

## 弹性光网络中面向可靠性的链路故障概率保护与保护资源重配置策略

刘焕淋<sup>\*①</sup> 杜君丹<sup>①</sup> 易鹏飞<sup>①</sup> 陈勇<sup>②</sup> 张明佳<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(重庆邮电大学光纤通信技术与网络重点实验室 重庆 400065)

<sup>②</sup>(重庆邮电大学自动化学院 重庆 400065)

**摘要:** 为解决弹性光网络中多链路故障保护的高保护资源冗余度问题, 该文提出一种面向可靠性的多链路故障概率保护与保护资源重配置(ROPP-BR)策略。在 ROPP-BR 策略中, 该文综合考虑频谱资源消耗和链路故障概率, 分别设计了工作与保护路径的链路代价函数, 以较小代价分别选择业务可靠性高且频谱资源消耗少的备选工作与保护光路。为满足业务差异化的可靠性需求, ROPP-BR 策略设计了一种面向可靠性的概率保护机制, 建立了业务可靠性评估模型, 在满足业务的可靠性需求的限制下灵活地配置概率保护路径。当业务将要被阻塞时, 该文提出一种基于极大团的保护光路重配置方法, 对网络中的业务保护资源进行重配置, 提高保护频隙的共享度。仿真表明, 所提策略兼顾了带宽阻塞率与可靠性能, 有效地降低了保护资源冗余度。

**关键词:** 弹性光网络; 多链路故障; 概率保护; 可靠性; 保护重配置

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)11-2579-08

DOI: 10.11999/JEIT170150

## Reliability-oriented Links Failure Probability Protection and Backup Reprovisioning Strategy for Elastic Optical Networks

LIU Huanlin<sup>①</sup> DU Jundan<sup>①</sup> YI Pengfei<sup>①</sup> CHEN Yong<sup>②</sup> ZHANG Mingjia<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(Key Laboratory of Optical Communications and Networks, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

<sup>②</sup>(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, a strategy of Reliability Oriented Probability Protection and Backup Reprovisioning (ROPP-BR) is proposed. In the ROPP-BR, an adaptive adjustment working and protection link cost functions are devised to effectively select the alternative working and protection light-paths respectively which have high reliability and consume a small amount of spectrum resources in the multi-link failure. The cost function sufficiently considers the spectrum resources consumption and the link failure probability for both working and protection paths. Meanwhile, in order to satisfy the differentiated reliability requirements, a reliability oriented probability protection mechanism is introduced. And a theoretical analysis model is established to estimate the service reliability for light-paths in optical networks with probability protection, so the probability protection path can be flexibly configured under the restriction of the reliability requirements of the request. Moreover, for further improving protection sharing efficiency, when the request will be blocked for shortage of idle spectrum resource, a backup reprovisioning method based on maximum clique, is put forward to reconfigure the protection paths and spectrum resources. The simulation results indicate that the proposed ROPP-BR strategy can synthetically consider the performance of bandwidth blocking probability and service reliability, and effectively reduce the redundancy of protection resources.

**Key words:** Elastic optical networks; Multi-link failure; Probability protection; Reliability; Backup reprovisioning

### 1 引言

近年来, 随着智慧城市、云服务、超高清实时

视频通信等新型网络服务与应用的大量涌现, 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)网络难以满足未来光网络的发展需求<sup>[1,2]</sup>, 基于正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)技术的弹性光网络频谱利用率高、带宽分配和资源配置灵活, 被认为是最具前景的下一代光网络<sup>[3]</sup>。

收稿日期: 2017-02-24; 改回日期: 2017-07-14; 网络出版: 2017-08-28

\*通信作者: 刘焕淋 liuhl2@sina.com

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

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

随着网络规模的扩张,业务种类的丰富,光纤上承载的数据流量越来越大,光纤链路故障会造成灾难性后果。同时,在有限的频谱资源难以承载持续剧增的网络流量的形势下,优化光网络中的路由与频谱分配过程,提高频谱资源利用率是解决该困境的有效手段。因此,针对网络中日益严重的多链路故障问题,研究弹性光网络的生存性RSA问题,将为提高网络的可靠性、降低网络的阻塞率提供一种可行的解决方案<sup>[4]</sup>。

为解决弹性光网络中多链路故障的生存性RSA问题,目前已有很多文献提出了生存性RSA策略。光网络生存性RSA策略研究主要集中在保护策略上。在多链路故障保护中,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<sup>[5]</sup>。概率保护策略能够根据业务差异化的可靠性需求和网络的故障概率分布情况,在保证业务可靠传输的前提下,灵活地配置带宽资源,为业务提供概率保护,减少保护资源消耗和降低网络阻塞率。文献[6]提出了负载均衡的多链路故障共享保护(Dynamic Load Balancing Shared Path Protection, DLBSP)算法,但是忽略了网络可靠性问题,导致所有业务的保护方案都一致,容易违反业务的服务等级协议。文献[7]通过可用性分析,选择满足联合故障概率约束的工作路径和保护路径组合,并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。但是,在联合故障概率计算时关于故障概率的计算不够准确。文献[8]为解决多链路故障概率约束下的网络生存性问题,以链路故障概率为权重,提出了频谱感知的共享保护(Spectrum-Aware Shared Protection, SASP)算法,直接选择跳数最小的路径,导致保护频谱共享较少,容易产生瓶颈链路,使得网络带宽阻塞率过高。文献[9]通过对大规模网络故障环境下的灾难风险进行评估,设计了灾难感知的业务降级保护算法和备份重配置算法,并将二者结合使用来降低阻塞率,但是保护重配置中并没有具体的重配置方法。文献[10]设计了可靠性保证的差分保护算法和可靠性保证的保护结构重配置策略,根据请求瞬时可靠性需求的变化动态地调整请求的保护频谱分配以提高频谱效率。但该故障模型只分析了单链路和双链路故障情况,没有考虑更多链路故障的问题。文献[11]提出了概率共享风险链路组下可靠性不同的多链路故障区分保护算法,提高了备用资源共享度,但是在路由时的限制条件太多,很难找到满足要求的候选路径。由此可知,现有的研究中仍存在着很多不足,需要

不断地改进和创新。

针对弹性光网络中的多链路故障保护问题,本文在保障业务传输可靠性基础上,以降低网络阻塞率为主要目标,提出面向可靠性的概率保护与保护重配置(Reliability Oriented Probability Protection and Backup Reprovisioning, ROPP-BR)策略。ROPP-BR策略在概率保护中,设计了动态的工作路由与保护路由链路代价函数,构建了业务可靠性评估模型评估业务的实际可靠性,根据业务差异化的可靠性需求和网络的实际可靠性,灵活地配置保护资源;在保护资源重配置中,提出基于分层辅助图与极大团的保护重配置方法,动态地调整保护资源配置,减少保护资源消耗。

## 2 概率保护问题描述与业务可靠性评估理论模型

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 $LR_i(s_i, d_i, TR_i, R_i)$ 表示, $s_i, d_i$ 分别表示业务的源、目的节点, $TR_i$ 表示业务传输速率, $R_i$ 表示业务可靠性要求,来源于业务服务等级协议。业务的可靠性定义为业务正常传输的时间与总传输时间的比值:

$$R_i = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} \quad (1)$$

式中, $T_{on}$ 表示业务的正常传输时间, $T_{off}$ 表示业务因网络发生故障的中断时间。假设业务的可靠性仅受网络中的光纤链路故障影响,且每条光纤链路的故障事件相互独立。

### 2.1 概率保护路由与频谱分配方法描述

根据不同业务的可靠性要求不同提供差异化服务,成为网络发展的重要趋势。相比传统的100%保护,概率保护能够根据不同业务可靠性需求的差异和网络故障概率分布情况,更灵活地配置带宽资源,减少保护资源消耗和降低网络阻塞率,较好地平衡阻塞率与可靠性。因此,在多链路故障保护中,概率保护更具性价比和更符合网络发展需求。

如图1(a)所示,业务 $LR_1$ 的可靠性要求为96.8%,当前选定的工作路径为A-B-C,候选的保护路径有路径A-D-C和路径A-D-E-C,且路径上都有足够的连续频谱资源。设当选择候选路径A-D-C作为保护路径时,通过可靠性评估得到业务实际可靠性为97.6%,而选择候选路径A-D-E-C作为保护路径时的业务的实际可靠性为96.2%,则选择路径A-D-C作为保护路径能够满足业务可靠性需求。因此,为业务 $LR_1$ 配置的工作路径是A-B-C,保护路

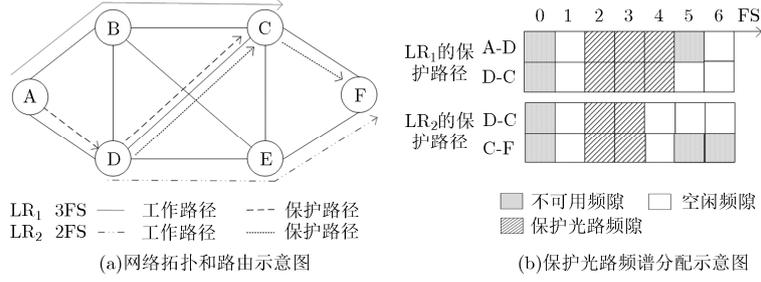


图 1 概率保护示意图

径为 A-D-C。同理，设业务 LR<sub>2</sub> 的可靠性要求为 98.3%，在满足业务可靠性要求前提下，为业务 LR<sub>2</sub> 配置的工作路径为 D-E-F，保护路径为 D-C-F。由于业务 LR<sub>1</sub> 和业务 LR<sub>2</sub> 工作路径链路不相交，保护路径链路相交，因此，保护路径上的频谱资源可以共享。业务 LR<sub>1</sub> 和 LR<sub>2</sub> 保护路径的频谱资源使用情况和保护频谱分配情况如图 1(b)所示，在业务 LR<sub>1</sub> 的保护路径 A-D-C 上分配保护频隙的索引值为 2, 3 和 4，在业务 LR<sub>2</sub> 保护路径 D-C-F 上分配保护频隙的索引值为 2 和 3。则业务 LR<sub>1</sub> 和 LR<sub>2</sub> 在链路 D-C 上共享保护资源，共享的频隙索引值为 2 和 3。

### 2.2 业务可靠性评估理论模型

在动态网络环境中，由于保护资源的共享和频谱资源动态分配或释放，业务的实际可靠性会发生改变。因此需要即时地评估为业务配置不同工作路径与保护路径时的实际可靠性，判断是否满足业务的可靠性需求。在多链路故障场景中，业务的实际可靠性可以通过先计算业务不能正常传输的概率确定。网络中的业务因网络故障而不能正常传输的情况主要有两种，一是业务的工作路径与保护路径同时故障，二是业务的工作路径发生故障，保护路径正常工作，但是保护路径竞争备用资源导致失败<sup>[10]</sup>。因此，业务无法正常传输的概率  $F(LR_i)$  可表示为式(2)所示，其中  $F_{(w,p)}^{w,p}$  表示业务 LR<sub>i</sub> 的工作路径与保护路径同时故障的概率， $F_{(w,p)}^w$  表示业务 LR<sub>i</sub> 的工作路径故障，保护路径正常工作但是竞争备用资源失败的概率。

$$F(LR_i) = F_{(w,p)}^{w,p} + F_{(w,p)}^w \quad (2)$$

一条路径能够正常传输业务的条件是它所经过的所有链路都正常工作，每条链路发生故障的概率用  $p_{i,j}$  表示，因此路径的可靠性计算可表示为  $\prod_{(i,j) \in x} (1 - p_{i,j})$ ，工作路径与保护路径同时故障的概率可由式(3)进行计算，式(3)中  $w$  表示工作路径链路集合， $p$  表示保护路径链路集合。

$$F_{(w,p)}^{w,p} = \left( 1 - \prod_{(i,j) \in w} (1 - p_{i,j}) \right) \times \left( 1 - \prod_{(i,j) \in p} (1 - p_{i,j}) \right) \quad (3)$$

为准确、快速地评估业务的工作与保护路径同时故障的概率，将式(3)中的路径故障概率表示成式(4)所示。并基于此提出改进的路径故障概率评估方法，如式(5)所示。再通过推导运算，可得出路径  $x$  的改进型故障概率表达式，如式(6)所示，其中， $F(x)$  表示路径  $x$  发生故障的概率。

$$F(x) = 1 - \prod_{(i,j) \in x} (1 - p_{i,j}) \Rightarrow 1 - F(x) = \prod_{(i,j) \in x} (1 - p_{i,j}) \quad (4)$$

$$-\ln(1 - F(x)) = -\ln \left( \prod_{(i,j) \in x} (1 - p_{i,j}) \right) = -\sum_{(i,j) \in x} \ln(1 - p_{i,j}) \quad (5)$$

$$F(x) = 1 - \prod_{(i,j) \in x} (1 - p_{i,j}) = 1 - \exp \left( \sum_{(i,j) \in w} \ln(1 - p_{i,j}) \right) \quad (6)$$

当业务的工作路径故障而保护路径正常工作时，由于保护资源的共享，若与当前业务共享保护资源的其它业务的工作路径故障，则会与当前业务竞争保护资源，因此当前业务可能由于竞争保护资源失败而导致业务失效，其概率如式(7)所示，其中  $S$  表示网络中与当前业务竞争保护资源的业务数。

$$F_{(w,p)}^w = \left( 1 - \prod_{(i,j) \in w} (1 - p_{i,j}) \right) \times \left( \prod_{(i,j) \in p} (1 - p_{i,j}) \right) \times (1 - 1/S) \quad (7)$$

综上所述，业务的可靠性可表示为如式(8)所示，其中  $R(LR_i)$  表示业务的可靠性，再通过推导运算，可得到简化的业务的可靠性表达式，如式(9)所示。其中  $(i,j) \in w$  表示当前业务没有配置保护路径时的业务可靠性， $(i,j) \in w$  or  $p$  表示当前业务配置了保护路径时的业务可靠性。

$$R(LR_i) = 1 - F(LR_i) \quad (8)$$

$$R(LR_i) = \begin{cases} \prod_{(i,j) \in w} (1 - p_{i,j}), & (i,j) \in w \\ \prod_{(i,j) \in w} (1 - p_{i,j}) + \frac{1}{S} \left( \prod_{(i,j) \in p} (1 - p_{i,j}) - \prod_{(i,j) \in w} (1 - p_{i,j}) \prod_{(i,j) \in p} (1 - p_{i,j}) \right), & (i,j) \in w \text{ or } p \end{cases} \quad (9)$$

### 3 面向可靠性的多链路故障概率保护与保护重配置策略

#### 3.1 面向可靠性的多链路故障概率保护机制

本文所提的面向可靠性的概率保护机制以业务差异化的可靠性要求为导向,在保证业务可靠传输的前提下,灵活地配置保护资源,实现网络阻塞率与可靠性的平衡。在面向可靠性的多链路故障概率保护机制中,首先综合考虑网络中的频谱资源使用状况、链路的故障概率和业务的频谱资源消耗,设计了工作路径选择时的链路代价函数,如式(10)所示,  $C_{i,j}$  表示链路  $(i,j)$  上的空闲频隙数,  $p_{i,j}$  表示链路  $(i,j)$  的故障概率。链路的代价函数值越小,表明链路的空闲频谱越多,链路的故障概率越小。并通过上述的可靠性评估理论模型评估每条候选路径的可靠性,优先选择可靠性高且具有足够空闲频隙资源的路径作为业务的工作路径,判断该路径的可靠性是否满足业务需求,若满足,则在该路径上进行频谱分配;否则,继续为业务寻找能够满足可靠性要求的保护路径,并进行工作频隙与保护频隙分配。

$$l_{i,j}^w = \frac{1}{C_{i,j}^{k_1}} + (-k_2 \ln(1 - p_{i,j})), \quad (i,j) \in E \quad (10)$$

当为业务仅仅配置了工作路径时,可能无法满足业务的可靠性要求,此时需要为业务配置保护路径,本文还设计了保护路径选择时的链路代价函数,如式(11)所示,以综合考虑空闲频隙的消耗和链路的故障概率,其中  $N_{LR}$  表示业务的保护路径上所需的保护频隙数,  $SR_{i,j}$  表示链路  $(i,j)$  上能共享的保护频隙大小,  $path_w$  表示业务的工作路径的链路集合。

$$l_{i,j}^p = \begin{cases} \infty, & (i,j) \in path_w \\ \frac{N_{LR} - SR_{i,j}}{N_{LR}} + (-k_3 \ln(1 - p_{i,j})), & (i,j) \notin path_w \end{cases} \quad (11)$$

在多链路故障场景中,由式(9)可知,保护资源的共享会降低业务的可靠性,因此保护资源的共享还应该满足以下约束:当前业务共享网络中已存在业务的保护资源时,已存在业务的可靠性降低,但变化后业务的实际可靠性仍能满足业务的可靠性需

求。

如图2所示的3个业务,业务  $LR_1$  可靠性要求为98.5%,为其配置的工作路径为1-2-3-4。假设此时不满足业务可靠性需求,因此需要配置保护路径,配置的保护路径为1-6-5-4,通过可靠性评估理论模型计算可得,此时业务的实际可靠性为99.2%,满足业务可靠性需求。因此为业务  $LR_1$  配置工作路径为1-2-3-4,保护路径为1-6-5-4。同理,对于业务  $LR_2$ ,其可靠性要求为95.3%,为其配置工作路径为1-7-4,计算得到此时实际可靠性为95.5%,可以满足业务可靠性需求,无需为其配置保护路径。对于业务  $LR_3$ ,设配置的满足业务可靠性需求的工作与保护路径分别为6-7-4和6-5-4,由于业务  $LR_3$  与业务  $LR_1$  的工作路径链路不相交,保护路径链路相交,因此两者的保护路径在链路6-5和5-4上存在共享保护频隙的可能性,假设通过计算,业务  $LR_1$  保护频隙被共享后业务可靠性为98.8%,仍满足业务  $LR_1$  要求,业务  $LR_3$  共享后可靠性为97.7%,同样满足可靠性要求。因此保护资源可以共享,即业务  $LR_3$  与业务  $LR_1$  保护路径在链路6-5和5-4上共享保护资源。

#### 3.2 基于极大团的保护资源重配置方法

在面向可靠性的概率保护机制中,为实现多链路故障下业务的可靠传输,将消耗大量频谱资源,导致网络中业务阻塞率过高。共享保护能减少保护资源的消耗,降低网络中保护资源的冗余度。当前业务因缺乏可用的频谱资源而将要被阻塞时,将保护资源有效地重配置,既能提高频谱资源共享利用率,又可以降低网络的频谱碎片程度。

在本文所提的基于极大团的保护资源重配置方法中,首先构造分层辅助图。将网络中满足业务可靠性需求的业务候选保护路径抽象成辅助图中的节点,每一层的节点对应一个业务的候选保护路径。若两个节点之间能够共享保护资源,则用边将两个节点相连。因此两个节点相连边的条件包括对应的工作路径链路不相交,保护路径链路相交;两个节点对应的业务的保护资源共享时,变化后的可靠性仍然满足业务各自的可靠性需求。设置链路权重为两条路径之间能够共享的保护频隙数,节点权重为该路径所需的频隙数,团的权重为共享的频隙总数与团中节点权重和的比。根据深度优先搜索算法计算辅助图中所有的极大团,由此得到每个团的权重,以及对应的路径信息。根据得到的极大权重极大团对应的保护路径信息和频谱共享信息,进行保护频隙分配,使网络中的业务充分共享保护资源,减少频谱资源消耗。

以图 3 所示的网络中现有业务的工作路径和保护路径为例，网络中现有 3 个业务，在满足频谱一致性、连续性约束下，假设为业务配置的工作路径与保护路径分别如图所示。进行保护资源重配置时，当前网络中已存在业务的工作路径与进行保护资源重配置的可选保护路径信息如表 1 所示。根据上述的分层辅助图构造方法，构造的分层辅助图如图 4 所示。

在图 4 所示的分层辅助示意图中，通过深度优先搜索算法可以计算出图中的极大团及其对应权重，以及得到每个极大团对应的保护路径信息和所需消耗的频隙总数，如表 2 所示，由于由 2 个节点构成的极大团只能同时考虑两个业务之间的保护资

源共享，因此消耗的频隙数要多于 3 个点构成的极大团，所以表 2 中只列出了其中消耗总频隙数最少的一种方案，如方案 3 所示。由表 2 可以得到，权重最大的团是(P1, P3, P5)，此方案消耗的频隙数最少。因此，根据该极大团对应的路径信息进行保护重配置，将业务 LR<sub>1</sub> 的保护路径重配置到路径 0-1-5-4 上，业务 LR<sub>2</sub> 和 LR<sub>3</sub> 的保护路径分别重配置到路径 1-0-2 和 0-1-5 上，如表 2 中的方案 1 所示。在进行频谱分配时选择能够共享的最大频谱块，分别在各条保护路径上进行频谱分配。

**3.3 面向可靠性的多链路故障概率保护与保护重配置(ROPP-BR)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 LR<sub>*i*</sub> 和业务数目  $N$ 。

**输出** 业务 LR<sub>*i*</sub> 的工作、保护路径 LR<sub>*i*</sub><sup>path</sup> 和分配的频隙索引值 LR<sub>*i*</sub><sup>index</sup>。

**步骤 1** 从等待路由业务队列中，取第  $i$  个业务请求 LR<sub>*i*</sub>( $s_i, d_i, TR_i, R_i$ )，确定工作路径、概率保护路径；

**步骤 2** 若  $i > N$ ，转至步骤 11；否则，执行步骤 3；

**步骤 3** 使用式(10)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  $K$  条最

表 1 网络中业务的工作路径及保护重配置候选路径信息表

业务请求	工作路径	保护路径
LR <sub>1</sub> (0,4) 2FS	(0-4)	P1= (0-1-5-4)
		P2= (0-2-3-4)
LR <sub>2</sub> (1,2) 2FS	(1-2)	P3= (1-0-2)
		P4=(1-5-3-2)
LR <sub>3</sub> (0,5) 2FS	(0-2-3-5)	P5= (0-1-5)
		P6=(0-4-5)

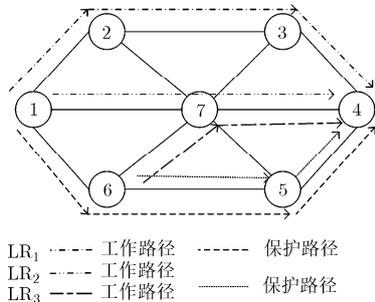


图 2 面向可靠性的概率保护机制示意图

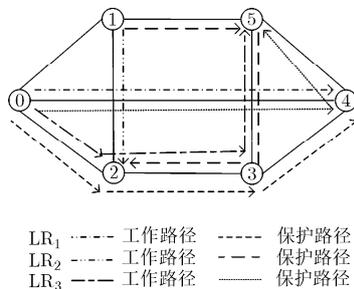


图 3 网络中现有业务的工作与保护路径示意图

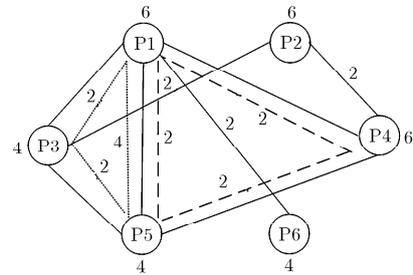


图 4 分层辅助示意图

表 2 业务保护路径配置与资源消耗表

方案	极大团	节点权重	保护路径	共享总频隙数	团的总权重	消耗总频隙数
方案 1	(P1, P3, P5)	6	LR <sub>1</sub> (0-1-5-4)	6	6/14	8
		4	LR <sub>2</sub> (1-0-2)			
		4	LR <sub>3</sub> (0-1-5)			
方案 2	(P1, P4, P5)	6	LR <sub>1</sub> (0-1-5-4)	6	6/16	10
		6	LR <sub>2</sub> (1-5-3-2)			
		4	LR <sub>3</sub> (0-1-5)			
方案 3	(P2, P3)	6	LR <sub>1</sub> (0-2-3-4)	2	2/10	10
		4	LR <sub>2</sub> (1-0-2)			
		4	LR <sub>3</sub> (0-1-5)			

小代价的候选路径,按可靠性进行降序排列,令  $k$  表示第  $k$  条候选工作路径,  $k$  初始值取 1, 转步骤 4;

步骤 4 若  $k > K$ , 启动基于极大团的保护重配置方法, 更新光网络  $G$  的频谱资源占用情况, 将  $i$  加 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  $k$  条候选工作路径上的频谱使用情况, 若存在大于或等于业务所需频隙数的空闲频谱块, 转步骤 6; 否则将  $k$  加 1, 转步骤 4;

步骤 6 并使用式(9)评估业务选择该候选路径时的业务可靠性  $R(LR_i)$ , 若  $R(LR_i) \geq R_i$ , 直接在该路径上通过首次命中算法进行频谱分配, 记录路径信息  $LR_i^{\text{path}}$  和分配的频隙索引值  $LR_i^{\text{index}}$ , 将  $i$  加 1, 转步骤 1, 否则选该路径作为工作路径, 记录路径信息, 转步骤 7;

步骤 7 使用式(11)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  $K$  条最小代价的候选保护路径, 令  $m$  表示第  $m$  条候选保护路径,  $m$  的初始值取 1, 转步骤 8;

步骤 8 若  $m > K$ , 启动基于极大团的保护资源重配置方法, 更新光网络  $G$  的频谱资源占用情况, 将  $i$  加 1, 处理下一个业务请求, 转步骤 1, 否则转步骤 9;

步骤 9 检查第  $m$  条候选路径的频谱使用情况, 若存在大于或等于业务所需频隙数的可用频谱块, 按频隙共享度从大到小排序, 转步骤 10, 否则将  $m$  加 1, 转步骤 8;

步骤 10 轮询每个可用频谱块, 使用式(9)计算当前业务可靠性, 若  $R(LR_i) \geq R_i$ , 则选当前路径作为保护路径, 在当前频谱块上按索引值从小到大进行保护频隙分配, 并在步骤 6 记录的工作路径上采用首次命中算法进行工作频隙分配, 并记录路径信息  $LR_i^{\text{path}}$  和分配的频隙索引值  $LR_i^{\text{index}}$ ; 否则,  $m$  加 1, 转步骤 8;

步骤 11 算法结束。

在 ROPP-BR 策略的步骤 8 中, 基于极大团的保护资源重配置方法过程为:

**输入** 当前网络中所有业务的工作路径与可行候选保护路径。

**输出** 每个业务配置的保护路径信息与分配的频隙索引值。

步骤 1 根据业务的工作路径、候选保护路径信息构造分层辅助图, 每层对应同一业务的几条候选保护路径, 设置节点权重为每条路径所需的频隙数, 边权重为两条路径之间能够共享的频隙数, 转步骤 2;

步骤 2 若某些点已经被分配保护频隙, 则根据路径与频谱信息更新与这些点相连边的权重, 并根据业务可靠性要求, 计算每条路径允许的最大频谱共享度, 得到每个点最大度数, 删除边权重较小边, 转步骤 3;

步骤 3 计算辅助图中所有极大团的总权重, 若存在极大团, 选择其中权重最大的极大团, 转步骤 4, 否则, 转步骤 7;

步骤 4 按当前极大团对应的路径信息, 计算所有能够满足业务可用性的频谱块, 选择其中能够共享的最大频谱块, 若路径上该频谱块可用, 则在该频谱块上进行保护频隙分配, 记录业务对应的保护路径信息和分配的保护频隙索引值, 转步骤 6, 否则, 转步骤 5;

步骤 5 在路径上轮询每一个可用频谱块, 分配保护频隙, 记录保护路径信息和频隙索引值, 转步骤 6;

步骤 6 检查已经完成频谱分配的路径对应的点, 若与其它已经完成频谱分配的路径之间的连线数已经达到该点最大度数, 将该点对应的分层全部删除; 否则, 删除该点对应分层中的其它点, 根据剩余业务的候选保护路径信息重构分层辅助图, 转步骤 2;

步骤 7 为剩余的业务依次选择满足业务可用性要求的路径和频谱块, 并使用首次命中算法进行频谱分配, 记录业务对应的保护路径和分配的频隙索引值, 转步骤 8;

步骤 8 算法结束。

## 4 算法仿真结果分析

### 4.1 仿真参数设置

为了验证算法性能, 将本文所提 ROPP-BR 算法分别与 DLBSPP 算法<sup>[6]</sup>、MFSB<sup>[7]</sup>算法、SASP<sup>[8]</sup>算法进行对比, 仿真中使用 NSFNET 网络和 BELLCORE 网络。

仿真时假设业务请求到达服从参数为  $\lambda$  的泊松分布, 业务源、目的节点随机生成, 服从均匀分布, 业务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, 光纤的故障风险在 0 到  $10^{-3}$  之间均匀分布。网络中业务请求从 {40 Gbps, 100 Gbps, 400 Gbps, 1000 Gbps} 中随机产生, 采用 DP-QPSK 调制方式, 分别对应 3, 4, 7, 16FS, 每个业务可靠性在 (0.930, 0.999) 之间均匀分布。每个业务配置一个保护带宽  $GB=1$  频隙, 每次仿真  $10^6$  个业务, 候选路径数  $K$  取 3。经过多次仿真实验, 得

到式(10)、式(11)参数  $k_1, k_2, k_3$  较优的取值分别为 0.5, 2.0, 10.0。

### 4.2 仿真结果分析

图 5 显示了 4 种算法在两种不同的网络场景中带宽阻塞率随负载的变化情况, 本文所提的 ROPP-BR 算法获得了较低的带宽阻塞率, 主要是由于采用了面向可靠性的概率保护方法, 且在业务阻塞时对保护资源进行重置, 降低保护频隙消耗, 减少了频谱碎片, 降低了带宽阻塞率。DLBSPP 算法在路由时考虑负载均衡, 且不考虑业务可靠性, 可以使保护资源的共享度最大化, 因而阻塞率最低。SASP 算法在满足业务故障概率约束的条件下选择跳数最少的工作与保护路径对, 共享的保护资源有限, 所以带宽阻塞率最高。而 MFSB 算法选择消耗空闲频隙最少的路径作为保护路径, 节约了频谱资源, 所以其阻塞率略低于 SASP 算法。

图 6 显示了 4 种算法在两种网络场景中业务平均可靠性随负载的变化情况, 本文所提的 ROPP-BR 算法获得了较高的业务可靠性。因为 ROPP-BR 算法在路由时优先选可靠性高的工作、保护路径对, 并采用了保护重置策略, 所以获得较好的业务可靠性。SASP 算法以链路故障概率为代价选路, 在最大频谱共享度的限制下进行保护频隙分配, 获得了最高的平均可靠性。MFSB 算法在路由时选择满足故障概率约束的工作与保护路径, 在进行故障概率计算时直接采用最大共享度, 使得计算的故障概

率偏大, 因此业务的平均可靠性略低于 SASP, ROPP-BR 算法。DLBSPP 算法保护资源充分共享, 所以平均可靠性最低。

图 7 显示了 4 种算法在两种网络环境中不同负载下频谱资源利用率的变化情况, 本文所提的 ROPP-BR 算法获得了较高的频谱资源利用率, 主要原因是本文算法采用了面向可靠性的概率保护方法, 能够服务更多业务, 且在业务被阻塞时进行保护重置, 减少了频谱碎片, 提高了频谱资源利用率。而 MFSB, SASP 算法为了确保业务的可靠性而选择故障概率低的路径, 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。DLBSPP 算法在选路时考虑了负载均衡, 且保护资源充分共享, 因此频谱利用率最高。

图 8 显示了 4 种算法在两种网络境中工作与保护资源比的变化情况, 本文所提的 ROPP-BR 算法获得了最大的工作与保护资源比, 即获得了最小的保护资源冗余度。主要原因是本文算法采用了可靠性为导向的概率保护策略, 且在业务被阻塞时进行保护重置, 因此工作与保护资源比最大。DLBSPP 算法尽最大能力共享保护资源, 工作与保护资源比略低于 ROPP-BR 算法。MFSB 选择消耗空闲频隙最小的保护路径, 减少了保护资源消耗, 所以工作与保护资源比高于 SASP 算法。

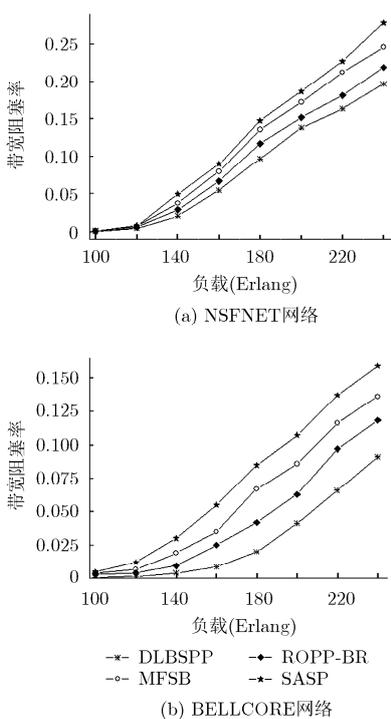


图 5 不同负载下带宽阻塞率的对比

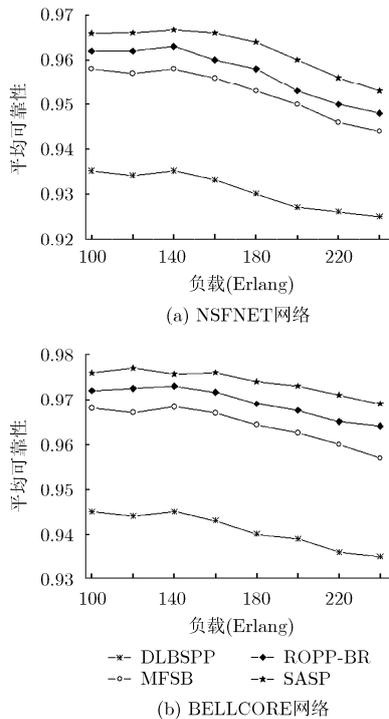


图 6 不同负载下业务平均可靠性的对比

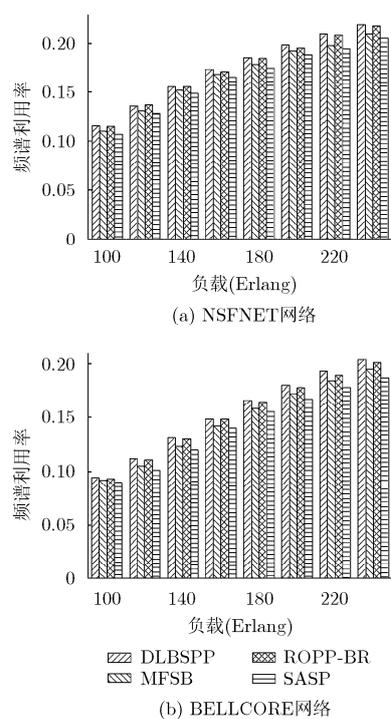


图 7 不同负载下频谱资源利用率的对比

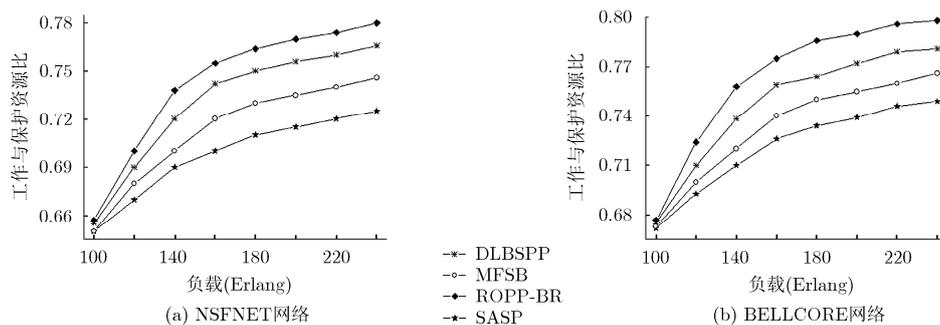


图8 不同负载下工作与保护资源比的对比

## 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,提出了面向可靠性的多链路故障概率保护与保护资源重配置(ROPP-BR)策略。建立了可靠性评估理论模型,设计了面向可靠性的概率保护机制,确保了业务的可靠传输。并通过基于极大团的保护资源重配置方法动态地调整保护资源,降低保护资源的冗余度,提高了频谱利用率。本文所提算法不仅有效地降低了带宽阻塞率和保护资源冗余度,还避免了业务可靠性性能的恶化,实现了阻塞率与可靠性的平衡,同时提高了光网络中日趋紧张的频谱资源利用率。万物互联是大势所趋,本文的研究结论对降低保护开销,提高光网络的可靠性和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] 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.
- [2] 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.
- [3] CHEN Xin, LI Juhao, ZHU Paikun, et al. Fragmentation-aware routing and spectrum allocation scheme based on distribution of traffic bandwidth in elastic optical networks[J]. *Journal of Optical Communications & Networking*, 2015, 7(11): 1064-1074. doi: 10.1364/JOCN.7.001064.
- [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] NOGBOU G A, MICHEL B, AHMED D, et al. An efficient hybrid protection scheme with shared/dedicated backup paths on elastic optical networks[J]. *Digital Communications and Networks*, 2017, 3(1): 11-18. doi: 10.1016/j.dcan.2016.05.001.
- [6] 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.
- [7] 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: 49-62. doi: 10.1016/j.osn.2014.01.001.
- [8] 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.
- [9] SAVAS S S, MA Chen, TORNATORE M, et al. Backup reprovisioning with partial protection for disaster-survivable software-defined optical networks[J]. *Photonic Network Communications*, 2016, 31(2): 186-195. doi: 10.1007/s11107-015-0563-6.
- [10] 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.
- [11] ZHAO Yongli, LIU Jinyan, ZHANG Jie, et al. Differentiated quality-of-protection provisioning with probabilistic-shared risk link group in survivable flexi-grid optical networks[J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(6): 167-174. doi: 10.1117/1.OE.53.6.066111.

刘焕淋: 女, 1970年生, 教授, 研究方向为光通信技术与未来网络。

杜君丹: 女, 1993年生, 硕士生, 研究方向为弹性光网络路由和频谱资源分配。

易鹏飞: 男, 1991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。

张明佳: 男, 1992年生, 硕士生, 研究方向为光网络生存性。