

频谱灵活光网络的故障概率与光纤链路负载均衡联合优化方法

陈博文¹, 符小东², 雷雨¹

(1. 苏州大学电子信息学院, 江苏 苏州 215006; 2. 中天科技研究院, 江苏 南通 226000)

摘 要: 在频谱灵活光网络中, 为了解决网络故障概率与光纤链路负载均衡问题, 建立了故障概率与光纤链路负载均衡联合计算与评估模型, 提出了故障概率与光纤链路负载均衡联合优化方法。仿真结果表明, 与传统方法相比, 当不考虑保护带宽时, 所提故障概率与光纤链路负载均衡联合优化方法降低了 69.8% 网络阻塞率, 减少了 45.3% 频谱资源占用率, 减少了 41.9% 平均故障概率, 实现了频谱灵活光网络的故障概率与光纤链路负载均衡联合优化方法。

关键词: 频谱灵活光网络; 故障概率; 光纤链路负载均衡; 联合优化

中图分类号: TN913.7

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2019178

Joint optimization method of failure probability and fiber-link load balancing in flexible bandwidth optical network

CHEN Bowen¹, FU Xiaodong², LEI Yu¹

1. School of Electronic and Information Engineering, Soochow University, Suzhou 215006, China

2. Zhongtian Broadband Technology, Nantong 226000, China

Abstract: In order to gain insight into the relationship between the failure probability and the spectrum efficiency, both failure probability (FP) and load balancing (LB) were attempted to minimize in flexible bandwidth optical networks. An optimized FP-LB algorithm was developed to reduce failure probability and to improve the spectrum efficiency, and a traditional algorithm was further introduced for comparison in flexible bandwidth optical networks. Simulation results show that the optimized FP-LB algorithm reduces 69.8% blocking probability, 45.3% spectrum occupancy rate, and 41.9% average failure probability compared to the traditional algorithm. Obviously, the optimized FP-LB algorithm achieves the joint optimization of both failure probability and load balancing.

Key words: flexible bandwidth optical network, failure probability, fiber-link load balancing, joint optimization

1 引言

在互联网、超高清视频、移动网络、物联网、数据中心、云计算、大数据、人工智能等应用服务需求下, 网络带宽需求出现了巨大的增长态势, 正推动着网络向着规模化和资源开放性方向发展。目前, 全球 95% 以上的信息量都是通过光通信网络传

送, 使光网络带宽需求呈现出指数级增长趋势, 造成光通信网络的规模不断增大, 加剧网络带宽业务调度与网络资源管理的难度, 给光网络复杂化与网络运营带来困难, 导致光网络资源效率低下和光网络发生故障概率增大。

传统波分复用光网络的通道间隔、传输速率、业务粒度等都保持不变, 容易造成网络带宽资源

收稿日期: 2019-02-26; 修回日期: 2019-05-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61701332); 江苏省自然科学基金资助项目 (No.BK20160326); 江苏省高校自然科学基金资助项目 (No.16KJB510041)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61701332), The Natural Science Foundation of Jiangsu Province (No.BK20160326), University Science Research Project of Jiangsu Province (No.16KJB510041)

浪费严重, 严重影响了光网络的传输效率。然而, 频谱灵活光网络^[1-3]可以根据连接请求的带宽粒度大小, 利用不同的线速率和调制格式分配网络的频谱资源, 以满足连接请求所需要的带宽需求, 是解决光网络带宽浪费的有效手段之一。同时, 由于频谱灵活光网络的大规模建立, 网络发生故障潜在的风险及网络资源效率将受到极大威胁。一方面, 在连接请求建立工作路径的过程中需要考虑工作路径的故障概率评估机制, 尽可能地选择发生故障概率比较小的路径作为传输业务的工作路径; 另一方面, 由于某些区域在某一时刻对带宽速率需求极大, 会造成频谱灵活光网络的某些光纤链路的负载比较重, 无法满足这一区域的连接请求, 使连接请求建立失败。因此, 研究频谱灵活光网络的故障概率与光纤链路负载均衡联合优化, 有利于在频谱灵活光网络的故障概率和频谱资源效率方面得到更好的均衡与优化。下面, 将从以下两方面论述频谱灵活光网络的故障概率和光纤链路负载均衡的研究情况。

在频谱灵活光网络的故障概率研究方面, 文献[4]根据网络的每一条链路发生故障事件都是独立出现的属性, 建立了计算工作路径的故障概率模型, 提出了基于故障概率的分化路由方法, 解决了网络故障概率最小问题。在光网络中, 文献[5]针对 2 条链路不相交的工作路径和保护路径的故障概率问题, 建立了 2 条链路不相交的最可靠路由模型, 提出了减少故障概率的最优化方法。针对光网络多故障问题, 文献[6]提出了基于多故障概率模型, 解决了网络的生存性问题。在频谱灵活光网络中, 针对连接请求工作路径必须满足最大可容忍故障概率的需求, 文献[7]提出了一种整数线性规划模型、重标度故障概率认知算法和重标度故障概率感知算法, 通过提出的整数线性规划模型和优化算法能够有效解决最小频谱资源消耗与最小故障概率之间的制约关系。针对频谱灵活光网络的专用保护问题, 文献[8]提出了生存性感知的联合故障概率方法, 提高了频谱灵活光网络的频谱资源效率, 降低了工作路径和专用保护路径的故障概率问题。在频谱灵活光网络中, 为了解决网络资源共享保护技术问题, 文献[9-10]建立了最小频谱资源消耗和降低工作路径和保护路径的联合故障概率模型, 提出了一种小空闲频谱块消耗算法和频谱最优化整数线性

规划模型, 同时引入传统共享频谱算法, 解决了频谱消耗最小化和平均联合故障概率最小之间的制约关系。

在光网络的光纤链路负载均衡方面, 为了提高光网络资源效率, 通常采用动态负载均衡方法减少网络的阻塞率, 给予网络中较轻负载的光纤链路优先选择权限, 即光纤链路占用频谱间隙数量越少, 光纤链路越可能被优先选择, 防止一条路径中的某些光纤链路的频谱资源过度消耗, 出现光纤负载不均衡现象。针对频谱灵活光网络的多链路故障问题, 文献[11]提出了基于动态负载均衡的多链路故障恢复方法, 提高了频谱灵活光网络的频谱资源效率和故障业务的恢复率。为了实现光网络的优化资源配置, 文献[12]研究了基于故障概率的可生存性网络负载均衡问题, 提出了基于不同业务流量的网络可靠模型, 实现了高的网络资源效率。根据联合网络拓扑与网络负载均衡的特性, 文献[13-14]研究了网络的流量优化与基于波长交换的负载均衡优化问题, 提高了网络的波长资源效率。文献[15]针对光网络的生存性问题, 提出了一种网络负载均衡方法, 有效解决了网络的资源效率问题。

在上述文献中, 一方面, 传统工作路径计算方法并没有考虑所计算工作路径发生故障的可能性, 也没有对工作路径的故障概率进行评估, 只是计算最小权重的路径作为工作路径; 另一方面, 在传统工作路径的计算过程中, 既没有考虑频谱灵活光网络的负载均衡属性, 也没有对每一条光纤链路负载的大小进行评估, 更没有评估所选择工作路径中的每一条光纤负载均衡情况。

在本文中, 为了建立连接请求, 一方面, 为保证连接请求的服务质量, 以频谱灵活光网络的光纤链路发生故障概率为基础, 引入连接请求的工作路径故障概率评估机制, 以便减少连接请求在工作路径发生故障的概率; 另一方面, 为了避免频谱灵活光网络的某些光纤链路因频谱资源过度消耗而使光纤链路没有可用频谱资源, 使光纤链路占用的频谱资源呈现不均衡特性, 通过引入网络链路中负载均衡的方法, 解决网络中资源利用的问题。因此, 本文将结合连接请求工作路径的故障概率与光纤链路的负载占用情况, 提出了故障概率和光纤链路负载均衡联合优化方法, 使故障概率和光纤链路负载均衡联合优化数值最

小, 从而解决频谱灵活光网络的故障概率与频谱资源效率最优化问题。

2 网络模型和问题描述方法

2.1 网络模型

在频谱灵活光网络 $G(V, E, F)$ 中, 其中 $V = \{v_1, v_2, v_3, \dots, v_{|V|}\}$ 表示一组光交换节点, $E = \{e_1, e_2, e_3, \dots, e_{|E|}\}$ 表示一组光纤链路, $F = \{f_1, f_2, f_3, \dots, f_{|F|}\}$ 是可用频谱间隙的集合, 其中, $|V|$ 、 $|E|$ 、 $|F|$ 分别表示频谱灵活光网络中光交换节点的总数、光纤链路的总数、频谱间隙的总数。从节点 k 到节点 l 的光纤链路用 (k, l) 表示, 其中, $k, l \in V$ 。每一条光纤链路 (k, l) 的故障概率用 $p_{(k, l)}$ 表示, 其变化范围为 $(0, 10^{-3})$ 。

每一个连接请求 $CR(s, d, FS)$, 由源节点 s 、目的节点 d 和网络带宽需求 FS 组成。对于每一个连接请求, 在分配频谱资源时, 需要考虑不同连接请求之间的保护带宽, 以实现更好的滤波性能, 这里在同一链路上不同频谱通道之间设置 GB 个频谱间隙作为保护带宽。如果有 2 个连接请求 $CR_1(s, d, FS_1)$ 和 $CR_2(s, d, FS_2)$, 它们需要的频谱资源分别是 FS_1 和 FS_2 个频谱间隙。假设它们在相同的工作路径上传输业务, 考虑的保护带宽为 GB 个频谱间隙, 这样, 这 2 个连接请求在这条工作路径上需求的频谱间隙为 $FS_1 + GB + FS_2$ 。

2.2 问题描述

给定一个频谱灵活光网络 $G(V, E, F)$, 生成一组连接请求 $CR(s, d, FS) \in CR$, 每条链路上的频谱间隙数量, 不同连接请求之间的分配频谱资源时的保护带宽, 即 GB 个频谱间隙, 以及每条链路故障的概率。对每个连接请求 $CR(s, d, FS)$ 来说, 从源节点 s 到目的节点 d 计算 K 条工作路径, 一方面, 需要评估每一个连接请求的 K 条工作路径上故障概率和负载占用情况; 另一方面, 设置故障概率和光纤链路负载调节参数, 从这 K 条工作路径中, 找出一条故障概率与光纤链路负载均衡联合优化数值最小的路径作为这个连接请求的工作路径。根据连接请求的带宽需求, 在所选择的最优化路径上分配所需要的频谱资源, 在频谱资源分配过程中, 需要同时满足频谱一致性和频谱连续性约束条件。本文的目标是对频谱灵活光网络的故障概率与光纤链路负载均衡联合优化, 提高网络的频谱资源效率。为了实现这个目标, 本文提出了频谱灵活光网络的故障概率与光纤链路负载均衡联合优化方法, 使频谱灵活光网

络的故障概率与频谱效率最优化。

3 光纤链路故障概率和负载均衡联合计算方法

3.1 光纤链路故障概率计算方法

为了满足连接请求的故障概率需求, 当建立一条工作路径时, 需要评估这条工作路径的故障概率。假设每条链路发生故障的事件是独立的, 即每条链路的故障概率是独立的, 因此, 每条链路的生存性概率为 $1 - p_{(k, l)}$ 。可见, 一条路径的生存性概率可用所有链路的生存性概率的乘积, 即 $\prod_{(k, l) \in x} (1 - p_{(k, l)})$ 表示。因此, 一条路径 x 的故障概率可以表示为

$$F(x) = 1 - \prod_{(k, l) \in x} (1 - p_{(k, l)}) \quad (1)$$

为了降低每一个连接请求潜在的故障概率, 可以从源节点 s 到目的节点 d 找到 K 条路径, 对每一条路径进行故障概率的评估, 这样可以通过对每一个连接请求 $CR(s, d, FS)$ 的工作路径故障概率进行评估, 从中选择故障概率最小的路径作为优先选择的工作路径, 从而减少连接请求从源节点 s 到目的节点 d 之间工作路径的故障概率。

3.2 光纤链路负载均衡计算方法

在频谱灵活光网络中, 为了避免光纤链路因频谱资源消耗过多而导致光纤链路负载不均衡情况, 根据每条光纤链路的频谱资源占用状态, 动态地调整每一条光纤链路的权重, 以使连接请求尽可能地选择负载较轻的光纤链路作为传输工作路径, 即光纤链路被占用的频谱间隙数量越小, 越有优先选择的权利。这样, 空闲频谱间隙数越多的光纤链路, 越有利于连接请求 $CR(s, d, FS)$ 分配所需要的带宽需求。考虑光纤链路的频谱占用状态对连接请求 $CR(s, d, FS)$ 建立的影响, 沿着从源节点 s 到目的节点 d 之间某条工作路径 x , 需要考虑每一段光纤链路 (k, l) 的频谱间隙占用数目。在光纤链路 (k, l) 中, 利用式(2)可以计算出已经预留的频谱间隙的数目。

$$\Theta_{(k, l)} = \sum_{i=1}^{|F|} \theta_i \quad (2)$$

其中, $\Theta_{(k, l)}$ 和 $|F|$ 分别表示光纤链路 (k, l) 上的频率间隙的占用总数目和频率间隙的总数; θ_i 表示第 i 个频谱间隙 f_i 是否被占用, 如式(3)所示。

$$\theta_i = \begin{cases} 1, & f_i \text{被占用} \\ 0, & f_i \text{空闲} \end{cases} \quad (3)$$

因此, 连接请求在工作路径 x 上, 频谱占用率为

$$S(x) = \frac{\sum_{(k,l) \in x} \theta_{(k,l)}}{H |F|} \quad (4)$$

其中, H 表示工作路径上的总跳数。

3.3 光纤链路故障概率和负载均衡联合计算方法

为了更好地建立连接请求 $CR(s, d, FS)$, 一方面, 尽最大可能地减少所选择工作路径潜在的故障概率; 另一方面, 在频谱灵活光网络中, 为了使连接请求更好地找到可用的频谱资源, 需要考虑光纤链路负载占用情况, 尽最大可能地选择负载较轻的光纤链路作为其传输的链路, 给予负载较轻的光纤链路优先选择的权利, 避免因某些光纤链路频谱资源消耗过多而导致光纤链路负载不均衡。为了使频谱灵活光网络故障概率和光纤链路负载获得最优化数值, 建立频谱灵活光网络的故障概率和负载均衡联合优化方法, 通过引入故障概率和光纤链路负载均衡调节参数 ρ , 使故障概率与光纤链路负载均衡联合优化数值无量纲化, 可以通过式(5)来表示。

$$\Omega(x) = \rho F(x) + (1-\rho)S(x) \quad (5)$$

其中, $\Omega(x)$ 、 ρ 、 $F(x)$ 、 $S(x)$ 分别表示故障概率与光纤链路负载均衡联合优化数值、调节参数 ($\rho \in [0, 1]$)、工作路径 x 的故障概率、工作路径 x 的频谱占用率。故障概率与光纤链路负载均衡联合优化数值 $\Omega(x)$ 越小, 代表着频谱灵活光网络的故障概率越小和占用的频谱间隙越少, 这样有利于降低连接请求的故障概率和提高频谱资源效率。

4 故障概率和负载均衡联合优化方法

4.1 最小化故障概率和负载均衡联合计算方法

对于每一个连接请求 $CR(s, d, FS)$, 采用 K 条最短路径 (K -SP, shortest path) 计算方法, 从源节点 s 到目的节点 d 之间找出 K 条工作路径, 用集合 $KP \in \{k_1, k_2, k_3, \dots, k_K\}$ 表示这 K 条路径, 然后在这 K 条工作路径中, 找出最小故障概率与光纤链路负载均衡联合优化数值 $\Omega(x)$, 即

$$\min \Omega(x), x \in KP \quad (6)$$

其中, \min 表示对 K 条工作路径查找 $\Omega(x)$ 最小值操作。根据式 (6) 操作, 找出 $\Omega(x)$ 最小值的路径 x 作为连接请求 $CR(s, d, FS)$ 的工作路径。

4.2 步骤和流程

为了实现连接请求在频谱灵活光网络中传输较低故障概率和避免光纤链路的负载不均衡, 首先, 设置频谱灵活光网络的光纤链路故障概率, 生成一组连接请求; 其次, 为每个连接请求计算 K 条路径, 计算每条工作路径的故障概率, 评估每条工作路径的每一段光纤链路的负载情况, 并在每条工作路径上查找满足连接请求的频谱资源; 最后, 设置故障概率和光纤链路负载调节参数, 并计算 K 条路径的故障概率和光纤链路负载均衡联合优化数值, 选择最小联合优化数值的路径作为连接请求的工作路径, 并在所选择的路径中, 分配连接请求的频谱资源, 建立连接请求。

故障概率和光纤链路负载均衡联合优化方法的步骤如下。

步骤 1 频谱灵活光网络初始化。对频谱灵活光网络 $G(V, E, F)$ 进行初始化, 即给出网络连接状态、网络光交换节点数、光纤链路数、光纤链路的频谱间隙数、分配频谱资源的保护带宽 GB 、每条光纤链路的故障概率。

步骤 2 产生一组连接请求集合 CR 。每一个连接请求 $CR(s, d, FS) \in CR$, s 和 d 分别表示连接请求的源节点和目的节点, FS 表示需求的频谱间隙数。

步骤 3 工作路径的故障概率评估。对于每一个连接请求 $CR(s, d, FS)$, 在计算 K 条工作路径过程中, 为了减少连接请求工作路径潜在的故障概率, 需要对从源节点 s 到目的节点 d 之间 K 条工作路径进行故障概率的评估, 即利用式(1)计算出每一条工作路径的故障概率。

步骤 4 光纤链路负载均衡调节。为了避免某些光纤链路因频谱资源消耗过多而导致链路负载不均衡, 利用式(2)对频谱灵活光网络的每一条光纤链路进行频谱占用状态进行评估, 根据每条光纤链路的频谱资源占用状态, 动态地调整每一条光纤链路的权重, 给予负载较轻的光纤链路优先选择的权利。此外, 利用式(4)对 K 条工作路径的频谱占用率进行计算与评估, 以选择出最优的路径作为连接请求的工作路径。

步骤 5 故障概率与光纤链路负载均衡联合优化方法。为了更好地建立连接请求 $CR(s, d, FS)$ ，通过引入调节参数 ρ ，尽最大可能地减少所选择工作路径潜在的故障概率和避免因某些光纤链路频谱资源消耗过多而导致光纤链路负载不均衡，利用式(5)建立频谱灵活光网络的故障概率和光纤链路负载均衡联合优化的评估方法，这样有利于降低连接请求的故障概率和提高频谱资源效率。

步骤 6 找出最小故障概率与光纤链路负载均衡联合优化数值的工作路径。对于每一个连接请求 $CR(s, d, FS)$ ，在 K 条工作路径中，利用式(6)找出最小故障概率与光纤链路负载均衡联合优化数值 $\Omega(x)$ 的路径作为这个连接请求的工作路径。

步骤 7 建立连接请求。在所选择的工作路径中，根据连接请求 $CR(s, d, FS)$ 所需的频谱间隙数 FS ，查找满足其带宽需求的频谱资源，然后选择满足频谱连续性与频谱一致性约束条件的频谱间隙作为预留频谱资源。这样，在频谱灵活光网络中，建立连

接请求 $CR(s, d, FS)$ 。

频谱灵活光网络的故障概率和光纤链路负载均衡联合优化方法的流程如图 1 所示。

4.3 联合优化方法的复杂性分析

在频谱灵活光网络 $G(V, E, F)$ 中，故障概率和光纤链路负载均衡联合优化方法运行 K -SP 方法计算 K 条工作路径，所以它的时间复杂度是 $O(K|V|(|E| + |V|\log(|V|-1)))$ ，其中， $|V|$ 和 $|E|$ 分别表示频谱灵活光网络中光交换节点的总数和光纤链路的总数。此外，在最坏的情况下，每个连接请求 $CR(s, d, FS)$ 在查找频谱资源时，都需要从编号为 0 的频谱间隙查找到编号为 $|F|-FS$ 的频谱间隙，所以在为每一个连接请求分配频谱资源时，分配频谱资源的时间复杂度是 $O((|F|-FS)FS\log(|V|-1))$ ，其中 $|F|$ 和 FS 分别代表每条光纤链路上的频率间隙的数量和每个连接请求的带宽要求。假设每条路径上链路的数量为 $\log(|V|-1)$ 。那么在最坏情况下，故障概率和负载均衡联合优化方法的总时间复杂度为

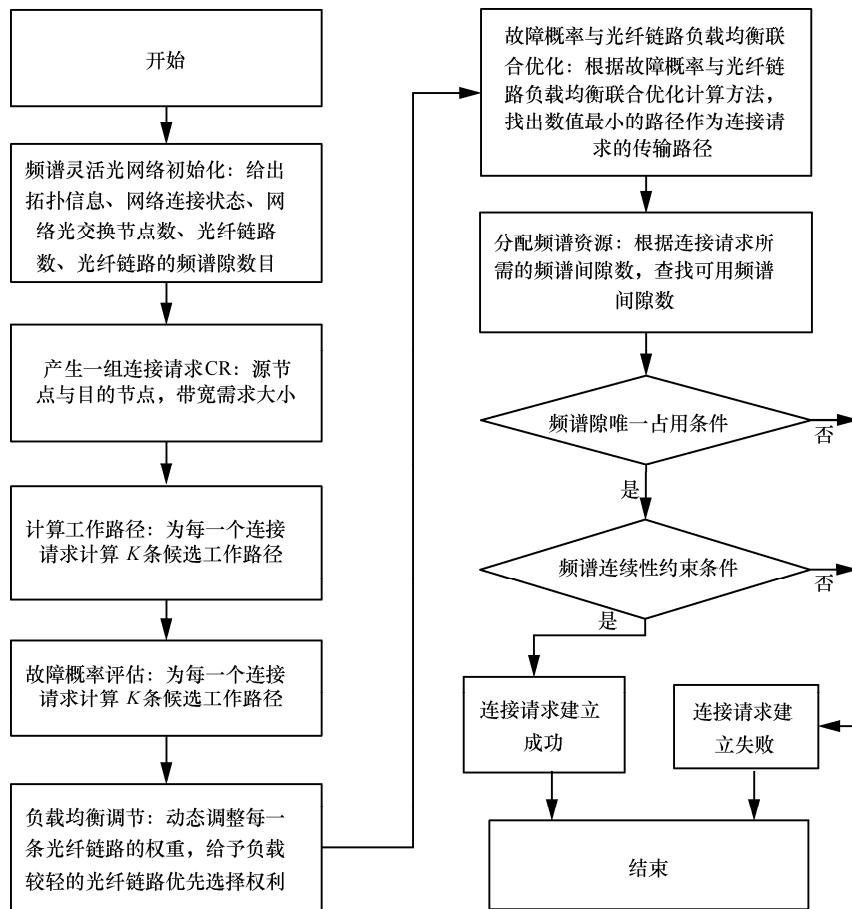


图 1 频谱灵活光网络的故障概率和负载均衡联合方法的流程

$$O(K|V|(|E|+|V|\log(|V|-1))+(|F|-FS)FS\log(|V|-1)) \tag{7}$$

4.4 基于最小化故障概率和负载均衡联合优化方法的建立连接请求过程

在频谱灵活光网络中，基于最小化故障概率和负载均衡联合优化方法建立一组连接请求，如图 2 所示，其中，每条连接线表示双向光纤链路，光纤链路的容量为 10 个频谱间隙；光纤链路上的数值(即圆圈中的数据)表示故障概率，限制在(0, 10⁻³)的范围内；生成 3 个连接请求 CR₁(0, 3, 2)、CR₂(0, 3, 3)、CR₃(0, 3, 4)，它们都是从源节点 0 到目的节点 3，带宽需求分别为 2、3、4 个频谱间隙。对于第一个连接请求 CR₁(0, 3, 2)，设置计算的路径为 K=2，从源节点 0 到目的节点 3 计算 2 条路径，即 0—1—2—3 和 0—5—4—3。根据式(1)，路径 0—1—2—3 和 0—5—4—3 的故障概率分别为 1.7×10⁻³和 2.1×10⁻³；根据式(4)计算路径 0—1—2—3 和 0—5—4—3 的频谱占用率分别为 0 和 0。设置故障概率和光纤链路负载调节参数 ρ=0.5，根据式(5)，可以计算出路径 0—1—2—3 和 0—5—4—3 的故障概率和光纤链路负载均衡联合优化数值，分别为 0.85×10⁻³和 1.05×10⁻³；根据式(6)，可以找出最小故障概率与光纤链路负载均衡联合优化数值 Ω(x)，即 Ω(0—1—2—3)=0.85×10⁻³，路径 0—1—2—3 作为连接请求 CR₁(0, 3, 2)的工作路径，并在所选择的路径 0—1—2—3 中，分配连接请求 CR₁(0, 3, 2)的带宽需求，建立了 CR₁(0, 3, 2)连接请求。

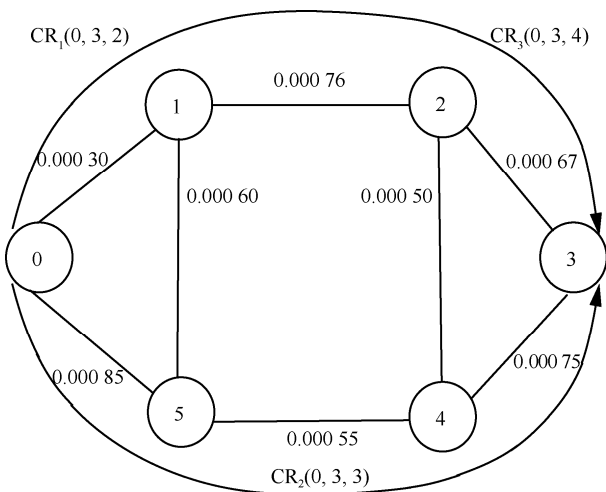


图 2 基于最小化故障概率和负载均衡联合方法的连接请求

同样，在频谱灵活光网络中，用上述同样的方法建立连接请求 CR₂(0, 3, 3)，即 CR₂(0, 3, 3)选择

路径 0—5—4—3 作为工作路径，并在这条路径上分配频谱资源；对于连接请求 CR₃(0, 3, 4)，则选择路径 0—1—2—3 作为工作路径，并在这条路径上分配频谱资源。最终，在图 2 中建立 3 个连接请求 CR₁(0, 3, 2)、CR₂(0, 3, 3)、CR₃(0, 3, 4)，使频谱灵活光网络达到故障概率和光纤链路负载均衡联合优化状态。

5 仿真与结果分析

5.1 仿真条件设置和评价指标

在频谱灵活光网络中，为了方便与本文所提故障概率与光纤链路负载均衡联合优化方法（用 PA 方法表示）比较，需要引入传统方法（用 TP 方法表示），即对于每一个连接请求，一方面，采用 K-SP 方法从源节点到目的节点计算出 K 条最短路径，但并没有对这 K 条最短路径的故障概率和负载均衡进行评估。另一方面，从这 K 条路径中查找满足每一个连接请求的频谱间隙，然后分配频谱资源，建立每一个连接请求。

采用如图 3 所示的 14 个节点 21 条边的仿真网络 NSFNET (national science foundation net) 来评估所提出的故障概率与光纤链路负载均衡联合优化方法。频谱灵活光网络中的每条光纤链路是双向的；每一个连接请求的源节点和目的节点是均匀分布的，每个连接请求的带宽需求是 2~5 个频谱间隙数。连接请求的到达时间的间隔服从到达率为 λ(s, d) 的泊松分布，连接请求的持续时间满足负指数分布 μ(s, d)，而它们的比值是业务量 (Erlang: λ(s, d) / μ(s, d))。每条光纤链路的频谱带宽为 1 250 GHz，每个频谱间隙的带宽为 12.5 GHz，保护带宽为 GB=0 和 GB=1 个频谱间隙。调节参数 ρ=0.5，生成的连接请求数为 100 000。

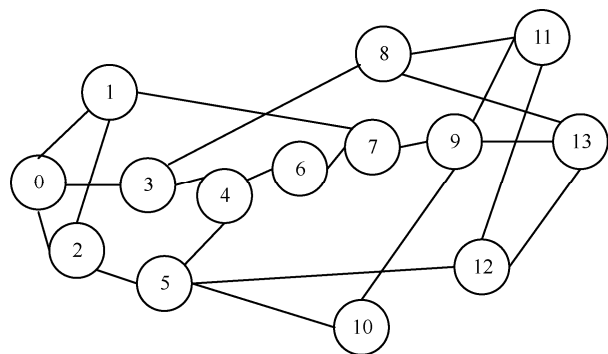


图 3 仿真网络 NSFNET

本文的评价指标包括网络阻塞率、频谱资源占用率、平均故障概率和平均跳数，具体如下：

1) 网络阻塞率为没有建立成功的连接请求个数除以连接请求的总个数；2) 频谱资源占用率为连接请求占用的频谱间隙总数除以频谱灵活光网络的频谱间隙总数；3) 平均故障概率为每个连接请求的故障概率总和除以成功连接请求总数；4) 平均跳数为每个连接请求的跳数总和除以成功连接请求总数。这些评价指标值都是在网络业务流达到稳定状态时的统计平均值。

5.2 仿真结果分析

1) 网络阻塞率

如图 4 所示，考虑保护带宽 GB=0 或 GB=1 个频谱间隙，与传统方法 (TP-GB-0 和 TP-GB-1) 相比，PA 方法 (PA-GB-0 和 PA-GB-1) 有效地降低了阻塞率。当 GB=0 时，与比传统方法 (TP-GB-0) 相比，所提出的 PA 方法 (PA-GB-0) 降低了 69.8% 的阻塞率，其原因在于 PA 方法考虑了故障概率与光纤链路负载均衡性，也就是在工作路径选择路由过程中，选择轻载的光纤链路的可能性更大，分配的频谱资源更容易成功，避免某些光纤链路由于频谱资源占用过多，导致分配频谱资源失败。此外，在 PA 方法或传统方法下，考虑保护带宽的频谱间隙个数越少，网络连接请求阻塞率越低，即在 GB=0 条件下，网络连接请求阻塞率比 GB=1 时低。这是因为设置保护带宽越大，2 个连接请求在同一光纤链路上分配更多的频谱间隙作为保护带宽，使光纤链路上的频谱资源占用更多，导致更多连接请求发生阻塞，使网络阻塞率增大。

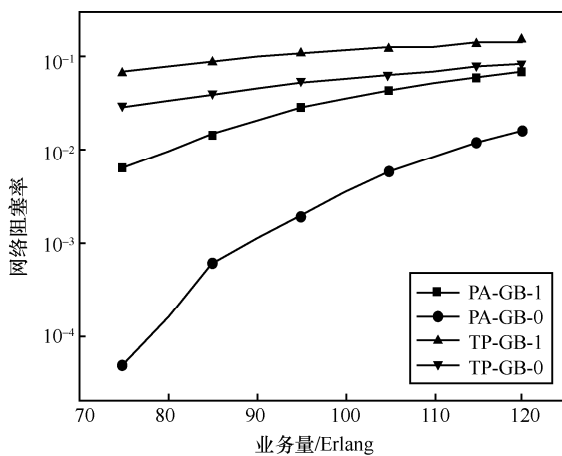


图 4 PA 方法与传统方法的网络阻塞率对比

2) 频谱资源占用率

为了有效提高频谱的资源效率，对 PA 方法与传统方法的频谱资源占用率进行比较。如图 5 所示，考虑相同的保护带宽条件，即 GB=0 或 GB=1，PA 方法的频谱资源占用率均低于传统方法。当 GB=0 或 GB=1 时，与传统方法相比，PA 方法降低了 45.3% 或 37.8% 的频谱资源占用率。此外，在考虑 PA 方法或是传统方法下，采用更多的频谱间隙个数作为保护带宽，会使网络连接请求的频谱资源占用率上升，因为考虑越多的频谱间隙个数作为保护带宽，需要分配更多空闲频谱资源，导致占用更多的频谱间隙，所以频谱资源占用率会升高。可见，通过采用最小的故障概率和光纤链路负载均衡联合优化数值，可以有效减少频谱灵活光网络的频谱占用率。

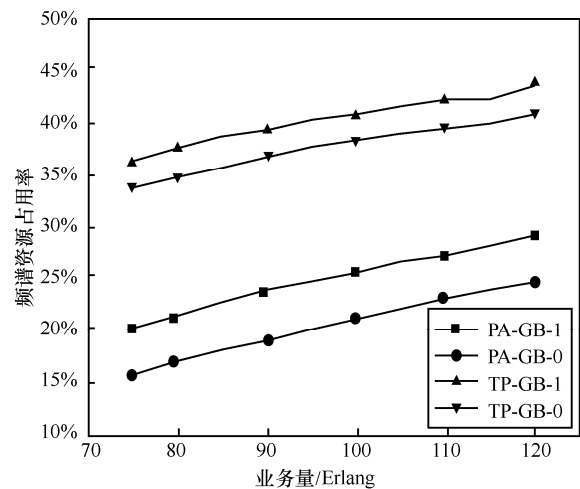


图 5 PA 方法与传统方法的频谱资源占用率对比

3) 平均故障概率

如图 6 所示，与传统方法相比，PA 方法减少了大约 41.9% (GB=0 和 GB=1) 的平均故障概率，这是因为 PA 方法在选择工作路径时，充分考虑了每一条工作路径的故障概率，使所提出的联合优化方法有效减少连接请求的故障概率。此外，不管是 PA 方法，还是传统方法，当保护带宽 GB=0 或 GB=1 时，这 2 种方法的平均故障概率并不会随着业务量增加而发生很大的变化。这是因为当连接请求选择跳数较多的工作路径时，很难找到满足频谱连续与一致约束条件的频谱资源，造成连接请求阻塞。随着业务量的增加，PA-GB-0 和 PA-GB-1 的平均故障概率差异越来越明显，这是因为 PA 方法考虑了故障概率和光纤链路负载均衡，使设置越大的保护带宽的连接请求在选择更

大跳数的工作路径时越容易阻塞，造成了 PA-GB-0 和 PA-GB-1 的平均故障概率明显差异。可见，通过采用故障概率和光纤链路负载均衡联合优化方法，可以有效减少连接请求的故障概率。

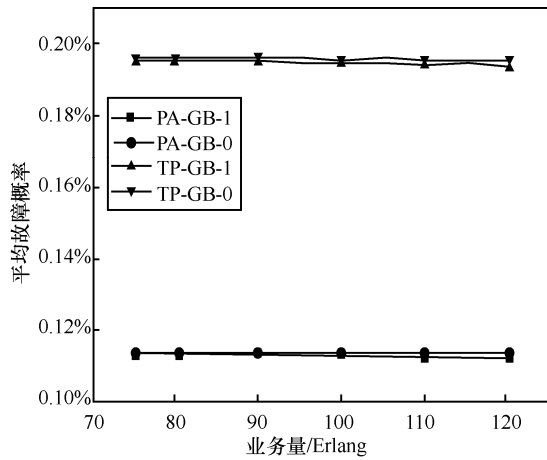


图 6 PA 方法和传统方法的平均故障概率对比

4) 平均跳数

由图 7 可以看出，PA 方法的平均跳数比传统方法小。当考虑保护带宽 GB=0 或 GB=1 时，与传统方法相比，PA 方法大约减少了 43.7%和 43.3%的平均跳数。此外，当保护带宽 GB=0 或 GB=1 时，PA 方法和传统方法随着业务量的变化不大。PA 方法或传统方法在保护带宽 GB=0 和 GB=1 时的平均跳数非常接近，这是由网络连接请求的阻塞率引起的，即在同一种方法下，当 GB=0 时，不管是 PA 方法或是传统方法，进入频谱灵活光网络的连接请求数目都比 GB=1 时多。因此，当 GB=0 时，在建立工作路径过程中，PA 方法或是传统方法选择更多跳数的路径作为传输工作路径。

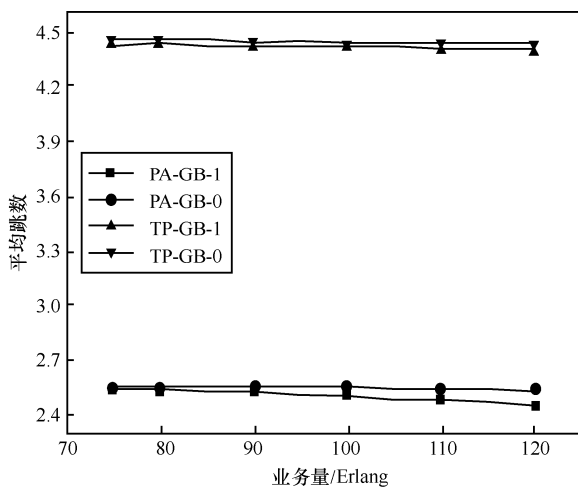


图 7 PA 方法和传统方法的平均跳数对比

6 结束语

在频谱灵活光网络中，一方面，为了降低连接请求在频谱灵活光网络中的故障概率，保证连接请求的服务质量，提出了连接请求的工作路径故障概率评估机制，以减少连接请求在传输路径发生故障的概率。另一方面，为了避免某些光纤链路因频谱资源过度消耗，通过引入光纤链路负载均衡方法，给予频谱灵活光网络中负载较轻的光纤链路优先选择的权利，并根据连接请求占用光纤链路频谱资源的情况，动态地调整频谱灵活光网络的光纤链路的权重，使频谱灵活光网络的光纤链路负载达到均衡。因此，本文采用故障概率与光纤链路负载均衡联合评估方法，提出了最小化故障概率与光纤链路负载均衡方法。仿真结果表明，与传统方法相比，故障概率与光纤链路负载均衡联合优化方法降低了网络阻塞率，提高了频谱灵活光网络的频谱资源利用率，减少了网络的故障概率，解决了故障概率与光纤链路负载均衡最小问题，实现了连接请求在频谱灵活光网络传输较低故障概率和避免光纤链路负载均衡联合优化方法。

参考文献：

- [1] JINNO M, TAKARA H, KOZICKI B, et al. Spectrum-efficient and scalable elastic optical path network: architecture, benefits, and enabling technologies[J]. IEEE Communications Magazine, 2009, 47(11): 66-73.
- [2] 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.
- [3] JINNO M, OHARA T, SONE Y, et al. Elastic and adaptive optical networks: possible adoption scenarios and future standardization aspects[J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(10): 164-172.
- [4] LEE H W, MODIANO E, LEE K. Diverse routing in networks with probabilistic failures[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2010, 18(6): 1895-1907.
- [5] SHE Q, HUANG X, JUE J P. How reliable can two-path protection be?[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2010, 18(3): 922-933.
- [6] DIAZ O, XU F, MIN-ALLAH N, et al. Network survivability for multiple probabilistic failures[J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(8): 1320-1323.
- [7] ZHANG J, CHEN B, ZHAO Y, et al. Minimized spectrum resource consumption with rescaled failure probability constraint in flexible bandwidth optical networks[J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 2013, 5(9): 980-993.

- [8] ZHANG J, CHEN B, ZHAO Y, et al. Survivable traffic cognition algorithm with joint failure probability in flexible bandwidth optical networks[J]. China Communications, 2013, 10(4): 38-48.
- [9] CHEN B, ZHANG J, ZHAO Y, et al. Spectrum-block consumption for shared-path protection with joint failure probability in flexible bandwidth optical networks[J]. Optical Switching and Networking, 2014(13): 49-62.
- [10] CHEN B, ZHANG J, ZHAO Y, et al. Spectrum-aware survivable strategies with failure probability constraints under static traffic in flexible bandwidth optical networks[J]. IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(24): 4221-4234.
- [11] CHEN B, ZHANG J, ZHAO Y, et al. Multi-link failure restoration with dynamic load balancing in spectrum-elastic optical path networks[J]. Optical Fiber Technology, 2012, 18(1): 21-28.
- [12] NI W, HUANG C, WU J, et al. Availability of survivable valiant load balancing (VLB) networks over optical networks[J]. Optical Switching and Networking, 2013(10): 274-289.
- [13] SON I K, MAO S, DAS S K. On joint topology design and load balancing in free-space optical networks[J]. Optical Switching and Networking, 2014(11): 92-104.
- [14] RASTEGARFAR H, RUSCH L A, LEON-GARCIA A. Optical load-balancing tradeoffs in wavelength-routing cloud data centers[J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 2015, 7(4): 286-300.
- [15] CONSTANTINOU C K, ELLINAS G. A load balancing technique for

efficient survivable multicasting in mesh optical networks[J]. Optical Switching and Networking, 2016(22): 1-8.

[作者简介]



陈博文（1983- ），男，广西桂平人，博士，苏州大学副教授、硕士生导师，主要研究方向为数据中心与光网络融合、光网络生存性、光网络虚拟化、软件定义光网络等。



符小东（1978- ），男，江苏东县人，中天科技研究院工程师，主要研究方向为光通信与网络。



雷雨（1995- ），女，河南南阳人，苏州大学硕士生，主要研究方向为空分复用频谱灵活光网络资源分配。