

光传送网的生存技术

倪文达, 李青山, 李艳和, 张汉一, 周炳琨, 郑小平

(清华大学电子工程系清华信息科学与技术国家实验室(筹), 集成光电子国家重点实验室, 北京 100084)

摘 要: 生存技术作为光传送网体系演进中最为重要的组成部件, 受到学术界和工业界广泛而持久的关注. 论文回顾和总结光传送网生存技术的重要研究成果及若干最新进展, 内容包括: 光网络的连接恢复技术、可生存光网络的资源优化与服务质量、两层网络的连接恢复技术以及透明光网络的故障定位技术.

关键词: 光传送网; 网络生存技术; 资源优化; 服务质量; 共享路径保护; 两层网络; 故障定位

中图分类号: TN911.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2013)07-1395-11

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.07.024

Survivability in Optical Transport Networks

NI Wen-da, LI Qing-shan, LI Yan-he, ZHANG Han-yi, ZHOU Bing-kun, ZHENG Xiao-ping

(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Tsinghua National Laboratory for Information Science and Technology (TNList),

Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Survivability is widely regarded as one of the most critical components during the architecture migration of optical transport networks. This paper reviews the research achievements and the state-of-the-art progress in the field of optical network survivability, which includes connection recovery in optical networks, resource optimization and service quality in survivable optical networks, connection recovery in two-layer networks, and failure localization in transparent optical networks.

Key words: optical transport networks; network survivability; resource optimization; quality of service (QoS); shared path protection; two-layer networks; failure localization

1 引言

光网络凭借高速和大容量的优点成为通信不可替代的基础设施. 波分复用(WDM)技术的发明应用使得不同波长的光信号可由同一光纤承载, 极大地提升了单纤的传送容量. 目前, 具备单波长 40Gb/s 传输速率的传送设备已经商用, 而单波长传输速率的实验室水平已突破 100Gb/s.

传统骨干网具有复杂的多层结构, 如 IP over ATM over SDH over WDM. 为减少投资和运营成本, 骨干网正向 IP over WDM 的两层结构演进, IP 层的逻辑链路在光层以光路的形式存在. 与此同时, IETF 提出的广义多协议标签交换(GMPLS)体系允许多层之间拥有统一的控制平面, 进一步提高网络的资源使用效率.

光传输速率和传送容量的提升在缓解骨干网带宽压力的同时, 却对网络的生存能力提出了严峻挑战. 40Gb/s 的单波长传输速率可以支持 625000 路传统话音

业务或 500 路高质量 MPEG-2 数据业务的并行传送^[1], 若单纤支持 160 个波长, 那么单一光纤故障将导致 1 亿路话音业务或 8 万路 MPEG-2 数据业务中断, 波及成千万上亿的用户. 网络的生存能力是网络在发生故障时对受影响的业务提供持续传送服务的能力, 是网络实现无缝服务供给的重要组成部分, 也是评估网络服务质量的重要指标之一. 光网络生存能力的实现要求光层具有灵活的资源配置能力, 动态的连接建立、拆除和倒换能力, 以及实时的性能监测能力. 波长粒度光线路交换(OCS)技术的成熟以及自动交换光网络(ASON)体系结构的标准化为此提供了坚实的技术支撑^[2].

本文将回顾网络生存技术发展中的若干里程碑工作和思想并介绍若干最新研究进展. 我们将首先对光网络的生存技术进行概述(第二节), 进而对其中共享路径保护的研究现状进行详尽剖析(第三节), 之后我们从资源优化(第四节)和服务质量(第五节)这两个视角总结可生存光网络的研究进展. 在单层网络生存技术的基础

上,我们将对 IP over WDM 两层网络生存技术的实施方案及其优缺点进行简述(第六节),并重点讨论连接恢复在上层实施时所带来的路由新问题.最后,我们将讨论透明光网络所特有的故障定位问题(第七节).

2 光网络生存技术概述

网络生存技术研究的核心问题是当网络发生故障时,如何快速响应,为受影响的连接实施恢复(connection recovery),提供持续的传送服务.网络故障的起因有施工挖掘、自然灾害以及软硬件升级等,其中大部分故障的发生时刻是难以预测的.此外,故障的位置、类型和数量也是难以预知的.为简化连接恢复机制的设计难度,连接恢复机制的研究总是假设一定的业务模型和故障模型,研究如何对业务传送在提供服务质量的同时优化网络的资源利用,如图 1. 常见的故障模型有如下两种:

(1)网络在任意时刻只存在单个故障事件,下一故障事件在上一故障事件被清除后才会发生,则当每个故障事件均为单条链路故障时称为单链路故障模型,均为两条链路故障时称为同时双链路故障模型,均为单个节点故障时称为单节点故障模型.故障事件中所有可能发生的故障场景可用矩阵描述^[3],并用共享风险链路组(SRLG)的概念加以概括^[4].

(2)网络在任意时刻最多存在两个故障事件,下一故障事件可能在上一故障事件尚未清除时发生,则当每个故障事件均为单条链路故障时称为序贯双链路故障模型.



图1 连接恢复机制的设计

2.1 业务模型

在 IP over WDM 两层网络中,服务请求可能来自 IP 层也可能来自光层^[5,6].随着新业务的不断涌现,不同业务模型被提出,总结如下:

(1)静态业务^[3]:静态业务的业务持续时间在数月以上.静态业务往往可以准确预测,并用业务矩阵对全网的业务请求进行描述.

(2)半动态业务^[7]:半动态业务的业务到达时刻和持续时间均不可知,业务持续时间在数天至数周之间.

(3)预约业务^[8]:预约业务的业务到达时刻和持续时间已知,业务持续时间在数小时至数天之间.

(4)滑动预约业务^[9]:滑动预约业务的业务持续时间已知且固定,业务持续时间在数小时至数天之间,但业务的开始时刻较为灵活,可在一定时间范围内选取.

(5)动态业务^[10]:动态业务的业务到达时刻和持续时间均不可知,业务持续时间在数秒至数分钟之间.

(6)保持时间可感知的动态业务^[11]:保持时间可感知的动态业务业务到达时刻不可知,但业务持续时间在连接请求到来时可知.

业务模型动态特性的不同使得相应网络问题的决策时间要求不同,根据决策时间的长短,可将网络问题分为网络规划、网络工程和流量工程^[12].各业务模型所归属的网络问题如图 2 所示.



图2 业务模型与网络问题

2.2 服务质量

随着电信市场的繁荣,网络运营商之间的竞争日益激烈,这就要求运营商在提供传送服务的同时,关注不同带宽应用对服务质量的不同需求,从而在竞争中赢得更多的用户.服务等级协定是运营商和用户之间的合约,规定了运营商在提供带宽服务时所需满足的服务质量以及服务质量未满足时所需支付的赔偿.

对于波长服务,常见的服务质量度量有^[6]:连接请求阻塞率、连接建立时间、连接恢复时间、连接可用率以及误码率.

连接建立时间是连接从提交请求到完成建立所经历的时间.

连接恢复时间是连接从中断到恢复所经过的时间.语音业务的连接恢复时间要求在 50ms 以内.

连接可用率(connection availability)即是通常所说的“4个9”、“5个9”等.连接可用率是一个稳态概率值.稳态可用率的定义为系统在未来任意时刻处于正常运行态的概率^[13].设某系统具有 G 和 B 两个状态, G 状态为正常运行态, B 状态为宕机态,系统的连接到达间隔和故障修复时间满足负指数分布,平均故障率和平均修复率分别为 λ 和 μ ,则系统的状态转移图由图 3 描述.令 G 状态的稳态概率为 π_G , B 状态的稳态概率为 π_B ,根据状态转移图列出平衡方程可得系统的可用率为

$$A = \pi_G = \frac{\mu}{\mu + \lambda} = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \quad (1)$$

其中, $MTTF = 1/\lambda$ 为平均故障时间, $MTTR = 1/\mu$ 为平均修复时间.系统的不可用率为

$$U = \pi_B = 1 - A \quad (2)$$

由不可用率 U ,可以预测系统在运行时间 T 内的宕机时间为

$$t_D = U \cdot T \quad (3)$$

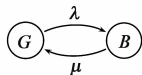


图3 二状态系统的状态转移图

表1给出了可用率、不可用率以及宕机时间的若干典型值. 当把一个连接看作一个系统时, 该系统可由一条路径组成, 也可由多条路径组成(考虑连接的生存性时).

表1 可用率、不可用率以及宕机时间的若干典型值

可用率(%)	不可用率(%)	宕机时间(min/yr)
99.9	0.1	526
99.99	0.01	52.6
99.999	0.001	5.26

对于 IP 服务, 常见的服务质量度量有^[6]: 延时、丢包率以及抖动.

2.3 连接恢复机制

连接恢复机制分为保护(protection)和重路由(restoration)两类. 保护机制是在连接建立时, 预留故障恢复所需的备用资源, 当故障发生时, 激活预留的备用资源实施连接恢复. 重路由机制则是在故障发生后根据网络当时的状况为受损实体动态地计算并建立迂回路. 根据迂回路路由的始末点, 保护和重路由机制的恢复对象可分别为链路、段和路径. 根据预留的备用资源的使用方式, 保护机制又可分为专用保护和共享保护. 表2给出了常见的保护机制. 常见的重路由机制有链路重路由和路径重路由. 在连接恢复中, 服务质量和资源利用是一对矛盾, 不同的连接恢复机制其实质是从不同程度上对两者进行折衷. 专用路径保护和路径重路由是目前设备商广泛采用的连接恢复机制.

表2 常见的保护机制

	链路	段	路径
专用			专用路径保护 ^[14]
共享	共享链路保护 ^[14] 预置环(p-cycle) ^[16]	共享段保护 ^[15]	共享路径保护 ^[14]

2.4 故障管理流程

故障管理是一个以连接恢复为核心的系统工程, 还包括故障监测、故障定位、故障通告、故障修复等环节, 其运作流程如图4所示. 故障监测负责监测网络中是否存在故障. 在智能光网络中, 可以通过传送平面配置光性能监测器^[17,18]的硬件方法实施, 也可利用控制平面链路管理协议 HELLO 消息的交互实施软件监测, 软件监测的响应速度比较慢. 故障定位通过故障监测阶段产生的告警信号确定网络中发生故障的链路. 故障信息通过故障通告传递至相关节点触发连接恢复,

与此同时, 故障信息也将传递给网络维护人员启动故障修复. 当故障修复后, 往往会将网络还原至故障发生前的状态, 该操作称为返回^[19]. 对于路径保护机制, 由于宿节点可以直接监测工作路径的传输质量, 因此, 当工作路径发生故障时, 宿节点可以立即感知并激活预先计算好(对于共享路径保护)或预先配置好(对于专用路径保护)的备用路径. 备用路径的激活无需等待故障的位置信息, 从而加快了连接恢复的响应速度, 这一优点在故障定位速度较慢的透明光网络中尤为显著^[18]. 路径保护机制下的故障管理流程如图5所示.

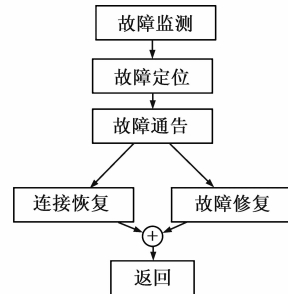


图4 故障管理的一般流程(除路径保护机制外)

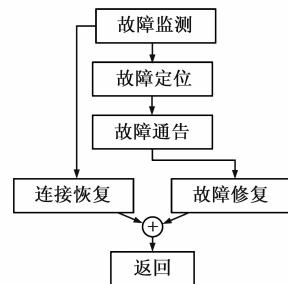


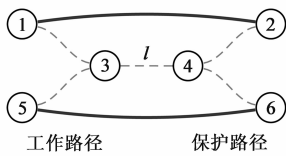
图5 路径保护的故障管理流程

3 共享路径保护

共享路径保护以其资源效率高的优点受到青睐, 并被认为是最有商用化前景的保护机制. 共享路径保护的基本思想是备用容量共享, 即当连接的工作路径链路不相交时, 连接的保护路径在其公共链路上共享备用容量. 例如, 图6中节点1、2之间的工作路径与节点5、6之间的工作路径链路不相交, 而其保护路径均穿过节点3、4之间的链路 l , 那么链路 l 上的备用容量可被两条保护路径分享, 从而减少了链路 l 上所需预留的备用容量. 注意, 上述备用容量共享基于单链路故障假设, 即两条工作路径不同时受故障中断. 此外, 故障发生后节点的配置状态(如图6中的节点3、4)与哪条保护路径被激活相关, 因此, 不能在故障发生前对节点进行预配置, 这就导致了共享路径保护的连接恢复时间要大于专用路径保护.

3.1 共享路径保护的信息结构

备用容量共享信息的捕捉需要引入复杂的数据结

图6 链路 l 上的备用容量共享

构.一种数据结构是捕捉基于每个连接的备用容量共享信息^[4,20~23],即每个连接 r 维护一个备用容量共享组 g_r ,记录与连接 r 的保护路径存在备用容量共享的网络连接.另一种数据结构是捕捉聚合的备用容量共享信息^[3,10,11,24~27],即只维护用以计算链路上所需预留备用容量数量的必要信息,但不指定连接间的备用容量共享关系,所预留备用容量的数量满足任意单链路故障发生时的备用容量激活需要.第二种数据结构更为灵活,所需维护的信息量小,因而被广泛采纳.

聚合的备用容量共享信息可以用矩阵描述^[3,24].设网络的链路组成集合 \mathcal{L} ,链路编号为1至 $|\mathcal{L}|$.令 $\mathbf{C} = \{c_{ij}\}_{|\mathcal{L}| \times |\mathcal{L}|}$ 为 $|\mathcal{L}| \times |\mathcal{L}|$ 矩阵,元素 c_{ij} ($i \neq j$)表示当链路 j 故障时链路 i 上激活的备用容量,元素 $c_{ii} = 0$.令 $\mathbf{s} = \{s_i\}_{|\mathcal{L}| \times 1}$ 为 $|\mathcal{L}| \times 1$ 列向量,元素 s_i 表示链路 i 上预留的备用容量,则

$$s_i = \max_{j \in \mathcal{L}} \{c_{ij}\}, \quad \forall i \in \mathcal{L} \quad (4)$$

矩阵 \mathbf{C} 即维护聚合的备用容量共享信息.

矩阵 \mathbf{C} 可由连接的工作路径和保护路径信息导出.设网络中的所有连接组成集合 \mathcal{D} ,连接编号为1至 $|\mathcal{D}|$.连接 r 的工作路径和保护路径分别用 $1 \times |\mathcal{L}|$ 二进制行向量 $\mathbf{a}_r = \{a_{rl}\}_{1 \times |\mathcal{L}|}$ 和 $\mathbf{b}_r = \{b_{rl}\}_{1 \times |\mathcal{L}|}$ 表示,当路径穿过链路 l 时,相应向量的第 l 个元素取值为1;否则,取值为0.显然, a_{rl} 与 b_{rl} 之间满足 $a_{rl} + b_{rl} \leq 1, \forall r \in \mathcal{D}, l \in \mathcal{L}$.设网络具有全波长转换能力,每个连接的带宽为一个波长,则元素 c_{ij} 可由 a_{rj} 与 b_{ri} 经如下公式得到

$$c_{ij} = \sum_{r \in \mathcal{D}} \{b_{ri} \cdot a_{rj}\}, \quad \forall i, j \in \mathcal{L} \quad (5)$$

写成矩阵形式为

$$\mathbf{C} = \sum_{r \in \mathcal{D}} \mathbf{b}_r^T \cdot \mathbf{a}_r \quad (6)$$

式(6)表明,矩阵 \mathbf{C} 可由单个连接的路由信息汇聚而成,每个连接 r 对矩阵 \mathbf{C} 的贡献各自独立,为 $\mathbf{C}^r = \mathbf{b}_r^T \mathbf{a}_r$.这一特性使得当网络有连接建立或拆除事件发生时,备用容量共享信息的更新只与建立或拆除的连接相关,而与其他连接无关,这对于动态业务下共享路径保护的算法设计至关重要.

3.2 共享路径保护的路由建模

表3从业务模型、故障模型、网络波长转换能力以及寻路方式四个方面对文献中共享路径保护的路由建模进行了总结,所建路由模型均为整数线性规划模型.由寻路方式的不同,可将路由模型分为两类,一类称为

节点链路模型^[28](或称为弧度流模型^[29]),另一类称为链路路径模型^[28](或称为路径流模型^[29]).节点链路模型通过流守恒约束寻找源宿节点间的路由.链路路径模型则是为源宿节点预计算一组候选路径,源宿节点间的路由从预计算的路径集合中选取.节点链路模型主要适用于有向图,对同一路由问题,其约束条件往往多于链路路径模型.链路路径模型对于有向图和无向图均适用,但解空间由候选路径集合决定,当集合的规模扩大时,解空间的大小随之指数上升,因而,在适当的路径集合规模下,链路路径模型解的质量依赖于候选路径的选取,所得最优解往往不能保证其全局最优性.文献[10]证明了共享路径保护的路由优化为NP完全问题.对于NP完全问题,整数线性规划方法适用于中小规模网络的离线计算,随着网络规模的扩大和业务动态性的增强,整数线性规划方法往往不能在多项式时间内求得最优解甚至是可行解,因而不具有可扩展性.对于大规模网络的动态路由问题,需要采用快速的启发式算法.

表3 共享路径保护的路由建模

研究工作	业务模型	故障模型	波长转换能力	寻路方式
M Kodialam, et al. [30]	动态业务	单链路	全波长转换	节点链路
Y Xiong, et al. [31]	动态业务	单链路	全波长转换	节点链路
B Doshi, et al. [32]	静态业务	单链路 单节点	全波长转换	节点链路
Y Liu, et al. [3]	静态业务	单链路 单节点	全波长转换	节点链路
Y Liu, et al. [24]	静态业务	单链路	全波长转换	链路路径
S Ramamurthy, et al. [14]	静态业务	单链路	波长连续	链路路径
M Sridharan, et al. [33]	静态业务	单链路	波长连续	链路路径
H Zang, et al. [34]	静态业务	光纤管道	波长连续	节点链路
L Shen, et al. [35]	静态业务	共享风险 链路组	波长连续	节点链路
T Li, et al. [36]	预约业务	单链路	全波长转换	链路路径
A Jaekel, et al. [37]	滑动 预约业务	单链路	全波长转换	链路路径

3.3 共享路径保护的算法

图7给出了共享路径保护路由算法的研究进展,算法针对聚合的备用容量共享信息.文献[24]首先提出了两步的生存路由算法:第一步计算连接的工作路径 p ,第二步计算连接的保护路径 q .两步路径计算均采用最短路算法,在计算保护路径时通过链路费用的设计最大化备用容量共享.生存路由算法对于静态和动态业务均适用,当处理静态业务时,对业务矩阵的连接请求

按某一随机顺序依次调用生存路由算法.对业务矩阵

中所有连接请求的一次路由计算为一个循环.

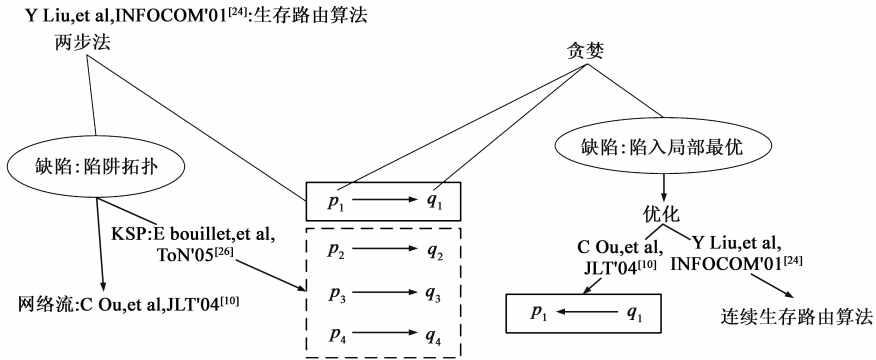


图7 共享路径保护路由算法的研究进展

生存路由算法存在两个缺陷.首先,两步方法的运用将导致陷阱拓扑^[10,35]下路由计算失败.例如,图8的二连通网络^[13]中,节点1、4之间工作路径的最短路路由阻塞了所有可能的链路不相交的保护路径,而事实上,在二连通网络中,任意节点对之间至少存在两条链路不相交的路径^[38].对此,文献^[26]提出为工作路径计算 K 条最短路.文献^[10]则提出当保护路径不存在时,定义源宿节点间的割,通过调整割中回程链路的费用,在重新计算工作路径时,避免回程链路的使用,使得保护路径得以存在.

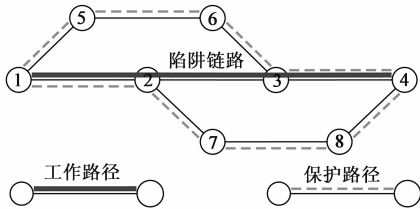


图8 陷阱拓扑

其次,生存路由算法运用了贪婪的思想,即通过每一步的局部最优来逼近全局最优,而事实上,这可能导致路由陷入局部最优,全局最优解无法达到.为此,文献^[10]提出对路径对 (p, q) 进行优化:先固定保护路径 q ,优化工作路径为 p' ,再固定工作路径 p' ,优化保护路径为 q' ,若 (p', q') 的总费用小于 (p, q) ,则选择 (p', q') 为新的路由解.另外,对于静态业务,文献^[24]在生存路由算法单次循环的基础上引入附加循环,在附加循环中若发现某一连接保护路径的调整可减少链路上所需预留的备用容量,则对该保护路径进行更新.引入附加循环的生存路由算法称为连续生存路由算法,其收敛速度快,与单次循环的生存路由算法相比可减少 2% ~ 6% 的备用容量消耗^[24,26].该算法所蕴含的通过保护路径调整进一步降低网络备用容量消耗的思想被文献^[26]提炼为备用路径再优化.

美国讯远通信和迅桐网络已在其传送设备中实现

了共享路径保护^[5].共享路径保护的标准化研究也已在 ITU-T 开展^[39].

4 可生存光网络的资源优化

共享路径保护本质上是资源优化的角度对链路容量资源进行共享.沿着这一思路,文献^[40,41]提出在半透明光网络中对节点处稀疏分布的用于信号再生和波长转换的光电光(OEO)转换资源实施共享.当连接的工作路径链路不相交时,连接的保护路径可共享节点处的 OEO 资源,如图9的场景一.此外,同一连接的工作路径和保护路径之间也可共享 OEO 资源,如图9的场景二.

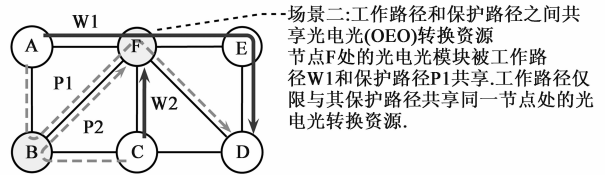


图9 半透明光网络中的资源共享

除了从空间上优化网络的资源使用外,现有文献还从业务模型的时间特性出发,最大化网络资源的时间使用效率.对于动态和半动态业务,由于连接请求随机到达,每一次连接请求的路由计算总是基于请求到来时刻的网络状态,最小化所需额外消耗的网络资源.这种对于每一连接请求满足局部最优的路由方案从网络所有连接的整体资源消耗看往往不是全局最优的.此外,拓扑变化、链路扩容等网络状态的更新都会使现行路由方案变为次优.为此,文献^[26]提出在动态和半动态业务下通过路径再优化将网络暂时拉回最佳路由状态,路径再优化的时间点可以是周期的也可由某些网络事件触发.路径再优化的主要效果可由仅调整保护路径达到,其好处是不会对正在服务的工作路径产

生中断.文献[7]对动态和半动态业务下事件触发的备用路径再优化进行了研究.

对于保持时间可感知的动态业务,文献[11]提出利用连接请求的保持时间信息为新到来请求的保护路径尽可能地选择备用容量共享时间较长的链路.其基本思想由图 10 的例子说明.连接 r_1 和 r_2 在 $t_a^1 = t_a^2 = 0$ 时刻到达,持续时间分别为 $t_h^1 = 30$ 和 $t_h^2 = 20$,其工作路径和保护路径如图 10 所示.连接请求 r_3 在 $t_a^3 = 10$ 时刻到达,持续时间为 $t_h^3 = 30$.连接 r_3 可选择保护路径为 E-C-D-F 与连接 r_1 共享链路 C-D 上的备用容量,也可选择保护路径为 E-G-H-F 与连接 r_2 共享链路 G-H 上的备用容量.考虑到 $t_a^3 = 10$ 时刻连接 r_1 的剩余持续时间 $h_1 = 20$ 大于连接 r_2 ($h_2 = 10$),则选择前一路径 E-C-D-F 可使 r_3 保护路径链路上备用容量共享的时间更长,从而从时间上提高资源的共享度.

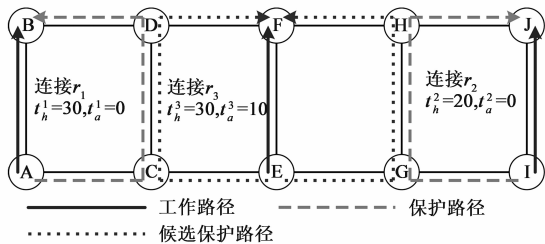


图 10 利用保持时间可感知动态连接请求的持续时间信息提高备用容量的共享度

对于预约业务,文献[36]提出利用业务的到达时刻和持续时间信息使网络容量资源在时间上不相交的预约连接之间复用,但保护路径在其持续时间内固定不变.为此,文献[42]提出在预约连接的持续时间内通过周期性的备用路径再优化降低网络的平均备用容量消耗,平均备用容量的节省可大于 9%.

图 11 对可生存光网络资源优化的研究进展进行了总结.

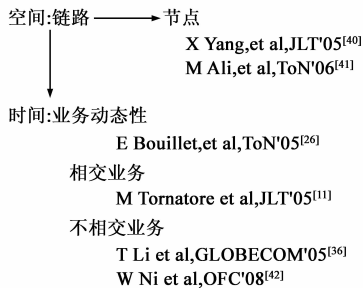


图 11 可生存光网络资源优化的研究进展

5 可生存光网络的服务质量

5.1 多链路故障下的连接恢复机制

连接的服务质量是资源优化外可生存光网络的另一研究视角.在实际网络中,多链路故障的发生在所难

免.当多链路故障发生时,针对单链路故障设计的连接恢复机制将无法抵御多链路故障的影响,连接将可能中断.因此,在连接恢复机制的设计中需要考虑如何提高多链路故障下连接的生存能力,这对于生存能力要求高的传送服务至关重要^[6].

对于提供一条备用路径的保护机制,当一个链路故障发生在工作路径上,另一链路故障发生在保护路径上时,连接将无法得到恢复.为此,文献[27]提出在每次故障的连接恢复后为工作路径重新计算保护路径并预留备用容量.该机制称为备用路径再指配*.专用路径保护下的备用路径再指配已有商用实现,被称为永久 1+1.

此外,共享路径保护的资源效率使得连接在第一个故障未受影响第二个故障发生在工作路径上的情况下,可能由于保护路径上某些链路的剩余备用容量不足,无法激活保护路径而中断.例如,图 12(a)中,当第一个故障发生在链路 A-B 上时,链路 A-C 上预留的一个单位的备用容量将被保护路径 A-C-B 激活.此时,当第二个故障发生在链路 C-D 上时,节点 C、D 间的连接将由于链路 A-C 上一个单位的备用容量已被激活而无法得到恢复.为此,文献[25]提出通过在链路上预留更多的备用容量消除上述情况的发生.例如,在图 12(b)的链路 A-C 上预留两个单位的备用容量可使因链路 A-C 上预留的备用容量不足而无法对连接实施恢复的情况得以消除.此时,与专用路径保护相比,链路 A-C 上仍可节省两个单位的备用容量.注意,此处假设序贯双链路故障.

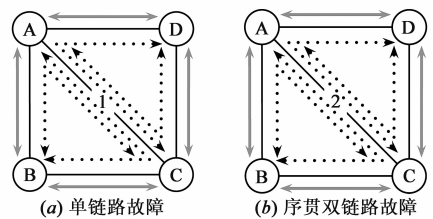


图 12 不同故障模型下的共享路径保护,实线表示工作路径,虚线表示保护路径

5.2 连接可用率分析

连接可用率是衡量可生存网络服务质量的重要指标,在服务等级协定中标定^[5].通常,连接恢复机制是针对单链路故障设计的,连接可用率则是对连接恢复机制在多链路故障场景下生存能力的评估.

可用率的计算有组合分析和状态空间分析两种方法^[43].组合分析法中较常见的是利用可靠方框图将系统表示为若干串联框图和并联框图的组合,在各框图

* 本文把网络在无故障阶段的保护路径调整称为备用路径再优化,在故障状态下的保护路径调整称为备用路径再指配.

相互独立的假设下,利用串并联结构的可用率计算公式可以很方便地求出系统的可用率.对于图 13 中 N 个独立部件组成的串联系统,若部件 i 的可用率为 A_i ,不可用率为 $U_i = 1 - A_i \ll 1$,则串联系统的可用率为

$$A_s = \prod_{i=1}^N A_i = \prod_{i=1}^N (1 - U_i) \approx 1 - \sum_{i=1}^N U_i \quad (7)$$

不可用率为

$$U_s = 1 - A_s \approx \sum_{i=1}^N U_i \quad (8)$$

对于图 14 中 N 个独立部件组成的并联系统,若部件 i 的不可用率为 $U_i = 1 - A_i$,则并联系统的不可用率为

$$U_p = \prod_{i=1}^N U_i \quad (9)$$

然而,许多系统无法用串并联结构及其组合表征^[1,43].

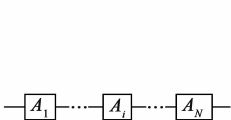


图13 串联系统

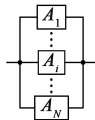


图14 并联系统

状态空间分析法是将系统建模为连续时间马尔可夫链,由状态转移图导出平衡方程,求出系统在各状态的稳态概率,而系统的不可用率即为系统宕机态概率的叠加.2.2 节中对二状态系统的可用率分析采用的即是状态空间分析法.与组合分析法相比,状态空间分析法对系统行为的刻画更为精确,但是以状态空间爆炸为代价.

共享路径保护下连接可用率分析的研究报导可参见表 4.

表 4 共享路径保护的连接可用率分析

分析 方法	备用容量共享信息	
	基于每个连接	聚合
组合	M Jaeger, et al, ECOC'04 ^[21] J Zhang, et al, ToN'07 ^[23]	L Song, et al, JSAC'07 ^[44]
状态 空间	D A A Mello, et al, CL'05 ^[22]	L Zhou, et al, JLT'07 ^[45]

5.3 区分服务

基于各种连接恢复机制表现出的服务质量特性的不同,区分服务的概念应运而生.通过满足不同用户对传送服务不同的生存要求,运营商可以从他们的投资中获得更多的回报.

可生存光网络的区分服务主要有两种实现架构:一种^[35,46]是运营商以连接恢复机制定义服务等级,用户根据带宽应用的特点选择适宜的服务等级,进而选择了相应的连接恢复机制.这一类区分服务的实现方式被称为结构型区分^[47].表 5 给出了专用路径保护和共享路径保护的定性比较,比较中性能较优的一方用

“√”表示,较差的一方用“×”表示.资源冗余为全网所消耗的备用容量与所消耗的工作容量之比,资源冗余越低则网络的带宽使用效率越高.另一种区分服务的实现架构^[23,44]是由用户提出可用率要求,运营商根据用户的可用率指标计算服务所需采用的连接恢复机制,如专用路径保护、共享路径保护或是无保护等.这一类实现方式被称为保证型区分^[47].关于可生存光网络区分服务的研究进展可参见文献^[47].

表 5 专用路径保护与共享路径保护的定性比较

	专用路径保护	共享路径保护
连接请求阻塞率	×	√
连接恢复时间	√	×
连接可用率	√	×
资源冗余	×	√

6 两层骨干网的生存技术

在 IP over WDM 两层网络中,生存技术的实施有如下三种方案^[48]:仅在光层实施、仅在 IP 层实施以及在两层同时实施.

对于在光层实施的方案,由于光层处理的是汇聚业务,因此恢复效率高.然而,光层实施方案无法恢复 IP 层发生的故障,如路由器故障等.

对于在 IP 层实施的方案,可以恢复来自 IP 层和光层两层的故障,并且故障恢复操作基于每一个 IP 层连接,因此可以实现连接间的区分服务.然而,由于 IP 层连接的带宽粒度细,在相同故障下,IP 层实施方案所需恢复的连接数多,因而所需的恢复操作也多.

对于在两层同时实施的方案,可以发挥各层连接恢复的优点,并通过层间协调机制协调各层有序地开展故障恢复.层间协调机制决定当网络发生故障时,首先在哪一层触发连接恢复,当当前层的连接恢复失败后,如何适时地将责任交接给另一层.根据连接恢复触发顺序的不同,层间协调机制可分为自底向上和自顶向下等.

关于两层网络连接恢复的研究进展可参见文献^[1,49].

如引言中所指出的,在 IP over WDM 两层网络中,每一条 IP 层逻辑链路在光层为一条光路,光路穿过若干物理链路.当连接恢复在 IP 层实施时,不仅需要保证 IP 层连接的工作路径和保护路径在逻辑拓扑上链路不相交,还需要保证其在光层所经过的物理链路不相交(考虑单链路故障模型).这是连接恢复在上层实施时所带来的新问题.一种解决思路,如文献^[50],是通过逻辑拓扑的动态增广(新建光路)来保证每一个 IP 层连接的工作路径和保护路径在物理拓扑上链路不相交.另

一种解决思路是将路由问题分解成两步.首先,对给定二连通逻辑拓扑设计其在光层的一组路由(即将每一条逻辑链路映射成一条光路)使得任意光层的单链路故障发生时逻辑拓扑仍然保持连通.这一拓扑布局问题被称为生存映射^[51].通过生存映射,可以保证逻辑拓扑中任意两节点间至少存在一对路径,其在光层所穿越的物理链路不相交.其次,在找到逻辑拓扑的生存映射后,即可在逻辑拓扑上对连接请求计算路由.文献[52]和[53]分别研究了其中共享路径保护的路由优化问题和链路重路由的容量设计问题.

7 透明光网络的故障定位技术

由图4的故障管理流程可以发现,连接恢复(路径保护机制除外)和故障修复依赖于故障位置信息.快速而准确的故障定位可以使连接恢复的激活时刻提前(路径保护机制除外),保障连接在给定时间内得以恢复,同时,还可降低故障修复的成本,缩短故障修复所需的时间^[17].在透明光网络中,光信号的传送在中间节点不经过电域处理,从而大大降低了数据传送的成本.然而,信号的透明性却给网络的性能监测带来了挑战,这其中包括故障的监测和定位.常见的解决方法是在传送平面配置光性能监测器,通过光信噪比等参数的监测,监测传送信号的质量,进而判断网络中是否存在故障.

传统的基于链路的性能监测可以准确地定位链路故障,但需要为每条链路配置一个性能监测器,投资成本高.为此,文献[54]提出将监测通道设计为环形,每一个环配备一个监测器,称为监测环.利用监测环定位链路故障(假设单链路故障模型)的基本思想是,为网络设计一组监测环,使得每一条链路所承载的环的集合非空且唯一,则每一条链路对应唯一的故障告警状态,从而由告警信息可以确定发生故障的链路.故障告警状态可以用二进制告警码表示,每一个监测环对应其中一位,此外,还可将二进制告警码转换成十进制,便于我们辨识告警码的唯一性.表6给出了图15中链路的告警码.其中,链路(2,5)和链路(3,5)使用了相同的告警码,其十进制告警码均为2,这就意味着当网络故障的十进制告警码显示为2时,将只能确定故障发生在链路(2,5)或链路(3,5)上,而无法进一步细化故障的位置.观察链路(2,5)和(3,5)在拓扑中的位置可以发现,在2-5-3这一路径上,中间节点5的度为2,则当任意环穿过链路(2,5)时将必然穿过链路(3,5).拓扑中某一路径上所有中间节点度均为2的结构称为链^[55].采用监测环将无法对同一链上链路的故障进行区分,存在故障位置不确定现象的故障定位称为含糊的故障定位^[56].为解决监测环在二连通拓扑中存在的故障定位

含糊问题,文献[57]提出了监测环和监测路相结合的故障定位方法,并证明该方法可以准确定位任意连通网络的单链路故障.文献[56]则将环和路的结构整合提出了监测轨的监测通道结构.具体而言,监测轨是在监测路的基础上允许任意节点处存在闭环,如图16所示.监测环和监测路均是特殊的监测轨.

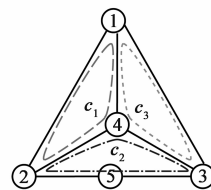


图15 监测环

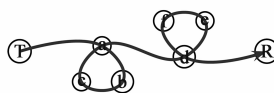


图16 监测轨

表6 图15中链路的告警码

链路	二进制告警码			十进制告警码
	c_3	c_2	c_1	
(1,2)	0	0	1	1
(1,3)	1	0	0	4
(1,4)	1	0	1	5
(2,4)	0	1	1	3
(2,5)	0	1	0	2
(3,4)	1	1	0	6
(3,5)	0	1	0	2

此外,考虑到光路的宿节点可以直接监测整条路径的光信号质量,文献[58]提出并研究了基于光路的故障监测和定位问题.当采用基于光路的故障监测和定位时可免去光性能监测器的配置.在IP over透明光网络的场景中,每一条光路在IP层为一条逻辑链路,若连接恢复在上层实施,则必须保证单物理链路故障下逻辑拓扑的连通性,即满足生存映射.为此,文献[59]提出在设计逻辑拓扑的生存映射时,最大化生存映射光路的物理层故障定位能力.在新设计方法下,生存映射光路实现了准确或近乎准确的故障定位,但故障定位能力的最大化是以光路长度的增加为代价.

8 总结

生存技术是光传送网最为重要的使能技术之一.本文对光传送网生存技术的研究现状和最新进展进行了回顾和总结.在概述光网络生存技术的基础上,全面总结了共享路径保护的研究成果,并从资源优化和服务质量这一对矛盾视角对可生存光网络的研究进展进

行了归纳.接着,论文介绍了两层网络连接恢复的三种实施方案,并对三种方案的优缺点做了定性的分析和比较.最后,论文讨论了透明光网络的故障定位技术.

参考文献

- [1] P Cholda, A Jajszczyk. Recovery and its quality in multilayer networks [J]. *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(4): 372 – 389.
- [2] 纪越峰,王宏祥.先进光网络支撑技术与研究进展[J]. *电子学报*, 2004, 32(12A): 11 – 15.
Ji Yue-feng, Wang Hong-xiang. Review of advanced optical network and its supporting technologies [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2004, 32(12A): 11 – 15. (in Chinese)
- [3] Y Liu, D Tipper, P Siripongwutikorn. Approximating optimal spare capacity allocation by successive survivable routing [J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2005, 13(1): 198 – 211.
- [4] 虞红芳,王晟,李乐民.网状 WDM 网中的共享通路保护设计算法[J]. *电子学报*, 2004, 32(4): 635 – 638.
Yu Hong-fang, Wang Sheng, Li Le-min. Shared-path protection design algorithm for meshed WDM network [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2004, 32(4): 635 – 638. (in Chinese)
- [5] R Doverspike, B Cortez. Restoration in carrier networks [A]. *Proceedings of DRCN [C]*. Washington, DC: IEEE, 2009. 45 – 54.
- [6] A L Chiu, et al. Network design and architectures for highly dynamic next-generation IP-over-optical long distance networks [J]. *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(12): 1878 – 1890.
- [7] L Song, J Zhang, B Mukherjee. A comprehensive study on backup-bandwidth reprovisioning after network-state updates in survivable telecom mesh networks [J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2008, 16(6): 1366 – 1377.
- [8] J Kuri, N Puech, M Gagnaire, E Dotaro, R Douville. Routing and wavelength assignment of scheduled lightpath demands [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2003, 21(8): 1231 – 1240.
- [9] B Wang, A Deshmukh. An all hops optimal algorithm for dynamic routing of sliding scheduled traffic demands [J]. *IEEE Communications Letters*, 2005, 9(10): 936 – 938.
- [10] C Ou, J Zhang, H Zhang, L Sahasrabudde, B Mukherjee. New and improved approaches for shared path protection in WDM mesh networks [J]. *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, 2004, 22(5): 1223 – 1332.
- [11] M Tornatore, C Ou, J Zhang, A Pattavina, B Mukherjee. PHO-TO: an efficient shared-path protection strategy based on connection-holding-time awareness [J]. *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, 2005, 23(10): 3138 – 3146.
- [12] B Mukherjee. *Optical WDM Networks [M]*. Springer, 2006.
- [13] W D Grover. *Mesh-Based Survivable Networks: Options and Strategies for Optical, MPLS, SONET, and ATM Networking [M]*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall PTR, 2004.
- [14] S Ramamurthy, L Sahasrabudde, B Mukherjee. Survivable WDM mesh networks [J]. *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, 2003, 21(4): 870 – 883.
- [15] D Xu, Y Xiong, C Qiao. Novel algorithms for shared segment protection [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2003, 21(8): 1320 – 1331.
- [16] W D Grover, D Stamatelakis. Cycle-oriented distributed pre-configuration: ring-like speed with mesh-like capacity for self-planning network restoration [A]. *Proceedings of ICC [C]*. Atlanta, GA: IEEE, 1998. 537 – 543.
- [17] A Ferguson, B O' Sullivan, D C Kilper. Transparent path length optimized optical monitor placement in transparent mesh networks [A]. *Proceedings of OFC/NFOEC [C]*. San Diego, CA: IEEE/OSA, 2008. 1 – 3.
- [18] A A M Saleh, J M Simmons. All-optical networking—evolution, benefits, challenges, and future vision [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2012, 100(5): 1105 – 1117.
- [19] W Ni, E Patzak, M Schlosser, Y Ye, H Zhang. On operating shared-path-protected WDM networks non-revertively by using backup path reprovisioning [A]. *Proceedings of OFC/NFOEC [C]*. San Diego, CA: IEEE/OSA, 2010. 1 – 3.
- [20] 王健全,张永健,顾婉仪. WDM 光网络中的共享通道保护方法[J]. *电子学报*, 2004, 32(5): 851 – 853.
Wang Jian-quan, Zhang Yong-jian, Gu wan-yi. Shared channel protection in all optical WDM networks [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2004, 32(5): 851 – 853. (in Chinese)
- [21] M Jaeger, R Huelsmann. Service availability of shared path protection in optical mesh networks [A]. *Proceedings of E-COC [C]*. Stockholm: IEEE, 2004. 154 – 157.
- [22] D A A Mello, D A Schupke, H Waldman. A matrix-based analytical approach to connection unavailability estimation in shared backup path protection [J]. *IEEE Communications Letters*, 2005, 9(9): 844 – 846.
- [23] J Zhang, K Zhu, H Zang, N S Matloff, B Mukherjee. Availability-aware provisioning strategies for differentiated protection services in wavelength-convertible WDM mesh networks [J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2007, 15(5): 1177 – 1190.
- [24] Y Liu, D Tipper, P Siripongwutikorn. Approximating optimal spare capacity allocation by successive survivable routing [A]. *Proceedings of INFOCOM [C]*. Anchorage, AL: IEEE, 2001. 699 – 708.
- [25] D A Schupke, R G Prinz. Capacity efficiency and restorability of path protection and rerouting in WDM networks subject to dual failures [J]. *Springer Photonic Network Communica-*

- tions, 2004, 8(2): 191 – 207.
- [26] E Bouillett, J F Labourdette, R Ramamurthy, S Chaudhuri. Lightpath re-optimization in mesh optical networks [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2005, 13(2): 437 – 447.
- [27] J Zhang, K Zhu, B Mukherjee. Backup reprovisioning to remedy the effect of multiple link failures in WDM mesh networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Supplement on Optical Communications and Networking, 2006, 24(8): 57 – 67.
- [28] M Pióro, D Medhi. Routing, Flow, and Capacity Design in Communication and Computer Networks [M]. Amsterdam, NL: Elsevier/Morgan Kaufmann, 2004.
- [29] R K Ahuja, T L Magnanti, J B Orlin. Network Flows: Theory, Algorithms and Applications [M]. New York: Prentice Hall, 1993.
- [30] M Kodialam, T V Lakshman. Dynamic routing of bandwidth guaranteed tunnels with restoration [A]. Proceedings of INFOCOM [C]. Tel Aviv, Israel: IEEE, 2000. 902 – 911.
- [31] Y Xiong, D Xu, C Qiao. Achieving fast and bandwidth-efficient shared-path protection [J]. IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, 2003, 21(2): 365 – 371.
- [32] B T Doshi, S Dravida, P Harshavardhana, O Hauser, Y Wang. Optical network design and restoration [J]. Bell Labs Technical Journal, 1999, 4(1): 58 – 84.
- [33] M Sridharan, M V Salapaka, A K Somani. A practical approach to operating survivable WDM networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2002, 20(1): 34 – 46.
- [34] H Zang, C Ou, B Mukherjee. Path-protection routing and wavelength assignment (RWA) in WDM mesh networks under duct-layer constraints [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2003, 11(2): 248 – 258.
- [35] L Shen, X Yang, B Ramamurthy. Shared risk link group (SRLG)-diverse path provisioning under hybrid service level agreements in wavelength-routed optical mesh networks [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2005, 13(4): 918 – 931.
- [36] T Li, B Wang, C Xin, X Zhang. On survivable service provisioning in WDM optical networks under a scheduled traffic model [A]. Proceedings of GLOBECOM [C]. St Louis, MO: IEEE, 2005. 1900 – 1904.
- [37] A Jaekel. Lightpath scheduling and allocation under a flexible scheduled traffic model [A]. Proceedings of GLOBECOM [C]. San Francisco: IEEE, 2006. 1 – 5.
- [38] R Diestel. Graph Theory [M]. New York, NY: Springer, 3rd Edition, 2005.
- [39] Draft Recommendation ITU-T G. 808. 3. Generic Protection Switching-Shared Mesh Protection [S].
- [40] X Yang, L Shen, B Ramamurthy. Survivable lightpath provisioning in WDM mesh networks under shared path protection and signal quality constraints [J]. IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, 2005, 23(4): 1556 – 1567.
- [41] M Ali. Generalized sharing in survivable optical networks [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2006, 14(6): 1388 – 1399.
- [42] W Ni, M Schlosser, Q Li, Y Guo, H Zhang, X Zheng. Achieving optimal lightpath scheduling in survivable WDM mesh networks [A]. Proceedings of OFC/NFOEC [C]. San Diego, CA: IEEE/OSA, 2008. 1 – 3.
- [43] K S Trivedi. Availability Modeling [OL]. <http://amod.ee.duke.edu>, 2001-10-04/2010-01-29.
- [44] L Song, J Zhang, B Mukherjee. Dynamic provisioning with availability guarantee for differentiated services in survivable WDM mesh networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Supplement on Optical Communications and Networking, 2007, 25(4): 35 – 43.
- [45] L Zhou, M Held, U Sennhauser. Connection availability analysis of shared backup path-protected mesh networks [J]. IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, 2007, 25(5): 1111 – 1119.
- [46] S Dong, C Phillips, R Friskney. Differentiated-resilience provisioning for the wavelength-routed optical network [J]. IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(2): 667 – 673.
- [47] P Cholda, A Mykkeltveit, B E Helvik, O J Wittner, A Jajszczyk. A survey of resilience differentiation frameworks in communication networks [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2007, 9(4): 32 – 55.
- [48] J-P Vasseur, M Pickavet, P Demeester. Network Recovery: Protection and Restoration of Optical, SONET-SDH, IP and MPLS [M]. Morgan Kaufmann MKP, 2004.
- [49] M Pickavet, P Demeester, D Colle, D Staessens, B Puype, L Depré, I Lievens. Recovery in multilayer optical networks [J]. IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(1): 122 – 134.
- [50] C Ou, K Zhu, H Zang, L Sahasrabudde, B Mukherjee. Traffic grooming for survivable WDM networks-shared protection [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2003, 21(9): 1367 – 1383.
- [51] E Modiano, A Narula-Tam. Survivable lightpath routing: A new approach to the design of WDM-based networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2002, 20(4): 800 – 809.
- [52] Y Liu, D Tipper, K Vajanapoom. Spare capacity allocation in two-layer networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2007, 25(5): 974 – 986.
- [53] A Narula-Tam, E Modiano. Lightpath routing and capacity as-

- segment for survivable IP-over-WDM networks [A]. Proceedings of DRCN [C]. Washington, DC: IEEE, 2009. 37 – 44.
- [54] H Zeng, C Huang, A Vukovic. A novel fault detection and localization scheme for mesh all-optical networks based on monitoring-cycles [J]. Springer Photonic Network Communications, 2006, 11(3): 277 – 286.
- [55] W D Grover, A Grue. Self-fault isolation in transparent p-cycle networks: p-cycles as their own m-cycles [J]. IEEE Communications Letters, 2007, 11(12): 1004 – 1006.
- [56] B Wu, P-H Ho, K L Yeung. Monitoring trail: On fast link failure localization in all-optical WDM mesh networks [J]. IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(18): 4175 – 4185.
- [57] S S Ahuja, S Ramasubramanian, M M Krunz. Single-link failure detection in all-optical networks using monitoring cycles and paths [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2009, 17(4): 1080 – 1093.
- [58] N JA Harvey, M Pătrașcu, Y Wen, S Yekhanin, V WS Chan. Non-adaptive fault diagnosis for all-optical networks via combinatorial group testing on graphs [A]. Proceedings of INFOCOM [C]. Anchorage, Alaska: IEEE, 2007. 697 – 705.
- [59] W Ni, Y Ye, M Schlosser, E Patzak, H Zhang. Survivable mapping with maximal physical-layer failure-localization potential in IP over transparent optical networks [A]. Proceedings of OFC/NFOEC [C]. San Diego, CA: IEEE/OSA, 2010. 1 – 3.

作者简介

倪文达 男, 1983 年 2 月出生于上海. 2010 年于清华大学电子工程系获博士学位. 现为博士后. 主要研究方向为光网络的生存技术和两层流量工程. E-mail: wonda.ni@gmail.com