

# 弹性光网络中考虑节点安全性的频谱分配算法

宣贺君<sup>1</sup> 王宇平<sup>1</sup> 徐展琦<sup>2</sup> 郝姗姗<sup>1</sup>

<sup>1</sup>西安电子科技大学计算机学院, 陕西 西安 710071

<sup>2</sup>西安电子科技大学综合业务网理论及关键技术国家重点实验室, 陕西 西安 710071

**摘要** 针对弹性光网络中业务的选路、频谱分配进行了研究, 考虑到物理节点对业务安全性的影响, 建立了以满足业务最低安全级别要求为约束、以最小化网络中最大占用频隙号为优化目标的全局约束优化模型。为有效求解该约束优化模型, 设计了全局优化算法。将疏导后的业务按照某种排序策略进行排序, 为每个业务选择  $K$  条满足业务最低安全级别要求的路径。利用改进的遗传算法为每个业务选择合适的路径并确定最优的频谱分配方案, 使得网络中最大占用频隙号最小。为验证该算法的有效性, 在不同的网络拓扑中进行了仿真, 结果表明, 所设计的算法可实现高效的频谱分配。

**关键词** 光通信; 弹性光网络; 安全性约束; 选路; 频谱分配

**中图分类号** TN915.03; TP393

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201643.1206002

## Node Security-Aware Spectrum Allocation Algorithm in Elastic Optical Networks

Xuan Hejun<sup>1</sup> Wang Yuping<sup>1</sup> Xu Zhanqi<sup>2</sup> Hao Shanshan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Computer Science and Technology, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Integrated Services Networks, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China

**Abstract** Routing and spectrum allocation for connection requests in elastic optical networks are investigated. Considering the influence of physical nodes on the security, a global constrained optimization model is established, which is with the requirement of meeting the minimum security level as the constraint and with the maximum sequence number of frequency slots in networks as the optimization goal. In order to solve the constrained optimization model effectively, a global optimization algorithm is presented. The connection requests groomed are sorted according to a specific sorting policy.  $K$  paths, which satisfy the minimum security level requirement, are selected for every connection request. To minimize the maximum sequence number of frequency slots, the improved genetic algorithm is employed to determine the optimal routing and spectrum allocation scheme. In order to verify the validity of the proposed algorithm, simulations are conducted in different network topologies, and the results show that the efficient spectrum allocation can be achieved by the proposed algorithm.

**Key words** optical communications; elastic optical network; security constraint; routing; spectrum allocation

**OCIS codes** 060.4510; 060.4251

## 1 引言

随着因特网业务的爆炸式增长, 如何高效分配频谱已成为一个热门的研究课题。尽管传统的波分复用网络在高速传输方面有很多优点, 但以固定大小的波长作为最小颗粒难以适应不同颗粒度的业务请求, 且频谱利用率(RFSU)偏低<sup>[1]</sup>。为了提高频谱利用率、节省带宽, 提出了频谱分割弹性光路径网络。路由选择、

**收稿日期:** 2016-08-25; **收到修改稿日期:** 2016-09-26

**基金项目:** 国家自然科学基金(61472297, 61402350, 61572391)、中央高校基本科研业务费专项资金(BDZ021430)

**作者简介:** 宣贺君(1988—), 男, 博士研究生, 主要从事光网络、优化建模等方面的研究。

E-mail: xuanhejun0896@126.com

**导师简介:** 王宇平(1961—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事智能优化、数据挖掘等方面的研究。

E-mail: ywang@xidian.edu.cn (通信联系人)

频谱分配已成为光网络研究的热点问题<sup>[2-4]</sup>。Christodouloupoulos 等<sup>[5-6]</sup>提出了弹性光网络中路由选择以及频谱分配的整数线性规划模型以及最大载波优先(MSF)和最长路径优先(LPF)的启发式频谱分配算法,并且介绍了两种路由选择和频谱分配的方法:联合路由和频谱分配(RSA)以及分步路由和频谱分配(R+SA)。Hashimoto 等<sup>[7]</sup>同时考虑业务载波以及路径跳数,提出了一种扩展的  $K$  条路径条数最大优先(EMkPSF)算法以实现高效的频谱分配。Jinno 等<sup>[8]</sup>提出了一种距离自适应的基于首次命中的频谱分配算法。Ding 等<sup>[9]</sup>建立了以最小化最大占用频隙号(MSNFS)为目标的约束优化模型,并且设计了距离自适应的协同进化算法,以实现路由选择和频谱分配。Zhang 等<sup>[10]</sup>提出了一种基于分层辅助图的方法来解决弹性光网络中的选路和频谱分配问题。然而,上述研究均未考虑物理节点的安全性问题。光网络的透明性虽然可以改善网络性能,但是也给网络的安全带来新的隐患<sup>[11]</sup>,因此光网络安全问题成为一个亟待解决的重要问题。目前,关于光网络安全问题的研究集中在物理层、网络协议、加密算法等方面,目的在于减少或者避免外界对光网络的攻击<sup>[12-13]</sup>。在存在网络攻击的弹性光网络中,迫切需要找到有效的路径选择(选择对业务攻击可能性最小的路径或者比较安全的路径)以及频谱分配等方案以保证业务的安全性,并提高网络中的频谱利用率。

本文针对弹性光网络中业务的选路、频谱分配问题进行了研究,考虑了物理节点对业务安全性的影响,建立了以满足业务最低的安全级别要求为约束、以最小化网络中最大占用频隙号为优化目标的全局约束优化模型。为了有效求解该约束优化模型,设计了全局优化算法。通过仿真,证实了本文算法可实现高效的频谱分配。

## 2 弹性光网络中频谱分配模型

### 2.1 网络与业务描述

设给定光网络的物理拓扑  $G=(V,E)$ ,其中  $V$  为结点集合,  $V=\{v_i | i=1,2,\dots,N\}$ ,  $N$  为网络中的结点总数;  $E$  为结点  $V_i$  和  $V_j$  之间的光纤链路  $l_{i,j}$  的集合,  $E=\{l_{i,j} | V_i, V_j \in V\}$ ,  $|E|$  为网络拓扑中链路的个数。每条链路上的频隙按顺序编号,占用的最大频隙号为  $|F|$ ,  $F$  为所占用的频隙集合,  $F=\{f_1, f_2, \dots, f_{|F|}\}$ , 集合中的频隙号按从小到大的顺序排列;  $R$  为静态业务请求集合,  $R=\{r_1, r_2, \dots, r_{|R|}\}$ , 其中  $|R|$  为请求业务总数。业务  $r_k$  ( $k=1,2,\dots, |R|$ ) 包含源结点  $s_k$  ( $s_k \in V$ )、目的结点  $d_k$  ( $d_k \in V$ )、请求的业务量  $T_k$  以及该业务所要求的最低安全级别  $\tau_k$  4 个要素,记  $r_k=(s_k, d_k, T_k, \tau_k)$ 。由于网络攻击等不安全因素的存在,网络节点存在安全性隐患,且不同的网络节点对于不同业务的安全性系数不同。设  $S$  为一个安全系数矩阵,  $S=(s_{ik})_{N \times |R|}$ , 其中  $s_{ik}$  为业务请求  $r_k$  在物理节点  $v_i$  处的安全性系数;  $s_{ik}$  越大,物理节点  $v_i$  对于业务请求  $r_k$  的安全系数越高。假定  $0 \leq s_{ik} \leq 1$ , 当物理节点  $v_i$  对于业务请求  $r_k$  绝对安全时,  $s_{ik}=1$ ; 绝对不安全时,  $s_{ik}=0$ ; 其他情况下,  $0 < s_{ik} < 1$ 。

### 2.2 符号定义与问题建模

#### 2.2.1 符号定义

为了便于对问题进行建模,对建立全局约束优化模型时使用的数学符号进行定义:  $C$  为在选择的调制格式下一个频隙的容量;  $Q_k$  为业务  $r_k$  可选的路径集合,且按照路径跳数递增排列;  $|Q_k|$  为业务  $r_k$  可选的路径集合中的路径个数;  $Q_k^{(q)}$  为业务  $r_k$  可选的路径集合  $Q_k$  中的第  $q$  条路径;  $V[Q_k^{(q)}]$  为路径  $Q_k^{(q)}$  上的物理节点集合;  $\lambda_k^{(q)}$  为布尔变量,  $\lambda_k^{(q)}=1$  表示业务  $r_k$  选择路径  $Q_k^{(q)}$ , 否则  $\lambda_k^{(q)}=0$ ;  $f_{k,q}^{i,j}$  为业务  $r_k$  在路径  $Q_k^{(q)}$  上所经过的链路  $l_{i,j}$  中占用的起始频隙号;  $\phi_{k,q}^{i,u}=1$  表示业务  $r_k$  在占用路径  $Q_k^{(q)}$  上的链路  $l_{i,j}$  中第  $u$  个频隙, 否则  $\phi_{k,q}^{i,u}=0$ ;  $k < k'$  表示具有公共链路的业务  $r_k$  和  $r_{k'}$ , 业务  $r_k$  在业务  $r_{k'}$  之前;  $G$  为保护频隙数。

#### 2.2.2 全局约束优化模型

目标函数:所有链路中最大频隙号最小。假设  $|F_{i,j}|$  为链路  $l_{i,j}$  中占用的最大频隙号,则目标函数可以表示为

$$\min |F| = \min \left\{ \max_{1 \leq i \leq N, 1 \leq j \leq N} \{ |F_{i,j}| \} \right\}. \quad (1)$$

约束条件(a):业务  $r_k$  只能占用可选路径集合  $Q_k$  中的一条路径,即  $\lambda_k^{(q)}$  ( $q=1,2,\dots, |Q_k|$ ) 中有且只有

一个值为 1, 即

$$\sum_{Q_k^{(q)} \in Q_k} \lambda_k^{(q)} = 1, \quad k = 1, 2, \dots, |R|. \quad (2)$$

约束条件(b): 业务  $r_k$  占用的路径  $Q_k^{(q)}$  中的所有物理节点对于业务  $r_k$  的安全系数均大于业务  $r_k$  所要求的最低安全级别  $\omega_k$ , 即该路径上所有物理节点对业务  $r_k$  的安全系数的最小值大于等于业务  $r_k$  的最低安全级别  $\omega_k$  即可, 即

$$\min\{s_{ik} \mid v_i \in V[Q_k^{(q)}]\} \geq \omega_k. \quad (3)$$

约束条件(c): 频隙一致性, 业务  $r_k$  经过的链路中所占用的频隙号必须一致, 即

$$f_{k,q}^{i,j} = f_{k,q}^{i',j'}, \quad k = 1, 2, \dots, |R|. \quad (4)$$

约束条件(d): 频隙连续性, 业务  $r_k$  不能被拆分成若干个小业务, 只能将业务  $r_k$  分配到若干个连续的频隙中, 即

$$\sum_{u=f_{k,q}^{i,j}}^{f_{k,q}^{i,j} + \lceil T_k/C \rceil + G - 1} \phi_{k,q}^{i,j,u} = \lceil T_k/C \rceil + G, \quad k = 1, 2, \dots, |R|. \quad (5)$$

约束条件(e): 占用同一个纤芯的两个业务所占频隙无重叠, 同一个纤芯上的同一个频隙不能分配给两个不同的业务, 即

$$f_{k,q}^{i,j} + \lceil T_k/C \rceil + G - 1 < f_{k',q}^{i',j'}, \quad 1 \leq k < k' \leq |R|. \quad (6)$$

在弹性光网络中, 考虑到节点的安全性, 以最小化最大频隙数为目标的全局约束优化模型可以表示为

$$\begin{cases} \min |F| = \min\{\max_{1 \leq i \leq N, 1 \leq j \leq N}\{F_{i,j}\}\} \\ \text{s.t.} \\ \text{(a)} \sum_{Q_k^{(q)} \in Q_k} \lambda_k^{(q)} = 1, \\ \text{(b)} \min\{s_{ik} \mid v_i \in V[Q_k^{(q)}]\} \geq \omega_k, \\ \text{(c)} f_{k,q}^{i,j} = f_{k,q}^{i',j'}, \\ \text{(d)} \sum_{u=f_{k,q}^{i,j}}^{f_{k,q}^{i,j} + \lceil T_k/C \rceil + G - 1} \phi_{k,q}^{i,j,u} = \lceil T_k/C \rceil + G, \\ \text{(e)} f_{k,q}^{i,j} + \lceil T_k/C \rceil + G - 1 < f_{k',q}^{i',j'}, \quad k < k', \\ \text{(f)} 1 \leq i, j, i', j' \leq N, \quad 1 \leq k \leq |R|, \quad 1 \leq q \leq |Q_k|, \end{cases} \quad (7)$$

该全局约束优化模型的优化目标为在满足业务最低安全级别要求的条件下, 业务所占用的最大频隙号最小。约束条件(a)表示业务  $r_k$  只能占用可选的路径集合  $Q_k$  中的一条路径; 约束条件(b)表示业务所选路径上的安全性满足业务最低安全性要求; 约束条件(c)表示频隙一致性; 约束条件(d)表示频隙连续性; 约束条件(e)表示占用同一个链路的两个业务所占频隙无重叠; 约束条件(f)给出了相关参数的取值范围。为了高效求解该全局约束优化模型以及为业务请求进行频谱分配, 设计了一种基于启发式选路机制的遗传算法。

### 3 基于启发式选路机制的全局优化遗传算法

在工程技术领域, 遗传算法得到了广泛应用, 尤其是在解决多项式内无法求解的组合优化问题中具有重要应用<sup>[14]</sup>。因此, 为了求解考虑业务最低安全级别要求以及最小化占用的最大频隙号的约束优化模型, 设计了一种基于启发式选路机制的全局优化遗传算法。首先为业务选择  $K$  条备选路径, 然后利用遗传算法确定业务所选的路径以及频谱分配方案。

#### 3.1 选路算法

为业务请求服务时, 首先需要给业务选择一条从源节点到目的节点的路径。采用算法 1 为业务请求  $r_k$  选择  $K$  条备选路径。算法 1: 输入为业务  $r_k$  (网络拓扑); 输出为业务  $r_k$  的  $K$  条备选的路径。具体步骤为: 1) 初始化  $Q_k = \emptyset$ ; 2) 如果  $|Q_k| < K$ , 转步骤 3), 否则算法结束; 3) 选择一条连接业务  $r_k$  的源节点和目的节

点的最短路径  $Q_k^{(q)}$ , 且  $Q_k^{(q)} \notin Q_k$ ; 4) 令  $\delta = \min\{s_{ik} | v_i \in V[Q_k^{(q)}]\}$ , 当  $\delta \geq \omega_k(Q_k = Q_k \cup \{Q_k^{(q)}\})$  时转步骤 2), 当  $\delta < \omega_k$  时转步骤 3)。

算法 1 为业务请求  $r_k$  选择的  $K$  条备选路径均满足约束条件(b), 便于遗传算法在  $K$  条备选路径中选择合适的路径进行频谱分配, 从而在满足业务最低安全级别要求条件下使最大频隙号最小化。

### 3.2 全局优化遗传算法

#### 3.2.1 编码

在设计的遗传算法中包含两个种群: 选路种群和频谱分配种群。因此, 算法中包括两类个体: 业务选路个体和频谱分配个体。设  $x$  为一个选路个体,  $x = (x_k)_{1 \times |R'|}$ ; 当且仅当  $x_k = q (q \leq K)$  时,  $\lambda_k^q = 1$ , 即业务请求选择  $K$  条备选路径集合中的第  $q$  条路径, 其中  $|R'|$  为业务请求经过疏导(将具有相同源节点和目的节点的业务合并成一个大的业务)后业务的个数。设  $y$  为一个频谱分配个体,  $y = (y_k)_{1 \times |R'|}$ ; 当且仅当  $y_k = u$  时,  $f_{k,q}^{i,j} = u$ 。一个选路个体  $x$  和一个频谱分配个体  $y$  组合形成一个解  $(x, y)$ 。

#### 3.2.2 交叉算子

所设计的遗传算法中包含两类个体: 业务选路个体和频谱分配个体。因此, 设计了适用于选路个体的交叉算子(算法 2)和适用于频谱分配个体的交叉算子(算法 3)。

算法 2: 输入为选路个体  $x = (x_1, x_2, \dots, x_k, \dots, x_{|R'|})$ , 邻居个体选择概率为  $P_n$ ; 输出为新的选路个体  $x^{(c)} = (x_1^{(c)}, x_2^{(c)}, \dots, x_k^{(c)}, \dots, x_{|R'|}^{(c)})$ 。具体步骤为: 1) 产生一个随机数  $\rho (0 < \rho < 1)$ ; 2) 如果  $\rho \leq P_n$ , 在个体  $x$  的  $T$  个邻居个体中选择一个个体  $x^{(1)}$ ; 否则在  $T$  个邻居个体之外的个体中选择一个个体  $x^{(1)}$ ; 3) 对于所有的  $k (1 \leq k \leq |R'|)$ , 计算  $x_k^{(c)} = \text{mod}\{\lfloor |x_k + \gamma \times (x_k - x_k^{(1)}) \rfloor, K\} + 1$ 。

算法 3: 输入为选路个体  $y = (y_1, y_2, \dots, y_k, \dots, y_{|R'|})$ , 邻居个体选择概率为  $P_n$ ; 输出为新的选路个体  $y^{(c)} = (y_1^{(c)}, y_2^{(c)}, \dots, y_k^{(c)}, \dots, y_{|R'|}^{(c)})$ 。具体步骤为: 1) 产生一个随机数  $\rho (0 < \rho < 1)$ ; 2) 如果  $\rho \leq P_n$ , 在个体  $x$  的  $T$  个邻居个体中选择一个个体  $y^{(1)}$ , 否则在  $T$  个邻居个体之外的个体中选择一个个体  $y^{(1)}$ ; 3) 对于所有的  $k (1 \leq k \leq |R'|)$ , 产生一个随机数  $u (\min\{y_k, y_k^{(1)}\} \leq u \leq \max\{y_k, y_k^{(1)}\})$ , 令  $y_k = u$ 。

#### 3.2.3 变异算子

变异算子为遗传算法中的一个重要操作算子, 它通过改变某些基因位上的基因值使得个体跳出局部最优解, 从而增加算法求得全局最优解的概率。采用统一的变异算子(算法 4)对选路个体和频谱分配个体进行变异。

算法 4: 输入为选路个体  $z = (z_1, z_2, \dots, z_k, \dots, z_{|R'|})$ ; 输出为新的选路个体  $z^{(m)} = (z_1^{(m)}, z_2^{(m)}, \dots, z_k^{(m)}, \dots, z_{|R'|}^{(m)})$ 。具体步骤为: 1) 令  $z^{(m)} = z$ ; 2) 产生两个随机整数  $k'$  和  $k'' (1 \leq k' < k'' \leq |R'|)$ ; 3) 令  $z_{k'}^{(m)} = z_{k''}$ ,  $z_{k''}^{(m)} = z_{k'}$  (即交换  $k', k''$  两个位置上的基因值)。

#### 3.2.4 适应度函数

适应度函数为衡量一个个体好坏的标准, 所建立的优化模型中的目标函数为最小化最大占用频隙号。因此, 采用的适应度函数为

$$f = |F| + \varphi\Delta, \quad (8)$$

式中  $\Delta$  为一个较大的常系数,  $|F| = \max_{1 \leq i \leq N, 1 \leq j \leq N} \{|F_{i,j}|\}$ ,  $\varphi$  为布尔型变量。当一个选路个体  $x$  和一个频谱分配个体  $y$  组合形成的一个解  $(x, y)$  为问题的可行解时,  $\varphi = 0$ ; 否则  $\varphi = 1$ 。

## 4 仿真与分析

### 4.1 参数设置

在仿真中, 采用两种网络拓扑。网络拓扑 1 为包含 12 个节点和 21 个链路的 NSFNET[图 1(a)], 网络拓扑 2 为包含 20 个节点和 32 个链路的 ARPANET[图 1(b)], 链路上的数据表示网络节点间的距离。仿真中, 假定每个频隙为 2.5 GHz, 4 种调制格式(二进制相移键控、正交相移键控、三进制正交振幅调制和四进制正交振幅调制)的传输距离分别为 9600, 4800, 2400, 1200<sup>[15-16]</sup>。实验中分别采用了 4 组不同数量(250, 500, 750, 1000)的业务请求数据, 每组业务请求的总业务量在区间[1, 10]中随机产生, 且满足均匀分布,  $G =$

2,  $K=5$ 。安全系数矩阵  $S = (s_{ik})_{1 \times |R|}$  中的  $s_{ik}$  为在区间  $[0, 1]$  产生的随机数, 若  $v_i$  为业务  $r_k$  的源节点或者目的节点, 则  $s_{ik} = 1$ , 即源节点和目的节点对该业务是绝对安全的。业务请求  $r_k$  的最低安全级别也是在区间  $[0, 1]$  产生的随机数。仿真中, 遗传算法参数设置为: 种群规模  $P_{size} = 100$ , 交叉概率  $P_c = 0.8$ , 变异概率  $P_m = 0.1$ , 适应度函数中常数  $\Delta = 1000$ , 最大迭代次数  $G_{max} = 10^4$ , 系数  $\gamma = 0.5$ 。

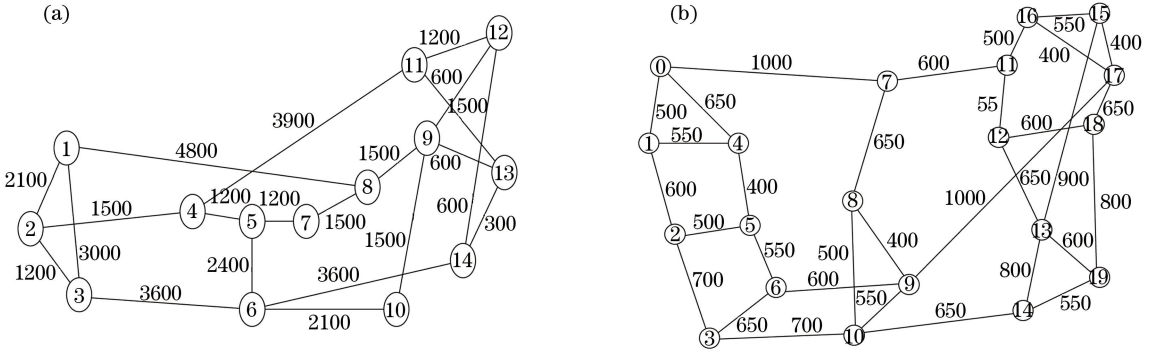


图 1 网络拓扑。(a) NSFNET 拓扑; (b) ARPANET 拓扑。

Fig. 1 Network topologies. (a) NSFNET topology; (b) ARPANET topology.

仿真中作为对比的 12 种算法可以分为 3 组, 第 1 组为 RSF、MSF、LPF、EMkSPF, 这 4 种算法中业务请求不经过疏导, 直接对业务按照 RSF、MSF、LPF、EMkSPF 的策略排序, 并采用首次适应频谱分配算法 (FF) 组合得到的算法; 第 2 组为随机排序下的遗传算法 (GRSF)、最大载波优先排序下的遗传算法 (GMSF)、最长路径优先排序下的遗传算法 (GLPF)、扩展的  $K$  条路径条数最大优先排序下的遗传算法 (GEMkSPF), 这 4 种算法将业务请求经过疏导后, 对业务按照 RSF、MSF、LPF、EMkSPF 策略排序, 并采用首次适应频谱分配算法组合得到的算法; 第 3 组为将 2 组算法与疏导策略 (GA) 相结合的算法, 分别为 GA-GRSF、GA-GMSF、GA-GLPF、GA-GEMkSPF。

### 4.2 仿真结果

建立了以最小化最大占用频隙号为目标的全局约束优化模型, 为了验证算法的有效性, 将最大占用频隙号作为评价算法有效性的标准。频谱资源是网络中的重要资源, 提高网络中频谱利用率可以有效减少频谱浪费。网络频谱连续性 (ASC) 是表征频谱分配后链路上频谱碎片情况的指标。频谱利用率和频谱连续性也是评价频谱分配算法的重要指标。因此将最大占用频隙号、频谱利用率和网路频谱连续性作为算法有效性的评价指标。网络的链路频谱连续性采用文献 [17] 提出的频谱连续度的度量方式, 则链路  $l$  上的频谱连续性  $A_{sc,l}$  可表示为

$$A_{sc,l} = \frac{F - mF}{F}, \tag{9}$$

式中  $F$  和  $mF$  分别为频谱分配完成后该链路上的可用频谱个数和链路中最大连续可用频隙块的频隙数。图 2 为某链路的频谱状态。由图 2 可得, 该链路的频谱连续性为 0.556。

由文献 [17] 定义的链路频谱连续性度量方式可知,  $A_{sc,l}$  越小, 链路  $l$  上的频谱连续性越好。因此整个网络的频谱连续性可描述为

$$A_{sc} = \max_{l \in E} \{A_{sc,l}\}. \tag{10}$$

由 (10) 式可知, 网络的频谱连续性为所有链路上频谱连续性的最大值。

图 3、4 分别为 NSFNET 和 ARPANET 网络中不同业务请求数量情况下得到的最大占用频隙号。图 5、6 分别为 NSFNET 和 ARPANET 网络中不同业务请求数量情况下得到的频隙利用率。图 7、8 分别为



图 2 链路频谱状态

Fig. 2 Frequency spectrum state in link

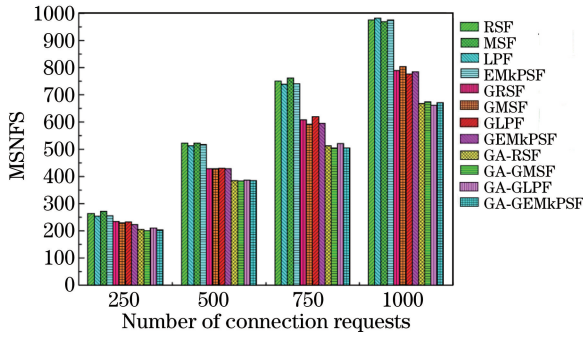


图 3 NSFNET 中的 MSNFS

Fig. 3 MSNFS obtained in NSFNET

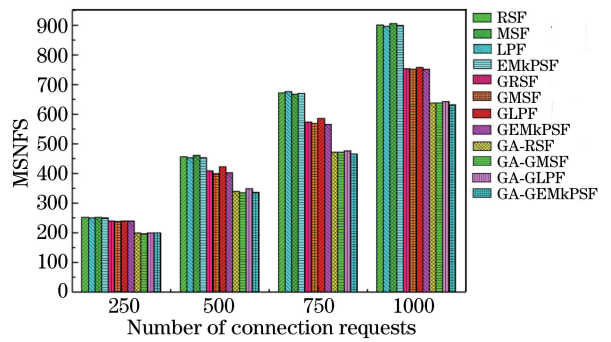


图 4 ARPANET 中的 MSNFS

Fig. 4 MSNFS obtained in ARPANET

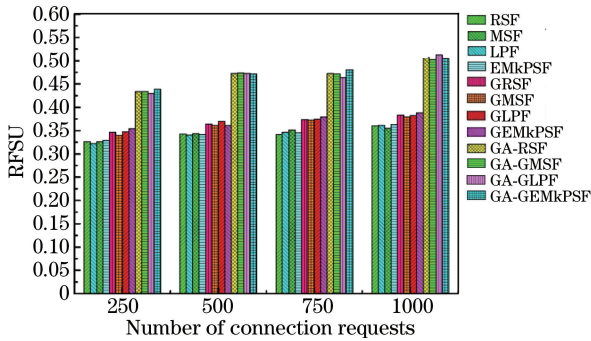


图 5 NSFNET 中的 RFSU

Fig. 5 RFSU obtained in NSFNET

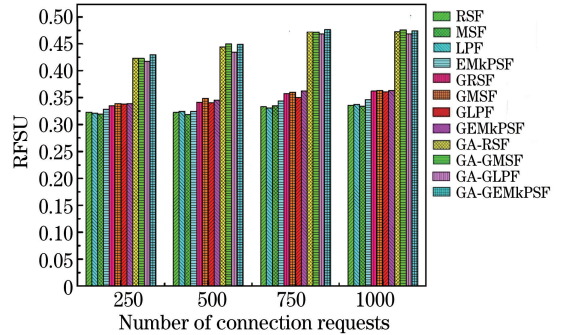


图 6 ARPANET 中的 RFSU

Fig. 6 RFSU obtained in ARPANET

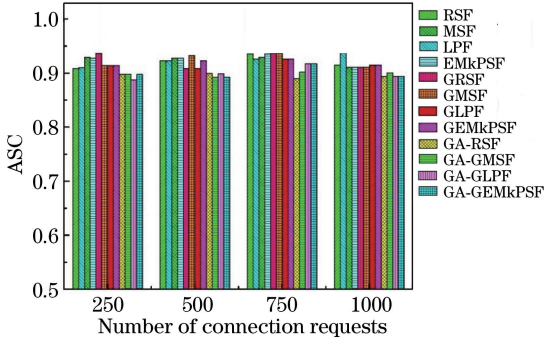


图 7 NSFNET 中的 ASC

Fig. 7 ASC obtained in NSFNET

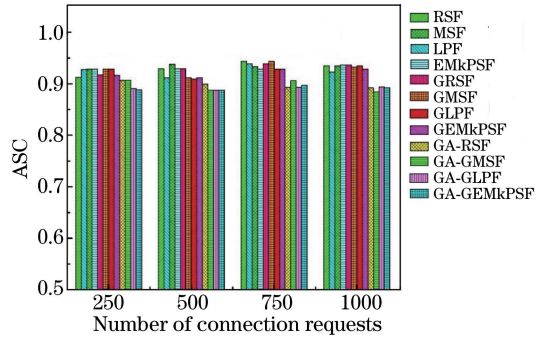


图 8 ARPANET 中的 ASC

Fig. 8 ASC obtained in ARPANET

NSFNET 和 ARPANET 网络中不同业务请求数量情况下得到的网络频谱连续性。

### 4.3 仿真分析

由图 3、4 可知,随着业务请求数量的增加,网络中的最大占用频隙号越来越大。在相同业务数量及业务排序策略情况下,第 1 组算法和第 2 组算法得到的最大占用频隙号大于第 3 组算法得到的最大占用频隙号。由于第 2 组算法在第 1 组算法的基础上增加了对业务进行疏导的策略,可以最大限度地减小业务之间的保护频隙数,因此第 2 组算法得到的最大占用频隙号比第 1 组算法得到的最大占用频隙号小。本文算法中的交叉算子和变异算子具有较强的搜索能力,可以在有限的时间内找到全局最优解,所以第 3 组算法得到的最大占用频隙号在 3 组算法中最小。如图 3、4 所示,当业务请求数量为 250 时,第 2 组算法得到的最大占用频隙号比第 1 组算法得到的最大占用频隙号减小了 3.0%~4.2%;第 3 组算法得到的最大占用频隙号比第 1 组算法得到的最大占用频隙号减小了 5.5%~6.4%。当请求业务的数量增大到 1000 时,第 2 组算法得到的最大占用频隙号比第 1 组算法得到的最大占用频隙号减小了 5.3%~6.5%;第 3 组算法得到的最大占用频隙号比第 1 组算法得到的最大占用频隙号减小了 7.1%~8.3%。因此,第 3 组算法得到的最大占用频隙号

比第 1、2 组算法得到的最大占用频隙号减小的比例会随着业务量的增加逐渐增大。

对于频隙利用率,由图 5、6 也可以得到与最大占用频隙号类似的结论。在相同业务数量和业务排序策略情况下,第 3 组算法得到的频隙利用率大于第 1、2 组算法得到的频隙利用率,这是由于所设计的遗传算法可减小在链路上的最大占用频隙号。此外,由于业务所占用的频隙号等于业务请求频隙与保护频隙之和,所以本文算法得到的频隙利用率大于第 2 组算法。如图 5、6 所示,当请求业务数量为 250 时,第 3 组算法得到的频隙利用率比第 1 组算法得到的频隙利用率提高了 2.3%;第 3 组算法得到的频隙利用率比第 1 组算法得到的频隙利用率提高了 3.9%。当请求业务的数量增大到 1000 时,第 3 组算法得到的频隙利用率比第 1 组算法得到的频隙利用率提高了 2.8%;第 3 组算法得到的频隙利用率比第 1 组算法得到的频隙利用率提高了 5.2%。因此,随着请求业务数量逐渐增大,第 3 组算法得到的频隙利用率比第 1、2 组算法得到的频隙利用率提高的比例也逐渐增大。

网路频谱连续性是表征频谱分配后链路上频谱碎片情况的指标。由采用的网络频谱连续性计算公式[(9)式]可知, $A_{sc}$  越小,频谱分配后网络的频谱连续性越好。由图 7、8 可以看出,本文算法可获得较小的  $A_{sc}$ ,即频谱分配后网络的频谱连续性较好。由图 3、4 可知,本文算法得到的最大占用频隙号较小,因此采用(9)式计算链路频谱连续性时,具有较小  $|F|$  的可能性较大,则链路频谱连续性较好的可能性较大。此外,采用疏导策略可以有效避免链路上频谱碎片的产生,因此本文算法可获得较好的网络频谱连续性。

本文算法首先将  $|R|$  个业务请求采用疏导策略转换为  $|R'|$  个业务请求,为每个业务请求选择  $K$  条备选路径的计算复杂度为  $O(KN^3)$ ,为  $|R'|$  个业务请求选择  $K$  条备选路径的计算复杂度为  $O(KN^3|R'|)$ 。采用进化算法为业务确定合适的路径以及频隙分配方案的计算复杂度为  $O(2G_{max}P_{size}N^3|F|)$ ,所以所设计的混合遗传算法的计算复杂度为  $O(KN^3|R'|+2G_{max}P_{size}N^3|F|)$ 。由于算法的复杂度较大,因此该算法比较适用于静态业务分配。

## 5 结 论

针对弹性光网络中业务的选路和频谱分配问题进行了研究,考虑了物理节点对业务安全性的影响,建立了以满足业务最低安全级别要求为约束、以最小化网络中最大占用频隙号为优化目标的全局约束优化模型。为有效求解该约束优化模型,设计了全局优化算法。在不同的网络拓扑中进行了仿真,结果表明本文算法不仅能够有效减小网络中的最大占用频隙号,而且可以提高网络的频隙利用率,在一定程度上减少了链路上的频谱碎片。由于本文算法的复杂度较大,因此在后续工作中将研究降低计算复杂度的方法,以快速实现业务选路和频谱分配。

## 参 考 文 献

- 1 Klinkowski M, Walkowiak K. Routing and spectrum assignment in spectrum sliced elastic optical path network[J]. IEEE Communication Letters, 2011, 15(8): 884-886.
- 2 Yao Haitao, Li Wei, Han Jilong, *et al.* Upstream data transmission in passive optical network based on orthogonal waveform multiplexing technology[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(8): 0805006.  
姚海涛, 李 蔚, 韩纪龙, 等. 基于正交波形复用技术的无源光网络上行信号传输方法[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0805006.
- 3 Qin Panke, Wang Liqian, Ma Jun, *et al.* Dynamic traffic balancing strategy experiment on optical line terminal of 40 G coherent passive optical network[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(4): 0405007.  
秦攀科, 王立芊, 马 骏, 等. 基于 40 G 相干无源光网络系统光线路终端的流量均衡策略实验[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0405007.
- 4 Zhang G Y, de Leenheer M, Morea A, *et al.* A survey on OFDM-based elastic core optical networking [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2013, 15(1): 65-87.
- 5 Christodouloupoulos K, Tomkos I, Varvarigos E A. Elastic bandwidth allocation in flexible OFDM-based optical networks [J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(9): 1354-1366.
- 6 Christodouloupoulos K, Tomkos I, Varvarigos E A. Routing and spectrum allocation in OFDM-based optical networks with elastic bandwidth allocation[C]. IEEE Conference on Global Telecommunications, 2010: 11743805.

- 7 Hashimoto T, Baba K I, Simojo S. A study on routing, modulation level, and spectrum allocation algorithms for elastic optical path networks[C]. IEEE 3<sup>rd</sup> International Conference on Photonics (ICP), 2012: 13176000.
- 8 Jinno M, Kozicki B, Takara H, *et al.* Distance-adaptive spectrum resource allocation in spectrum-sliced elastic optical path network[J]. IEEE Communications Magazine, 2010, 48(8): 11456544.
- 9 Ding Z, Xu Z Q, Zeng X D, *et al.* Hybrid routing and spectrum assignment algorithms based on distance-adaptation combined coevolution and heuristics in elastic optical networks[J]. Optical Engineering, 2014, 53(4): 046105.
- 10 Zhang S Q, Martel C, Mukherjee B. Dynamic traffic grooming in elastic optical networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013, 31(1): 4-12.
- 11 Fok M P, Wang Z X, Deng Y H, *et al.* Optical layer security in fiber-optic networks[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2011, 6(3): 725-736.
- 12 Liu B, Zhang L J, Xin X J, *et al.* Physical layer security in OFDM-PON based on dimension-transformed chaotic permutation[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(2): 127-130.
- 13 Deng L, Cheng M F, Wang X D, *et al.* Secure OFDM-PON system based on chaos and fractional Fourier transform techniques[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(15): 2629-2635.
- 14 Costa A, Cappadonna F A, Fichera S. A novel genetic algorithm for the hybrid flow shop scheduling with parallel batching and eligibility constraints[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 75(5): 833-847.
- 15 Bocoli A, Schuster M, Rambach F, *et al.* Reach-dependent capacity in optical networks enabled by OFDM[C]. Optical Fiber Communication Conference and National Fiber Optic Engineers Conference, 2009: OMQ4.
- 16 Sun Ye, Shen Jianhua. An energy aware routing and spectrum assignment algorithm for elastic optical networks [J]. Study on Optical Communications, 2015, 187(1): 11-13.  
孙 晔, 沈建华. 一种基于能量感知的弹性光网络 RSA 算法 [J]. 光通信研究, 2015, 187(1): 11-13.
- 17 Moura P M, Fonseca N, Scaraficci R A. Fragmentation aware routing and spectrum assignment algorithm[C]. IEEE International Conference on Communications, 2014: 6883474.