

# 多纤芯弹性光网络中纤芯选择算法

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** 针对多纤芯弹性光网络中业务的路径选择、纤芯选择和频谱分配问题进行了研究。建立了全局约束优化模型,设计了基于纤芯轮换选择的启发式算法及其改进算法。在改进算法中,根据不同的排序策略将业务排序;然后根据业务的源宿结点以及所选取的路径将业务划分到不同的业务集合中,在同一类业务集合中采用基于纤芯轮换的选择机制进行纤芯的选择;在选中的纤芯上采用首次命中法进行频谱分配。在两个网络中进行了仿真以验证所提出的算法的性能,仿真结果表明,所提出的算法以及改进的算法能够得到比对比算法更优的路径选择与纤芯选择方案。

**关键词** 光通信; 弹性光网络; 多纤芯; 约束优化; 纤芯轮换选择

**中图分类号** TN915.03; TP393 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201636.1206005

## Core Selection Algorithm for Multi-Core 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, core selection and spectrum assignment in multi-core elastic optical networks are studied. A global constrained optimization model is established, and a heuristic algorithm and its improved algorithm based on core rotation selection are proposed. In the improved algorithm, connection requests are classified according to different sorting strategies. Connection requests are classified into different groups according to source node, destination node and the selected routing, the selection mechanism based on core rotation in the same connection request group is employed, and the first-fit method is used in spectrum assignment for the selected core. Simulations are conducted in two networks to verify the performance of the proposed method, and the results indicate that the proposed algorithm and its improved algorithm can obtain better scheme of routing and core selection than the compared algorithms.

**Key words** optical communications; elastic optical network; multi-core; constrained optimization; core rotation selection

**OCIS codes** 060.4510; 060.4265

## 1 引 言

随着网络电视、云计算等新业务的持续发展,在波分复用网络中,以固定大小的波长作为最小分配单元无法满足不同颗粒度的业务请求,从而使得频谱利用率较低<sup>[1]</sup>。为了提高频谱利用率(RFSU)、节省带宽以及为业务请求灵活分配带宽,弹性光网络应运而生,因此对弹性光网络中相关问题的研究也成为网络研究的热点问题<sup>[2-5]</sup>。为了提高频谱利用率和节省带宽,设计较好的路径选择以及频谱分配方案成为迫切需要。为

**收稿日期:** 2016-08-10; **收到修改稿日期:** 2016-08-16

**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(BDZ021430)

**作者简介:** 宣贺君(1988—),男,博士研究生,主要从事光网络频谱分配以及优化建模方面的研究。

E-mail: xuanhejun0896@126.com

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

E-mail: ywang@xidian.edu.cn(通信联系人)

解决弹性光网络中路径选择以及频谱分配的问题,提出了整数线性规划模型<sup>[6]</sup>。Christodouloupoulo 等<sup>[7]</sup>研究了静态业务的服务顺序问题,提出了基于最大载波优先(MSF)和最长路径优先(LPF)的启发式路径选择和频谱分配算法。Hashimoto 等<sup>[8]</sup>在考虑业务请求量以及候选  $K$  条最短路径的平均跳数的基础上,提出了扩展的  $K$  条路径条数最大优先(EMkSPF)算法以对业务请求进行频谱分配。Zhu 等<sup>[9]</sup>研究了动态业务路径选择和频谱分配方案以解决单路径和多路径的路径选择问题。在动态业务请求条件下,Rosa 等<sup>[10]</sup>提出了一种基于马尔可夫模型的路径选择以及频谱分配算法。为实现高效的路径选择和频谱分配,Ding 等<sup>[11]</sup>以最小化最大占用频隙号(MSNFS)为目标,设计了距离自适应的协同进化算法。然而以上研究都是基于单纤芯弹性光网络。Ajmal 等<sup>[12]</sup>在多纤芯网络中同时考虑纤芯间的串扰和有限资源下业务的阻塞率,提出了一种启发式频谱分配算法。Tode 等<sup>[13]</sup>在多纤芯网络中定义了纤芯优先级并进行路径选择和频谱分配,以降低纤芯间的串扰。Muhammad 等<sup>[14]</sup>建立了整数线性规划模型,并设计了纤芯选择算法以实现最小化多纤芯光纤中最大占用频隙号的目的。

本文针对多纤芯弹性光网络中业务的路径选择、纤芯和频谱的分配问题进行了研究。建立了全局约束优化模型以得到最佳的路径选择、纤芯选择和频谱分配方案。设计了基于轮换选择机制的纤芯选择算法以及改进的纤芯轮换选择算法。通过仿真验证了所设计算法的有效性。

## 2 多纤芯弹性光网络中频谱分配模型

### 2.1 网络与业务描述

无向图  $G$  表示光网络的拓扑结构, $G=(V, E)$ , $V$  为网络中结点的集合, $V=\{v_1, v_2, \dots, v_N\}$ ;  $E$  为网络中链路的集合, $E=\{l_{i,j} | v_i, v_j \in V\}$ ,其中  $l_{i,j}$  为结点  $v_i$  和  $v_j$  之间的光纤链路。 $N$  和  $|E|$  分别为网络中的结点个数以及链路条数。任意光纤链路  $l_{i,j} (\forall l_{i,j} \in E)$  均包含  $M$  个纤芯,即  $l_{i,j} = \{l_{i,j}^{(1)}, l_{i,j}^{(2)}, \dots, l_{i,j}^{(M)}\}$ 。集合  $F$  为纤芯上的频隙号从小到大排列的频隙集合, $F=\{f_1, f_2, \dots, f_{|F|}\}$ , $|F|$  为占用的最大频隙编号。 $R$  为  $|R|$  个静态业务请求的集合, $R=\{r_1, r_2, \dots, r_{|R|}\}$ 。对于业务  $r_k (r_k \in R)$ ,可以由三元组表示,即  $r_k = (s_k, d_k, T_k)$ ,其中  $s_k, d_k, T_k$  分别为业务  $r_k$  的源结点、宿结点和请求的业务量。研究中假定业务从源结点经过多条链路到达目的结点的过程中,不同链路上业务所占用的纤芯号不变。

### 2.2 问题建模

研究目标是为业务选择合适的路径、分配合理的纤芯和确定最优的频谱分配方案,使得占用的最大频隙号最小,为此建立了一个带有约束的全局优化模型。下面给出所建立的数学模型。

目标函数:最小化网络中最大占用频隙号,优化模型的目标函数为

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

式中  $|F_{i,j}^{(u)}|$  为纤芯  $l_{i,j}^{(u)}$  中被占用频隙的最大频隙号。

满足一定的约束条件时才能实现目标函数的最小化,以下为模型的约束条件。

约束(a):假设业务  $r_k$  的候选物理路径集合为  $Q_k, Q_k = \{Q_k^{(1)}, Q_k^{(2)}, \dots, Q_k^{(|Q_k|)}\}$  ( $|Q_k|$  为业务  $r_k$  候选物理路径集合中路径的个数),那么业务  $r_k$  占用且只能占用其中的一条路径,满足

$$\sum_{Q_k^{(q)} \in Q_k} x_k^{(q)} = 1, \quad \forall r_k \in R, \quad (2)$$

式中  $x_k^{(q)}$  为布尔变量;当且仅当业务  $r_k$  占用候选物理路径  $Q_k$  集合中的第  $q$  条路径时, $x_k^{(q)} = 1$ ;否则  $x_k^{(q)} = 0$ 。

约束(b):业务  $r_k$  在所经过的链路中占用的纤芯号是相同的,满足

$$y_{k,q}^{i,j} = y_{k,q}^{i',j'}, \quad \forall r_k \in R, \quad (3)$$

式中  $y_{k,q}^{i,j}, y_{k,q}^{i',j'}$  分别为业务  $r_k$  在所占用路径上的两条不同链路  $l_{i,j}, l_{i',j'}$  中占用的纤芯号。

约束(c):业务  $r_k$  所经过的链路中占用的起始频隙号必须保持一致,满足

$$f_{k,q,u}^{i,j} = f_{k,q,u}^{i',j'}, \quad \forall r_k \in R, \quad (4)$$

式中  $f_{k,q,u}^{i,j}$ 、 $f_{k,q,u}^{i',j'}$  分别为业务  $r_k$  在两条不同的纤芯  $l_{i,j}^{(u)}$ 、 $l_{i',j'}^{(u)}$  中占用的起始频隙号。

约束(d):业务  $r_k$  必须占用若干个连续的频隙,不能拆分为小业务分配到可用的频隙中,满足

$$\sum_{\lambda=f_{k,q,u}^{i,j}}^{f_{k,q,u}^{i,j}+\lceil T_k/C \rceil+G-1} \phi_{k,q,u}^{i,j,\lambda} = \lceil T_k/C \rceil + G, \forall r_k \in R, \quad (5)$$

式中  $C$  为每个频隙的容量, $G$  为保护频隙数, $\phi_{k,q,u}^{i,j,\lambda}$  为布尔型变量, $\lceil T_k/C \rceil$  为业务  $r_k$  占用的频隙数。当且仅当业务  $r_k$  在占用路径  $Q_k^{(q)}$  中纤芯  $l_{i,j}^{(u)}$  上的第  $\lambda$  个频隙时, $\phi_{k,q,u}^{i,j,\lambda} = 1$ ; 否则  $\phi_{k,q,u}^{i,j,\lambda} = 0$ 。

约束(e):链路上的每一个频隙至多分配一个业务,对于任意两个不同的业务  $r_k$  和  $r_{k'}$ ,且  $r_k < r_{k'}$ ,满足

$$f_{k,q,u}^{i,j} + \lceil T_k/C \rceil + G - 1 < f_{k',q,u}^{i',j'}, \forall r_k < r_{k'}, \quad (6)$$

式中  $r_k < r_{k'}$  表示业务  $r_k$  和  $r_{k'}$  占用公共的纤芯  $l_{i,j}^{(u)}$ ,且业务  $r_k$  在纤芯  $l_{i,j}^{(u)}$  上的起始频隙号小于业务  $r_{k'}$  的起始频隙号。

约束(f):业务所选的纤芯必须在可用纤芯范围内,满足

$$1 \leq y_{k,q}^{i,j} \leq M, \forall r_k \in R. \quad (7)$$

多纤芯光网络中以最小化最大频隙数为目标的全局约束优化模型为

$$\left\{ \begin{array}{l} \min |F| = \min \left\{ \max_{1 \leq i \leq N, 1 \leq j \leq N, 1 \leq u \leq M} \{ |F_{i,j}^{(u)}| \} \right\}, \\ \text{s.t.} \\ \text{(a)} \sum_{Q_k^{(q)} \in Q_k} x_k^{(q)} = 1, \forall r_k \in R, \\ \text{(b)} y_{k,q}^{i,j} = y_{k,q}^{i',j'}, \forall r_k \in R, \\ \text{(c)} f_{k,q,u}^{i,j} = f_{k,q,u}^{i',j'}, \forall r_k \in R, \\ \text{(d)} \sum_{\lambda=f_{k,q,u}^{i,j}}^{f_{k,q,u}^{i,j}+\lceil T_k/C \rceil+G-1} \phi_{k,q,u}^{i,j,\lambda} = \lceil T_k/C \rceil + G, \forall r_k \in R, \\ \text{(e)} f_{k,q,u}^{i,j} + \lceil T_k/C \rceil + G - 1 \leq f_{k',q,u}^{i',j'}, \forall r_k < r_{k'}, \\ \text{(f)} 1 \leq y_{k,q}^{i,j} \leq M, \forall r_k \in R, \\ \text{(g)} 1 \leq i, j, i', j' \leq N, 1 \leq k \leq |R|, 1 \leq q \leq |Q_k|, 1 \leq u \leq M, \end{array} \right. \quad (8)$$

该约束优化模型的目标为确定最优路径选择、纤芯分配以及频谱分配方案中最小化业务占用的最大频隙号。约束(a)~(f)为模型需满足的约束条件;约束(g)为相关参数的取值范围。为有效、快速地求解该全局约束优化模型,设计了一种基于纤芯轮换选择机制的启发式算法。

### 3 轮换选择机制的启发式算法

#### 3.1 轮换选择机制

设计了一种基于纤芯轮换选择机制的启发式算法,以实现多纤芯弹性光网络中高效的频谱分配,并减小链路中占用的最大频隙号,进而提高网络频谱的利用率。

首先将所有业务请求按照某种策略(MSF、LPF、EMkSPF)进行排序,然后将所有业务划分为若干个不同的类别,即将业务集合  $R = \{r_1, r_2, \dots, r_{|R|}\}$  划分为  $R = \{R_{1,1}, R_{1,2}, \dots, R_{i,j}, \dots, R_{N,N}\}$ ,其中  $R_{i,j} = \{R_{i,j}^{(1)}, R_{i,j}^{(2)}, \dots, R_{i,j}^{(|R_{i,j}|)}\}$  为源结点为  $v_i$ 、目的结点为  $v_j$  的业务集合,该集合中的业务按照某种策略排序,  $|R_{i,j}|$  为源结点为  $v_i$ 、目的结点为  $v_j$  的业务个数。如果  $u_{i,j}^{(k')}$  为业务集合  $R_{i,j}$  中第  $k'$  个业务占用的纤芯号,那么设计的纤芯轮换选择机制的纤芯算法中  $R_{i,j}$  类业务集合中的第  $k'+1$  个业务被分配到编号为  $u_{i,j}^{(k'+1)} [u_{i,j}^{(k'+1)} = (u_{i,j}^{(k')} + 1) \% N_{\text{core}} + 1, N_{\text{core}}$  为纤芯数量]的纤芯上,即前一个业务所占纤芯的下一个纤芯上。

这种业务分配方法使得业务均匀占用链路上的纤芯(实现负载的均衡),进而实现最小化业务占用最大频隙号的目的。

根据业务的源宿结点将业务划分为不同的类别,在具有相同源宿结点的业务中采用纤芯轮换选择机制可以有效地将业务均匀分配到不同的纤芯上,避免了业务被分配到同一纤芯上以及该纤芯上占用的最大频隙号较大的现象。划分为同类的业务虽然具有相同的源宿结点,但是不同业务选择的路径不同,所以仅在具有相同的源宿结点的同类业务集合中采用纤芯轮换选择机制并不能最大限度的提高业务在不同纤芯上分配的均衡性。为了进一步提高业务在不同纤芯上分配的均衡性,3.2节中对仅根据源宿结点将业务划分为不同类别的方法进行了改进。

### 3.2 改进的纤芯轮换选择机制

首先根据业务的源宿结点将业务集合  $R = \{r_1, r_2, \dots, r_{|R|}\}$  划分为不同的类别  $R = \{R_{1,1}, R_{1,2}, \dots, R_{i,j}, \dots, R_{N,N}\}$ , 其中  $R_{i,j}$  ( $R_{i,j} = \{R_{i,j}^{(1)}, R_{i,j}^{(2)}, \dots, R_{i,j}^{(|R_{i,j}|)}\}$ ) 为源结点为  $v_i$ 、目的结点为  $v_j$  的业务集合,该集合中的业务按照某种策略排序。假设当前进行分配的业务为  $r_k$ , 首先根据源宿结点将该业务分类到集合  $R_{s_k, d_k}$  中。然后选择当前网络情况下最大频隙号最小的路径,设路径编号为  $p$ , 将业务  $r_k$  分类到集合  $p(R_{i,j})$  中。如果  $u_{i,j}^{p,k'}$  为业务集合  $R_{i,j}$  中第  $k'$  个业务占用的纤芯号,那么集合  $p(R_{i,j})$  中第  $k'+1$  个业务占用的纤芯号为  $u_{i,j}^{p,k'+1}$ ,  $u_{i,j}^{p,k'+1} = (u_{i,j}^{p,k'} + 1) \% N_{\text{core}} + 1$ 。根据业务的源宿结点以及所选的路径将业务划分为不同的子集合,在不同的业务子集中采用纤芯轮换选择机制可以有效地将业务均匀分配到不同的纤芯上,使得业务占用的最大频隙号最小。

### 3.3 算法框架

为宏观地理解所提出的启发式算法,给出改进的基于纤芯轮换机制的频谱分配算法的框架。

- 1) 采用某种策略(MSF、LPF、EMkSPF),将业务进行排序;
- 2) 将第一个业务记为  $r_k$ ,采用 KSP 算法为业务  $r_k$  选择  $|Q_k|$  条路径,将路径长度按从小到大的顺序置于集合  $Q_k$  中;
- 3) 取集合  $Q_k$  中的最大频隙号最小的那条路径,根据路径长度选择合适的调制格式;
- 4) 根据业务  $r_k$  的源宿结点以及该业务所选的路径,将其映射到业务集合  $p(R_{s_k, d_k})$  ( $p$  为该业务所选的路径编号)中,业务  $r_k$  在集合  $p(R_{s_k, d_k})$  中的序号为  $k'$ ;
- 5) 在选取的路径上将编号为  $(u_{i,j}^{p,k'-1} + 1) \% N_{\text{core}} + 1$  的纤芯分配给  $r_k$ ,其中  $u_{i,j}^{p,k'-1}$  为集合  $p(R_{s_k, d_k})$  中序号为  $k'-1$  的业务所占用的纤芯号;
- 6) 采用首次适应策略给业务  $r_k$  分配合适的频隙;
- 7) 删掉业务集合中的业务  $r_k$ ,如果业务集合为空,则停止;否则跳转至 2)。

## 4 仿真及分析

### 4.1 参数设置

为评估算法的性能,在网络 NSFNET 和 ARPANET 中进行仿真。图 1(a)为包含 12 个结点和 21 条链路的 NSFNET 网络,图 1(b)为包含 20 个结点和 32 条链路的 ARPANET 网络。仿真中,二进制相移键控、正交相移键控、三进制正交振幅调制、四进制正交振幅调制 4 种调制格式对应的传输距离分别设置为 9600, 4800, 2400, 1200<sup>[15-16]</sup>。4 组不同数量 ( $250N_{\text{core}}, 500N_{\text{core}}, 750N_{\text{core}}, 1000N_{\text{core}}$ ) 的业务请求数据被用于仿真,每组业务请求中的业务量满足均匀分布,且在区间  $[1, 10]$  中随机产生。保护频隙数  $G=2$ , 候选物理路径集中路径的条数  $K=5$ 。

仿真中对比的 9 种算法可以分为 3 组。第 1 组算法为 MSF-F、LPF-F、EMkSPF-F,这 3 种算法为 MSF、LPF、EMkSPF 分别与文献[12]提出的纤芯选择算法(F)组合的算法;第 2 组算法为 MSF-R、LPF-R、EMkSPF-R,这 3 种算法为 MSF、LPF、EMkSPF 分别与提出的轮换选择机制(R)组合后的算法;第 3 组算法为 MSF-IR、LPF-IR、EMkSPF-IR,这 3 种算法为 MSF、LPF、EMkSPF 分别与提出的改进后的轮换选择机

制(IR)组合后的算法。9种算法均采用首次适应策略进行频谱分配。

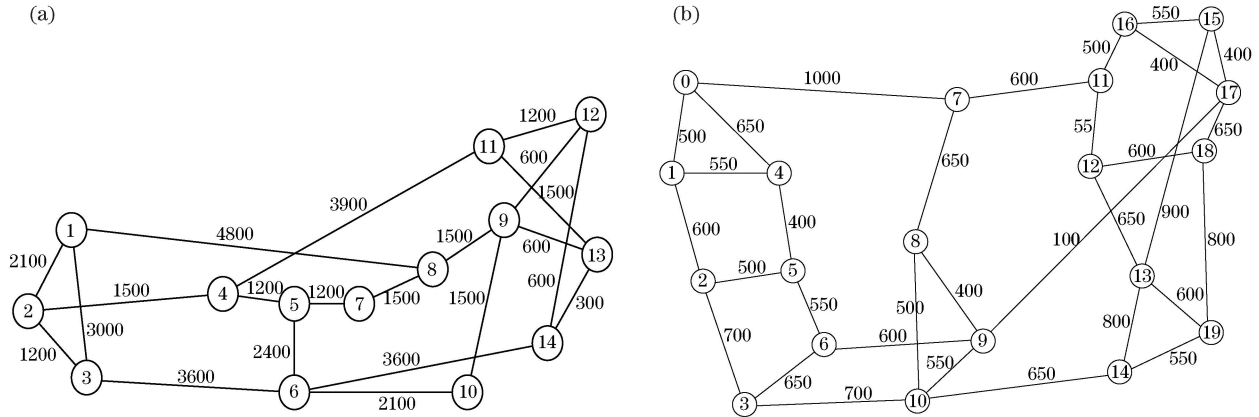


图1 网络拓扑。(a) NSFNET 拓扑;(b) ARPANET 拓扑

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

### 4.2 仿真结果

为得到最优的路径选择、纤芯分配以及频谱分配方案,建立了以最小化占用的最大频隙号为目标的约束优化模型。将得到的最大占用频隙号作为评价指标,以验证所提出算法的有效性。此外,提高频谱利用率可以有效减少网络中频谱资源的浪费,因此频谱利用率(RFSU)也是评价路径选择、频谱分配算法的重要指标。利用最大占用频隙号和频谱利用率这两个评价指标对提出的算法进行性能评估。图2(a)、(b)分别为纤芯数量  $N_{core}=5$  时两个网络中不同业务请求数量情况下3组算法得到的 MSNFS;图2(c)、(d)分别为纤芯数量  $N_{core}=5$  时两个网络中不同业务请求数量情况下3组算法得到的 RFSU;图3(a)、(b)分别为纤芯数量  $N_{core}=7$  时两个网络中不同业务请求数量情况下3组算法得到的 MSNFS;图3(c)、(d)分别为纤芯数量  $N_{core}=7$  时两个网络中不同业务请求数量情况下3组算法得到的 RFSU。

### 4.3 仿真分析

由图2、3可以看出,网络中最大占用频隙号随着业务请求数量的增加而逐渐增大。当纤芯数量为5和7时,在相同的业务排序策略以及相同的业务请求数量情况下,文献[12]提出的算法得到的最大占用频隙号大于纤芯轮换选择算法和改进的纤芯轮换选择算法得到的最大占用频隙号。此外,对所设计的纤芯轮换选择机制改进后的算法可以使业务在不同链路上的分配更均匀,从而减小链路上占用的最大频隙号,以达到提高算法效率的目的。因此,改进的纤芯轮换选择算法(第3组算法)小于纤芯轮换选择算法(第2组算法)得到的最大占用频隙号。如图2(a)、(b)和图3(a)、(b)所示,当业务数量为  $250N_{core}$  时,纤芯轮换选择算法和改进的纤芯轮换选择算法得到的最大占用频隙号分别比文献[12]提出的算法得到的最大占用频隙号降低了2.4%~3.1%和3.4%~4.1%;当业务数量为  $1000N_{core}$  时,纤芯轮换选择算法和改进的纤芯轮换选择算法得到的最大占用频隙号分别比文献[12]提出的算法得到的最大占用频隙号降低了4.7%~5.5%和5.6%~6.8%。因此,随着业务数量的增加,纤芯轮换选择算法和改进的纤芯轮换选择算法得到的最大占用频隙号比文献[12]提出的算法得到的最大占用频隙号减小的比例也逐渐增加。

如图2(c)、(d)和图3(c)、(d)所示,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,且纤芯轮换选择算法和改进的纤芯轮换选择算法得到的最大占用频隙号小于文献[12]提出的算法得到的最大占用频隙号,因此在相同的业务排序策略以及相同的业务数量情况下,文献[12]提出的算法得到的频隙利用率小于纤芯轮换选择算法和改进的纤芯轮换选择算法得到的频隙利用率。对设计的纤芯轮换选择机制改进后的算法使业务在不同链路上的分配更均匀,从而减小了链路上占用的最大频隙号。此外,由于对设计的纤芯轮换选择机制改进后的算法得到的最大占用频隙号较小,且业务占用的频隙号等于业务请求频隙与保护频隙之和,因此改进的纤芯轮换选择算法得到的频隙利用率大于纤芯轮换选择算法。当请求业务数量为  $250N_{core}$  时,纤芯轮换选择算法和改进的纤芯轮换选择算法得到的频隙利用率分别比文献[12]提出的算法得到的频隙利用率提高了1.4%和1.9%。当请求业务的数量增大为  $1000N_{core}$  时,纤芯轮换选择算法和改进的

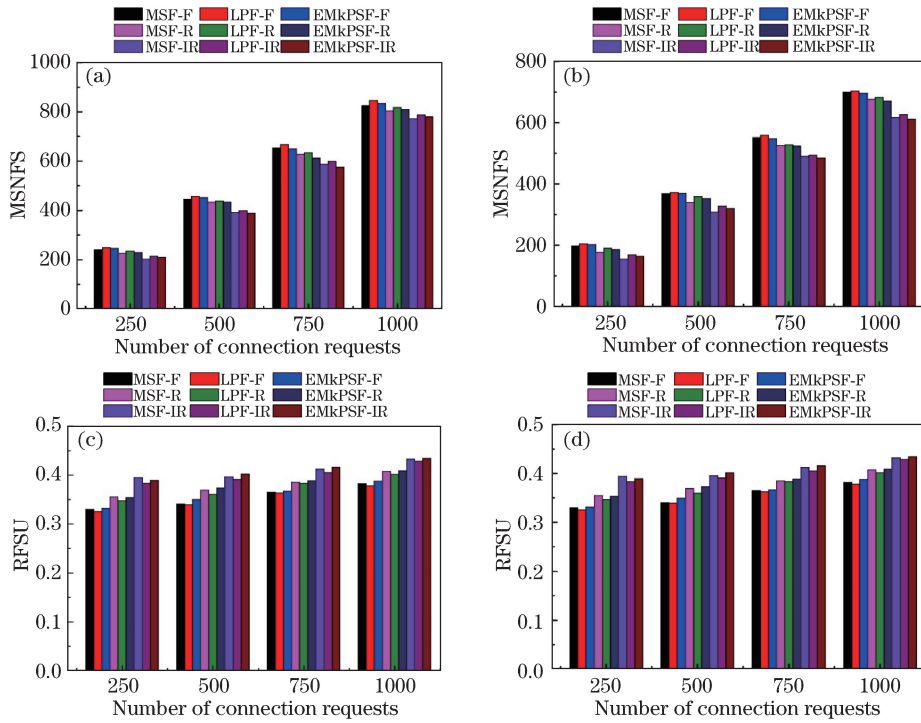


图 2  $N_{core}=5$  时网络中的 MSNFS 和 RFSU。(a) NSFNET 网络中 MSNFS; (b) ARPANET 网络中 MSNFS; (c) NSFNET 网络中的 RFSU; (d) ARPANET 网络中的 RFSU

Fig. 2 MSNFS and RFSU of network when  $N_{core}=5$ . (a) MSNFS of NSFNET network; (b) MSNFS of ARPANET network; (c) RFSU of NSFNET network; (d) RFSU of ARPANET network

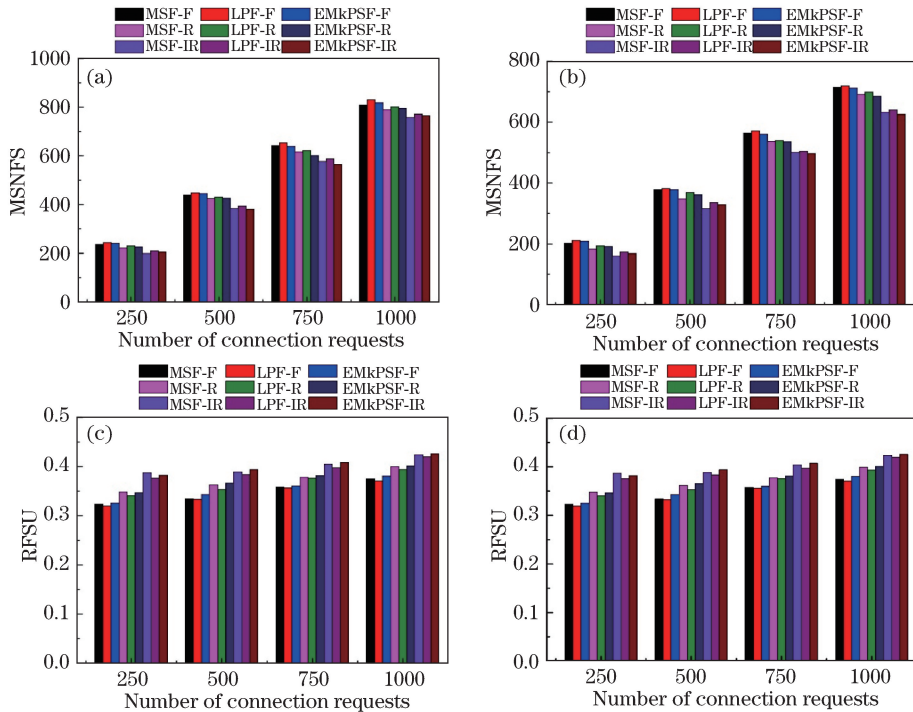


图 3  $N_{core}=7$  时网络中的 MSNFS 和 RFSU。(a) NSFNET 网络中 MSNFS; (b) ARPANET 网络中 MSNFS; (c) NSFNET 网络中的 RFSU; (d) ARPANET 网络中的 RFSU

Fig. 3 MSNFS and RFSU of network when  $N_{core}=7$ . (a) MSNFS of NSFNET network; (b) MSNFS of ARPANET network; (c) RFSU of NSFNET network; (d) RFSU of ARPANET network

纤芯轮换选择算法得到的频隙利用率分别比文献[12]提出的算法提高了 2.1% 和 3%。因此,随着业务数量的增加,纤芯轮换选择算法和改进的纤芯轮换选择算法得到的频隙利用率比文献[12]提出的算法得到的频隙利用率提高的比例也会逐渐增加。

由于仿真中的算法基于 MSF、LPF、EMkSPF,且 MSF、LPF、EMkSPF 的时间复杂度为  $O(|R||F|T_{\max}|E|)$ ,其中  $T_{\max} = \max_{1 \leq k \leq |R|} \{T_k\}$ 。所设计的纤芯选择算法在  $K$  条最短路径中选择一条路径后,再采用纤芯轮换机制进行纤芯的选择,所以该算法的时间复杂度与纤芯数量无关,而与路径条数  $K$  有关,即所设计算法的复杂度为  $O(K|R||F|T_{\max}|E|)$ 。

## 5 结 论

为得到最优的路径选择、纤芯分配和频谱分配方案以使占用的最大频隙号最小,建立了约束全局优化模型。为了有效求解该模型并实现多光纤网络中的纤芯分配,设计了一种纤芯轮换选择算法,并且对设计的算法进行了改进。不同网络拓扑中的仿真结果表明,设计的纤芯选择算法以及改进的算法可有效减小网络中的最大占用频隙号,从而提高了网络的频隙利用率。所设计的算法旨在减小网络中的最大占用频隙号,未考虑纤芯间的串扰情况,因此后续工作中需考虑纤芯间的串扰来设计多纤芯弹性光网络中有效的纤芯选择算法。

### 参 考 文 献

- 1 Klinkowski M, Walkowiak K. Routing and spectrum assignment in spectrum sliced elastic optical path network[J]. IEEE Communications Letters, 2011, 15(8): 884-886.
- 2 Qin Panke, Chen Xue, Wang Lei, *et al.* Multi-core shared tree based multipoint to multipoint multicast in multi-domain optical networks[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(5): 0506001.  
秦攀科, 陈 雪, 王 磊, 等. 多域光网络基于多核点共享树的多点对多点组播[J]. 光学学报, 2015, 35(5): 0506001.
- 3 Gerstel O, Jinno M, Lord A, *et al.* Elastic optical networking: a new dawn for the optical layer? [J]. IEEE Communications Magazine, 2012, 50(2): 12525244.
- 4 Guo Aihuang, Feng Shengyi, Xue Lin, *et al.* Research on power efficient routing algorithm in green optical networks[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(4): 0406002.  
郭爱煌, 冯圣毅, 薛 琳, 等. 基于节能的绿色光网络路由算法的研究[J]. 光学学报, 2012, 32(4): 0406002.
- 5 Wang C, Shen G X, Bose S K. Distance adaptive dynamic routing and spectrum allocation in elastic optical networks with shared backup path protection[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(14): 2955-2964.
- 6 Christodoulopoulos 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.
- 7 Christodoulopoulos K, Tomkos I, Varvarigos E A. Routing and spectrum allocation in OFDM-based optical networks with elastic bandwidth allocation[C]. IEEE Global Telecommunications Conference, 2010: 11743805.
- 8 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, 2012: 13176000.
- 9 Zhu Z Q, Wu L, Zhang L, *et al.* Dynamic service provisioning in elastic optical networks with hybrid single-/multi-path routing[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(1): 15-22.
- 10 Rosa A N F, Wiatr P, Cavdar C, *et al.* Statistical analysis of blocking probability and fragmentation based on Markov modeling of elastic spectrum allocation on fiber link[J]. Optics Communications, 2015, 354: 362-373.
- 11 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.
- 12 Muhammad A, Zervas G, Simeonidou D, *et al.* Routing, spectrum and core allocation in flex-grid SDM networks with multi-core fibers[J]. Optical Communication, 2014, 6(12): 1059-1069.
- 13 Tode H, Hirota Y. Routing, spectrum and core assignment for space division multiplexing elastic optical networks[C]. 16<sup>th</sup> International Conference on Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium (Networks), 2014: 14771533.
- 14 Muhammad A, Zervas G, Simeonidou D, *et al.* Routing, spectrum and core allocation in flexgrid SDM networks with multi-core fibers[C]. International Conference on Optical Network Design and Modeling, 2014: 192-197.
- 15 Saleh A A M, Simmons J M. All-optical networking-evolution, benefits, challenges, and future vision[J]. Proceedings of the IEEE, 2012, 100(5): 1105-1117.
- 16 Shieh W. OFDM for flexible high-speed optical networks[J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(10): 1560-1577.