

频谱可用性和保护带宽共享度感知的弹性光网络生存性多路径策略

刘焕淋^{*①} 张明佳^① 陈勇^② 王欣^①

^①(重庆邮电大学光纤通信技术与网络重点实验室 重庆 400065)

^②(重庆邮电大学自动化学院 重庆 400065)

摘要: 针对弹性光网络频谱利用率降低和带宽阻塞率高等问题, 该文提出一种频谱可用性和保护带宽共享度感知的生存性多路径策略(M-SDSAA)。首先, 该策略对业务采用单路径路由, 通过区分业务的持续时间, 分别采用首次命中和末端命中的工作路径频谱分配方式, 并且为不同大小共享频谱块设定不同链路权重值。若单路径路由或频谱分配失败, 引入多路径传输策略, 自适应选择消耗频隙数少的策略, 并且引入共享保护机制, 提高保护带宽共享度。最后, 当业务阻塞时, 且存在单路径业务的保护路径预置在频隙消耗次优的路径, 则启动重配置机制进一步降低阻塞率, 将该业务重配置到保护频隙消耗最少的路径。仿真结果表明所提算法能有效地提高频谱利用率, 降低网络的带宽阻塞率。

关键词: 弹性光网络; 生存性路由; 共享度; 重配置; 带宽阻塞率

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)10-2472-07

DOI: 10.11999/JEIT161374

Survivable Multipath Strategy Based on Spectrum Availability and Protection Bandwidth Sharing Degree-aware for Elastic Optical Networks

LIU Huanlin^① ZHANG Mingjia^① CHEN Yong^② WANG Xin^①

^①(Key Laboratory of Optical Communications and Networks, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

^②(School of Automation, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: In order to address the problems of the low Spectrum Utilization (SU) and the high Bandwidth Blocking Probability (BBP), a survivable Multipath strategy based on Sharing Degree of protection bandwidth and Spectrum Availability-Aware (M-SDSAA) is proposed. Firstly, the single-path routing is used to transmit the request. The first fit and last fit methods are adopted according to the request duration for the working path Routing and Spectrum Assignment (RSA). A link weight value is designed in accordance with the size of sharable spectrum block. Secondly, the multipath RSA mechanism is used to transmit the request when the single-path RSA fails. The multipath RSA adaptively chooses multiple paths priority with less number of spectrum slots to transmit the request. A shared light-path protection mechanism is used for the multipath provision. Lastly, a reprovisioning mechanism is proposed to further reduce the BBP when the request is blocked. This mechanism reconfigures the blocked request from the sub-optimal protection path to the optimal path occupied minimum protection bandwidth. The simulation results show that the M-SDSAA can improve the SU and decrease the BBP.

Key words: Elastic optical networks; Survivable routing; Sharing degree; Reprovisioning; Bandwidth Blocking Probability (BBP)

1 引言

基于光正交频分复用 (Optical-Orthogonal

Frequency Division Multiplexing, O-OFDM) 技术的弹性光网络 (Elastic Optical Networks, EONs)^[1] 因其高效的频谱利用率得到了广泛的关注。不同于波分复用 (Wavelength Division Multiplexing, WDM) 网络^[2,3], EONs 可以根据业务大小分配所需频隙数 (Frequency Slot, FS), 实现 Gb/s 到 Tb/s 级业务的传输, 因此 EONs 被认为是下一代光网络发展的重要方向。

随着网络技术的发展, 单光纤提供的带宽达到

收稿日期: 2016-12-16; 改回日期: 2017-03-23; 网络出版: 2017-05-26

*通信作者: 刘焕淋 liuhl2@sina.com

基金项目: 国家自然科学基金(61275077, 61571072), 重庆市基础与前沿研究项目(2015jcyjA40024)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61275077, 61571072), The Basic and Frontier Research Program of Chongqing (2015jcyjA40024)

400 Gb/s 甚至 1 Tb/s, 故弹性光网络中单链路的故障可能导致 Tb/s 级业务的丢失^[4], 因此光网络的生存性问题非常重要, 而路由和频谱分配(Routing and Spectrum Allocation, RSA)策略是影响弹性光网络保护性能的一个重要因素^[5,6]。

目前, 光网络生存性的路由和频谱分配策略问题研究广泛, 其中路径保护机制较恢复机制而言, 具有恢复时间快, 频谱资源利用率高等优点, 故路径保护技术更具有研究意义^[7]。文献[8]研究专用路径保护(Dedicated Path Protection, DPP)。DPP 算法可以有效地保证网络中业务的可靠传输, 但是需要消耗大量的频谱资源。为了减少 DPP 算法所消耗的频隙资源, 文献[9,10]提出了共享路径保护(Shared Path Protection, SPP)算法。虽然 SPP 算法比 DPP 算法提高了频谱利用率, 但没有区分共享频谱块大小在保护链路代价函数中的权重, 初始分配后没有调整权重值来反映带宽资源稀缺情况, 造成保护带宽共享度和频谱利用率较低的问题。现有的共享路径保护算法的频谱分配方式大多使用首次命中(First Fit, FF)算法。FF 算法易产生大量的频谱碎片, 降低了频谱利用率, 并且随着网络负载的增大, 以上的生存性 RSA 策略由于受限于单路径传输, 不能有效地降低网络带宽阻塞率。因此文献[11]研究生存性多路径保护(Multiple Path Protection, MPP)策略, 所提 MPP-heuristic 算法使用多条路径传输, 可以提高频谱利用率。但是 MPP-heuristic 算法没有考虑多路径共享保护, 且没有优化多路径路由由频谱分配策略, 降低频谱资源利用率。

综上所述, 现有的生存性多路径 RSA 算法不能有效地提高网络性能, 故本文提出频谱可用性和保护带宽共享感知的多路径策略。首先通过区分业务持续时间, 采用不同的频谱分配方式; 根据共享频谱块大小, 优化链路代价函数。然后在多路径传输阶段, 根据业务保护带宽需求的不同, 自适应地采用不同的传输策略, 最小化消耗频隙数目; 同时, 在多路径保护中引入共享路径保护机制, 减少空闲频隙的使用。最后通过保护带宽重配置策略, 提高保护带宽共享度, 优化保护路径频谱分配问题。

2 问题描述

弹性光网络表示为 $G(V, E, S)$, 其中 $V = \{v_i | i = 1, 2, \dots, |V|\}$ 表示节点集合, $E = \{e_{ij} | i, j \in V, i \neq j\}$ 为链路集合, $S = \{s_i | i = 1, 2, \dots, |S|\}$ 是频隙集合。业务用 $R = \{r_i | i = 1, 2, \dots, |R|\}$ 表示, 其中 $|R|$ 表示业务请求的数目。每个业务表示为 $r_i(s_i, d_i,$

$TR_i)$, 其中 s_i 表示源节点, d_i 表示目的节点, TR_i 表示业务 r_i 的传输速率。业务 r_i 所需连续频隙数目为 $N_{r_i} = TR_i / (SE_{FS}) + N_{GB}$, 其中 SE_{FS} 代表单个子载波(频隙)所能传输的最大速率, N_{GB} 代表业务之间保护带宽。若业务采用多路径传输, 保护带宽需求记为 q , 则保护带宽为 $qTR_i + N_{GB}$ 。

2.1 约束条件

2.1.1 单路径约束条件 单路径共享保护问题的研究关键在于基于工作路径和保护路径的选择, 最小化所消耗的频谱资源。优化目标如式(1)所示, 约束条件如式(2)~式(6)所示。

$$\min SFS_r = \sum_{e \in E} \sum_{s \in S} (WP_{e,s}^r + PP_{e',s}^r - SP_{e',s}^r), \quad \forall e \in \mathbf{WP}_r, \forall e' \in \mathbf{PP}_r, \forall r \in R, \forall s \in S \quad (1)$$

$$\sum (PP_e^{r_i} + PP_e^{r_j}) \geq 1, \forall r_i, r_j \in R, i \neq j, \forall e \in E \quad (2)$$

$$WP_{e_1,s}^r = WP_{e_2,s}^r, \forall e_1, e_2 \in \mathbf{WP}_r, \forall r \in R, \forall s \in S \quad (3)$$

$$WP_{e,s}^r = WP_{e,s+1}^r, \forall e \in E, \forall r \in R, \forall s \in \mathbf{WS}_r \quad (4)$$

$$PP_{e_1,s}^r = PP_{e_2,s}^r, \forall e_1, e_2 \in \mathbf{PP}_r, \forall r \in R, \forall s \in S \quad (5)$$

$$PP_{e,s}^r = PP_{e,s+1}^r, \forall e \in E, \forall r \in R, \forall s \in \mathbf{PS}_r \quad (6)$$

其中, SFS_r 代表 r 占用频隙数, \mathbf{WP}_r 和 \mathbf{PP}_r 代表 r 的工作路径链路集合和保护路径链路集合。 $WP_{e,s}^r$ 代表 \mathbf{WP}_r 中链路 e 上频隙 s 是否被占用, 1 代表占用, 0 代表空闲; $PP_{e',s}^r$ 代表 \mathbf{PP}_r 中链路 e' 上频隙 s 是否被占用, 1 代表占用, 0 代表空闲; $SP_{e',s}^r$ 代表 \mathbf{PP}_r 中链路 e' 上频隙 s 是否为共享频隙, 1 代表是, 0 代表否。 WP_e^r 和 PP_e^r 代表链路 e 是否属于 r 的工作路径和保护路径, 1 代表是, 0 代表否。式(2)表示 r_i 和 r_j 的保护路径满足共享条件。 \mathbf{WS}_r 和 \mathbf{PS}_r 分别表示 r 的工作频隙集合和保护频隙集合。式(3), 式(4), 式(5)和式(6)分别保证了工作路径和保护路径的频谱一致性和连续性约束。

2.1.2 多路径约束条件 针对生存性多路径保护策略, 优化目标如式(7)所示, 约束条件还需满足条件式(8)和式(9)。

$$\min MFS_r = \min \sum_{k=1}^u (N_r^k + 1) |\mathbf{WP}_r^k| \quad (7)$$

$$\sum_{k=1}^u N_r^k \geq N_r \quad (8)$$

$$\sum_{k=1}^u N_r^k - N_r^{\max} \geq qN_r \quad (9)$$

其中, MFS_r 代表 r 使用多路径策略所用频隙数, $|\mathbf{WP}_r^k|$ 表示 r 第 k 条路径的跳数, N_r^k 表示 r 的第 k 条路径频隙数, u 表示多路径的条数, N_r^{\max} 表示在 u 条路径上分配的最大频隙数目。式(8)保证了 r 的 u 条路径频谱数和不少于 N_r 。式(9)保证业务 r 的任

意 $u - 1$ 条路径分配频隙总和均可以满足保护带宽需求条件。

2.2 举例说明

网络中有业务 $r_1(A, D, 40)$, $r_2(A, B, 100)$, $r_3(E, D, 400)$, 所需带宽大小分别为 3, 4, 7, 保护带宽 $N_{GB} = 1$ 。若使用多路径传输时, 保护带宽需求 $q = 0.4$ 。当前网络频谱资源使用情形如图 1(b)所示。其中, 3 个业务采用的传输方式及其相应的网络资源(频谱资源, 路径资源)分配情况如表 1 所示。

因为 r_1 的工作路径 A-C-D 和 r_2 的工作路径 A-B 链路不相交, 故对应的保护路径满足共享带宽的条件。如图 1(a)所示, 业务 r_1 保护路径 A-E-D 和 r_2 保护路径 A-E-B 有相同链路 A-E, 并且 r_1 已占用保护频隙 $index \in [5, 7]$ 。若链路 D-E 的 $index \in [5, 7]$ 空闲, 则 r_2 在 E-B 上的保护频隙分配在已有的 $index \in [5, 7]$, 实现与 r_1 保护频隙的共享。因为 r_3 无法采用单路径传输, 则使用两条路径对其进行传输。每条路径上分配频隙数目为 $N_{r_3}^1 = 3$, $N_{r_3}^2 = 3$, 满足约束条件式(8)和式(9)。

文献[12]证明了生存性 RSA 问题是 NP 难问题。虽然 ILP 模型可以解决该问题, 但 ILP 模型算法复杂度太高, 故不适用于大型网络。因此本文提出了一种启发式算法可以有效地解决生存性多路径 RSA 问题。

3 M-SDSAA 算法

本文提出一种频谱可用性和保护带宽共享度感知的生存性多路径算法(survivable Multipath strategy based on Sharing Degree of protection

bandwidth and Spectrum Availability-Aware, M-SDSAA)。首先通过区分动态业务的持续时间, 优化工作路径频谱分配策略, 减少频谱碎片的产生。然后针对不同大小的共享频谱块设定不同的链路权重值, 优化链路代价函数, 实现保护路径的频谱分配。如果上述单路径路由或频谱分配失败, M-SDSAA 算法进行自适应多路径频谱分配策略。同时, 在多路径中引入共享保护机制, 最大化保护带宽共享度, 提高频谱资源利用率。当业务发生阻塞时, M-SDSAA 算法将保护路径分配在次优路径上的业务重配置到最优路径上, 提高频谱利用率。M-SDSAA 算法的总流程如表 2 所示。

M-SDSAA 算法主要由 S-PSDSF(Single path shared path Protection based on Sharing Degree of protection bandwidth and Spectrum Fragmentation-aware) 算法和 ASPSA(Adaptive Shared Protection based on Spectrum-Aware)算法两部分组成。假设仿真业务数为 N , 则 M-SDSAA 时间复杂度表示为 $O(N |V|^2 |S|^4 + M |V|^2 K^u \cdot |S|^{u+2})$ 。其中, $|V|$ 代表网络节点数, $|S|$ 为链路频隙数, M 是使用多路径传输的业务数, u 为多路径的条数。

3.1 S-PSDSF 算法

为了提高保护带宽的共享度和频谱利用率, 本文提出保护带宽共享度与频谱碎片感知的单路径共享路径保护(S-PSDSF)算法。首先通过区分业务的持续时间, 优化工作路径频谱分配策略。假设业务持续时间服从参数为 μ 的负指数分布, 若业务的持续时间大于 μ , 采用 FF 算法; 反之, 采用 LF 算法,

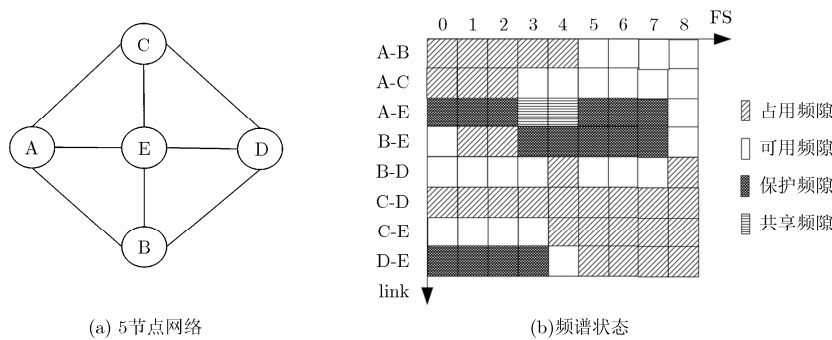


图 1 路由频谱分配示意图

表 1 网络资源分配表

| 业务 | 工作路径 | 保护路径 | 保护频隙 | 共享频隙 | 共享业务 |
|------------------|-------|-------|---------------|------|------------------|
| $r_1(A, D, 40)$ | A-C-D | A-E-D | 1, 2, 3, 4 | 3, 4 | $r_2(A, B, 100)$ |
| $r_2(A, B, 100)$ | A-B | A-E-B | 3, 4, 5, 6, 7 | 3, 4 | $r_1(A, D, 40)$ |
| $r_3(E, D, 400)$ | E-D | | 5, 6, 7, 8 | 无 | 无 |
| | E-C-D | | 4, 5, 6, 7, 8 | 无 | 无 |

表 2 M-SDSAA 算法

| |
|---|
| 输入: 网络拓扑 G , 业务数目 N , 变量 $i = 0$; 在传业务表 T_{req} , 阻塞业务表 B_{req} , 重配置业务链表 R_{req} 。 |
| 输出: 阻塞业务表 R_{req} 。 |
| 步骤 1 业务 $r_i(s_i, d_i, TR_i)$ 到达, $i = i + 1$ 。更新网络资源, 释放离开业务所占资源, 并将 r_i 从 T_{req} 和 B_{req} 中清除。若 $i > N$, 算法结束; 否则, 执行步骤 2; |
| 步骤 2 调用 3.1 节 S-PSDSF 算法。首先通过 Dijkstra 算法计算前 K 条最短路径作为工作路径, 根据业务持续时间, 采用 FF 算法或 LF 算法进行工作路径频谱分配, 记录工作路径链路集合 WP_{r_i} 。然后更新网络拓扑, 设置 WP_{r_i} 中链路的权重为无穷大。根据式(11)与式(13)计算保护链路权重值, 通过 Dijkstra 算法计算前 $K-1$ 条保护路径, 实现保护路径的频谱分配。最后记录 r_i 的路由频谱分配状态; |
| 步骤 3 判断步骤 2 中 S-PSDSF 算法是否成功。若是, 执行步骤 4; 否则, 不使用 S-PSDSF 算法中的保护路径重配置机制, 调用多路径频谱分配策略, 执行步骤 5; |
| 步骤 4 首先将 r_i 保存进表 T_{req} 中, 并判断 r_i 所分配的保护路径是否是 Dijkstra 算法计算出的消耗频谱资源最少路径。若是, 执行步骤 1; 否则, 保存 r_i 到表 R_{req} 中, 执行步骤 1; |
| 步骤 5 调用 3.2 节 ASPSA 算法。首先通过比较各种多路径方式所需频隙数, 选择消耗频隙数目最少策略。然后在多路径中引入共享机制, 提高频谱资源利用率。最后, 记录业务 r_i 的多路径路由由频谱分配状态; |
| 步骤 6 判断步骤 5 中操作是否成功。若是, 保存 r_i 到 R_{req} 中, 执行步骤 1; 否则, 记录 r_i 阻塞, 保存 r_i 到 B_{req} 表, 调用 3.1 节中保护路径重配置机制, 执行步骤 1。 |

从而克服传统 FF 算法缺陷, 减少频谱碎片的产生。然后, 区分共享频谱块大小, 调整保护路径链路代价函数, 优化保护路径频谱分配策略。最后, 当网络中业务阻塞时, 重配置已分配的保护路径频谱资源, 提高保护带宽共享度, 降低带宽阻塞率。

设业务 $r(s, d, TR)$, 工作路径记为 W_r , 保护路径记为 P_r , 保护路径的跳数记为 h_r^p 。业务 r 所需频隙数目为 N_r , 保护路径 P_r 上可共享保护带宽数目为 sn_r^p , 空闲保护频隙记为 n_r^p 。单路径共享路径保护算法的优化目标即最小化每个业务占用的保护带宽资源, 记为 PFS_r , 如式(10)所示。

$$\min PFS_r = \min(h_r^p N_r - sn_r^p + h_r^p N_{GB}) \quad (10)$$

其中, $h_r^p N_{GB}$ 代表保护路径所需要的保护带宽资源总数, S-PSDSF 算法的流程如表 3 所示。

S-PSDSF 算法包括 K 条最短路径的计算, 工作/保护路径频谱分配过程和保护带宽重配置机制。时间复杂度分别是 $O(|V|^2)$, $O(|S|^2)$ 和 $O(|S|^2)$ 。因此 S-PSDSF 算法的时间复杂度为 $O(|S|^4 |V|^2)$ 。

3.1.1 基于保护带宽共享度感知的单路径共享保护算法 本文在传统共享保护算法之上, 通过设计两

表 3 S-PSDSF 算法

| |
|--|
| 步骤 1 调用 Dijkstra 算法为业务 $r_i(s_i, d_i, TR_i)$ 计算 K 条最短路径, 作为工作路径候选路径集。 |
| 步骤 2 业务持续时间服从参数为 μ 的负指数分布。若 r_i 持续时间大于 μ , 采用 FF; 反之, 采用 LF, 实现 r_i 工作路径的频谱分配。若分配成功, 记录链路集合 WP_{r_i} , 执行步骤 3; 否则, 业务阻塞, 执行步骤 7。 |
| 步骤 3 更新网络拓扑, 设置 WP_{r_i} 中链路的权重值为无穷大。 |
| 步骤 4 调用式(11), 式(13)和 Dijkstra 算法为 r_i 计算 $K-1$ 条保护路径选路径集。 |
| 步骤 5 在 $K-1$ 条最短保护路径中使用 FF 算法分配保护带宽。若分配成功, 记录保护路径 P_{r_i} , 链路集合为 PP_{r_i} , 执行步骤 6; 否则, 标记 r_i 阻塞, 保存 r_i 到表 B_{req} , 算法结束。 |
| 步骤 6 判断业务所分配的保护路径是否是 Dijkstra 算法计算出的消耗频谱资源最少的路径。若是, 保存业务到表 T_{req} ; 否则保存业务到表 R_{req} 和 T_{req} 中。 |
| 步骤 7 调用保护路径重配置机制, 从链表头开始, 依次重配置业务链表 R_{req} 中的业务。 |

种策略来提高频谱利用率: (1)区分共享频谱块大小, 优化保护链路代价函数, 提高保护带宽的共享度; (2)重配置保护路径频谱资源, 提高带宽共享度和频谱利用率。

(1)优化链路代价函数提高保护带宽共享度:

若链路 e 中共享频谱块集合 $\mathbf{Gap} = \{\text{gap}_1, \text{gap}_2, \dots, \text{gap}_n\}$, 其中 n 代表频谱块数目。传统共享路径保护算法的链路权重值函数设定如式(12)和式(13)。

$$C_e = \begin{cases} \frac{1}{\sum_{k=0}^n g_k}, & e \in \mathbf{WP}_r \\ \infty, & e \notin \mathbf{WP}_r \end{cases} \quad (11)$$

$$g_k = \begin{cases} 1, & \text{size}_k \leq f \\ \text{size}_k, & \text{size}_k > f \end{cases} \quad (12)$$

式中, C_e 表示链路 e 的链路代价值, g_k 代表 \mathbf{Gap} 中第 k 个频谱块所占权重, size_k 表示 \mathbf{Gap} 中第 k 个频谱块的大小, 其中 f 为 1。传统保护链路代价函数导致相同的代价函数值对应的频谱状态不同, 降低频谱利用率。因此本文通过区分共享频谱块大小, 优化链路代价函数, 提高保护带宽共享度, 调整 g_k 的计算方式。

$$g_k = \begin{cases} 1, & \text{size}_k \leq f \\ 2\text{size}_k, & \text{size}_k > f \end{cases} \quad (13)$$

(2)重配置保护带宽提高频谱资源利用率: 随着业务的建立与释放, 保护路径频谱分配存在以下情况: (a)最优路径无法满足频谱连续性和一致性,

而选择次优路径；(b)业务的保护带宽共享度会降低。因为保护路径不传输业务，本文采用保护带宽重配置策略，当业务发生阻塞时进行重配置。首先判断 r 是否存在较优的保护路径，若存在，调整保护路径 P_r ；若没有，判断当前路径上是否可以改变频谱分配范围，减少现有的 n_r^p ，若是，改变保护路径频谱分配范围。

3.1.2 基于频谱感知的时间区分持续时间工作路径频谱分配算法 在动态网络环境中，由于业务大小不一，持续时间不同，且随着业务动态到达与离去，传统的工作路径频谱分配 FF 算法会产生不同程度的频谱碎片。本文设计一种工作路径频谱分配策略，根据业务持续时间的不同，采用不同的频谱分配策略。设业务的持续时间服从参数为 μ 的负指数分布，仿真业务 r 持续时间记为 DT_r 。若 $DT_r > \mu$ ，则采用 FF 算法；若 $DT_r \leq \mu$ ，则采用 LF 算法。

3.2 ASPSA 算法

设业务 $r(s, d, TR)$ ，所需频谱数为 N_r ，保护带宽需求为 q ，保护带宽为 qN_r 。不同的多路径频谱分配策略消耗的总频隙数不同。本文设计一种基于频谱感知的自适应共享保护(ASPSA)策略。通过比较每种频谱分配方式所消耗频隙数，自适应地选择频隙数目消耗最少的多路径传输。由于该算法在生存性多路径中引入共享保护机制，提高了保护带宽共享度，减少空闲频谱资源消耗，提高频谱利用率。ASPSA 算法流程如表 4 所示。

ASPSA 算法包括 K 条边分离路径的计算，多路径 RSA 和重配置机制。时间复杂度分别是 $O(|V|^2)$ ， $O(|S|^u K^u)$ 和 $O(|S|^2)$ 。因此 ASPSA 算法的复杂度为 $O(|V|^2 K^u |S|^{u+2})$ 。

3.2.1 基于频谱感知的自适应多路径策略 生存性多路径保护策略一般采用均等分配策略，且多路径数目 u 一般不超过 4。如 2.1 节中所示，优化目标为

表 4 ASPSA 算法

| | |
|------|---|
| 步骤 1 | 调用 Dijkstra 算法为业务 $r_i(s_i, d_i, TR_i)$ 计算 K 条链路不相交路径，保证多路径之间链路不相交。 |
| 步骤 2 | 分别设定多路径条数 $u = 2, 3, 4$ 。如表 2 所示，计算每种情形所消耗的频隙数，自适应求解最小频隙数 MFS_r 以及对应的路径条数。若不同 u 值对应的 MFS_r 相同，那么取 $u = 4$ 传输，保证网络的负载均衡。 |
| 步骤 3 | 若步骤 2 操作成功，保存 r_i 到表 T_{req} ，执行步骤 4；否则标记 r_i 阻塞，保存 r_i 到表 B_{req} ，执行步骤 5。 |
| 步骤 4 | 根据业务传输所需频隙数 N_r 和占用频隙数 MFS_r ，标记 $MFS_r - N_r$ 频隙数为可共享保护带宽。 |
| 步骤 5 | 调用保护路径重配置机制，从链表头开始，依次重配置业务链表 R_{req} 中的业务。 |

$\min MFS_r$ ，计算 $\min MFS_r$ 对应的 u 值。具体自适应多路径策略如表 5 所示。

表 5 自适应多路径分配策略

| | 2 | 3 | 4 | 选择 |
|------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 情形 1 | MFS_r^{12} | MFS_r^{13} | MFS_r^{14} | MFS_r^{12} |
| 情形 2 | MFS_r^{22} | MFS_r^{23} | MFS_r^{24} | MFS_r^{23} |
| 情形 3 | MFS_r^{32} | MFS_r^{33} | MFS_r^{34} | MFS_r^{34} |
| 情形 4 | MFS_r^{42} | MFS_r^{43} | MFS_r^{44} | MFS_r^{44} |

其中， MFS_r^{iu} 表示 r 在情形 i 中采用 u 条路径传输消耗总频隙数目。(1)若 $MFS_r^{12} = \min \{MFS_r^{12}, MFS_r^{13}, MFS_r^{14}\}$ ，则 r 采用 2 条路径；(2)若 $MFS_r^{23} = \min \{MFS_r^{22}, MFS_r^{23}, MFS_r^{24}\}$ ，则 r 采用 3 条路径传输；(3)若 $MFS_r^{34} = \min \{MFS_r^{32}, MFS_r^{33}, MFS_r^{34}\}$ 或 $MFS_r^{42} = MFS_r^{43} = MFS_r^{44}$ ，则 r 采用 4 条路径。

3.2.2 基于共享保护的生存性多路径策略 当多路径传输的保护带宽需求 q 较大时，部分路径上会有空闲频隙，因此本文设计一种基于共享保护的生存性多路径算法。定义变量 WN_r^i 为 r 在第 i 条路径上工作频隙数目， MSN_r 表示 r 可提供的共享带宽数目，则 $MSN_r = MFS_r - \sum_{i=1}^u WN_r^i |WP_r^i|$ 。其中，不同于 S-PSDSF 算法，ASPSA 算法不用保护带宽重配置机制。

4 算法仿真结果分析

本文所提 M-SDSAA 算法分别在 TOPO-15 和 NSFNET 网络中仿真验证。为了验证单路径阶段的频谱分配策略与保护带宽重配置机制，本文仿真 S-PSDSF 算法。每条链路有 358 个频隙，频隙的大小为 12.5 GHz。业务到达率服从参数为 λ 的泊松分布，持续时间服从参数为 1 的负指数分布。业务源/目的节点随机产生，业务速率分别是 40 Gb/s, 100 Gb/s, 400 Gb/s, 1000 Gb/s，仿真业务数目为 10^6 个。多路径业务的保护带宽需求 q 在 0.5, 0.75, 1 中随机产生。调制等级为 DP-QPSK^[13]，频谱数分别为 3, 4, 7, 16。对比算法为 SPP-SWP-SS^[9]，MPP-heuristic^[11]。仿真指标是网络带宽阻塞率，频谱利用率和多路径传输消耗频隙数。

图 2 和图 3 仿真了 4 种算法在两种网络中的带宽阻塞率。因为 NSFNET 中的节点度数小于 TOPO-15，故相同负载下 NSFNET 的带宽阻塞率最高。单路径 RSA 算法比多路径 RSA 算法的阻塞率更高，因为负载的增加，多路径 RSA 算法采用多路径传输。S-PSDSF 的阻塞率优于 SPP-SWP-SS

算法, 因为 S-PSDSF 算法通过优化链路代价函数和频谱分配方式, 并采用重配置机制提高频谱利用率。M-SDSAA 算法的阻塞率低于 MPP-heuristic 算法, 是由于 M-SDSAA 算法选取消耗频隙数少策略, 并引入共享机制, 降低了带宽阻塞率。

图 4 和图 5 仿真 4 种算法在两种网络中的频谱利用率。多路径 RSA 算法比单路径 RSA 算法频谱利用率高。S-PSDSF 算法在 SPP-SWP-SS 算法基础上, 通过优化链路代价函数和频谱分配方式, 提高了频谱资源利用率, 并且 S-PSDSF 算法中采用的重配置机制可以减少频隙的消耗。M-SDSAA 算法的频谱利用率高于 MPP-heuristic 算法, 因为 M-SDSAA 算法采取消耗总频隙数少的多路径策略, 并在频谱分配过程中引入共享保护机制, 提高了网络的频谱利用率。

图 6, 图 7 为 2 种多路径算法的多路径业务传输所消耗的频隙总数。相同负载下, NSFNET 的多路径消耗频隙数最多。因为 NSFNET 的节点度数低, 降低了单路径传输的概率, 增加了业务多路径

传输概率。其中, M-SDSAA 算法比 MPP-heuristic 算法消耗更少的保护频隙数, 因为 M-SDSAA 算法通过比较每种多路径频谱分配方式所消耗频隙数目, 采用自适应多路径频谱分配方式, 最小化多路径策略所消耗频隙数目。

5 结束语

本文研究了弹性光网络中生存性多路径 RSA 问题, 提出的 M-SDSAA 算法可有效地解决动态业务生存性多路径 RSA 问题。首先, M-SDSAA 算法通过区分业务持续时间与保护频谱块大小, 分别优化工作路径频谱分配方式与保护路径链路代价函数, 从而提高保护带宽共享度和频谱利用率; 然后, M-SDSAA 算法提出的自适应多路径频谱分配, 减少所消耗频谱资源; 最后, M-SDSAA 算法的保护带宽重配置机制进一步减少传输所需频谱资源。随着万物互联数据应用的发展, 本文的研究结论对保障数据可靠和有效传输性能同时降低频谱冗余配置的保护代价和提高频谱带宽的利用率具有重要意义。

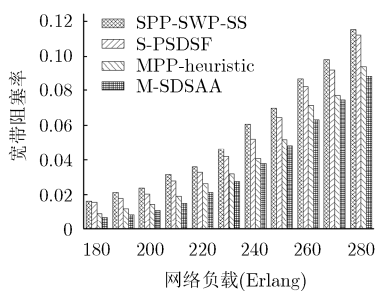


图 2 TOPO-15 中带宽阻塞率比较

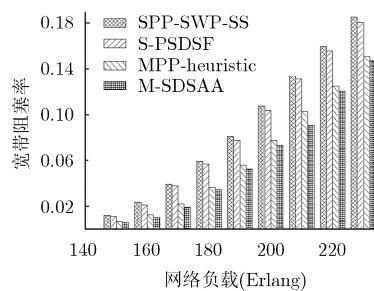


图 3 NSFNET 中带宽阻塞率比较

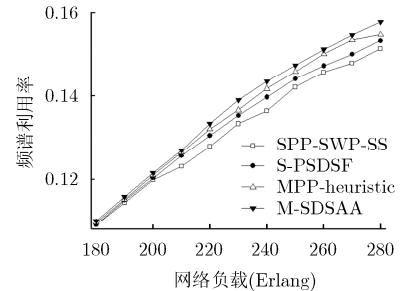


图 4 TOPO-15 中频谱利用率比较

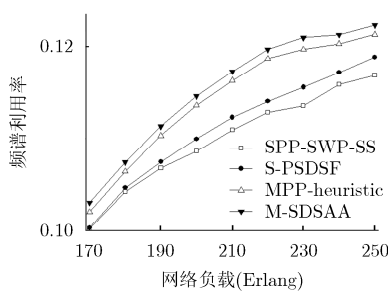


图 5 NSFNET 中频谱利用率比较

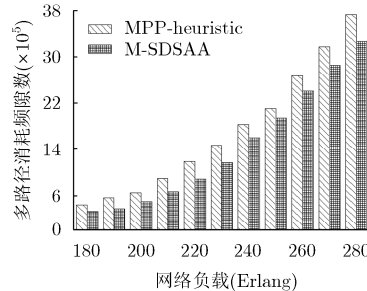


图 6 TOPO-15 中多路径消耗频隙数

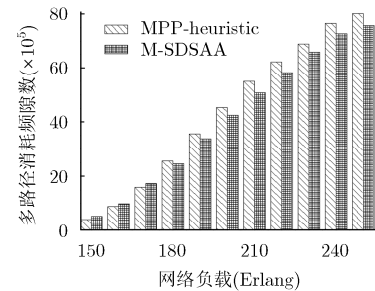


图 7 NSFNET 中多路径消耗频隙数

参考文献

- [1] 刘焕淋, 李瑞艳, 孔德谦, 等. 基于多目标遗传算法优化弹性光网络的多路径保护机制[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(9): 2261-2267. doi: 10.11999/JEIT151384.
LIU Huanlin, LI Ruiyan, KONG Deqian, et al. Optimization survivable multipath provisioning based on NSGA-II

algorithm for elastic optical networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(9): 2261-2267. doi: 10.11999/JEIT151384.

- [2] 刘焕淋, 方强, 雷芳. WDM 光网络中多播业务量疏导方法分析[J]. 重庆邮电大学学报自然科学版, 2012, 24(3): 269-277. doi: 10.3979/j.issn.1673-825X.2012.03.001.

LIU Huanlin, FANG Qiang, and LEI Fang. Research on the

- dynamic multicast traffic grooming in WDM optical networks [J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications*, 2012, 24(3): 269–277. doi: 10.3979/j.issn.1673-825X.2012.03.001.
- [3] ZHOU Hui, MAO Shiwen, and AGRAWAL P. Optical power allocation for adaptive transmissions in wavelength-division multiplexing free space optical networks[J]. *Digital Communications and Networks*, 2015, 1(3): 171–180. doi: 10.1016/j.dcan.2015.09.001.
- [4] LIU Menglin, TORNATORE M, and MUKHERJEE B. Survivable traffic grooming in elastic optical networks-shared protection[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(31): 903–909. doi: 10.1109/JLT.2012.2231663.
- [5] HUANG I and LI B. A genetic algorithm using priority-based encoding for routing and spectrum assignment in elastic optical network[C]. IEEE International Intelligent Computation Technology and Automation Conference, Changsha, China, 2014: 5–11. doi: 10.1109/ICICTA.2014.9.
- [6] TALEBI S, KATIB I, and ROUSKAS G N. Distance-adaptive routing and spectrum assignment in rings[J]. *IET Networks*, 2016, 5(3): 64–70. doi: 10.1049/iet-net.2015.0085.
- [7] ZHANG Jie, LÜ Chunhui, ZHAO Yongli, *et al.* A novel shared-path protection algorithm with correlated risk against multiple failures in flexible bandwidth optical networks[J]. *Optical Fiber Technology*, 2012, 18(6): 532–540. doi: 10.1016/j.yofte.2012.09.002.
- [8] ASSIS K D R, Peng S, ALMEIDA R C, *et al.* Network virtualization over elastic optical networks with different protection schemes[J]. *Journal of Optical Communications & Networking*, 2016, 8(4): 272–281. doi: 10.1364/JOCN.8.000272.
- [9] WANG Chao, SHEN Gangxiang, and 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. doi: 10.1109/JLT.2015.2421506.
- [10] CHEN Bowen, ZHANG Jie, ZHAO Yongli, *et al.* Spectrum-block consumption for shared-path protection with joint failure probability in flexible bandwidth optical networks[J]. *Optical Switching & Networking*, 2014, 13(4): 49–62. doi: 10.1016/j.osn.2014.01.001.
- [11] LU Ruan and NAN Xiao. Survivable multipath routing and spectrum allocation in OFDM-based flexible optical networks [J]. *Journal of Optical Communications & Networking*, 2013, 6(1): 77–85. doi: 10.1364/JOCN.6.000077.
- [12] CHRISTODOULOUPOULOS K. Elastic bandwidth allocation in flexible OFDM-based optical networks[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, 29(9): 1354–1366. doi: 10.1007/978-3-642-30376-0_36.
- [13] SCARAFICCI R A and DA FONSECA N L S. Alternative routing and zone-based spectrum assignment algorithm for flexgrid optical networks[C]. IEEE International Conference on Communications (ICC), Sydney, Australia, 2014: 3295–3300. doi: 10.1109/ICC.2014.6883829.
- 刘焕淋: 女, 1970 年生, 教授, 研究方向为光通信技术与未来网络。
- 张明佳: 男, 1992 年生, 硕士生, 研究方向为光网络生存性。
- 陈 勇: 男, 1963 年生, 教授, 研究方向为光通信技术、传感检测与自动化技术。
- 王 欣: 女, 1991 年生, 硕士生, 研究方向为光网络生存性。