

WDM 抗毁网中考虑链路故障相关性的双链路失效保护算法

郭磊 虞红芳 李乐民

(电子科技大学宽带光纤传输与通信网技术重点实验室 成都 610054)

摘要: 光纤链路由于共享了相同的物理资源, 因此具有一定的故障相关性。这种故障相关性可以用相关链路失效概率(Correlated Link Failure Probability, CLFP) 来表示。在 CLFP 基础上, 该文研究了 WDM 抗毁网中双链路失效问题, 提出了一种新的支持用户区分可靠性 (Differentiated Reliability, DiR) 的共享通路保护算法: SPPDLF-DiR (Shared-Path Protection for Dual-Link Failures with DiR)。仿真表明, SPPDLF-DiR 在满足用户区分可靠性要求的前提下, 能有效地提高资源利用率和降低业务阻塞率。

关键词: WDM 抗毁网, 双链路失效, 相关链路失效概率, 区分可靠性

中图分类号: TN919.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2005)09-1483-05

A Dual-Link Failure Protection Algorithm with Correlated Link Failure Probability for Survivable WDM Networks

Guo Lei Yu Hong-fang Li Le-min

(Key Lab of Broadband Optical Fiber Transmission and Communication Networks,
UEST of China, Chengdu 610054, China)

Abstract Because the fiber links share the common physical resources, they have the Correlated Link Failure Probability (CLFP). Based on CLFP and Differentiated Reliability (DiR), the dual-link failures problem has been studied, and a novel protection algorithm, which is called Shared-Path Protection for Dual-Link Failures with DiR (SPPDLF-DiR), has been proposed for survivable WDM networks. Under dynamic traffic with different load, the performances of SPPDLF-DiR are simulated. The results show that SPPDLF-DiR not only can satisfy the specific requirements of users but also can effectively improve the resource utilization ratio and reduce the blocking ratio.

Key words Survivable WDM networks, Dual-link failures, Correlated Link Failure Probability (CLFP), Differentiated Reliability (DiR)

1 引言

在波分复用(Wavelength-Division-Multiplexing, WDM)光网络中, 由于每条波长的传输速率可高达吉比特/秒(如: OC-48, OC-192, OC-768), 链路(光纤链路)失效将导致大量业务的中断, 为此必须对网络进行保护设计。传统的保护大多研究了单链路失效问题, 其保护设计方案主要有专用保护(dedicated protection)、共享路径保护(shared-path protection)、共享链路保护(shared-link protection)^[1]和共享子路径保护(shared sub-path protection)^[2]。由于共享保护比专用保护节省了更多的资源, 因此大多数文献研究共享保护设计。

随着网络用户不断增多, 网络承载的业务量越来越大, 网络规模也随之不断扩大, 各种异类网络的大量互联, 使网

络结构也更加复杂。因此光纤链路之间的故障相关性问更加突出, 同时发生多条链路失效不能被忽略。共享风险链路组(Shared Risk Link Group, SRLG)^[3]的引入, 描述了光纤链路故障相关性的问题。SRLG 指共享相同的物理资源(也就是具有共同失效风险)的一组链路, 这些物理资源可以是光缆、路由器、管道等, 甚至可以是一个地域范围的灾难。一个 SRLG 故障, 就有可能导致同组的多条链路失效。SRLG 可以通过物理链路的路由信息自动生成, 也可以通过网络管理者人工指定。每个 SRLG 对应唯一的标识, 在路由选择的时候, 为光纤链路分配不同的 SRLG 标识来满足业务请求的工作通路和保护通路的分离程度。

基于 SRLG 约束, 文献[4, 5]的保护方案保证了工作通路和保护通路 SRLG 分离, 这样在单 SRLG 故障前提下, 业务

连接就不会丢失。这种设计思想,在本质上都认为,属于不同 SRLG 的链路不会同时发生故障。但实际上,如何为链路合理地分配 SRLG 标识,至今仍是一个没有解决的问题。大多数文献在进行保护设计时,都是为链路随机指定 SRLG 标识,这显然是不合理的。即使根据路由信息或共享的风险资源来分配 SRLG,但由于存在许多意想不到的大范围风险或灾难(如:地震、军事行动等),导致许多风险资源之间存在风险相关性,因此属于不用 SRLG 的链路也有可能同时失效。我们通过下面的例子来说明。

图 1(a)中 SRLG1 和 SRLG2 存在交叉部分,当 SRLG1 发生故障,属于 SRLG1 和 SRLG2 交叉部分的光纤链路有可能同时失效。可见,属于 SRLG1 和 SRLG2 交叉部分的链路存在故障相关性。

即使 SRLG1 和 SRLG2 没有交叉,也可能存在故障相关性。图 1(b)中 SRLG3 表示大面积的地震风险。虽然 SRLG1 和 SRLG2 是独立的,但当地震发生后,分别属于 SRLG1 和 SRLG2 的光纤链路也可能同时失效。可见,属于不同 SRLG 的链路也存在故障相关性。

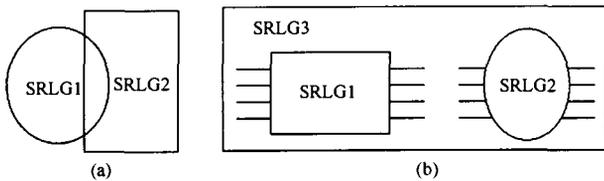


图 1 风险相关性

为了解决 SRLG 的缺陷,本文采用相关链路失效概率 (Correlated Link Failure Probability, CLFP) 来表示链路的故障相关性。也就是说,链路 f 在链路 l 失效的前提下失效的条件概率,可用概率公式 $P(f \text{ 失效} | l \text{ 失效})$ 来表示。每条链路的 CLFP 是一个统计值,因此获得 CLFP 是切实可行的^[6-11],只需要长时间对指定网络进行链路故障的统计测量。

由于光纤链路存在故障相关性,传统的只考虑单链路故障的设计方案已经不能满足需求。假设只存在双链路故障的前提下,文献[12-14]的设计方案都是为业务请求分配一条工作通路和两条链路分离的保护通路,这等效于为业务请求提供 100% 的保护,而没有支持区分可靠性^[7-11] (Differentiated Reliability, DiR),这会导致资源利用率低和业务阻塞率高。

综上所述,由于 SRLG 的缺陷,现有算法不能完善地解决链路故障相关性,也没有解决双链路故障下支持区分可靠性的保护设计。鉴于此,假设只存在双链路故障的前提下,本文综合考虑 CLFP 和 DiR,首次提出了一种支持区分可靠性的共享通路保护算法: SPPDLF-DiR (Shared-Path Protection for Dual-Link failures with DiR)。SPPDLF-DiR 采用

一种新的联合路由选择算法——KPP 路由,在满足用户区分可靠性要求下,能有效地提高资源利用率和降低业务阻塞率。

本文结构如下,第 2 节进行了问题分析,第 3 节描述了 SPPDLF-DiR 算法步骤,第 4 节进行了仿真和分析,第 5 节总结全文。

2 问题分析

2.1 网络模型

假定网络拓扑 $G=(N, L, W)$, 其中 N 为节点集; L 为链路集,每条链路 l 为一根双向传输的光纤; W 为每根光纤上的波长集。节点数、链路数和波长数分别用 $|N|$ 、 $|L|$ 和 $|W|$ 表示。假定每个业务请求 (s, d) 动态到达, s, d 分别为源、宿节点,在节点集 N 中随机选择。每个业务请求的带宽都是一个波长,网络节点具有完全波长变换能力。采用的路径搜索算法为 Dijkstra 算法。用到的符号如下描述: a_l 和 r_l 分别为链路 l 上已经占用的波长数和剩余的波长数,满足 $a_l + r_l = |W|$; wp_n 为业务请求 n 的工作通路; bp_{1n} 和 bp_{2n} 分别为业务请求 n 的第一条和第二条保护通路; v_l^e 为工作通路通过链路 e 且保护通路通过链路 l 的业务请求集; p_{1l} 、 p_{2l} 和 w_l 分别为链路 l 上预留波长数的最大值、次大值和所有业务请求已占用的波长数,满足 $p_{1l} \geq p_{2l}$ 且 $p_{1l} + p_{2l} + w_l = a_l$; DP_{1l} 和 DP_{2l} 分别为对应 p_{1l} 和 p_{2l} 的业务代号集; tp_{1l} 和 tp_{2l} 分别为链路 l 上预留波长数的最大值和次大值的临时存储记录; tDP_{1l} 和 tDP_{2l} 分别为对应 tp_{1l} 和 tp_{2l} 的业务代号集; $CLFP_{i,j}$ 为链路 j 在链路 i 失效的前提下失效的条件概率; P_i 为链路 i 的可靠性; $|S|$ 为集合 S 的元素数。

2.2 区分可靠性的保护

假设同时只存在两条失效链路,传统的方案在进行保护设计时,为每条工作通路 wp_n 分配两条链路分离的保护通路 bp_{1n} 和 bp_{2n} 。当 wp_n 和 bp_{1n} 各通过一条失效链路时, bp_{2n} 仍然可以传输业务,这等效于 100% 保护双链路失效。但并不是所有用户都需要 100% 的保护,有些用户需要的可靠性要低些,例如只需要 98% 的保护^[7-11] (100% 的保护,指用户业务在故障发生时丢失的可能性为零; 98% 的保护,指用户业务在故障发生时丢失的可能性为 2%),因此并不需要为每条工作通路都分配两条保护通路。下面,在 CLFP 的基础上,我们来描述支持区分可靠性的保护设计。

对任意业务请求 n 的工作通路 wp_n , 其可靠性为式(1),其失效概率为式(2)。

$$P(wp_n) = \prod_{l \in wp_n} P_l \quad (1)$$

$$P(wp_n \text{ failure}) = 1 - \prod_{l \in wp_n} P_l \quad (2)$$

第1条保护通路 bp_{1n} 在 wp_n 失效的前提下失效的条件概率为

$$P(bp_{1n} \text{ failure} | wp_n \text{ failure}) = \text{Maximum}_{l \in wp_n, f \in bp_{1n}, l \neq f} (CLFP_{l,f}) \quad (3)$$

根据条件概率公式, wp_n 和 bp_{1n} 同时失效的概率为

$$\begin{aligned} & P(wp_n \text{ failure} \cap bp_{1n} \text{ failure}) \\ &= P(wp_n \text{ failure}) \times P(bp_{1n} \text{ failure} | wp_n \text{ failure}) \end{aligned} \quad (4)$$

则 wp_n 和 bp_{1n} 的联合可靠性为

$$\begin{aligned} & 1 - P(wp_n \text{ failure} \cap bp_{1n} \text{ failure}) \\ &= 1 - P(wp_n \text{ failure}) \times P(bp_{1n} \text{ failure} | wp_n \text{ failure}) \end{aligned} \quad (5)$$

假设用户需要的可靠性为 RD, 如果

(1) wp_n 的可靠性不小于 RD, 即满足式(6), 则可认为工作通路 wp_n 满足了用户需要的可靠性, 而不再需要为业务请求分配保护通路。此时, 用户实际得到的连接可靠性为式(1)。

$$P(wp_n) \geq RD \quad (6)$$

(2) wp_n 的可靠性小于 RD, 即不满足式(6), 而 wp_n 和 bp_{1n} 的联合可靠性不小于 RD, 即满足式(7), 则可认为工作通路 wp_n 和第1条保护通路 bp_{1n} 满足了用户需要的可靠性, 而不再需要为业务请求分配第2条保护通路 bp_{2n} 。此时, 用户实际得到的连接可靠性为式(5)。

$$1 - P(wp_n \text{ failure} \cap bp_{1n} \text{ failure}) \geq RD \quad (7)$$

(3) 在式(6)和式(7)都不满足的情况下, 需要为业务请求分配第2条保护通路 bp_{2n} 。此时, 用户实际得到的连接可靠性为 100%。

综合以上分析, 我们得到: 在支持区分可靠性的保护中, 只要满足了用户的可靠性需求, 就没有必要为每条业务请求都分配两条保护通路。由于减少了保护通路的分配, 从理论上说, 可以减少预留资源的消耗, 从而提高资源利用率和降低业务阻塞率。从仿真结果, 可以看到分析的正确性。

2.3 K-Path-Pairs 路由

文献[4]介绍了 K-shortest-paths 路由的思想, K 路由的基本原理是, 事先计算出 K 条最短路由, 再从 K 条路由中选出最佳的工作通路和保护通路组合。我们将此思想扩展为 K-Path-Pairs (KPP) 路由。在 KPP 路由中, 事先计算 K 对工作通路和保护通 $pair_m(wp_n, bp_{1n}, bp_{2n}, A_n)$, ($1 \leq m \leq K$), 其中 A_n 根据式(8)计算, 表示资源占用总量。任意两个 $Pair_m$ 不能完全相同。在计算每个 $Pair_m$ 时, 如果

(1) wp_n 的可靠性满足式(6), 则 bp_{1n} 和 bp_{2n} 为空。

(2) wp_n 的可靠性不满足式(6), 但 wp_n 和 bp_{1n} 的联合可靠性满足式(7), 则 bp_{2n} 为空。

(3) 式(6)和式(7)都不满足, 则 bp_{2n} 不为空。

计算完 K 个 $pair_m(wp_n, bp_{1n}, bp_{2n}, A_n)$, ($1 \leq m \leq K$) 后(如果没有找到 K 个路由对, 则计算所有可能的路由对), 取 A_n 值最小的路由对作为最终分配结果。

$$A_n = \sum_{l \in L} a_l \quad (8)$$

下面我们来描述计算一个 $Pair_m$ 的算法步骤:

函数 $Pair_m(S)$: 输入网络初始状态 S, 输出一个 $Pair_m$, 初始时所有 $Pair_m$ 都为空。

步骤1 删除网络拓扑中所有 $r_l = 0$ 的链路 l, 用 Dijkstra 算法为业务请求寻找一条最短路径作为工作通路 wp_n 。如果没有找到, 则函数输出空 $Pair_m$ 。否则, 如果满足式(6), 则函数输出 $Pair_m$, 如果不满足式(6), 则执行步骤2。

步骤2 先取 $tp_{1l} = \max\{v_l^e\} (\forall e \in L, e \neq l)$ 和 $tDP_{1l} = v_l^e$, 再取 $tp_{2l} = \max\{v_l^e - v_l^e \cap tDP_{1l}\} (\forall e \in L, e \neq l)$ 和 $tDP_{2l} = v_l^e - v_l^e \cap tDP_{1l}$ 。删除网络拓扑中所有 wp_n 通过的链路, 以及所有 $p_{1l} + p_{2l} + r_l < tp_{1l} + tp_{2l}$ 的链路, 用 Dijkstra 算法为业务请求寻找一条最短路径作为第1条保护通路 bp_{1n} , 在路径搜索时, 需保证 (wp_n, bp_{1n}) 与所有 $Pair_k (k < m)$ 不完全相同。如果没有找到, 则函数输出空 $Pair_m$ 。否则, 如果满足式(7), 则函数输出 $Pair_m$, 如果不满足式(7), 则执行步骤3。

步骤3 根据步骤2中的网络拓扑, 再删除所有 bp_{1n} 通过的链路, 用 Dijkstra 算法为业务请求寻找一条最短路径作为第2条保护通路 bp_{2n} , 在路径搜索时, 需保证 (wp_n, bp_{1n}, bp_{2n}) 与所有 $Pair_k (k < m)$ 不完全相同。如果没有找到, 则函数输出空 $Pair_m$ 。否则, 函数输出 $Pair_m$ 。

3 SPDLF-DiR 算法和性能指标

3.1 算法步骤

步骤1 等待业务请求。如果业务请求达到(假设业务请求代号为 n), 记录下此时网络状态 S, 执行步骤2; 否则, 拒绝该业务请求, 更新网络状态, 返回步骤1。

步骤2 如果已经完成 K 个路由对的计算, 则执行步骤3。否则, 恢复网络状态 S, 调用函数 $Pair_m(S)$ 。如果函数返回 $Pair_m$ 为空, 则执行步骤3。否则, 记录下 $Pair_m$, 返回步骤2。

步骤3 如果所有 $Pair_m(wp_n, bp_{1n}, bp_{2n}, A_n)$, ($1 \leq m \leq K$) 都为空, 则拒绝该业务请求, 更新网络状态, 返回步骤1。否则, 取 A_n 值最小的一个路由对, 记录下此时的工作通路、保护通路和资源占用情况, 同时更新工作通路、保护通路和资源占用情况的临时记录, 返回步骤1。

3.2 性能指标

资源利用率 RUPC (Resource Utilization Per Connection)

如式(9)表示, 其中 E 为网络中存在的业务请求集。RUPC 越小, 表明业务请求平均占用资源越少, 资源利用率越高。

$$RUPC = \sum_{i \in E} a_i / |E| \quad (9)$$

业务阻塞率 BR (Blocking Ratio) 为 $|R|$ 和 $|A|$ 的比值, 其中 A 为到达网络的所有业务请求的集合, R 为被拒绝的业务请求的集合。BR 越小, 表明业务阻塞率越低。

4 仿真和分析

仿真时假设所有业务请求到达速率服从均值为 β 的泊松分布, 所建业务连接的持续时间服从均值为 $1/\mu$ 的指数分布, 即全网总负载为 β/μ Erlang, 仿真时可取 $\mu=1$ 。到达业务请求的源、宿节点在所有节点对之间随机选择, 如果业务连接建立失败则立即丢弃, 即无等待队列。仿真网络如图 2 所示, 每条链路为一根双向传输的光纤, 每根光纤支持 3 个波长。与 SPPDLF-DiR 进行性能比较的是文献[12]中的共享通路保护算法 (Shared-Path Protection, SPP), SPP 对双链路失效能提供 100% 的保护。仿真时可取足够大的 K 值 ($K>100$), 仿真所得结果都是在模拟 10^6 次业务请求后得到的平均值。

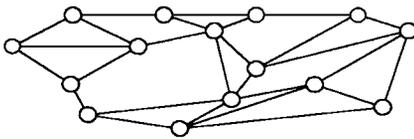


图 2 仿真网络拓扑图

根据文献[7-11], 每条链路 i 的可靠概率 P_i 随机分布于 1.0~0.95; $CLFP_{i,j}(i \neq j)$ 条件故障概率从 {100%, 50%, 20%, 10%, 0%} 中随机选取。可假设 3 个不同的可靠性级别 $P_1 \sim P_3$, P_1 对可靠性要求非常高, 为传统的 RD=100% 保护; P_3 对可靠性要求要低些, 为 RD=98%; P_2 对可靠性的要求还要低, 为 RD=96%。

从图 3 可以看出, 同样都为双链路失效提供 100% 的保护, SPPDLF-DiR 的 RUPC 和 BR 性能都优于 SPP。这是因为 SPPDLF-DiR 计算 K 个路由对, 并从中选出资源消耗最少

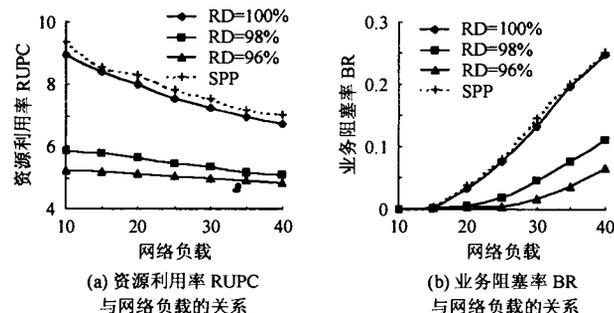


图 3

的路由对作为分配结果; 而 SPP 只计算一个路由对, 该路由

对可能不是最优的结果。因此, SPPDLF-DiR 的资源利用率比 SPP 高。而资源利用率越高, 后续业务请求可利用的空闲资源就越多, 业务阻塞率就会越低。

从图 3 还可以看出, 可靠性要求越高, 资源利用率就越低, 业务阻塞率也就越高。因为可靠性要求越高, 需要为业务请求分配多条保护通路的几率就越大, 预留的保护资源就越多, 从而资源利用率降低, 后续业务请求可用的空闲资源越少, 业务阻塞率也就越高。同时还可以看出, 随着网络负载增加, RD 越小, 在阻塞率性能上的优势更加明显。

图 4 给出了可靠性要求分别为 96% 和 98% 时, 1000 个业务请求实际得到的连接可靠性。从图中可以看出, 实际得到的连接可靠性都满足了用户的要求。当 RD=98% 时, 实际得到的可靠性等于 100% 的数量, 比当 RD=96% 的要多。这是因为对于 wp_n 和 bp_{1n} 的联合可靠性小于 98% 的业务连接, 都需要建立 bp_{2n} , 这相当于为业务连接提供了 100% 的保护。

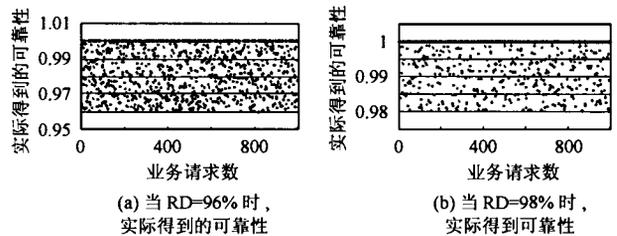


图 4

5 结束语

在服务多样化的背景下, 可靠性作为衡量光网络服务质量 QoS 的一个重要指标, 应该向用户提供区分可靠性 (DiR) 的服务, 满足用户对可靠性的不同要求和不同的经济承受力。同时, 由于光纤链路共享了相同的风险资源, 因此存在链路故障相关性, 我们用相关链路失效概率 (CLFP) 来表示。本文在 DiR 和 CLFP 的基础上, 研究了双链路失效问题, 首次提出了一种支持区分可靠性的共享通路保护算法 SPPDLF-DiR。仿真结果表明, SPPDLF-DiR 既满足了用户的要求, 又有效地提高了资源利用率和降低了业务阻塞率。

参考文献

[1] Ramamurthy S, Sahasrabbudhe L, Mukherjee B. Survivable WDM mesh networks. *Journal of Lightwave Technology*, 2003, 21(4): 870 - 883.
[2] He Rongxi, Wen Haibo, Li Leming, et al.. Shared sub-path protection algorithm in traffic-grooming WDM mesh networks. *Photonic Network Communications*, 2004, 8 (3): 239 - 249.
[3] Papadimitriou D, Poppe F, Jones J, et al.. Inference of shared risk link groups, Internet Draft, draft-many-inference-srlg-00.txt, 2001.

- [4] 温海波, 王晟, 李乐民. 一种不共享风险的双路径选路算法. 电子与信息学报, 2003, 25 (6): 824 – 830.
- [5] Guo Lei, Yu Hongfang, Li Lemin. Dynamic shared-path protection based on SRLG constraints in WDM mesh networks. ICCAS 2004, IEEE International Conference on Communications, Circuits and Systems, 2004, Chengdu, China, vol. 1: 643 – 646.
- [6] Cui Weidong, Stoica I, Katz R H. Backup path allocation based on a correlated link failure probability model in overlay networks. ICNP 2002, IEEE International Conference on Network Protocols, Paris, France, 2002: 236 – 245.
- [7] Yu Hongfang, Wen Haibo, Wang Sheng, *et al.*. Shared-path protection algorithm with differentiated reliability for WDM mesh networks. APOC 2003, Asia-Pacific Optical and Wireless Communications, SPIE 5282 (2): 682 – 687.
- [8] Guo Lei, Yu Hongfang, Li Lemin. Joint routing-selection algorithm for a shared path with differentiated reliability in survivable wavelength-division-multiplexing mesh networks. *Optics Express*, 2004, 12 (11): 2327 – 2337.
- [9] Bolmie N, Ndousse T D, Su D H. A differentiated optical service for WDM networks. *IEEE Communications Magazine*, 2000, 38 (2): 68 – 73.
- [10] Fumagalli A, Tacca M, Unghvary F. Shared path protection with differentiated reliability. ICC 2002, IEEE International Conference on Communications, New York, USA, 2002, vol. 4: 2157 – 2161.
- [11] Saradhi C V, Murthy C S R. Routing differentiated reliable connections in WDM optical networks. *Optical Networks Magazine*, 2002, 3 (3): 50 – 67.
- [12] Jozsa B G, Orincsay D, Kern A. Surviving multiple network failures using shared backup path protection. ISCC 2003, IEEE International Symposium on Computers and Communication, Kemer-Antalya, Turkey, 2003: 1333 – 1340.
- [13] He W S, Somani A K. Path-based protection for surviving double-link failures in mesh-restorable optical networks. GLOBECOM 2003, IEEE Global Telecommunications Conference, Hong Kong, China, 2003, vol.5: 2558 – 2563.
- [14] Guo Lei, Yu Hongfang, Li Lemin. Double-link failure protection algorithm for shared sub-path in survivable WDM mesh networks. *Chinese Optics Letters*, 2004, 2 (7): 279 – 282.

郭磊: 男, 1980年生, 博士生, 研究方向为 WDM 光网络中的生存性技术.

虞红芳: 女, 1975年生, 博士生, 研究方向为 WDM 光网络技术.

李乐民: 男, 1932年生, 中国工程院院士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为通信网与宽带通信技术.