

最小故障风险损失的弹性光网络多链路故障概率保护策略

刘焕淋^{*①} 易鹏飞^① 张明佳^① 陈勇^②

^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: 针对弹性光网络中多链路故障 100%保护的资源消耗冗余度较高的问题, 该文提出一种最小故障风险损失的概率保护(MFRL-PP)策略, 在多链路故障时为业务提供高效率的概率保护。在 MFRL-PP 策略中, 该文设计了一个综合考虑链路负载和故障风险的代价函数, 为业务选择故障风险小且频谱资源消耗少的概率保护光路。当最小故障风险路径无法传输时, 为进一步降低概率保护光路的故障风险损失, 该文还设计了一种非对称业务流分流的最小故障风险损失概率保护机制, 以便选择故障风险损失最小的分流路径组作为传输光路。同时, 在传输光路的频谱分配阶段, 提出了基于最大频谱重合度的可用频谱块选择策略, 以减少频谱碎片的产生。仿真结果表明所提策略不仅有效地提升了频谱利用率, 还较好地实现了带宽阻塞率与故障风险的平衡。

关键词: 弹性光网络; 多链路故障; 最小故障风险损失; 非对称业务流; 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)08-1819-07

DOI: 10.11999/JEIT161159

Multi-link Failure Probability Protection Strategy Based on Minimum Fault Risk Loss in Elastic Optical Networks

LIU Huanlin^① YI Pengfei^① ZHANG Mingjia^① CHEN Yong^②

^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: Due to the high resource redundancy of full protection for request's multi-link failure in elastic optical networks, the strategy of Minimum Fault Risk Loss Probability Protection (MFRL-PP) is proposed to protect the request with high spectrum-efficiency. In the MFRL-PP, a link cost function integrated considering the link payload and fault risk is designed to choose the protection lightpath, which has minimum fault risk and consumes a small amount of spectrum resource. When the minimum fault risk lightpath is unavailable for shortage of idle spectrum resource, for further reducing the failure risk of the probability protection lightpath, a minimum fault risk loss probability protection mechanism for the non-symmetrical flow is designed to split the flow into two sub-flows for easily selecting the protection branch lightpath with the minimum fault risk loss. Moreover, in the phase of spectrum allocation for the lightpath, for reducing the number of spectrum fragmentations, a spectrum allocation strategy based on the maximum spectrum coincidence degree is put forward to allocate spectrum resource. The simulation results indicate that the proposed MFRL-PP algorithm can improve the spectrum utilization, and provide a better tradeoff between the bandwidth blocking probability and fault risk degree.

Key words: Elastic optical networks; Multi-link failure; Minimum fault risk loss; Non symmetrical traffic flow; Bandwidth blocking probability

1 引言

近年来, 随着多媒体业务的飞速发展, 如交互

式网络电视、视频点播、云服务等新型应用大量涌现, 网络流量呈爆炸式增长, 网络带宽需求也急剧增加。传统的波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)网络采用固定波长粒度的分配方式会造成带宽资源浪费, 使其很难满足未来光网络的带宽需求^[1]。基于正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)技术的弹性光网络, 可根据传输距离选择不同的调制方式, 灵活地分配子载波(12.50 GHz 或 6.25 GHz)。相比

收稿日期: 2016-10-28; 改回日期: 2017-03-17; 网络出版: 2107-04-25

*通信作者: 刘焕淋 liuhl2@sina.com

基金项目: 国家自然科学基金(61275077), 重庆市教委基金(KJ1400421), 重庆市委基础与前沿研究项目(2015jcyjA40024)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61275077), The Scientific Research Fund of Chongqing Municipal Commission (KJ1400421), The Basic and Frontier Research Program of Chongqing (2015jcyjA40024)

于 WDM 网络, 弹性光网络具有频谱效率高、能耗低等优点, 是一种高效的新型光网络架构, 成为未来光网络智能化的一个主要方向^[2,3]。

在弹性光网络中传输业务时, 需要建立一条源到目的节点的光路, 再为光路上的每一条链路分配相同的、连续的频隙(Frequency Spectrum, FS)资源, 这就是路由与频谱分配(Routing and Spectrum Assignment, RSA)问题。在网络带宽资源有限的情况下, 优化网络中的路由与频谱分配过程, 提高频谱利用率, 能够节约网络带宽资源, 降低阻塞率^[4,5]。而通信网络中超过 80%的信息需要通信光纤链路传输, 网络中的链路故障会造成大量的业务中断、数据丢失。同时随着网络规模的不断扩大, 网络发生多故障的概率逐渐增大。针对网络中日益严重的多链路故障问题, 研究光网络的生存性 RSA 问题, 成为提升光网络抵御多故障能力的重要途径^[6,7]。

为解决弹性光网络中的生存性 RSA 问题, 目前已有许多文献提出了生存性 RSA 策略。光网络中的生存性 RSA 策略主要分为保护和恢复两种, 现有的研究主要集中在保护策略上。在保护策略中, 要实现 100%的多故障保护, 需要消耗大量的带宽资源, 造成网络阻塞率过高; 另一方面, 随着光器件技术的进步, 光器件发生故障的概率较小, 实施高昂保护开销的 100%保护意义和效果不大, 因此更具性价比意义的光纤链路故障概率保护策略应运而生。概率保护作为一种特殊的保护策略, 能够根据业务差异化的可靠性需求和网络资源情况, 灵活地配置带宽资源, 为业务提供概率保护, 减少保护资源消耗, 降低网络阻塞率。文献[8]提出了负载均衡的多链路故障共享保护(Dynamic Load Balancing Shared-Path Protection, DLBSPP)算法, 并采用传统的首次命中(First Fit, FF)算法进行频谱分配, 但是忽略了频谱碎片问题。文献[9]通过可用性概率分析, 选择满足联合故障概率约束的路径来传输业务, 使用最小空闲频谱消耗(Minimum Free Spectrum-Block consumption, MFSB)算法来选择保护路径并进行频谱分配, 但是在进行可用性分析时直接通过概率计算十分复杂且在联合故障概率计算时关于共享度的使用不够精确。文献[10]通过对可用性与频谱资源消耗的分析, 提出了频谱感知的多故障共享保护策略, 通过 ILP 模型对联合故障概率和频谱资源消耗进行联合优化, 但是 ILP 模型构造、求解复杂。文献[11]提出了一种可用性感知的区分保护策略, 在业务传输中通过可用性分析切换保护方式以节约频谱资源消耗, 但是故障模型只是分析了单链路和双链路故障情况, 没有考虑多链路故障问题。文献[12]

提出了一种多故障共享路径保护算法, 有效地恢复因多故障而引起的多业务中断, 提高受损业务的恢复率, 但是在频谱分配时共享的资源比较有限。由此可知, 在弹性光网络的多链路故障保护研究中, 仍存在着许多问题, 需要不断改进和创新。

针对弹性光网络中的多链路故障保护问题, 本文以降低网络的阻塞率为首要目标, 同时考虑避免业务故障风险的激增, 首先提出了一种最小故障风险概率保护(Minimum Fault Risk Probability Protection, MFR-PP)策略, 为业务优先选择故障风险最小的传输路径。为进一步降低业务的故障风险损失, 在此基础上提出了最小故障风险损失的概率保护(Minimum Fault Risk Loss Probability Protection, MFRL-PP)策略, 当最小故障风险路径无法传输时, 将业务分割为非对称的业务流, 在故障风险损失最小的分流路径组传输, 实现业务的最小故障风险损失概率保护, 频谱分配时选择频谱重合度最大的可用频谱块来传输业务。

2 最小故障风险概率保护(MFR-PP)策略

在一个给定的弹性光网络拓扑 $G(V, E, S)$ 中, V 表示节点集合, E 表示链路集合, S 表示频谱资源集合, 第 i 个业务请求用 $LR_i(s_i, d_i, TR_i)$ 表示, s_i , d_i 分别表示业务的源、目的节点, TR_i 表示业务的传输速率, 则业务所需的频隙数为 $N_{LR} = TR_i / (p_m \times B_{FS}) + GB$, p_m 为调制等级为 m 时的频谱效率, B_{FS} 为单个频隙的带宽, GB 为保护带宽, 一般取值为 1 个频隙带宽。

2.1 故障风险概率保护问题描述

在弹性光网络保护中, 高的可靠性保证意味着高的带宽资源消耗, 使得网络阻塞率过高。概率保护能在保证业务可靠传输的前提下, 灵活地配置带宽资源, 实现阻塞率与可靠性的平衡。本文首先提出了一种最小故障风险的概率保护策略, 在为业务路由时通过对候选路径进行故障风险评估, 选择故障风险最小的路径来传输业务, 以此实现对业务的概率保护。首先生成网络拓扑链路故障风险矩阵, 根据链路的故障风险设计链路代价函数如式(1)所示。 $A_{i,j}$ 表示链路 (i, j) 的故障风险概率, $l_{i,j}$ 表示链路 (i, j) 的代价。

$$l_{i,j} = A_{i,j}, \quad (i, j) \in E, \quad i, j \in V \quad (1)$$

为降低业务的故障风险, 通过式(2), 式(3)对候选路径的故障风险进行评估, 选择故障风险最小的路径作为传输路径。假设业务所选的路径为 x , k 表示路径 x 经过的链路, 则当前路径的故障风险可表示为

$$F(\mathbf{x}) = 1 - \prod_{k \in \mathbf{x}} (1 - p_k) \Rightarrow 1 - F(\mathbf{x}) = \prod_{k \in \mathbf{x}} (1 - p_k) \quad (2)$$

式中， $F(\mathbf{x})$ 表示路径 \mathbf{x} 的故障风险概率， p_k 表示路径所经过的链路 k 的故障风险概率。在网络发生多链路故障时，为准确、快速地评估故障风险，提出了改进的故障风险评估模型，通过取对数将乘法运算转化为加法，如式(3)所示。再通过推导运算，可得出路径 \mathbf{x} 的改进故障风险概率 $F(\mathbf{x})$ ，如式(4)所示。

$$\begin{aligned} -\ln(1 - F(\mathbf{x})) &= -\ln\left(\prod_{k \in \mathbf{x}} (1 - p_k)\right) = (-\ln(1 - p_1)) \\ &\quad + (-\ln(1 - p_2)) + \dots + (-\ln(1 - p_k)) \\ &= -\sum_{k \in \mathbf{x}} \ln(1 - p_k) \end{aligned} \quad (3)$$

$$F(\mathbf{x}) = 1 - e^{\sum_{k \in \mathbf{x}} \ln(1 - p_k)} \quad (4)$$

设业务请求为 LR(0,3,200 Gbps)，网络拓扑及 3 条候选路由如图 1 所示，链路权重为链路的故障风险概率，现有 3 条候选路径分别为路径 1(0-3)，路径 2(0-1-2-3)，路径 3(0-5-4-3)。通过上述方法进行候选路径的故障风险评估，得到 3 条候选路径的故障风险分别为 0.045, 0.079, 0.081。

由候选路径故障风险可知，选择路径 1 的故障风险最小，根据最小故障风险概率保护目标，业务 LR(0, 3, 200 Gbps) 优先选路径 1(0-3) 作为传输路径，实现对业务的概率保护。

2.2 最小故障风险的概率保护(MFR-PP)策略过程

输入：光网络拓扑 $G(V, E, S)$ ，令 $i = 1$ ，设等待处理的业务数目 N 。

输出：业务 LR_i 的实现最小故障风险概率保护的传输路径 LR_i^p 和分配的频谱索引值 LR_i^d 。

步骤 1 从等待路由的业务队列中，取第 i 个业务请求 $LR_i(s_i, d_i, TR_i)$ 寻找具有最小故障风险概率保护功能的传输路径；

步骤 2 若 $i > N$ ，转至步骤 7；否则，执行步骤 3；

步骤 3 使用式(1)更新光网络中的链路代价，根据 Dijkstra 算法计算业务源到目的节点的 K 条候

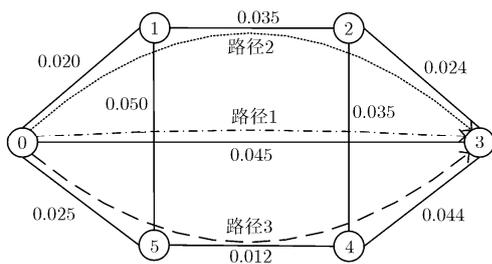


图 1 网络拓扑及业务候选路径示意图

选传输路径；并根据式(3)和式(4)评估每条候选路径的故障风险程度，按故障风险程度从小到大对 K 条候选路径进行排序，令 k 表示第 k 条传输路径， k 初始值取 1，转步骤 4；

步骤 4 若 $k > K$ ，标记该业务被阻塞， K 条光路上都无满足要求的可用频谱块，释放业务，更新光网络 G 的频谱资源占用情况， $i = i + 1$ ，处理下一个业务请求，转步骤 1；否则，转步骤 5；

步骤 5 检查第 k 条(其中， $k \in [1, K]$)光路上各链路的频谱资源使用情况，找到光路上的各个空闲频谱块；再根据业务所需的频隙数，选出大于或等于业务所需频隙数的空闲频谱块，作为可用频谱块，加入到可用频谱块集合 \mathbf{AFS}_k 中，记作 $\mathbf{AFS}_k = \{\text{afs } 1 \text{ afs } 2 \dots \text{ afs } n\}$ ， \mathbf{AFS}_k 表示第 k 条路径上的可用频谱资源集合， $\text{afs } m$ ($m \in [1, n]$) 表示第 m 个可用频谱块。若 \mathbf{AFS}_k 为空， $k = k + 1$ ，转步骤 4；否则，转步骤 6；

步骤 6 记录所选择的传输路径 k ，并按频谱索引值从小到大的顺序，选择第 1 个可用的频谱块 $\text{afs } m$ 进行频谱分配，记录其频隙索引值，返回具有最小故障风险概率保护功能的传输路径 LR_i^p 和分配的频隙索引值 LR_i^d ，更新网络资源状态， $i = i + 1$ ，转步骤 1；

步骤 7 算法结束。

3 最小故障风险损失的概率保护(MFRL-PP)策略

为业务选择最小故障风险的路径作为传输路径，可能导致网络负载不均衡产生瓶颈链路。且随着负载的增大，满足频谱约束的最小故障风险路径很难被选到，业务只能退而选故障风险较大的路径进行传输。此时业务在所选的故障风险较大的路径上传输，会导致业务风险损失较大。因此，为降低网络发生多故障时的业务损失，本文又提出基于非对称业务流的最小故障风险损失概率保护策略。

3.1 基于非对称业务流的最小故障风险损失概率保护问题描述

在基于非对称业务流的最小故障风险损失概率保护策略中，首先综合考虑网络中的频谱资源使用状况、链路的故障风险概率和业务的频谱资源消耗，设计了路由选择时的链路代价函数，如式(5)所示。链路的代价函数值越小，表明链路的空闲频谱越多，链路的故障风险越小。更新链路的代价函数后，使用 Dijkstra 算法计算 K 条候选路径，并通过上述的故障风险评估模型评估每条候选路径的故障风险。优先选择故障风险最小的路径进行传输，若最小故

障风险路径上无足够的可用频谱资源, 则依据故障风险程度低的路径传输多的业务的原则, 设计了式(6)将业务分解为非对称业务流, 如图 2(a)所示, 非对称业务流分别在两条光路上传输, 如图 2(b)所示。设计式(7)来评估采用最小故障风险路径传输时的业务故障风险损失。采用非对称业务流传输时, 通过式(8)来评估业务的故障风险损失, 选择故障风险损失最小的分流路径组来传输业务, 实现最小故障风险损失的概率保护。由于随着传输路径的增多, 所消耗的保护频隙会增多, 所以本文最多只将业务分割为 2 个子业务。

$$l_{i,j} = 1/C_{i,j}^{k_1} + (-k_2 \ln(1 - A_{i,j})), (i, j) \in E \quad (5)$$

式中, $C_{i,j}$ 表示链路 (i, j) 上的空闲频隙数, $A_{i,j}$ 表示链路 (i, j) 的故障风险。 k_1 和 k_2 为调节因子, k_1 均衡链路负载与频谱资源消耗关系, k_2 调节前者与链路故障风险关系。

$$\left. \begin{aligned} P_i &= 1 - \prod_{k \in x} (1 - p_k), \quad i \in [1, 2], \quad \alpha = \frac{P_1}{P_1 + P_2} \\ N_{LR}^1 &= [(1 - \alpha)N_{LR}], \quad N_{LR}^2 = N_{LR} - N_{LR}^1 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式(6)划分业务 N_{LR} 为非对称业务流 N_{LR}^1 和 N_{LR}^2 , N_{LR}^1 和 N_{LR}^2 分别表示分流光路 1 和光路 2 上所需的频隙数。 P_i 表示路径 i 的故障风险, N_{LR} 表示业务 LR 所需频隙数。

综上所述, 为实现业务的最小故障风险损失概率保护, 业务传输可分为两种情况, 第 1 种情况是直接使用故障风险最小的路径进行传输, 此时业务损失的大小可以通过式(7)进行评估, 业务损失为

$$Q = N_{LR}P_i \quad (7)$$

第 2 种情况是, 最小故障风险路径无法传输时, 业务采用非对称分流进行传输, 划分业务 N_{LR} 为大小为 N_{LR}^1 和 N_{LR}^2 的非对称业务流, 分别在分流路径 m 和 n 上传输, P_m , P_n 分别表示对应的路径故障风险。当网络大规模故障时, 业务发生损失又可以细分为 3 种, 一是分流路径 P_m 发生故障, 此时业务损失约为 $q_1 = N_{LR}^1P_m$, 二是分流路径 P_n 发生故障, 此时业务损失约为 $q_2 = N_{LR}^2P_n$, 三是两条分流路径同

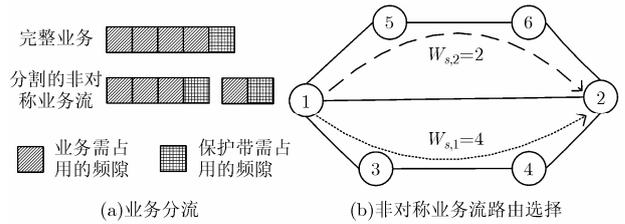


图 2 非对称业务流示意图

时故障, 此时业务损失约为 $q_3 = N_{LR}^1P_m + N_{LR}^2P_n$ 。则采用非对称业务流传输时, 业务损失为 Q :

$$Q = \max \{q_1, q_2, q_3\} \quad (8)$$

业务的路由确定后, 需要在满足频谱一致性、连续性的前提下在光路由上分配频谱资源。首先根据链路频谱资源使用情况找出满足请求带宽要求的可用频谱块集合。分别计算当前每个可用频谱块如果被使用后的频谱重合度, 选择重合度最大的频谱块来承载业务, 使光路的频谱碎片最小化。设 FS_{d1}^{Ri} 和 FS_{d2}^{Ri} 分别表示业务 LR 第 i 个子业务流的首、尾频隙索引值, $FS_{pa}^{n,d1}$, $FS_{pa}^{n,d2}$ 分别表示路径上第 n 个频谱块的首、尾索引值; FSD_n 表示第 n 个频谱块被占用后的频谱重合度, 定义频谱重合度的计算如式(9)所示。

$$FSD_n = \frac{FS_{d2}^{Ri} - FS_{d1}^{Ri} + 1}{FS_{pa}^{n,d2} - FS_{pa}^{n,d1}} \quad (9)$$

假设业务选择的分流路径组如图 2(b)所示, 所选的 2 条分流光路分别为 $W_{s,1}$ 和 $W_{s,2}$, 每条分流路径上所需的频隙数分别为 4 FS 和 2 FS。路径的频谱资源使用情况分别如图 3(a), 3(b)所示, 则可通过式(9)计算每个可用频谱块被占用后的频谱重合度, 如表 1 所示。

表 1 频谱重合度计算表

分流路径 频谱块	频隙 索引值	业务所 需频隙数	频谱 重合度
$W_{s,1}$ AFS 块 1	1, 2, 3, 4	4	1
$W_{s,1}$ AFS 块 2	6, 7, 8, 9, 10	4	4/5
$W_{s,2}$ AFS 块 1	2, 3, 4	2	2/3
$W_{s,2}$ AFS 块 2	7, 8, 9, 10	2	2/4

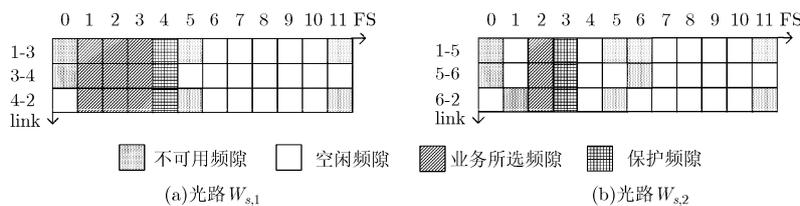


图 3 非对称业务流频谱分配示意图

根据选路径上频谱重合度最大的频谱块进行频谱分配的原则, 路径 1-3-4-2 选择频谱重合度大的频谱块(频谱索引值为 1, 2, 3, 4)承载业务, 分配的频隙索引值为 1, 2, 3, 4; 同理, 路径 1-5-6-2 选择频谱重合度大的频谱块(频谱索引值为 2, 3, 4)承载业务, 分配的频隙索引值为 2, 3, 结果如图 3 所示。

3.2 基于非对称业务流的最小故障风险损失概率保护(MFRL-PP)策略过程

输入: 光网络拓扑 $G(V, E, S)$, 令 $i = 1$, 设变量 S 初始取 0, 等待处理的业务数目 N 。

输出: 业务 LR_i 的实现最小故障风险损失概率保护的传输路径 LR_i^p 和分配的频谱索引值 LR_i^d 。

步骤 1 从等待路由的业务队列中, 取第 i 个业务请求 $LR_i(s_i, d_i, TR_i)$, 为该业务寻找具有最小故障风险损失概率保护功能的传输路径; 释放已经传输结束的业务占用的频谱资源, 更新光网络 G 的频谱资源占用情况;

步骤 2 若 $i > N$, 转至步骤 10; 否则执行步骤 3;

步骤 3 使用式(5)更新网络中的链路代价, 运行 Dijkstra 算法计算源到目的节点的 K 条候选传输路径; 并根据式(3)和式(4)评估每条候选路径的故障风险程度, 按故障风险程度从小到大对 K 条候选路径进行排序, 令 k 表示第 k 条候选传输路径, k 初始值取 1, 转步骤 4;

步骤 4 检查第 k 条路径的频谱资源使用情况, 找到光路上的各个空闲频谱块; 再根据业务所需的频隙数, 选出大于或等于业务所需频隙数的空闲频谱块, 加入到可用频谱块集合 \mathbf{AFS}_k 中, 记作 $\mathbf{AFS}_k = \{\text{afs } 1 \text{ afs } 2 \cdots \text{afs } n\}$, \mathbf{AFS}_k 表示第 k 条路径上的可用频谱资源集合, $\text{afs } m$ ($m \in [1, n]$) 表示第 m 个可用频谱块。若 \mathbf{AFS}_k 为空, 转步骤 6; 否则转步骤 5;

步骤 5 选该路径作为传输路径, 记录路径信息, 计算集合 \mathbf{AFS}_k 中每个可用频谱块 $\text{afs } m$ ($m \in [1, n]$) 的频谱重合度 FSD_m , 选择 FSD_m 最大的频谱块, 从该频谱块上频隙索引值最小的频隙开始进行频谱分配, 记录分配的频隙索引值, 返回具有最小故障风险损失概率保护功能的传输路径 LR_i^p 和分配的频谱索引值 LR_i^d ; 判断 S 是否等于 1, 若等于 1, 转步骤 9; 否则, $i = i + 1$, 转步骤 1;

步骤 6 令变量 S 等于 1, 表征该业务是通过分流路径组传输, 从 K 条候选路径中, 按路径标号 k 从小到大的顺序将对应的路径进行两两组合, 得到分流路径组, 并加入到分流路径组集合 \mathbf{PATH} 中, 记作 $\mathbf{PATH} = \{\text{path } 1 \text{ path } 2 \cdots \text{path } n\}$, 其中 $\text{path } k$

$= \{p \ q\}$ ($k \in [1, n]$) 表示第 k 个分流路径组, p, q 分别表示分流路径的路径标号, $p \in [1, K], q \in [1, K]$, 且满足 $p < q$; 根据式(6)对业务进行非对称分流, 得到每个分流路径组中每条分流路径 p 和 q 上所需的频隙数, 分别记作 N_{LR}^1 和 N_{LR}^2 , 转步骤 7;

步骤 7 检查 \mathbf{PATH} 中每个分流路径组 $\text{path } k = \{p \ q\}$ ($k \in [1, n]$) 中每条分流路径 p 和 q 的频谱资源使用情况, 根据 $N_p \geq N_{LR}^1$ and $N_q \geq N_{LR}^2$ 的限制条件, 其中 N_p, N_q 分别表示分流路径 p 和 q 上最大空闲频谱块的大小, 找出所有满足该限制条件的分流路径组 $\text{path } k$, 加入到集合 \mathbf{P}_{pk} 中; 若 \mathbf{P}_{pk} 为空, 则阻塞该业务, $i = i + 1$, 转步骤 1; 否则根据式(8)计算 \mathbf{P}_{pk} 中每个分流路径组对应的业务故障风险损失 Q , 选出故障概率风险损失最小的路径组 $\text{path } k = \{p \ q\}$, 转步骤 8;

步骤 8 对确定的分流路径组 $\text{path } k = \{p \ q\}$, 取出其中的第 1 条分流路径 p , 记录其路径信息, 让 k 的取值为 p , 转步骤 4;

步骤 9 继续取出分流路径组 $\text{path } k = \{p \ q\}$ 中的第 2 条分流路径, 记录其路径信息, 让 k 取值为 q , 并令 S 取值为 0, 转步骤 4;

步骤 10 算法结束。

4 算法仿真结果分析

4.1 仿真参数设置

为了验证算法的性能, 将本文所提的 MFRL-PP 算法、MFRL-PP 算法分别与 DLBSPP 算法^[8]、MFSB^[9]算法进行了对比, 性能指标为带宽阻塞率, 频谱利用率和业务平均故障风险。仿真中使用 14 个节点、21 条链路的 NSFNET 网络, 及 15 个节点、28 条链路的 BELLCORE 网络。

假设业务请求到达服从参数为 λ 的泊松分布, 业务的源、目的节点生成服从均匀分布, 持续时间服从参数为 $1/\mu$ 的指数分布。每根光纤总频隙宽度为 4.75 THz, 每个频隙宽度为 12.5 GHz, 每根光纤有 358 个频隙, 每根光纤的故障风险在 0 到 0.05 之间均匀分布。网络中的业务请求从 {40 Gbps, 100 Gbps, 400 Gbps, 1000 Gbps} 随机产生, 采用 DP-QPSK 调制方式^[13], 分别对应 3, 4, 7, 16 FS。每次仿真 10^6 个业务, 候选路径数 $K = 3$ 。经过多次仿真实验, 得出链路代价公式中参数 k_1, k_2 的最优取值分别为 0.5 和 2.0。

4.2 仿真结果分析

图 4 显示了 4 种算法在两种不同网络场景中带宽阻塞率随负载的变化情况。从图 4 可以看出, 本文所提的 MFRL-PP 算法获得了最低的带宽阻塞

率。主要是因为在选择路由时综合考虑了故障风险与业务频谱资源消耗,并采用了非对称业务流方法,在频谱分配时通过频谱重合度的计算选择合适的频谱块来减少频谱碎片,降低了带宽阻塞率。MFSB, DLBSPP 算法需要配置保护路径,消耗了额外的频谱资源来提升业务传输的可靠性,导致其阻塞率最高。MFR-PP 算法优先选择故障风险小的路径来传输业务,但是会因频谱约束条件而绕路,所以其阻塞率略高于 MFRL-PP 算法。相同负载下,NSFNET 网络的阻塞率要高于 BELLCORE 网络,主要是因为 BELLCORE 网络节点平均度数较大,因此业务更容易成功传输。

图 5 显示了 4 种算法在两种不同网络场景中业务平均故障风险随负载的变化情况,可以看出,本文所提的 MFRL-PP 算法获得了较低的业务平均故障风险,实现了阻塞率与业务故障风险更好的平衡。主要是因为 MFRL-PP 算法优先选择故障风险最低的路径进行传输,在故障风险最低路径无法传输时,通过故障风险评估将业务进行非对称分流,降低了业务的故障风险。而 MFSB, DLBSPP 算法分别采用了不同的保护策略,所以故障风险较小。随着负载增大, MFR-PP 算法所选路径故障风险会增大,所以平均故障风险最高。在负载相同时,NSFNET 网络的平均故障风险要高于 BELLCORE 网络,主要是因为 BELLCORE 网络节点平均度数较大,业务更容易选到故障风险小的路径。

图 6 分析了 4 种算法在两种不同网络环境中不同负载下频谱资源利用率的变化情况,可以看出,本文所提的 MFRL-PP 算法获得了最高的频谱资源利用率。主要原因是 MFRL-PP 算法在故障风险最低路径无法传输时进行了非对称分流,充分利用了频谱资源,并且通过评估频谱块的频谱重合度来分配频隙,减少了频谱碎片,提高了频谱资源利用率。而 MFSB, DLBSPP 算法为了确保业务的可靠性而选择故障风险低的路径,可能造成资源消耗不均匀,频谱碎片过多,因此频谱利用率较低。MFR-PP 算法通过故障风险来选路,频谱利用率位于几者之间。在相同负载下,NSFNET 网络的频谱资源利用率要高于 BELLCORE 网络,主要是因为 BELLCORE 网络链路数较多,业务更容易选到跳数少的路径,节约了频谱资源消耗。

5 结束语

本文主要研究了弹性光网络中的多链路故障保护问题,提出 MFR-PP 与 MFRL-PP 算法提高多链路故障时的概率保护性能和频谱资源利用率。设计了一个综合考虑链路负载和故障风险的代价函数来计算候选光路,当最小故障风险光路无法传输时,通过故障风险评估,选择基于非对称业务流的最小故障风险损失分流路径组进行路由,并选择频谱重合度最大的空闲频谱块来传输业务,实现了概率路由保护。本文算法不仅有效地降低了业务的带宽阻

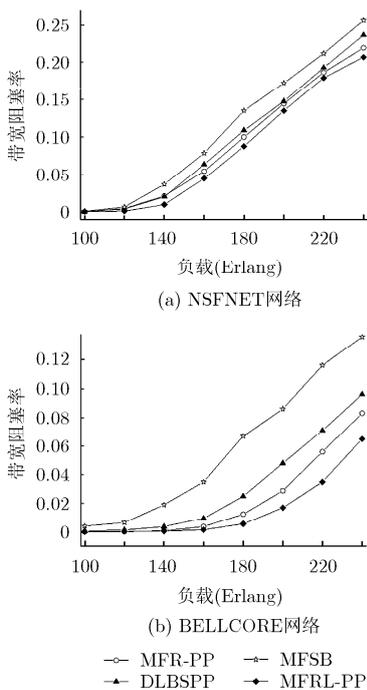


图 4 不同负载下带宽阻塞率的对比

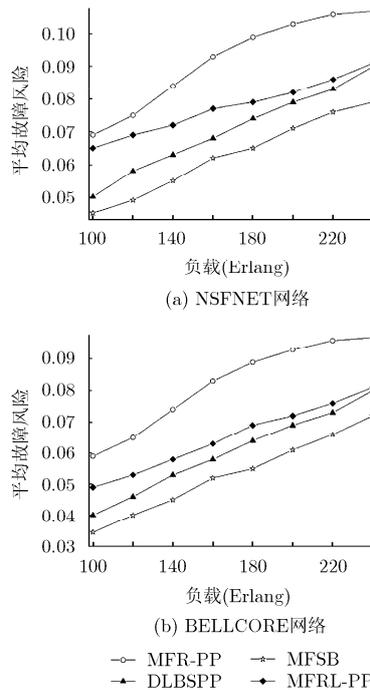


图 5 不同负载下业务平均故障风险的对比

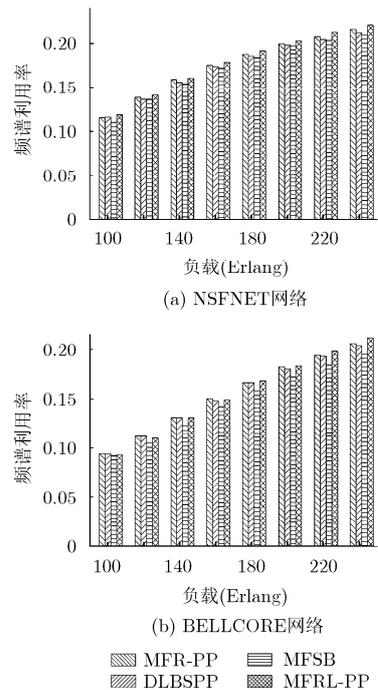


图 6 不同负载下频谱资源利用率的对比

塞率，提高了频谱利用率，还避免了业务故障风险性能的恶化，更好地实现阻塞率与可靠性的平衡。工业生产与信息化的融合是大势所趋，本文的研究结论对降低网络的故障风险和保护开销，提高光网络中日趋紧张的频谱资源的利用率具有重要指导意义，对推动新的数据业务在未来光网络中应用和高频谱效率路由保护至关重要。

参 考 文 献

- [1] 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.2015.09.004.
- [2] LEZAMA F, CASTANON G, SARMIENTO A M, et al. Differential evolution optimization applied to the routing and spectrum allocation problem in flexgrid optical networks[J]. *Photonic Network Communications*, 2016, 31(1): 129-146. doi: 10.1007/s11107-015-0558-3.
- [3] 刘焕淋, 岁蒙, 徐一帆, 等. 基于距离自适应和有效共享路径感知的光疏导方法[J]. *电子与信息学报*, 2015, 37(8): 1955-1970. doi: 10.11999/JEIT141442.
- LIU Huanlin, SUI Meng, XU Yifan, et al. A method of optical grooming for distance-adaptive and effective sharing path-aware[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(8): 1955-1970. doi: 10.11999/JEIT141442.
- [4] 刘焕淋, 徐一帆, 陈勇, 等. 基于频谱感知的业务分割-合并的弹性光网络资源分配策略[J]. *电子与信息学报*, 2016, 38(4): 892-898. doi: 10.11999/JEIT150842.
- LIU Huanlin, XU Yifan, CHEN Yong, et al. Spectrum-aware traffic split-merge resource allocation strategy for elastic optical networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(4): 892-898. doi: 10.11999/JEIT150842.
- [5] ZHANG Zhenrong, XIAO Mei, WU Minghou, et al. Adaptive subcarrier-distribution algorithm for routing and spectrum allocation in OFDM-based elastic optical networks[J]. *Photonic Network Communications*, 2014, 28(3): 225-231. doi: 10.1007/s11107-014-0446-2.
- [6] LIU Huanlin, LI Ruiyan, CHEN Yong, et al. Resource efficiency improved approach for shared path protection in EONs[J]. *Photonic Network Communication*, 2017, 33(1): 19-25. doi: 10.1007/s11107-016-0612-9.
- [7] 鲍宁海, 刘翔, 张治中, 等. WDM 节能光网络中的抗毁保护算法研究[J]. *重庆邮电大学学报(自然科学版)*, 2012, 24(3): 278-282. doi: 10.3979/j.issn.1673-825X.2012.03.002.
- BAO Ninghai, LIU Xiang, ZHANG Zhizhong, et al. Survival protection algorithm in WDM energy-efficient optical network[J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition)*, 2012, 24(3): 278-282. doi: 10.3979/j.issn.1673-825X.2012.03.002.
- [8] CHEN Bowen, ZHANG Jie, ZHAO Yongli, 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. doi: 10.1016/j.yofte.2011.10.002.
- [9] 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.
- [10] CHEN Bowen, ZHANG Jie, ZHAO Yongli, et al. Spectrum-aware survivable strategies with failure probability constraints under static traffic in flexible bandwidth optical networks[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(24): 4823-4836. doi: 10.1109/JLT.2014.2366557.
- [11] CHEN Xiaoliang, TORNATORE M, ZHU Shilin, et al. Flexible availability-aware differentiated protection in software-defined elastic optical networks[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(18): 3872-3882. doi: 10.1109/JLT.2015.2456152.
- [12] 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.
- [13] SCARAFICCI R A and FONSECA N L S D. Alternative routing and zone-based spectrum assignment algorithm for flexgrid optical networks[C]. *IEEE International Communications Conference*, 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。
- 易鹏飞：男，1991年生，硕士生，研究方向为光网络生存性。
- 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。