

弹性光网络中基于图着色理论的资源分配算法

吴润泽, 秦宇浩*, 樊冰

(华北电力大学 电气与工程学院, 北京 102206)

摘要:传统的波分复用网络采用固定栅格, 已无法满足网络需求。提出一种改进的基于图着色理论的路由选择频谱分配(GT-RSA)算法。首先, 使用前 k 条最短路径算法确定备选路由集合, 根据各备选路由集合建立备选路由关系图; 然后, 使用图着色理论的混合整数线性规划模型进行选路, 根据分支定界的饱和度最大优先算法得到优解, 同时完成频谱的路由着色分区分配; 最后, 采用分区前后适配(PAR-FLF)算法对业务完成频谱资源的分配。仿真结果表明: GT-RSA 算法具有更低的频谱资源消耗、阻塞率以及更高的平均链路连续率。

关键词:弹性光网络; 图着色理论; 混合整数线性规划; 带宽阻塞率

中图分类号: TN929.11 文献标志码: A 文章编号: 1002-5561(2021)07-0041-07

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2021.07.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Resource allocation algorithm based on graph coloring theory in elastic optical network

WU Runze, QIN Yuhao*, FAN Bing

(School of Electric and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The traditional WDM network uses fixed grid, which can not meet the network requirements. An improved graph coloring based routing spectrum allocation (GT-RSA) algorithm is proposed. Firstly, the first k shortest path algorithm is used to determine the candidate route set, and the candidate route graph is established according to each candidate route set. Then, the mixed integer linear programming model of graph coloring theory is used to select the route, and the optimal solution is obtained according to the maximum saturation priority algorithm of branch boundary. At the same time, the coloring partition allocation of spectrum is completed. Finally, partition first-last-fit (PAR-FLF) algorithm is used to allocate spectrum resources. The simulation results show that GT-RSA algorithm has lower spectrum resource consumption, lower blocking rate and higher average link continuity rate.

Key words: elastic optical network; graph coloring theory; mixed integer linear programming; bandwidth blocking rate

0 引言

随着 IP 数据业务对带宽的需求越来越高, 如何在网络层面将传输模式从刚性固定大容量模式转换成柔性模式, 提高光路资源利用率, 成为人们关注的焦点。弹性光网络(EON)是全新一代的光网络, 其带宽资源被细分成频隙, 可灵活、高效地为用户分配频谱资源,

收稿日期: 2020-11-11。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51677065)资助。

作者简介: 吴润泽(1975—), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 现任职于华北电力大学(北京), 主要从事电力系统通信与信息技术研究, 包括可靠性分析、无线传感网和智能电网大数据等方面研究和教学工作。

* 通信作者: 秦宇浩(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为弹性光网络的资源分配和边缘计算等方面。



减少不必要的消耗。在 EON 中, 光路由是建立在指定源节点与目标节点之间的承载一定数据量的通路, 路由选择与频谱分配(RSA)是 EON 的核心。为此, 学术界提出了一些 RSA 算法, 以降低业务阻塞率和提高资源利用率。DELVALLE L 等人^[2]提出了一种基于最小路由频谱连通降低策略(MRCR)的 RSA 算法, 在源节点与目标节点之间找到一路分配业务后, 选择路由频谱资源连通度降低最小的路由, 算法缺点是陷入局部最优, 未从整个网络路由选择的角度节约频谱资源。文献[3]提出了一种基于距离自适应调制的 RSA 算法, 通过引入距离自适应调制机制, 提高频谱传输效率, 但未考虑到频谱碎片的产生。文献[4]提出了一种基于频谱碎片与资源联合均衡的 RSA 算法, 通过建立

吴润泽,秦宇浩,樊冰:弹性光网络中基于图着色理论的资源分配算法

一个线性模型,联合均衡频谱碎片值与频谱资源使用量降低阻塞率,但这种算法的缺点是从局部出发,使得这2项指标相背,均为联合均衡做出了牺牲。FADINZ W等人^[5]提出了一种基于频谱着色分类的RSA算法,通过将整个频谱段分区,无重复链路的路由在同一区使用频谱带宽资源,有效减少频谱碎片的产生,但缺点是在路由层面仅使用了简单的最短路径算法,同时无法针对不同路由业务量的不同按需分配频谱带宽资源。因此,为了减少频谱资源的浪费,在研究EON的RSA算法时,不仅要降低路由使用的链路数量,同时也要尽可能减少单条链路频谱资源的消耗。

本文提出一种改进的基于图着色理论的RSA(GT-RSA)算法,采用距离自适应调制机制,针对不同距离的路由,采取不同的调制格式,提高资源利用率,同时在对节点选择路由时,尽量避免重复链路的产生,减少路由使用的链路数量。

1 RSA 问题分析

EON拓扑可以表示为 $G(N, L, B)$,其中 $N=\{N_1, N_2, \dots, N_k\}$ 代表网络节点集,每个节点配置光交叉连接器; $L=\{L_1, L_2, \dots, L_k\}$ 为网络拓扑中链路的集合; B 代表每条链路的频隙集合,每条链路的频隙数量一定且相等。在任意2个节点之间设置的第 k 条备选路由为 $P_k^{r,d}(r, d, n_k, b_k, c_k, m_k)$ 。其中, r, d 为路由 P_k 的源、目的节点($r, d \in N$), n_k 为路由占用的链路总数, b_k 为使用该条路由的业务在每条链路上占用的频隙数, c_k 为该路由分配的颜色标号, m_k 为该条路由采用调制格式的频谱效率。

为了提高频谱传输效率,EON采用自适应调制技术,在满足信噪比和业务连接速率要求的前提下,可采用二进制相移键控(BPSK)、正交相移键控(QPSK)和8阶或16阶正交振幅调制(8QAM、16QAM)等调制格式,通过提高调制等级来减少频谱资源的占用。不同的调制格式的频谱效率和最远无中继传输距离不同,如表1所示。

表1 不同调制格式的频谱效率与传输距离关系

调制格式	所占频隙数	传输距离/km
16QAM	4	1200
8QAM	3	2400
QPSK	2	4800
BPSK	1	9600

业务请求通过路由 $P_k^{r,d}$ 传输,单条链路占用的频隙 b_k 可表示为:

$$b_k = \left\lceil \frac{s_k}{s \cdot m_k} \right\rceil \quad (1)$$

其中, s_k 为业务请求的带宽, s 为单个频隙的带宽。

因此,使用路由 $P_k^{r,d}$ 传输的业务完成分配,消耗的总频隙资源为:

$$R_k = n_k \cdot b_k \quad (2)$$

对于每一种到达的业务请求,首先要根据其源节点与目的节点确定路由,如何从备选路由集合 P 中选择路由成为需首要解决的问题。由于各备选路由的长度往往不同,采用不同的调制格式会导致分配不同数量的频隙,消耗不同大小的频谱资源。与此同时,各备选路由占用的链路数量 n_k 往往不同,如果路由的选取不合理,某条链路被多条路由共享使用,将导致该链路的频谱资源被快速消耗的概率上升。因此,如何在减少频谱资源消耗的同时又能避免某些链路被过多路由共享使用,这成为了路由选择的关键。

本文以图1为例加以说明。此网络拓扑包含5个节点和12条链路。以节点1与节点5为源节点、目的节点的路由备选集合中有3条备选路由,分别是:

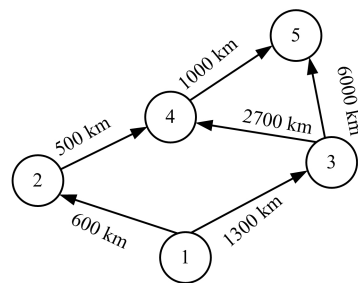


图1 网络拓扑图

① $P_1^{1,5}=1-3-5$, 传输距

离7300 km,采用BPSK调制方式,单条链路占用4频隙;② $P_2^{1,5}=1-2-4-5$,传输距离为3100 km,采用QPSK调制方式,单条链路占用2频隙;③ $P_3^{1,5}=1-3-4-5$,传输距离为5000 km,采用BPSK调制方式,单条链路占用4频隙。在以节点2与节点5为源节点、目的节点的路由已选择 $P^{1,4}=1-2-4$ 的情况下,如果以 $P_1^{1,5}$ 作为路由选择,占用2条链路,消耗的总频隙数为8;如果以 $P_2^{1,5}$ 作为路由选择,占用3条链路,消耗的总频隙数为6,但链路2-4和1-2被 $P^{1,4}$ 和 $P_2^{1,5}$ 这2条路由使用,阻塞率提高;如果以 $P_3^{1,5}$ 作为路由选择,占用3条链路,消耗的总频隙数为12,占用的链路与 $P^{1,4}$ 没有冲突,是备选路由集合 $P^{1,5}$ 中的最优选择。如果选择 $P_1^{1,5}$ 或者 $P_3^{1,5}$ 与 $P^{1,4}$ 无冲突,但是消耗的频谱资源提高;如

果选择 $P_2^{1,5}$, 消耗的频谱资源减少, 但是会与 $P^{1,4}$ 使用的链路产生冲突, 导致阻塞率提高。由此可见, EON 的 RSA 算法除了关注如何科学地分配频谱资源外, 还应该从路由选择的角度、网络拓扑层面减少频谱资源的消耗与不同路由的链路冲突, 降低阻塞率。

2 基于图着色理论的模型构建

为了减少整个网络拓扑的路由链路重复情况, 本文从路由选择的角度出发, 同时在距离自适应调制技术的背景下尽量减少频谱资源 R_k 的消耗, 以分配更多的业务, 引入图着色理论对该路由选择问题进行建模。图着色是指在一个有限、无环和无重边的无向简单图中, 将因为某种关系而连线的 2 个点涂上不同的颜色, 最终为所有节点完成着色时使用颜色数目最少的一种方法。为此, 首先要建立备选路由关系图, 设其拓扑为 $G_r(V, E)$, 其中 V 表示节点集合, 每个点代表一条备选路由 $P_k^{r,d}$, E 表示图的边集合, 当 2 个节点代表的备选路由存在共享链路时, 将 2 个节点连接起来。具体算法流程如下(输入: $P_k^{r,d}$, 输出: 备选路由关系图):

①初始化节点集合 V 和边集合 E , 且均为空集;

②每一个备选路由 $P_k^{r,d}$ 对应 $v_k \in V$;

③如果 2 条备选路由 $P_j^{r,d}$ 与 $P_i^{r,d}$ 的源节点 r 与目的节点 d 相同, 则将 v_i 与 v_j 连线, 同时将边 (i, j) 加入集合 E ;

④如果 2 条备选路由 $P_j^{r,d}$ 与 $P_i^{r,d}$ 的源节点 r 与目的节点 d 不同, 但共享至少 1 条链路, 则将 v_i 与 v_j 连线, 同时将边 (i, j) 加入集合 E 。

根据图着色理论, 当 2 条备选路由存在共享链路时, 其所代表的点必须分配不同的颜色; 当多条备选路由的源、目的节点相同时, 仅为其中 1 条路由代表的点着色; 同时, 根据 $P_k^{r,d}(r, d, n_k, b_k, c_k, m_k)$ 每条备选路由由单条链路占用的频隙数 b_k 不同, 为其分配的颜色数量也不同。定义 SL 为完成着色后着色点之间的连线数量, 其表达式如下:

$$SL = \sum_{i, j \in V} E(v_i^o, v_j^{o'}) \quad (3)$$

其中, v_i^o 表示点 i 着色 o , $v_j^{o'}$ 表示点 j 着色 o' 。

当目标完成着色且使用的颜色数目最少时, 会使得选取的所有路由 $P_k^{r,d}$ 之间的共享链路尽可能少, 即

使用的链路数量尽可能小, 同时各路由中单条链路占用的频隙数尽可能小, 在路由链路数量尽可能小的前提下, 即所消耗的频谱资源 R_k 尽可能小。

据此, 构建混合整数线性规划模型为:

$$\text{Min } num = \sum_{o \in O} y_o \quad (4)$$

$$\sum_{k \in K} x_{v, o}^k \leq 1 \quad (5)$$

$$x_{v, o}^k + x_{v, o'}^{k'} \leq 1 \quad (6)$$

$$w_k = b_k \quad (7)$$

$$\sum_{o \in O} \sum_{k \in K} x_{v, o}^k = w_k \quad (8)$$

$$\sum_{k \in K_i} x_{i, o}^k + \sum_{k \in K_j} x_{j, o}^k \leq y_o \quad (9)$$

$$y_o \geq y_{o'}, \text{ if } o' \geq o \quad (10)$$

$$y_o = \{0, 1\} \quad (11)$$

$$x_{v, o}^k = \{0, 1\} \quad (12)$$

其中, $v \in V, (i, j) \in E, o' \in O$; num 表示最终完成整个备选路由关系图着色时使用的颜色总数; K 表示节点对备选路由集合; O 表示备选颜色集合; k 表示备选路由标号; o 表示颜色标号; v 表示节点标号; w_k 表示着色数量; $x_{v, o}^k$ 和 y_o 为二进制变量, 如果备选路由 $P_k^{r,d}$ 代表的点 v 分配了颜色 o , 则 $x_{v, o}^k = 1$, 否则 $x_{v, o}^k = 0$; 如果颜色在备选路由关系图中被使用, 则 $y_o = 1$, 否则 $y_o = 0$ 。

式(4)表明该整数线性规划模型的目标是使最终使用的颜色数量最少, 即各源、目的节点最终选择路由的重复链路最少, 单条链路占用的频隙数最小; 同时, 颜色数量也对应频谱段的分区数, 消耗不同频谱资源的路由占用的分区数不同。式(5)表明在所有相同源、目的节点对的不同备选路由中, 最多只会对其中一条着色 o ; 式(6)表明对于同一源、目的节点对的不同备选路由, 不会分别着色 o 与 o' ; 式(7)表明着色数量与业务需求的频隙数量一致; 式(8)表明根据备选路由单条链路占用的频隙数不同, 对应节点标号 v 的着色数量为 w ; 式(9)表示如果 2 条备选路由存在共享通路, 且不是相同的源、目的节点对, 则为其着色各不相同; 式(10)表示颜色按标号从小到大依次分配; 式(11)和式(12)分别表示 y_o 与 $x_{v, o}^k$ 为二进制变量。

为了更好地理解图着色理论的应用, 本文以表 2 和图 2 加以说明。由表 2 可知, 节点 1、3 之间有多条备选路由, 其中标号 1 的路由消耗的总频隙数为 2, 标号

吴润泽,秦宇浩,樊冰:弹性光网络中基于图着色理论的资源分配算法

4 的路由消耗的总频隙数为 1, 从降低频谱资源的消耗、提高资源利用率和降低阻塞率的角度出发, 应选择标号 4 的路由。从图着色理论的角度出发, 如果选择标号 1 作为着色

表 2 备选路由表

标号	源节点	目的节点	路由	单条链路占用频隙数
1	1	3	1-2-3	1
2	2	3	2-3	3
3	1	4	1-2-3-4	2
4	1	3	1-3	1
5	1	5	1-3-4-5	1
6	1	2	1-2	3

点, 使用的颜色总数为 8; 如果选择标号 4 作为着色点, 使用的颜色总数为 5。为了使最终使用的颜色总数最少, 应选择标号 4 作为最终选择的着色点, 即当有源节点、目标节点分别为 1、3 的业务来临时, 应选择标号 4 作为传输路由。这与消耗的频隙总数最少和重复使用的链路数最少的目标相契合, 达到了降低频谱资源的消耗的效果。

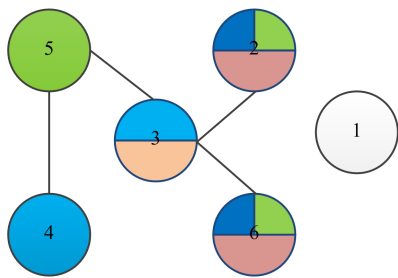


图 2 着色效果图

3 GT-RSA 算法描述

为解决图顶点着色问题, 人们提出了很多精确算法, 但精确算法通常只能够解决较小规模的随机图的着色问题。在实际应用中, 通常需要处理具有成百上千顶点的图着色问题, 随着图中顶点数量的不断增加, 着色问题计算的困难程度不断加大, 因此产生了许多有效的启发式算法。启发式算法应用于完整的枚举方案中可以产生精确算法, 例如分支定界的饱和度和最大优先算法^[7]可被用于解决着色问题。DSATUR 算法指基于色度对顶点进行排序, 顶点的色度是其相邻顶点所着颜色的种类数, 也被称为该顶点的饱和度。每次着色时, 选择饱和度最大的顶点进行着色, 若存在多个饱和度最大的顶点, 则从中选择在未着色图中饱和度最大的顶点; 若存在多个度最大的顶点, 则从中按照字典顺序进行选择。具体算法流程如下(输入: 备选路由关系图, 输出: 路由着色图):

①找到图的最大团并为其着色, 将最大团的大小作为搜索的下界(LB), 搜索的上界(UB)初始化为图中的顶点数。

②为图中剩余顶点着色, 每次选择当前饱和度最大的顶点, 若存在多个具有最大饱和度的顶点, 则从

中选择节点饱和度最大的顶点; 若又存在多个节点度最大的顶点, 则按照字典顺序从中选择。着色时, 分配当前已用的有效颜色或者分配一种新的颜色进行分支, 采用递归的方式遍历所有可能的情况。

③每次着色时, 若当前所用颜色数大于或等于 UB, 则进行剪枝。

④当找到一个可行解时, 更新 UB 为该可行解所用的颜色数, 判断 UB 与 LB 是否相等, 若不等, 则继续递归搜索; 若相等, 则停止搜索, 当前的解即为最终的着色方案。

在完成业务的路由选择后, 还需为业务规划占用的频谱资源。为了减少频谱碎片化现象, 降低阻塞率, 本文采用分区前后适配(PAR-FLF)算法^[9]。PAR-FLF 算法的原则是通过 DSATUR 算法得到的颜色总数, 然后将整个频谱段均分。不同的源节点、目的节点对应不同颜色频谱段标号, 奇数段从最小标号向最大标号开始检索可用频谱段, 偶数段从最大标号向最小标号开始检索可用频谱段, 同时奇偶频谱段可根据业务的大小动态组合, 空闲频隙可组合在一起共享使用, 增加了业务完成分配的成功率, 降低了阻塞率。具体算法流程如下(输入: 业务请求, 输出: 频谱资源分配):

①根据分配的颜色总数, 将整个频谱均分为一个频谱段。

②根据业务请求的源节点、目的节点确定路由。

③根据选择的路由确定频谱段分区。

④如果选择的频谱段标号是奇数, 从最小的标号开始搜索可用频隙; 如果选择的频谱段标号是偶数, 从最大标号开始搜索可用频隙。

⑤无可可用频隙, 则拒绝业务请求。

PAR-FLF 频谱分配效果如图 3 所示, 不同颜色频谱块代表不同业务。PAR-FLF 算法可以根据传输业务的 b_k 指标, 动态地为每种业务使用的路由分配不同数量的频谱块, 达到大业务多频谱块、小业务少频谱块的效果。由图 3(a)可知, 使用链路 3 的着色为绿色的业务, 每次分配占据 2 个频隙, 使用 PAR-FLF 算法后, 为其分配 2 个频谱块, 分别是频隙 1~3 和频隙 7~9, 因此无需占用相邻频谱块的共享频隙来完成 2 次业务分配; 由图 3(b)可知, 仅采用 FLF 算法, 将频谱块简单分区, 对于着色为绿色的业务分配的频谱块区域仅为频隙 1~3, 因此在完成 2 次业务分配之后, 已经占用了与相邻频谱块之间的共享频隙, 导致下次有相同业务到来时有较大概率阻塞。因此, 在空闲频谱块大小相同的情况下, PAR-FLF 算法能够针对不同业务消

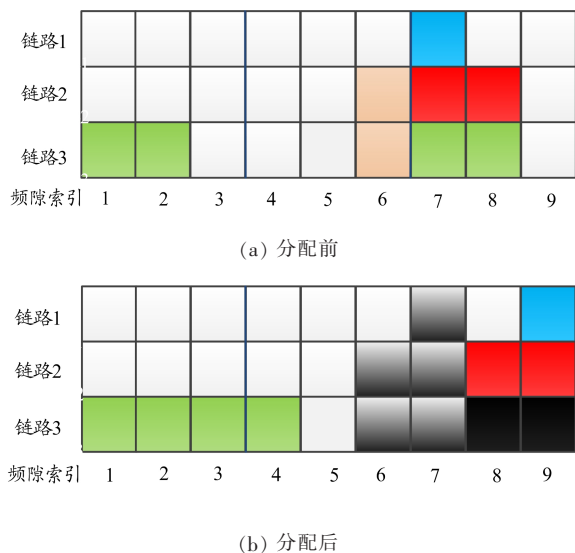


图3 频谱分配效果图

耗的频谱资源不同,动态地分配频谱块,达到提高资源利用率、降低阻塞率的效果。

PAR-FLF 算法的时间复杂度主要取决于搜寻路由、确定频谱段分区以及频谱分配。根据业务请求的源节点、目的节点,搜寻路由的时间复杂度约为 $O_m(|N| \cdot \log |N|)$,确定频谱段分区的时间复杂度约为 $O_m(|C| \cdot \log |C|)$ 。在频谱分配阶段,为业务分配频隙的时间复杂度约为 $O_m(|B| \cdot |L|)$ 。

在搜寻路由、确定频谱段分区以及频谱分配这 3 个步骤中,主要是频谱分配阶段。因此,PAR-FLF 算法的时间复杂度应为 $O_m(|B| \cdot |L|)$ 。

4 仿真分析

4.1 仿真条件

本文的仿真拓扑为具有 14 个节点、21 条链路的 NSFNET 网络,以及具有 11 个节点、26 条链路的 COST239 网络。每根光纤链路有 400 个频隙,每个频隙的带宽为 12.5 GHz。备选路由集合由前 k 条最短路径算法产生。采用 4 种备选调制格式,分别为 BPSK、QPSK、8QAM 和 16QAM,对应的频谱效率分别为 1、2、3 和 4,传输距离分别为 9600 km、4800 km、2400 km 和 1200 km。

仿真中产生 10^6 次业务请求,每次业务请求的源、目的节点随机产生,其带宽为 150 GHz,占用的频隙数根据距离自适应调制格式的不同分别为 12、6、4 和 3。业务请求按参数 λ 的泊松分布到达网络,业务的持续时间服从均值为 $1/\mu$ 的指数分布,即全网的总负载为 λ/μ Erlang,仿真时取 $\mu=1$ 。本文采用 Matlab2017b 搭

建 EON 仿真平台,同时使用 Cplex Solver 完成图着色理论的混合整数线性规划。

4.2 路由选择优化结果分析

本节对所提 GT-RSA 算法的路由选择功能进行仿真,并与文献[10]中的最短距离路由(MD-routing)选择算法、最小跳数路由(MH-routing)选择算法进行对比,分析不同方法下对各路由重复链路(SL_r)、消耗资源数 R_k 的影响。着色点连线数量、频隙消耗数在不同网络下的对比情况分别如图 4、图 5 所示。可以看出,相较 MD-routing 算法,GT-RSA 算法的连线数量较少;相较 MH-routing 算法,GT-RSA 算法的连线数量差别不大,即各路由重复链路较少,同时减少了选择各路由的业务频隙资源消耗。这是因为 MD-routing 算法仅降低了各路由的传输距离,未考虑传输链路的数量,导致与其它路由共享链路的可能性升高,同时也增加了使用该路由的业务频隙资源的消耗。MH-routing 算法仅优化了各路由的转接跳数,但传输距离可能增大,而调制格式是根据距离自适应选择的,因此增加了使用该路由业务的频隙资源的消耗。

4.3 频谱分配优化结果分析

本节在 4.2 节基础之上,对频谱分配的效果进行仿真分析,仿真评测指标为平均链路连续率、带宽阻塞率。平均链路连续率定义为每条链路空闲频隙连续程度与空闲频隙总数比值的平均值,其表达式为:

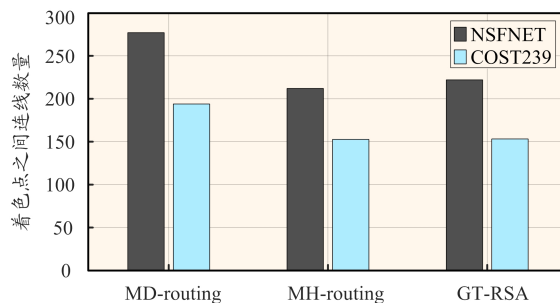


图4 着色点连线数量对比图

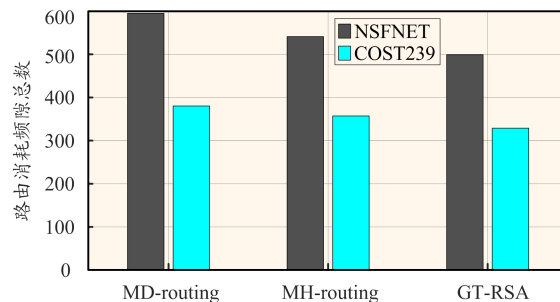
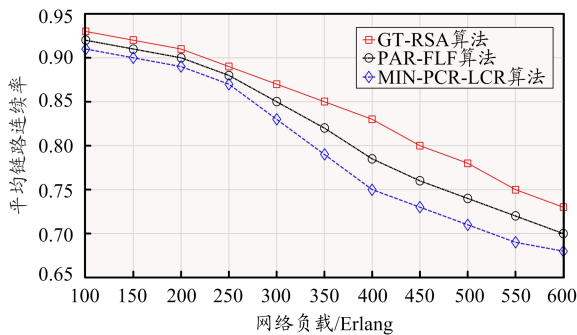
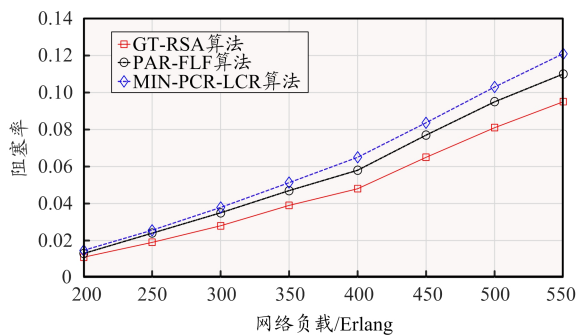


图5 频隙消耗数对比图

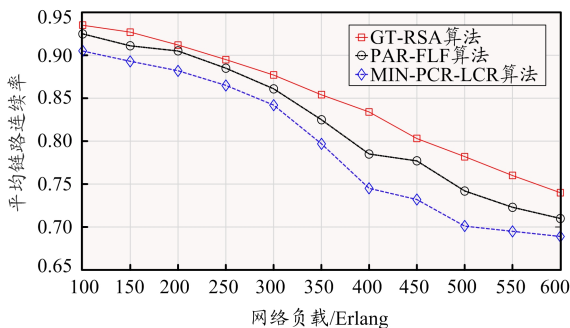


(a) 平均链路连续率与网络负载关系图

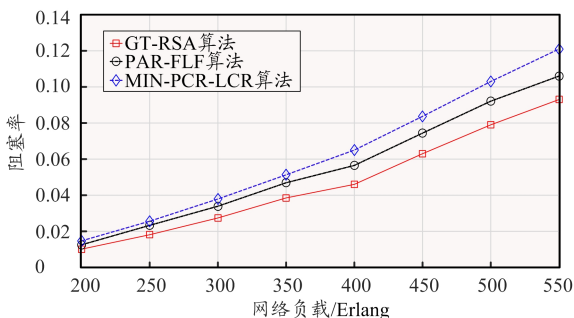


(b) 阻塞率与网络负载关系图

图6 NSF-NET网络下频谱分配效果对比图



(a) 平均链路连续率与网络负载关系图



(b) 阻塞率与网络负载关系图

图7 COST239网络下频谱分配效果对比图

$$G = \frac{\sum_{i \in L} \frac{\sum_{j=2} (S_i[i] S_i[i-1])}{(\sum_{i=1} (S_i[i]) - 1)}}{L} \quad (13)$$

其中, S 表示频隙数, 当频隙 i 空闲时, $S_i[i] = 1$, 否则 $S_i[i] = 0$; L 表示网络拓扑中链路总数。

带宽阻塞率定义为被阻塞业务需要的带宽与全部达到业务消耗带宽的比值, 其计算公式如下:

$$P = \frac{\sum_{r \in R_B} R_r \cdot T_r}{\sum_{r \in S_e} R_r \cdot T_r} \quad (14)$$

其中, R_r 表示业务 r 消耗的频谱资源; T_r 表示业务 r 传输的时间; R_B 表示阻塞业务的集合; S_e 表示全部业务的集合。NSF-NET 网络、COST239 网络下, 3 种算法的频谱分配效果对比情况分别如图 6、图 7 所示。

通过与文献[10]提出的最小链路/路径连续性减少(MIN-PCR-LCR)算法、PAR-FLF 算法进行对比可知, 本文所提的 GT-RSA 算法相比于其它算法在相同网络负载情况下获得了更高的平均链路连续率, 因此获得了更低的阻塞率。这是因为 GT-RSA 算法一方面根据图着色理论, 采用自适应调制机制, 提高了资源利用率, 在为节点对选择路由时, 尽量避免重复链路的产生, 同时降低频谱资源的消耗, 从而降低阻塞率, 提高资源利用率; 另一方面考虑了各路由分配的颜色对频谱资源进行分区, 从而减少频谱碎片, 最大化可用空闲频谱块, 提高业务请求的成功率。而 PAR-FLF 算法仅仅针对频谱分配阶段, 只是将频谱分为几个区域, 分类传输业务, 无法根据业务所需资源多少动态分配频谱空间; MIN-PCR-LCR 算法只是根据不同路由频谱资源连续程度进行选择, 尽量降低频谱资源碎片化程度, 但未对每条路由消耗的频谱资源进行优化, 无法从整个网络全部路由选择的角度降低频谱碎片化程度。

5 结束语

本文针对 EON 提出一种 GT-RSA 算法, 该算法利用节点连线数量反映不同路由之间重复链路数量的能力。从整个网络拓扑的角度出发, 采用混合整数线性规划的方法, 从备选路由集合中挑选最佳路由并完成路由着色功能。然后, 根据不同的颜色对频谱段进行分块, 由不同的路由分配的颜色不同, 分块完成

频谱资源的分配。仿真结果表明:GT-RSA 算法有利于提高资源利用率,降低阻塞率。

参考文献:

- [1] ZHU Zuqing, LU Wei, ZHANG Liang. Dynamic service provisioning in elastic optical networks with hybrid single-/multi-path routing [J]. IEEE Lightwave Technology, 2012, 31(1): 15–22.
- [2] DELVALLE L, ALFONZO E, ROA D P P. EONS: An online RSA simulator for elastic optical networks[EB/OL]. [2020-11-11]. https://www.researchgate.net/publication/313455643_EONS_An_online_RSA_simulator_for_elastic_optical_networks
- [3] 鞠卫国, 黄善国, 徐珍珍, 等. 面向频谱融合的理由和频谱分配和碎片整理算法[J]. 光子学报, 2013(8): 929–935.
- [4] SHAKYA S, CAO X. Spectral defragmentation in elastic optical path networks using independent sets [EB/OL]. [2020-11-11]. <https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=NFOEC-2013-NTh11.4>
- [5] FADINI W, CHATTERJEE B C, OKI E. A subcarrier-slot partition scheme with first-last fit spectrum allocation for elastic optical networks[J]. Computer Networks, 2015, 91: 700–711.

吴润泽, 秦宇浩, 樊冰: 弹性光网络中基于图着色理论的资源分配算法

- [6] FILER M, GAUDETTE J, GHOBADI M, et al. Elastic optical networking in the microsoft cloud [J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2016, 8(7): A45–A54.
- [7] ZHANG M, YIN Y, PROIETTI R, et al. Spectrum defragmentation algorithms for elastic optical networks using hitless spectrum retuning techniques [EB/OL]. [2020-11-11]. <https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=OFC-2013-OW3A.4>
- [8] 江祥奎, 赵峰, 范永青, 等. 考虑串扰的多纤芯弹性光网络中的频谱分配算法[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(6): 74–81.
- [9] TALEBI S, ALAM F, KATIB I, et al. Spectrum management techniques for elastic optical networks: A survey[J]. Optical Switching & Networking, 2014, 13(7): 34–48.
- [10] YUAN J, ZHANG D, ZHANG Q, et al. A routing and spectrum assignment algorithm in elastic optical network based on minimizing contiguity reduction[J]. Photonic Network Communications, 2019, 38: 51–61.
- [11] 肖媚, 何动, 张振荣. 基于 OOFDM 的 EON 研究[J]. 光通信技术, 2013, 37(4): 29–32.
- [12] LÓPEZ V, VELASCO L. Elastic optical networks [M]. New York: Springer International Publishing, 2016.