش ۴ به نتیجه گیری می پردازد.

۲- الگوریتم پیشنهادی

در این بخش، یک الگوریتم جدید مبتنی بر چند مسیره در هر هسته با نام OPT2-SBMC-RSCA ارائه شده است. الگوریتم های spectrum block multipathing per core بر اساس مفهوم چند مسیری کار می کنند. در الگوریتم های چند مسیری بلوک طیفی در هر هسته، تعداد اسلات های درخواستی در هر تقاضا به چندین بلوک تقسیم می شود و هر بلوک را می توان از یک هسته بین یک منبع و مقصد معین اختصاص داد.

رویکردهای یکپارچه سازی عملکرد پایین تری دارند. در رویکردهای بدون یکپارچه سازی، از استراتژی های زیر برای کاهش تکه تکه شدن طیف استفاده می شود.

مسیریابی چند مسیره [۱۳، ۱۴] یکی از راهکارهای بدون یکپارچه سازی است که برای کاهش محدودیت مجاورت طیف معرفی شد و از آن به عنوان مسیریابی تقسیم طیف [۱۵] نیز یاد می شود. مفهوم مسیریابی چند مسیری یا تقسیم طیف در شکل ۲ ارائه شده است. در شکل ۲ یک درخواست مسیره نوری $L(F; S; D)$ را در نظر گرفته شده است، که در آن F, S, D به ترتیب تعداد اسلات های پیوسته، منبع و مقصد مورد نیاز هستند.



شکل ۲: رویکردهای مسیریابی چند مسیره [۱۵]

یکی از مهمترین مسائل در الگوریتم های چند مسیره، بهره وری طیف و همچنین کاهش احتمال مسدودی درخواست های ورودی است. الگوریتم های مطرح شده در مرجع های [۱۴] و [۱۳] علی رغم کاهش احتمال مسدودی درخواست های ورودی به علت استفاده نکردن بهینه از پهنای باند، بهره وری کمی دارند از این رو در این مقاله الگوریتمی معرفی می گردد که نه تنها

پژوهش های نوین در مهندسی برق و الکترونیک هوایی دوره دوم، شماره ۱، پاییز ۱۴۰۴

```

19- Use slots 296 to 300 from core 1 and 2
    or slots 297-300 of cor0
20- End IF
21- Remain_FS = remain_FS - S
22- End IF
23- End For
24- End For
25- IF(Remain_FS = 0)
26- For i = 0 to C-1
27- Assign the found spectrum starting from Gap(i)
    on core i to connection
28- Break
29- End For
30- Else
31- Block request
32- End If

```

الگوریتم ۱: الگوریتم OPT2-SBMC-RSCA

در شبه کد ۱ در خطوط ۱-۳، SBR هر هسته مشخص می شود. مقدار SBR هر هسته بر اساس توان های عدد ۲ و شماره هر هسته مشخص می شود. به عنوان مثال اگر فیبر نوری دارای ۷ هسته باشد، و هسته ها، با شماره های (i) ۰ الی ۶ مشخص شود، SBR هسته های به ترتیب برابر ۱، ۲، ۴، ۸، ۱۶، ۳۲، ۶۴ می باشند. خط ۵ حلقه FOR است که همه K مسیر ممکن بین مبدا و مقصد را مد نظر قرار می دهد. در خط ۷ هسته ها، به ترتیب نزولی بررسی می شوند. هر هسته براساس SBR مخصوص به آن هسته، در صورت نیاز مورد استفاده قرار می گیرد. شایان ذکر است که برای تخصیص از سیاست SMART-FIT استفاده گردیده است که بهترین نتایج از نظر مقابله با تکه تکه شدن طیف را از خود نشان داد [۱۴]. در ادامه، با فرض اینکه تعداد اسلات های طیف ۳۰۰ باشد به بررسی بلوک های با اندازه ۳۲، ۸، ۴ می پردازد. در این حالات، پس از بررسی بعضی از هسته ها، در صورتی که بلوک خالی وجود نداشته باشد از اسلات های بلااستفاده از هسته های دیگر استفاده می کند. در خطوط ۱۲ الی ۱۴ در صورتی که نیاز به بلاک با اندازه ۳۲ وجود داشته باشد و در هسته ۱ بلوک خالی وجود نداشته باشد، از اسلات های ۲۵۸ الی ۲۹۰ هسته ۰ استفاده می شود. در ادامه برای بلوک های با اندازه ۸ و ۴ نیز این موضوع تکرار می شود. جهت روشن شدن مطالب فوق به مثال ۲ توجه شود.

مثال ۲: فرض کنید در یک شبکه EON که دارای ۷ هسته است تمام اسلات های هسته ۱ اشغال شده باشد. بر اساس الگوریتم OPT2-SBMC-RSCA اسلات های هسته ۱ به بلوک های با اندازه ۳۲ بلوک بندی شده است. فرض کنید در این لحظه درخواستی با مقدار درخواستی ۳۴ وارد شبکه شود، در بهترین حالت این درخواست به دو درخواست کوچکتر با اندازه ۳۲ و ۲ شکسته

در این الگوریتم هر یک از هسته ها فقط برای مقدار مشخصی اسلات در نظر گرفته شده است.

OPT2-SBMC-RSCA بهبود یافته الگوریتم OPT-SBMC-RSCA

است. در الگوریتم OPT-SBMC-RSCA هر هسته به بلوک هایی با اندازه مشخص تقسیم می شود و بر اساس اندازه هر بلوک های هر هسته، از آن هسته در تخصیص طیف استفاده می شود. به عنوان مثال اگر یک هسته دارای ۳۰۰ اسلات باشد و اندازه هر بلوک در این هسته ۶۴ اسلات باشد، در این هسته، چهار بلوک با اندازه ۶۴ وجود دارد که برای درخواست های ورودی استفاده می شود. نکته ای که وجود دارد در این هسته ۴۴ اسلات وجود دارد که در بلوک خاصی قرار نمی گیرند در نتیجه از این اسلات ها استفاده ای نمی شود. این مورد باعث کاهش بهره وری (تقریباً ۱۵٪) هسته می گردد. در الگوریتم پیشنهادی این مشکل برطرف شده است. الگوریتم ۱، روند الگوریتم پیشنهادی را به صورت شبه کد نشان می دهد. در این شبه کد تعداد هسته ها ۷ و تعداد اسلات های هر هسته ۳۰۰ فرض شده است ($C=7$ and $N=300$)

Input:

b : number of required FS by a now connection

C : number of considered cores

$SBR[0]=2^0$, $SBR[1]=2^1$, ..., $SBR[C-1]=2^{C-1}$

Output: Connection setup

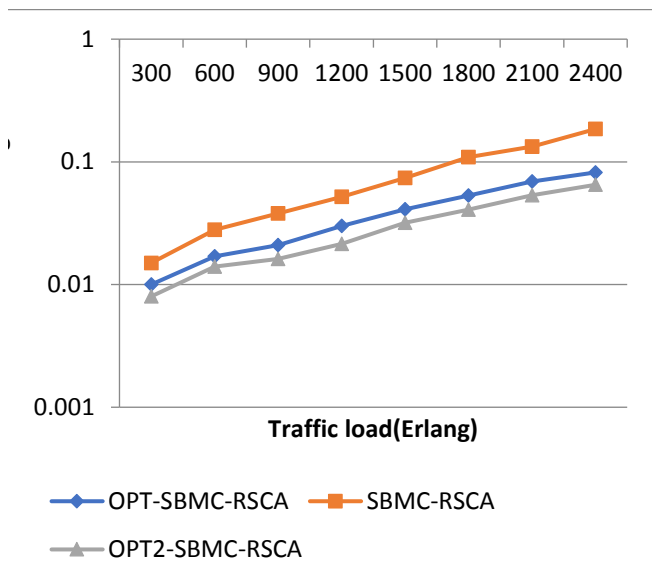
```

1- For i = 0 to C-1
2-   SBR[i] = 2C-1-i
3- End For
4- Remain_FS = required FS
5- For j = 1 to k
6-   Path = get j-th path
7-   For i = C-1 to 0
8-     IF (Remain_FS ≠ 0)
9-       Z = Int (Remain_FS / SBR[i])
10-      S = Z × SBR[i]
11-      Gap = Find-Smart-Free-Gap
12-      If i = 1 and Gap = {}
13-        Use slots 258 to 290 from core 0
14-      End IF
15-      If i = 3 and Gap = {}
16-        Use slots 291 to 297 from core 0
        or use slots 288 to 296 from core 1 and 2
17-      End IF
18-      If i = 4 and Gap = {}

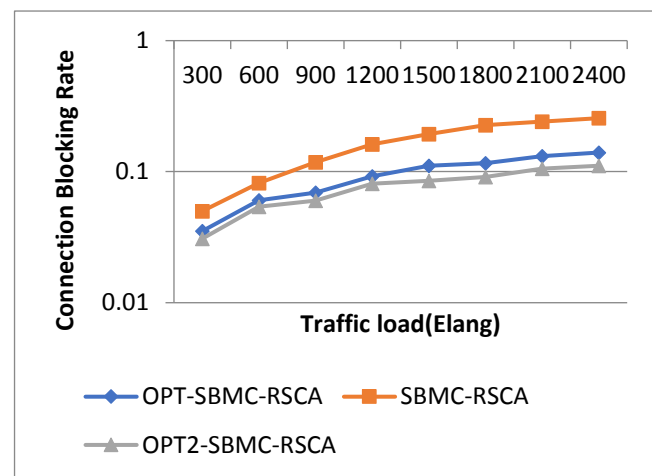
```

ارائه الگوریتم چند مسیره جدید برای کاهش پراکندگی طیف در شبکه های نوری منعطف، یعقوب خراسانی و ابراهیم چگینی

شکل ۳ و شکل ۴ نتایج شبیه سازی الگوریتم OPT2-SBMC-RSCA را بر اساس احتمال مسدود شدن درخواست ها در دو شبکه NSFNET و JPN-12 در مقایسه با الگوریتم های مشابه نشان می دهد.



شکل ۳: احتمال مسدودی درخواست های ورودی در ساختار شبکه NSFNET



شکل ۴: احتمال مسدودی درخواست های ورودی در ساختار شبکه JPN12

میزان احتمال مسدود شدن درخواست در الگوریتم OPT2-SBMC-RSCA در هر دو شبکه NSFNET و JPN-12 در مقایسه با الگوریتم های دیگر کاهش یافته است. علت کاهش احتمال مسدودی درخواست ها استفاده بهینه الگوریتم پیشنهادی نسبت به دو الگودیتیم دیگر است.

می شود. در الگوریتم OPT-SBMC-RSCA به علت عدم وجود بلوک خالی در هسته ۱، این درخواست مسدود می شود اما در الگوریتم OPT2-SBMC-RSCA جهت تامین بلوک خالی، از اسلات های بلا استفاده هسته ۰ (اسلات های ۲۵۸-۲۹۰) استفاده می شود و این درخواست برقرار می گردد.

۳- نتایج آزمایشگاهی

در این بخش نتایج حاصل از شبیه سازی، الگوریتم OPT2-SBMC-RSCA بررسی و ارزیابی می شود. برای ارزیابی الگوریتم OPT2-SBMC-RSCA، مقدار احتمال انسداد درخواست این الگوریتم بر اساس دو مدل شبکه (NSFNET و JPN-12) با دو روش ارائه شده در [۱۴] و [۱۳] مقایسه شده است. در شبیه سازی از مکانیسم K-Shortest path برای مسیریابی استفاده می شود که در آن $K=2$ را تنظیم می کنیم. اگر امکان برقراری ارتباط در مسیر اول وجود نداشته باشد، مسیر دوم امتحان می شود. در صورت عدم امکان قرار دادن در مسیر دوم، درخواست مسدود می شود.

گره های مبدأ-مقصد هر درخواست به طور تصادفی با استفاده از توزیع یکنواخت به دست می آیند و دو کوتاه ترین مسیر بین هر جفت گره مبدأ-مقصد در نظر گرفته می شود. تعداد هسته های یک لینک، $C=7$ در نظر گرفته می شود. هر هسته دارای کل عرض طیف 4THz است. فرض بر این است که پهنای باند یک حامل فرعی ۱۲.۵ گیگاهرتز است. تعداد اسلات ها برای هر هسته ۳۰۰ در نظر گرفته شده است. باند محافظ برای دو اتصال مجاور یک اسلات در نظر گرفته شده است. نتایج شبیه سازی در هر ترافیک در تمام نمودارها میانگین ۱۰ سناریو تکرار با فاصله اطمینان ۹۵ درصد است. کامپیوتر مورد استفاده در شبیه سازی دارای CPU Core-i5، 6 گیگابایت رم DDR3، هارد دیسک SSD، تحت ویندوز ۸.۱ است و از نرم افزار OPNET برای شبیه سازی استفاده شده است.

در همه شبیه سازی ها، فرض می شود که اسلات های درخواستی یک ارتباط به طور یکنواخت بین [۵۰، ۷۰] اسلات توزیع شده است. در شبیه سازی، زمان اعتبار برای هر ارتباط ۱۰ ثانیه است و فاصله زمانی بین دو ارتباط متوالی از توزیع نمایی پیروی می کند. شبیه سازی برای یک میلیون ارتباط انجام شده و محدوده بار ترافیکی بین ۳۰۰ تا ۲۴۰۰ ارلانگ است.

۴- نتیجه گیری

در این بخش از مقاله الگوریتم OPT2-SBMC-RSCA که در شاخه الگوریتم های چند مسیره قرار می گیرد تشریح گردید. این الگوریتم نسخه بهینه شده الگوریتم OPT-SBMC-RSCA می باشد. در این الگوریتم احتمال مسدودی تقاضا و احتمال مسدودی پهنای باند نسبت به الگوریتم OPT-SBMC-RSCA کاهش یافته و همچنین از پهنای باند موجود به صورت بهینه استفاده گردید. به همین علت می تواند بهترین راندمان را در صناعی همچون دیتا سرور ، داده کاوی اطلاعات هواشناسی، اویونیک و .. داشته باشد.

مراجع

- [12] Chen, X., et al., Fragmentation-aware routing and spectrum allocation scheme based on distribution of traffic bandwidth in elastic optical networks. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2015. 7(11): p. 1064-1074.
- [13] Yousefi, F. and A.G. Rahbar, Novel fragmentation-aware algorithms for multipath routing and spectrum assignment in elastic optical networks-space division multiplexing (EON-SDM). *Optical Fiber Technology*, 2018. 46: p. 287-296.
- [14] Khorasani, Y., A. Ghaffarpour Rahbar, and M. Jafari-Beyrami, Fragmentation management to reduce bandwidth wastage in SDM-EON networks. *Photonic Network Communications*, 2023: p. 1-17.
- [15] Pagès, A., et al., Optimal route, spectrum, and modulation level assignment in split-spectrum-enabled dynamic elastic optical networks. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2014. 6(2): p. 114-126.
- [1] Jinno, M., et al., Spectrum-efficient and scalable elastic optical path network: architecture, benefits, and enabling technologies. *IEEE communications magazine*, 2009. 47(11): p. 66-73.
- [2] Armstrong, J., OFDM for optical communications. *Journal of lightwave technology*, 2009. 27(3): p. 189-204.
- [3] Paira, S., et al. A novel fragmentation-aware and energy-efficient multipath routing and spectrum allocation for prioritized traffic in protected EONs. in 2020 11th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT). 2020. IEEE.
- [4] Khorasani, Y., A.G. Rahbar, and M. Jafari-Beyrami, A novel two-dimensional metric for fragmentation evaluation in elastic optical networks. *Computer Networks*, 2022. 216: p. 109275.
- [5] Chatterjee, B.C., S. Ba, and E. Oki, Fragmentation problems and management approaches in elastic optical networks: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017. 20(1): p. 183-210.
- [6] Khorasani, Y., A.G. Rahbar, and B. Alizadeh, A novel adjustable defragmentation algorithm in elastic optical networks. *Optical Fiber Technology*, 2024. 82: p. 103615.
- [7] Comellas, J., L. Vicario, and G. Junyent, Proactive defragmentation in elastic optical networks under dynamic load conditions. *Photonic Network Communications*, 2018. 36(1): p. 26-34.
- [8] Etezadi, E., et al., DeepDefrag: a deep reinforcement learning framework for spectrum defragmentation. 2022.
- [9] Fernández-Martínez, S., B. Barán, and D.P. Pinto-Roa, Spectrum defragmentation algorithms in elastic optical networks. *Optical Switching and Networking*, 2019. 34: p. 10-22.
- [10] Zhu, Z., et al., Impairment-and splitting-aware cloud-ready multicast provisioning in elastic optical networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2016. 25(2): p. 1220-1234.
- [11] Batham, D., D.S. Yadav, and S. Prakash, Least loaded and route fragmentation aware RSA strategies for elastic optical networks. *Optical Fiber Technology*, 2017. 39: p. 95-108.

ارائه الگوریتم چند مسیره جدید برای کاهش پراکندگی طیف در شبکه های نوری منعطف، یعقوب خراسانی و ابراهیم چگینی