

考虑串扰的多纤芯弹性光网络中的频谱分配算法

江祥奎¹, 赵峰¹, 范永青¹, 张银良²

¹西安邮电大学自动化学院, 陕西 西安 710121;

²68306 部队, 陕西 西安 710608

摘要 研究了多纤芯弹性光网络中选路、纤芯分配和频谱分配问题。为最小化网络的最大占用频隙号, 建立了一个使相邻纤芯之间的串扰率满足一定阈值要求的全局约束优化模型。为有效地求解该约束优化模型, 设计了一种全局优化遗传算法。首先将疏导后的业务排序, 然后利用设计的遗传算法为所有业务选择最优的路径和纤芯分配方案, 从而使网络中占用的最大频隙号最小。为验证算法的有效性, 在多个网络中进行了不同的仿真验证, 仿真结果表明所设计的算法能够减小网络中最大占用频隙号, 提高频谱利用率。

关键词 光通信; 多纤芯; 遗传算法; 纤芯分配; 选路

中图分类号 TN915.03; TP393 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.060601

Frequency Assignment Algorithm for Elastic Optical Network with Multi-Cores Considering Crosstalk

Jiang Xiangkui¹, Zhao Feng¹, Fan Yongqing¹, Zhang Yinliang²

¹School of Automation, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an, Shaanxi 710121, China;

²68306 Troops, Xi'an, Shaanxi 710608, China

Abstract This investigation focuses on the routing, core allocation and spectrum assignment problems in elastic optical network with multi-cores. To minimize the maximum index of used frequency slots, a global constraint optimization model with crosstalk rate of adjacent cores meeting certain threshold requirement is proposed. In order to solve the model efficiently, a global optimization genetic algorithm is proposed. The groomed connection requests are sorted, and the designed genetic algorithm is used to obtain the optimal schemes of routing and core allocation for all the connection requests. To evaluate the efficiency of the proposed algorithm, different simulations are conducted. The simulation results show that the proposed algorithm can reduce the maximum index of used frequency slot and improve spectrum efficiency.

Key words optical communications; multi-cores; genetic algorithm; core allocation; routing

OCIS codes 060.4510; 060.4265

1 引言

随着大数据处理等新服务的产生, 网络中的数据量呈爆炸式增长。传统的波分复用网络仅能以固定波长作为最小传输单位, 已经不能适应多种多样的网络服务需求, 从而使网络的利用率偏低^[1-2]。弹性光网络^[3-5]可以提高网络利用率, 更加灵活地进行网络带宽分配, 因此越来越多的学者开始研究弹性光网络^[6-9]。文献[5]针对静态业务选路和频谱分配问题, 建立了一个整数线性规划模型以有效地求解弹性光网络中选路和频谱分配问题, 并提出了联合和分步选路、频谱分配方案。文献[6]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

收稿日期: 2017-02-07; **收到修改稿日期:** 2017-02-20

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(61305098)、西安市科技局高校院所技术转移推进项目[CXY1516(6)]

作者简介: 江祥奎(1979—), 男, 博士, 讲师, 主要从事智能优化算法和计算机视觉方面的研究。

E-mail: jiangxiangkui@xupt.edu.cn

小化网络中最大占用频隙号(MIUS)为优化目标的全局约束优化模型。文献[10]建立了约束优化模型,利用双种群协同进化算法解决了静态业务选路和频谱分配问题。在动态业务请求条件下,文献[11]提出了一种基于马尔科夫模型的选路以及频谱分配算法。此外,越来越多的研究者也开始研究弹性光网络虚拟化^[12-13]和网络能耗^[14]等问题。然而以上这些研究都是基于单纤芯弹性光网络的研究,关于多纤芯光网络的研究并不多见。为解决传统的波分复用多纤芯光网络中的选路以及纤芯分配等问题,文献[15]建立了约束优化模型并设计了有效的算法。文献[16]针对多纤芯弹性光网络在频谱资源有限的情况研究了业务的选路以及频谱分配方案以减小业务的阻塞率,并且提出了一种启发式算法。文献[17]研究了多纤芯弹性光网络中的频谱分配方案,并且提出了减小纤芯间串扰的方案。文献[18]研究了基于白盒和黑盒问题的多纤芯网络资源分配问题,并且提出了启发式算法以实现资源的有效分配。文献[19]研究了多纤芯弹性网络中的选路和纤芯分配问题,并提出了基于纤芯轮换选择的启发式算法,但该研究并未考虑纤芯间的串扰。文献[20]研究了多纤芯弹性光网络中选路、纤芯分配问题且考虑了纤芯之间的串扰光,但是该文献研究的是动态选路、纤芯分配问题。

本文考虑纤芯间的串扰,研究了资源充足的条件下多纤芯弹性光网络中的选路、纤芯分配以及频谱分配问题。为确定最优的选路、纤芯分配以及频谱分配方案,建立了一个以最小化网络最大占用频隙号为目标的约束优化模型,并设计了一种改进的全局优化遗传算法求解该约束优化模型。对两个广泛利用的网络拓扑进行了仿真验证,仿真结果表明设计的算法能够有效地在多纤芯弹性光网络中进行选路和纤芯分配。

2 多纤芯弹性光网络频谱分配模型

2.1 网络与业务描述

无向图 $G = (V, E)$ 表示光网络的拓扑结构, $V = \{v_1, v_2, \dots, v_N\}$ 表示网络中的节点集合, 其中 v_i 和 N 分别表示网络中的第 i 个节点以及网络中节点的总数。 $E = \{l_{ij} | v_i, v_j \in V\}$ 是网络中链路的集合, 其中 l_{ij} 表示节点 v_i 和节点 v_j 之间的链路, N_E 表示网络中链路的个数。每个链路均包含 M 个纤芯, 链路 l_{ij} 可以表示为 $l_{ij} = \{l_{ij}^1, l_{ij}^2, \dots, l_{ij}^m, \dots, l_{ij}^M\}$, 其中 l_{ij}^m 表示链路 l_{ij} 上的第 m 个纤芯。集合 $F_{ij}^m = \{f_{ij}^{m,1}, f_{ij}^{m,2}, \dots, f_{ij}^{m,u}, \dots, f_{ij}^{m,NF}\}$ 为纤芯上的频隙号从小到大排列的频隙集合, 每个纤芯上有 N_F 个频隙。与已有的文献类似^[8-12], 假设每个频隙具有相同的带宽 C_{fs} 。

集合 $R = \{r_1, r_2, \dots, r_k, \dots, r_{N_R}\}$ 表示 N_R 个静态业务请求, 其中 r_k 表示第 k 个静态业务。业务 r_k 可以用三元组 $r_k = (s_k, d_k, T_k)$ 表示, 其中 s_k 、 d_k 和 T_k 分别表示业务 r_k 的源节点、目的节点和请求的业务量。集合 $Q_k = \{Q_k^1, Q_k^2, \dots, Q_k^q, \dots, Q_k^{N_{Q_k}}\}$ 表示业务 r_k 的 N_{Q_k} 条从源节点 s_k 到目的节点 d_k 的可用路径, 其中 Q_k^q 是集合 Q_k 中的第 q 条可用路径。一般地, 为每个业务选 K 条可用路径, 即 $N_{Q_k} = K (k = 1, 2, \dots, N_R)$ 。

2.2 问题建模

研究旨在多纤芯弹性光网络中为 N_R 个静态业务确定最优的选路、纤芯分配以及频谱分配方案, 使得不同的业务被均衡地分配到不同纤芯频隙中, 即分配结束时所有纤芯上占用的最大频隙号最小。网络中的最大占用频隙号可以表示为

$$F = \max_{l_{ij}^m \in E} [n(f_{ij}^m)], \quad (1)$$

式中 $n(f_{ij}^m)$ 表示纤芯 l_{ij}^m 上占用的最大频隙号。因此最小化网络中的最大占用频隙号的优化目标可以表示为

$$\min(F) = \min \left\{ \max_{l_{ij}^m \in E} [n(f_{ij}^m)] \right\}. \quad (2)$$

优化目标在满足一定的约束条件时才能达到最优, 所要满足的约束条件如下。

约束 1): 对于静态业务 $r_k (\forall r_k \in R)$, 其占用且只能占用可用路径集合 Q_k 中的一条路径, 满足

$$\sum_{q=1}^{N_{Q_k}} \lambda_k^q = 1, \quad \forall r_k \in R, \quad (3)$$

式中 $\lambda_k^q = 1$ 表示业务 r_k 占用路径集合 Q_k 中的路径 Q_k^q , 否则 $\lambda_k^q = 0$ 。

约束 2): 业务 $r_k (\forall r_k \in R)$ 在其所占路径上的不同链路中所占用的纤芯号保持一致, 即纤芯不可交换, 满足

$$1 \leq \phi_{kq}^{ij} = \phi_{kq}^{i'j'} \leq M, \forall r_k \in R, \quad (4)$$

式中 ϕ_{kq}^{ij} 和 $\phi_{kq}^{i'j'}$ 分别表示业务 r_k 在路径 Q_k^q 上的两条不同链路 l_{ij} 和 $l_{i'j'}$ 中占用的纤芯号。

约束 3): 业务 r_k ($\forall r_k \in R$) 在其所占路径上的不同链路中的纤芯上分配给该业务的若干个频隙的起始频隙号保持一致, 满足

$$f_{kq}^{ijm} = f_{kq}^{i'j'm}, \forall r_k \in R, \quad (5)$$

式中 f_{kq}^{ijm} 和 $f_{kq}^{i'j'm}$ 分别表示业务 r_k 在路径 Q_k^q 上两个不同的纤芯 l_{ij}^m 和 $l_{i'j'}^m$ 中占用的起始频隙号。

约束 4): 分配给业务 r_k ($\forall r_k \in R$) 的若干个频隙必须是连续的, 即一个业务不能被分配到几个不连续的频隙中, 满足

$$\sum_{u=1}^{f_{kq}^{ijm} + B_k + G - 1} \theta_{kqu}^{ijm} = B_k + G, \forall r_k \in R, \quad (6)$$

式中 θ_{kqu}^{ijm} 是布尔变量, $\theta_{kqu}^{ijm} = 1$ 表示业务 r_k 所占用的路径 Q_k^q 中纤芯 l_{ij}^m 上的第 u 个频隙, 否则 $\theta_{kqu}^{ijm} = 0$; G 是保护频隙数; 业务 r_k 所占用的频隙数 B_k 的计算公式为

$$B_k = \left\lceil \frac{T_k}{D_k \times C_{Is}} \right\rceil, \quad (7)$$

式中 D_k 表示业务 r_k 在其所占路径 Q_k^q 上所选择的调制格式。可以距离自适应地为业务 r_k 选取调制格式, 所用公式为

$$M_k = \max\{D \mid d(M) \geq d(Q_k^q)\}, \quad (8)$$

式中 $d(M)$ 和 $d(Q_k^q)$ 分别表示调制格式 D 的传输距离和路径 Q_k^q 的长度。

约束 5): 对于所占用的路径中公共纤芯 l_{ij}^m 的任意两个不同的业务 r_k, r'_k ($\forall r_k, r'_k \in R$), 且业务 r_k 的起始频隙号小于业务 r'_k 的起始频隙号, 记为 $r_k < r'_k$, 则分配给业务 r_k, r'_k 的频隙必须满足

$$f_{kq}^{ijm} + B_k + G \leq f_{kq}^{i'j'm}, \forall r_k < r'_k. \quad (9)$$

约束 6): 业务在其所占用路径上所有链路中不同纤芯之间的串扰值之和要小于某个阈值(当串扰值大于某个阈值时会使得目的节点解码错误), 即

$$\sum_{l_{ij} \in Q_k^q} \rho_{ij} \leq \delta, \forall r_k \in R, \quad (10)$$

式中 ρ_{ij} 是业务 r_k 在所占用路径 Q_k^q 中链路 l_{ij} 上的串扰值, δ 是串扰值阈值。业务 r_k 在链路 l_{ij} 上的串扰值可以采用文献[21]中的方法计算得到。

3 全局优化遗传算法

弹性光网络中的选路和频谱分配问题是典型的非确定性多项式难题(NP-Hard)组合优化问题。遗传算法^[22]在许多工程问题中都得到广泛的应用, 尤其是在解决组合优化问题方面更是表现出了传统优化方法所不具备的优良性能。因此, 这里设计了一种新的全局优化遗传算法来求解建立的多纤芯弹性光网络中的选路、纤芯分配和频谱分配模型。

3.1 编码和种群初始化

3.1.1 编码

为解决多纤芯弹性光网络中的选路、纤芯分配和频谱分配问题, 有以下 4 个主要步骤: 1) 利用启发式算法将所有业务按照某种方式排序; 2) 为每个业务选择合适的路径; 3) 为每个业务分配合适的纤芯; 4) 为业务分配频隙。为了使问题简化, 采用首次适应 (FF)^[3] 策略进行频谱分配, 因此只需要对选路和纤芯分配进行编码即可, 即遗传算法中只包含选路种群和纤芯分配种群。

在选路种群中, 每一个个体均表示一种所有业务的选路方案。假设 $x = (x_1, x_2, \dots, x_k, \dots, x_{N_R})$ 表示选路种群中的一个个体, 其中 x_k ($1 \leq k \leq N_R$) 表示业务 r_k ($r_k \in R$) 的选路方案。 $x_k = q$ 表示业务 r_k 占用其可用路径集合中的第 q 条路径 Q_k^q 。

类似地, 在纤芯分配种群中, 每一个个体均表示一种所有业务的纤芯分配方案。假设 $y =$

$(y_1, y_2, \dots, y_k, \dots, y_{N_R})$ 表示纤芯分配种群中的一个个体, 其中 $y_k (1 \leq k \leq N_R)$ 表示业务 $r_k (r_k \in R)$ 的纤芯分配方案。 $y_k = m$ 表示业务 r_k 占用链路中的第 m 个纤芯。

3.1.2 种群初始化

为了在问题的可行域内产生均匀分布的初始解, 采用均匀设计^[23-24]的方法。数组 $L_H(\chi^s)$ 表示有 s 个因素, 且每个因素具有 χ 水平的 H 种组合。假设每一种组合表示问题的一个解, 则 H 种组合均匀地分布在具有 χ^s 个解的可行域内。采用文献[22]中提出的简单且有效产生均匀分布解的方法, 即对于种群 P_{op} 第 p 个解中的第 j 个分量, 计算公式为

$$P_{op}(p, j) = [p \times \sigma^j \bmod(\chi)] + 1, \quad (11)$$

式中 σ 是一个常数, mod 表示取模运算。在利用(11)式产生选路种群时, χ 是业务可选路径的条数, 即 $\chi = K$; 在利用(11)式产生纤芯分配种群时, χ 是链路中纤芯的个数, 即 $\chi = M$ 。

3.2 交叉算子

由于选路个体和纤芯分配个体均采用整数编码的方式, 因此可以采用相同的交叉算子产生新的选路个体和纤芯分配个体。假设 $z^1 = (z_1^1, z_2^1, \dots, z_k^1, \dots, z_{N_R}^1)$ 与 $z^2 = (z_1^2, z_2^2, \dots, z_k^2, \dots, z_{N_R}^2)$ 是取自选路种群和纤芯分配种群中的两个用于交叉的父代个体, 令 $L_z = (A_1, A_2, \dots, A_k, \dots, A_{N_R}), U_z = (B_1, B_2, \dots, B_k, \dots, B_{N_R})$, 其中 $A_k = \min\{z_k^1, z_k^2\}, B_k = \max\{z_k^1, z_k^2\}, k = 1, 2, \dots, N_R$ 。可以得到两个子代个体 $z^{c1} = (z_1^{c1}, z_2^{c1}, \dots, z_k^{c1}, \dots, z_{N_R}^{c1})$ 和 $z^{c2} = (z_1^{c2}, z_2^{c2}, \dots, z_k^{c2}, \dots, z_{N_R}^{c2})$, 其中

$$z_k^{c1} = \min\left\{B_k, \left\lceil \frac{2A_k + B_k}{3} \right\rceil\right\}, z_k^{c2} = \max\left\{A_k, \left\lceil \frac{A_k + 2B_k}{3} \right\rceil\right\}. \quad (12)$$

3.3 变异算子

变异算子是遗传算法中一种重要的算子, 变异算子可以通过改变个体中基因位的值来增加种群中的个体跳出局部最优解并得到全局最优解的可能性。和交叉算子类似, 选路个体和纤芯分配个体采用相同的变异算子以产生新的解。假设 $z^c = (z_1^c, z_2^c, \dots, z_k^c, \dots, z_{N_R}^c)$ 是交叉后得到的用于进行变异的个体, 则变异后得到的个体为 $z^m = (z_1^m, z_2^m, \dots, z_k^m, \dots, z_{N_R}^m)$, 其中

$$z_k^m = \chi + 1 - z_k^c. \quad (13)$$

在利用(13)式产生选路个体时, χ 是业务可选路径的条数, 即 $\chi = K$; 在产生纤芯分配种群时, χ 是链路中纤芯的个数, 即 $\chi = M$ 。

3.4 适应度函数

适应度函数是评价个体质量的指标, 适应度值越大, 个体越好, 反之则越差。为了评价个体的质量, 用(1)式作为适应度函数。由于设计的遗传算法中产生的个体均为可行解, 所以个体的适应度函数值越大, 该个体越好。

4 仿真与分析

4.1 参数设置

仿真验证采用了两个被广泛利用的网络, 即美国国家科学基金会网络(NSFNET)和美国高级研究计划署网络(ARPANET)。NSFNET 包含 14 个节点和 21 条链路[图 1(a)], ARPANET 包含 20 个节点和 32 条链路[图 1(b)]。4 种调制格式二进制相移键控(BPSK)、正交相移键控(QPSK)、三进制正交振幅调制(8QAM)和四进制正交振幅调制(16QAM)的最大传输距离为 9600, 4800, 2400, 1200 km^[25]。实验中采用 4 组不同的业务量, 分别为 $250 \times M, 500 \times M, 750 \times M, 1000 \times M$ 。每组业务中不同业务所需的业务量在区间 $[12.5 \text{ GHz}, 125 \text{ GHz}]$ 内产生, 且满足均匀分布。在实验中, 每个频隙的容量均为 12.5 GHz, 串扰率阈值设置为 0.5。遗传算法中的参数设置为: 种群规模 $P_{op_size} = 100$, 交叉概率和变异概率分别为 $p_c = 0.8$ 和 $p_m = 0.1$, 最大迭代次数 $G_{max} = 5000$ 。均匀设计中常数 $\sigma = 3$ 。

4.2 对比算法与评价指标

4.2.1 对比算法

由于不同的业务排序策略会影响选路和纤芯分配的结果, 因而采用 3 种常用的排序策略: 最大载波优先

(MSF)^[6]、最长路径优先(LPF)^[6]以及 EMkPSF(Extended Most K Paths' Slots First, EMkPSF)^[26]。对比的 9 种算法可以分为 3 组:第 1 组为本文设计的遗传算法(GA)和 3 种不同排序策略结合产生的 3 种不同算法,即 GAMSF、GALPF 以及 GAEMkPSF;第 2 组是文献[16]提出的纤芯选择算法与 3 种排序策略结合产生的算法,表示为 FMSF、FLPF 以及 FEMkPSF;第 3 组是文献[19]提出的算法与 3 种排序策略结合产生的算法,表示为 IRMSF、IRLPF 以及 IREMkPSF。

4.2.2 评价指标

为了验证算法的有效性,采用两种评价指标。这里建立了以最小化最大占用频隙号为目标的约束优化模型,因此将最大占用频隙号作为评价指标之一。此外,频谱利用率(FRSU)也是评价选路和频谱分配算法性能的指标之一。频谱利用率计算公式为

$$\eta = \min_{l_m^m \in E} \left[\frac{f(F_{ij}^m)}{F} \right], \quad (14)$$

式中 $f(F_{ij}^m)$ 是纤芯 l_{ij}^m 上占用的频隙个数, F 是网络中的最大占用频隙号。因此网络的频谱利用率是所有纤芯上频谱利用率的最小值。

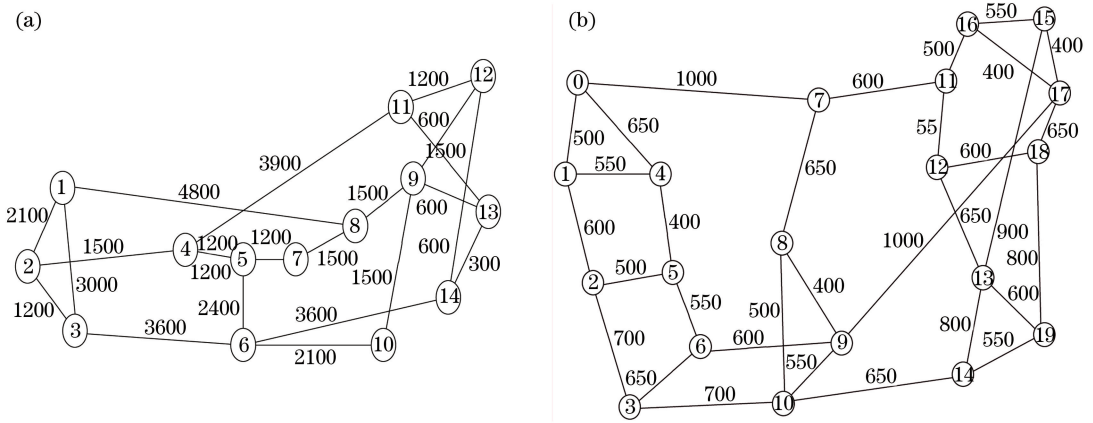


图 1 网络拓扑。(a) NSFNET 拓扑;(b) ARPANET 拓扑

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

4.3 仿真结果

图 2 所示为纤芯数目为 7 时两个网络拓扑得到的最大占用频隙号随业务量的变化情况;图 3 所示为纤芯数目为 7 时两个网络拓扑得到的频谱利用率随业务量的变化情况;图 4 所示为纤芯数目为 12 时两个网络拓扑得到的最大占用频隙号随业务量的变化情况;图 5 所示为纤芯数目为 12 时两个网络拓扑得到的频谱利用率随业务量的变化情况。

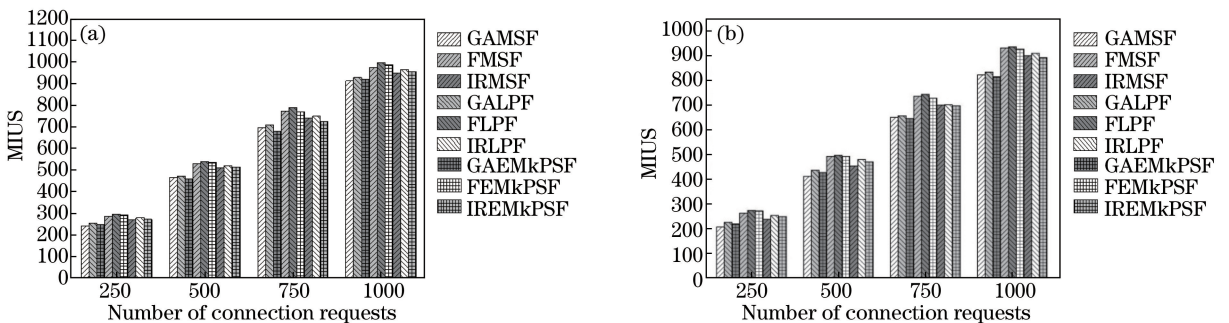


图 2 纤芯数目为 7 时得到的最大占用频隙号。(a) NSFNET 中最大频隙号;(b) ARPANET 中最大频隙号

Fig. 2 MIUS obtained when $M=7$. (a) MIUS obtained in NSFNET; (b) MIUS obtained in ARPANET

4.4 仿真结果分析

从图 2 和图 4 的仿真结果可以看出,在纤芯数目为 7 和 12 的情况下,相比于文献[16]和文献[19]中提出的算法,所提算法可以得到较小的最大占用频隙号。文献[16]中提出的算法不能将业务均衡地分配到不

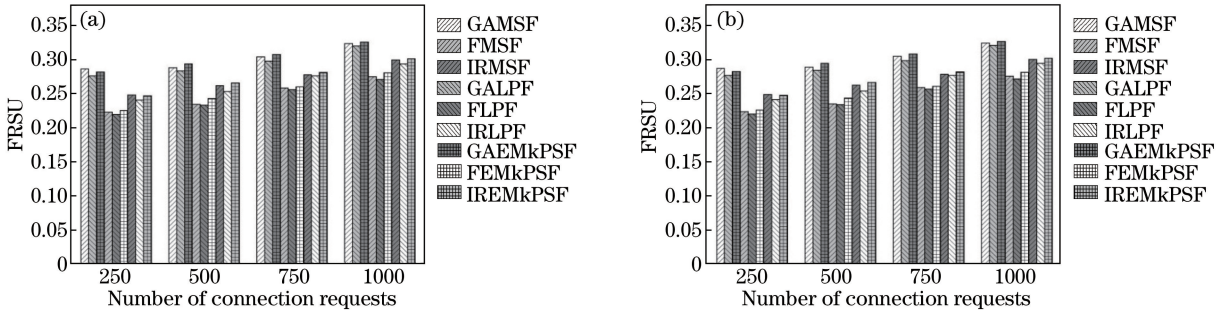


图3 纤芯数目为7时得到的频谱利用率。(a) NSFNET中的频谱利用率;(b) ARPANET中的频谱利用率
Fig. 3 FRSU obtained when $M=7$. (a) FRSU obtained in NSFNET; (b) RFSU obtained in ARPANET

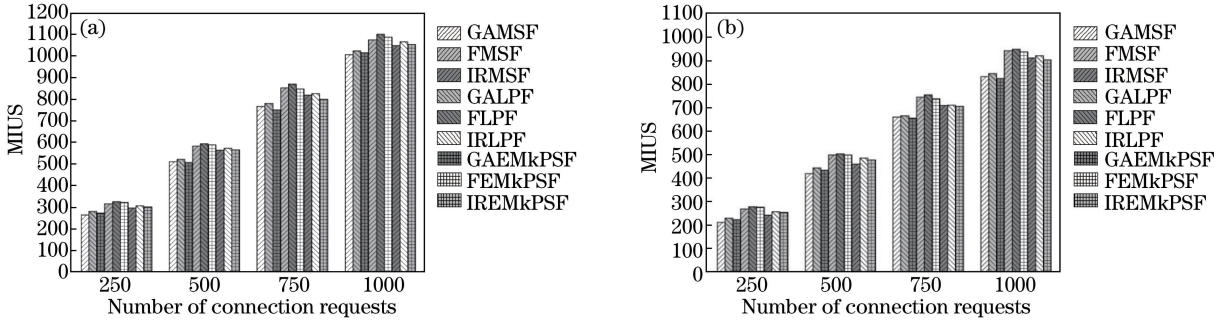


图4 纤芯数目为12时得到的最大占用频隙号。(a) NSFNET中最大频隙号;(b) ARPANET中最大频隙号
Fig. 4 MIUS obtained when $M=12$. (a) MIUS obtained in NSFNET; (b) MIUS obtained in ARPANET

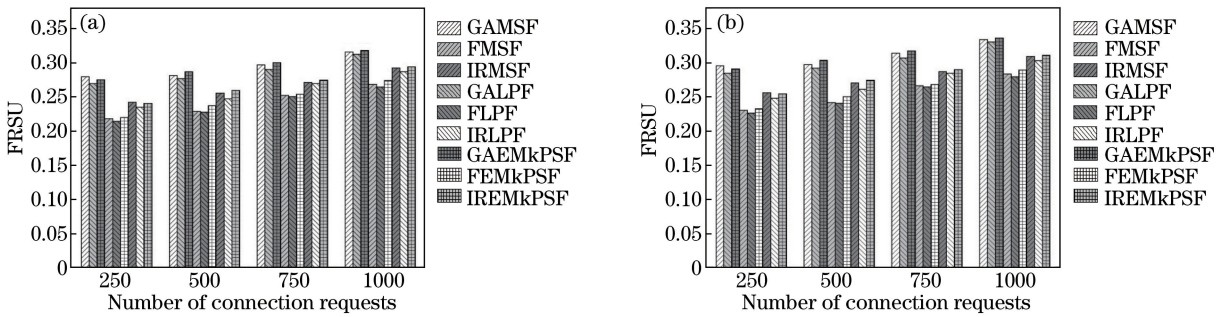


图5 纤芯数目为12时得到的频谱利用率。(a) NSFNET中的频谱利用率;(b) ARPANET中的频谱利用率
Fig. 5 FRSU obtained when $M=12$. (a) FRSU obtained in NSFNET; (b) RFSU obtained in ARPANET

同链路的纤芯中以减小最大占用频隙号,因此该算法得到的最大占用频隙号较大。文献[19]中提出的基于纤芯轮换选择的纤芯分配算法可以从一定程度上提高业务在不同链路的纤芯中实现分配的均衡性,但是该算法仅利用根据当前信息进行选路的纤芯分配,容易陷入局部最优,不能得到问题的最优解。而本文设计的遗传算法能够根据全局信息进行选路和纤芯分配,采用均匀设计产生初始种群以及设计的交叉和变异算子提高了算法的搜索能力,得到模型的全局最优解,即为每个业务确定最优的选路和纤芯选择方案,因此本文算法能够得到对比算法更小的最大占用频隙号。此外,从图2和图4还可以看出,当业务量为 $250 \times M$ 时,本文算法得到的最大占用频隙号比文献[16]和文献[19]提出算法平均减小的比例分别为6.8%和4.5%。当业务量逐渐增大时,文献[16]和文献[19]提出的算法会使业务在不同的纤芯上更加不均衡,不能得到最优的分配方案,而本文算法能够根据所有信息确定最优的方案。当业务量为 $1000 \times M$ 时,本文算法得到的最大占用频隙号比文献[16]和文献[19]提出算法减小的比例分别为12.5%和9.6%。因此,随着业务量的增大,本文算法得到的最大占用频隙号与文献[16]和文献[19]提出算法得到的最大占用频隙号之间的差值越来越大,即本文算法使最大占用频隙号减小的比例越来越大。

类似地,从图3和图5的仿真结果可以看出,在纤芯数目为7和12的情况下,本文算法得到的频谱利用

率比文献[16]和文献[19]提出算法的更大。由(15)式可知,业务在不同的纤芯上分配越均衡,最大占用频隙号越小,频谱利用率越高。本文算法能获得较小的最大占用频隙号,且在不同的纤芯上业务分配更均衡,所以本文算法获得的频谱利用率较高。与最大占用频隙号的情况类似,从图3和图5的仿真结果还可以看出,当业务量为 $250 \times M$ 时,本文算法得到的频谱利用率比文献[16]和文献[19]提出的算法平均减小的比例分别为5.6%和3.8%。当业务量逐渐增大时,文献[16]和文献[19]提出的算法会使业务在不同的纤芯上越来越不均衡,不能得到最优的分配方案,而本文算法能够根据所有信息确定最优的方案。当业务量为 $1000 \times M$ 时,本文算法得到的频谱利用率比文献[16]和文献[19]提出的算法平均减小的比例分别为10.2%和7.9%。因此,随着业务量的增大,本文算法得到的频谱利用率与文献[16]和文献[19]提出算法得到的频谱利用率之间的差值越来越大,即本文算法使频谱利用率提高的比例越来越大。

4.5 算法复杂度

本文算法首先将 N_R 个业务经过疏导后转换为 $N(N-1)$ 个业务, $N(N-1)$ 个业务选路的时间复杂度为 KN^4 。用遗传算法为每个业务确定最优的选路和纤芯分配方案的时间复杂度为 $2G_{\max}P_{\text{op_size}}N^3F$,所以本文算法的时间复杂度为 $KN^4 + 2G_{\max}P_{\text{op_size}}N^3F$ 。

5 结 论

研究了考虑纤芯串扰时多纤芯弹性光网络中的选路、纤芯分配以及频谱分配问题。为最小化网络最大占用频隙号,建立了一个约束优化模型。为有效地求解该约束优化模型,设计了一种全局优化遗传算法。为验证模型及算法的有效性,在两个广泛被采用的网络中进行了仿真验证,仿真结果表明本文算法能够得到较小的最大占用频隙号和较大的频谱利用率。但是本文算法时间复杂度较大,因此只适应于静态业务的选路、纤芯分配和频谱分配。

参 考 文 献

- [1] Velasco L, Klinkowski M, Ruiz M, *et al.* Modeling the routing and spectrum allocation problem for flexgrid optical networks[J]. *Photonic Network Communications*, 2012, 24(3): 177-186.
- [2] Castro A, Velasco L, Ruiz M, *et al.* Dynamic routing and spectrum (re)allocation in future flexgrid optical networks [J]. *Computer Networks*, 2012, 56(12): 2869-2883.
- [3] 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): 138-145.
- [4] 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): s12-s20.
- [5] 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.
- [6] Xuan Hejun, Wang Yuping, Xu Zhanqi, *et al.* Node security-aware spectrum allocation algorithm in elastic optical networks[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(12): 1206002.
宣贺君, 王宇平, 徐展琦, 等. 弹性光网络中考虑节点安全性的频谱分配算法 [J]. *中国激光*, 2016, 43(12): 1206002.
- [7] Muhammad A, Fiorani M, Wosinska L, *et al.* Joint optimization of resource allocation for elastic optical intradatacenter network[J]. *IEEE Communications Letters*, 2016, 20(9): 1760-1763.
- [8] 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.
- [9] Yoshida Y, Maruta A, Kitayama K, *et al.* SDN-based network orchestration of variable-capacity optical packet switching network over programmable flexi-grid elastic optical path network[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(3): 609-617.
- [10] Ding Z, Xu Z, Zeng X, *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.
- [11] 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.
- [12] Gong L, Zhu Z. Virtual optical network embedding (VONE) over elastic optical networks[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(3): 450-460.
- [13] Jiang H, Wang Y, Gong L, *et al.* Availability-aware survivable virtual network embedding in optical datacenter networks[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2015, 7(12): 1160-1171.
- [14] Chen B, Zhang J, Xie W, *et al.* Minimum-cost survivable virtual optical network mapping in flexible bandwidth optical networks[C]. *IEEE Global Communications Conference*, 2014: 2023-2028.
- [15] Li Y, Hua N, Zheng X. Routing, wavelength and core allocation planning for multi-core fiber networks with MIMO-based crosstalk suppression[C]. *IEEE Opto-Electronics and Communications Conference*, 2015: 15650195.
- [16] Muhammad A, Zervas G, Simeonidou D, *et al.* Routing, spectrum and core allocation in flexgrid SDM networks with multi-core fibers[C]. *IEEE International Conference on Optical Network Design and Modeling*, 2014: 192-197.
- [17] Fujii S, Hirota Y, Tode H, *et al.* On-demand spectrum and core allocation for reducing crosstalk in multicore fibers in elastic optical networks[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2014, 6(12): 1059-1071.
- [18] Muhammad A, Zervas G, Forchheimer R. Resource allocation for space-division multiplexing: Optical white box versus optical black box networking[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(23): 4928-4941.
- [19] Xuan Hejun, Wang Yuping, Xu Zhanqi, *et al.* Core selection algorithm for multi-core elastic optical networks[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(12): 1206005.
宣贺君, 王宇平, 徐展琦, 等. 多纤芯弹性光网络中纤芯选择算法[J]. *光学学报*, 2016, 36(12): 1206005.
- [20] Tode H, Hirota Y. Routing, spectrum, and core and/or mode assignment on space-division multiplexing optical networks[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2017, 9(1): A99-A113.
- [21] Muhammad A, Zervas G, Forchheimer R. Resource allocation for space-division multiplexing: Optical white box versus optical black box networking[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(23): 4928-4941.
- [22] 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: 833-847.
- [23] Tan Y Y, Jiao Y C, Li H, *et al.* MOEA/D+ uniform design: A new version of MOEA/D for optimization problems with many objectives[J]. *Computers and Operations Research*, 2013, 40(6): 1648-1660.
- [24] Jiang S W, Cai Z H. A new differential evolution for multiobjective optimization by uniform design and minimum reduce hypervolume[C]. *Proceedings of the 4th International Workshop on Natural Computing*, 2010: 199-208.
- [25] Bocoï A, Schuster M, Rambach F, *et al.* Reach-dependent capacity in optical networks enabled by OFDM[C]. *IEEE Conference on Optical Fiber Communication*, 2009: 10689443.
- [26] Hashimoto T, Baba K, Simojo S. A study on routing, modulation level, and spectrum allocation algorithms for elastic optical path networks[C]. *IEEE 3rd International Conference on Photonics*, 2012: 395-399.