

抗毁 WDM 网中单 SRLG 故障的共享子通路保护

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: 该文针对抗毁 WDM 网中单个共享风险链路组(Shared Risk Link Group, SRLG)故障, 提出了一种动态共享子通路保护(Dynamic Shared Sub-Path Protection, DSSPP)算法。DSSPP 为每条业务请求选择一条工作通路后, 按照参数 m 把工作通路划分成若干条等长的子通路, 其中 m 为子通路的长度, 并为每条子通路各选择一条 SRLG 分离的保护通路。如果两条子通路 SRLG 分离, 则它们对应的保护通路可以共享相同资源。在进行路由选择时, DSSPP 考虑了负载均衡度和资源共享度, 因此能有效地提高资源利用率和降低业务阻塞率。仿真表明, DSSPP 不仅能保护单 SRLG 故障, 而且能灵活地在资源利用率(阻塞率)和保护切换时间之间进行性能折衷。

关键词: 抗毁 WDM 网共享风险链路组, 动态共享子通路保护

中图分类号: TN915.63

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2005)07-1136-05

A Shared Sub-path Protection for a Single-SRLG Failure in Survivable WDM Networks

Guo Lei Yu Hong-fang Li Le-min

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

Abstract This paper proposes an algorithm, called Dynamic Shared Sub-Path Protection (DSSPP), for protecting a single Shared Risk Link Group (SRLG) failure in survivable WDM mesh networks. DSSPP firstly searches a primary path for a connection request, and it follows to segment the primary path into several equal length sub-paths according to the m , where the m is the length of the sub-path, and searches a SRLG-disjoint backup path for each sub-path. If two sub-paths are SRLG-disjoint, then their corresponding backup paths can share the common resources. When computing paths, DSSPP considers the load balance and the resources sharing degree, so that the paths are the minimum cost, and the resource utilization ratio can be improved and the blocking ratio can be reduced. The simulation results show that DSSPP not only can completely protect a single-SRLG failure but also can make the trade-offs between the resource utilization ratio (or blocking ratio) and the protection-switching time.

Key words Survivable WDM networks, Shared Risk Link Group (SRLG), Dynamic Shared Sub-Path Protection (DSSPP)

1 引言

随着 WDM 光网络技术的日益成熟和广泛应用, 已经成为骨干网络的基础。由于每条波长的传输速率可高达每秒吉比特, 光纤链路失效将导致大量业务中断。为此必须对网络进行保护设计。传统的保护设计大多考虑单链路失效^[1]和双链路失效^[2,3], 它们都假设了光纤链路发生故障是独立的, 失效链路之间是没有故障相关性的。但在实际网络中, 光纤链路存在一定的故障相关性, 这种故障相关性可以用共享风险链路组(Shared Risk Link Group, SRLG)来描述^[4]。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。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(ID), 在路由选择的时候, 为光纤链路分配不同的 SRLG ID 来满足业务请求的工作通路和保护通路的分离程度^[5]。

在 SRLG 约束下, 单 SRLG 故障就有可能导致同组的多条链路失效。为了有效地保护单 SRLG 故障, 文献[6]提出了一种共享通路保护 (Shared-Path Protection, SPP) 算法。SPP 为每条业务请求建立一条工作通路和一条 SRLG 分离的保护通路, 通过与专用通路保护 (Dedicated-Path Protection, DPP) 比较, 大幅度提高了资源利用率和降低了业务阻塞率。但 SPP 没有考虑保护切换时间, 而保护切换时间作为抗毁 WDM 网

中一个重要指标,是不可忽略的^[7]。保护切换时间越短,表明网络故障恢复越快。文献[1]指出,共享通路保护具有较好的资源利用率和较长的保护切换时间,而共享链路保护具有较差的资源利用率和较短的保护切换时间。因此,共享子通路保护能在共享通路保护和共享链路保护之间,折衷资源利用率和保护切换时间的性能^[8-10]。

鉴于此,本文综合考虑资源利用率和保护切换时间,在单 SRLG 故障前提下,提出了一种动态共享子通路保护(Dynamic Shared Sub-Path Protection, DSSPP)算法。DSSPP 根据参数 m 来划分子通路,其中 m 为每条子通路的长度。在路由计算时,根据网络状态动态调整链路代价,将负载平衡度和资源共享度作为代价函数的优化目标,不但能提高资源利用率和降低业务阻塞率,而且能灵活地在资源利用率(阻塞率)和保护切换时间之间进行性能折衷^[9]。

本文结构如下:第 2 节描述了网络模型、链路代价分配和保护切换时间;第 3 节描述了 DSSPP 算法的具体步骤和性能指标;第 4 节进行了仿真和分析;第 5 节总结全文。

2 问题描述

2.1 网络模型

假定网络拓扑结构 $G = (N, L, W)$, 其中 N 为节点集, L 为链路集, 每条链路为一根双向传输的光纤, 容量为 C ; 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, b) 动态到达, s , d 分别为源、宿节点, 并在节点集 N 中随机选择, b 为业务请求带宽。采用的路径搜索算法为 Dijkstra 算法。需要用到的符号描述如下: $l \in L$ 为 G 中的一根双向传输的光纤。 c_l 为链路 l 的基本代价, 由该链路的物理长度、建设费用等因素决定。 c'_l 为链路 l 的代价函数, 由当前网络状态决定。 s_l 为链路 l 的 SRLG ID。 a_l 为链路 l 上已经占用的带宽, r_l 为链路 l 上剩余的带宽, 满足 $a_l + r_l = C$ 。 p_l 为链路 l 上预留的保护带宽, w_l 为链路 l 上所有业务的工作通路占用的带宽, 满足 $p_l + w_l = a_l$ 。 C_w 为工作通路上所有链路的代价函数之和, C_b 为保护通路上所有链路的代价函数之和。 sp_n 为编号为 n 的子通路, 其中 n 按照业务请求先后到达的顺序和子通路划分顺序分配。

2.2 链路代价分配

(1)考虑负载均衡度 在为业务请求建立工作通路时,需要分配新的带宽资源,此时需要考虑网络的负载均衡度。所谓负载均衡,就是要使被占用的资源尽量均匀地分散到网络链路上。如图 1(a)所示,每条链路支持 3 个波长。如果 3 条业务请求都是 $(1, 4, 1)$, 在不考虑负载平衡下,业务连接都选择最短路径 1-2-3-4 作为工作通路。此时,如图 1(b)所示,

1-2-3-4 将会因资源耗尽而不可用(即从网络拓扑中删除 1-2-3-4), 这样,后续业务请求的工作通路和保护通路可选择的链路减少,阻塞率就会增加。如果考虑负载平衡,可使 3 个业务请求的工作通路分别通过 1-2-3-4, 1-5-6-4 和 1-7-8-9-4。此时,没有链路因资源耗尽而不可用,这样,后续业务可选择的链路就多,业务阻塞率就会降低。

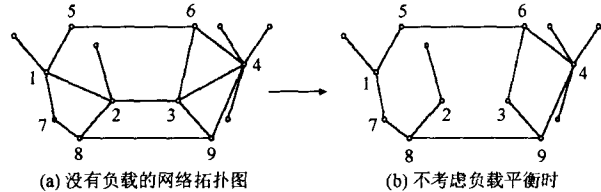


图 1 链路 1-2-3-4 因资源耗尽而不可用的拓扑图

因此,应该使工作通路尽量通过剩余资源多的链路。为此可使用式(1)调整链路代价,式(1)中 α 为考虑负载均衡的控制因子,要求满足 $-\alpha r_l + c_l > 0$ 。利用式(1)调整完链路代价后,DSSPP 为业务请求计算一条最小代价的工作通路,要求 $0 < C_w < +\infty$ 且工作通路通过的所有链路 SRLG 分离。利用式(1)调整链路代价,等效于删除了没有足够资源的链路(通过设置链路代价为 $+\infty$ 实现),同时使剩余资源越多(即 r_l 值越大)的链路,其代价越小,工作通路选择这些链路的几率越高,负载就能更均匀地分散在网络链路上。

$$C'_l = \begin{cases} +\infty, & r_l < b \\ -\alpha r_l + C_l & \text{其它} \end{cases} \quad (1)$$

(2)考虑资源共享度 在为子通路建立保护通路时,如果两条子通路 SRLG 分离,则它们对应的保护通路可以共享相同的资源。因此,需要考虑提高预留资源的共享度,减少对空闲资源的占用,从而减小后继业务请求的阻塞率。

假定为子通路 n 计算保护通路。在 n 之前被网络成功接受的所有业务请求子通路的代号,以及此次业务请求中已经计算好保护通路的子通路代号,构成集合 B 。对任意链路 $l \in L$, 假定 tp_l 为链路 l 上预留带宽的临时存储记录。设定 $U = \{s_j; j \in sp_n\}$ 和 $Y = \{j; j \in B \cap l \in bp_j\} + \{n\}$, 其中 bp_j 为子通路 j 的保护通路。对每个 $s_k (s_k \in U)$, 计算满足 $s_b = s_k (b \in wp_j \cap j \in Y)$ 的所有子通路 j 上的业务量之和,最大者存入 tp_l 。很明显,如果保护通路通过链路 l , 则 tp_l 为链路 l 上应该预留的带宽。如果满足 $p_l \geq tp_l$, 则链路 l 上不需要分配新的带宽,因此原来预留的带宽资源被充分共享,资源利用率相应提高。

如图 2(a)所示,链路旁的数字为链路上已经预留资源的大小(即 p_l 值)。如果采用最短路径算法选择保护通路,如图 2(b)所示,业务连接 $a-b-c$ 的保护通路为 $a-d-c$, 此时 p_{ad} 和 p_{dc} 都为 1, 因此需要新分配 2 的保护带宽。如果采用考虑资源共享度的最小代价路径算法,如图 2(c)所示,业务连接的保护通路为 $a-e-f-c$, 此时就不需要分配新的保护带宽,因此资源被充分共享,从而资源利用率提高。因此,应该使保护

通路尽量通过已经分配了足够预留资源的链路。

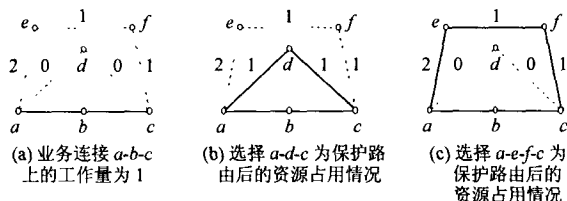


图 2

根据以上分析,可采用式(2)调整链路代价,式(2)中 η 为考虑预留资源共享度的控制因子,要求满足 $-\eta C + c_l > 0$ 。DSSPP 利用式(2)调整完链路代价后,为子通路计算一条最小代价的保护通路,要求 $0 < C_b < +\infty$ 且保护通路通过的所有链路 SRLG 分离。通过式(2)调整链路代价,等效于删除了与工作通路有相同 SRLG ID 的链路和没有足够资源的链路(通过设置链路代价为 $+\infty$ 实现),同时使不需要分配新带宽的链路(即满足 $p_l \geq tp_l$)具有较小的代价,保护通路选择这些链路的几率较大,资源利用率就能相应地提高。

$$C'_l = \begin{cases} +\infty, & (s_l \cap u \neq \emptyset) \cup (r_l + p_l + tp_l) \\ -\eta C + c_l, & p_l \geq tp_l \\ c_l, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

2.3 保护切换时间

保护切换时间定义为子通路上链路失效的时刻起到保护通路配置完毕开始承载业务量的时刻止。根据文献[1],假设节点消息处理时间 D 为 $10\mu s$, 链路传播延迟 P 为 $400\mu s$, 配置一个 OXC 的时间 X 为 $10\mu s$, 失效探测时间 F 为 $10\mu s$ 。假设链路 l 为子通路上的失效链路,则 n 为 l 源点到业务源点的跳数, h 为保护通路的跳数。子通路 k 的保护切换时间 t_k 为式(3)。

$$t_k = F + n \times P + (n+1) \times D + 2 \times h \times P + 2 \times (h+1) \times D + (h+1) \times X \quad (3)$$

可以看出,子通路和保护通路长度越长,则 n 和 h 值就会越大,从而导致保护切换时间增大。

3 DSSPP 算法步骤和性能

3.1 算法步骤

步骤 1 等待业务请求到达。如果业务请求达到,则执行步骤 2; 否则,检查网络中离开的业务连接,更新网络状态,继续等待。

步骤 2 利用式(1)调整链路代价,为业务请求计算一条最小代价的工作通路。如果没有找到,则拒绝该业务请求,复位已找到的工作通路、保护通路和资源占用情况的临时记录,更新网络状态,返回步骤 1。否则,执行步骤 3。

步骤 3 按照网络操作人员事先设置的 m 值,把工作通路化分成若干条等长子通路。利用式(2)调整链路代价,为每

条子通路各计算一条 SRLG 分离的保护通路。只要有一个子通路的保护通路建立失败,则拒绝该业务请求,复位已找到的工作通路、保护通路和资源占用情况的临时记录,更新网络状态,返回步骤 1。否则,执行步骤 4。

步骤 4 接受该业务请求,记录下此时的工作通路、保护通路和资源占用情况,同时更新网络状态。返回步骤 1。

DSSPP 算法复杂度主要取决于使用 Dijkstra 算法的次數。运行一次 Dijkstra 算法的复杂度为 $O(|M|^2)$, 为一条业务请求寻找一条工作通路的复杂度为 $O(|M|^2)$ 。此外还要为 K 条子通路各寻找一条 SRLG 分离的保护通路,其复杂度为 $O(K|M|^2)$ 。从而可得算法复杂度近似为 $O(|M|^2 + K|M|^2)$ 。

3.2 算法性能指标

资源利用率(Resource Utilization Ratio, RUR)如式(4)表示。RUR 值越小,表明预留的带宽资源越少,资源利用率越高。

$$RUR = \sum_{k \in L} p_k / \sum_{k \in L} w_k \quad (4)$$

负载平衡度(Balance Degree, BD)如式(5)表示。BD 值越接近 1,表示全网负载越趋于均衡。

$$BD = |L| \max_{k \in L} \{a_k\} / \sum_{k \in L} a_k \quad (5)$$

业务阻塞率(Blocking Ratio, BR)和平均丢失率(Average Dropping Ratio, ADR)可参考文献[10]中的定义。

平均保护切换时间 (Average Protection-Switching Time, APST)如式(6)表示,其中 M 通过失效链路的子通路集, $|M|$ 为集合包含元素的数目。APST 越小,表明故障恢复越快。

$$APST = \sum_{k \in L} t_k / |M| \quad (6)$$

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 爱尔兰,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。仿真网络拓扑美国国家网络(USA 网络),如图 3 所示,每条链路为一根双向传输的光纤。链路旁标注的下划线数字为随机分配的 SRLG ID,这些标识形成 SRLG 标识集,发生单 SRLG 故障的 ID 号在标识集中随机选择。假设每根光纤支持 10 个波长,每个业务请求的带宽都是 1 个波长粒度,网络具有完全波长变换能力(光-电-光变换)。仿真时可取每条链路的基本代价为 100。子通路长度 m 可分别取 1、2、3 和 ML,其中 ML 为业务请求工作通路的长度。当 $m=1$ 时,子通路等效于链路,算法就

等效于共享链路保护。当 $m=ML$ 时, 子通路其实就是工作通路, 算法等效于共享通路保护。

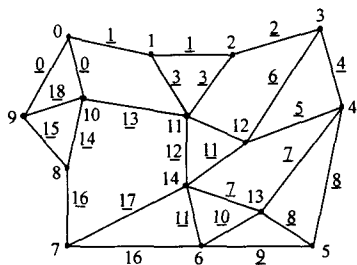


图3 USA网络拓扑

从图4(a)可以看出, 随着参数 α 值增加, 负载平衡度 BD 值在减小, 表明负载随着 α 值增加更趋于均衡。因为当 $\alpha=0$ 时, 式(1)中可用链路的代价函数都等于 c_l (即链路的基本代价), 因此选择的路由是最短的路径。由于没有考虑负载均衡, 必然容易出现图1中描述的问题, 从而造成某些链路的资源被很快耗尽。而随着 α 值增大, 式(1)中可用资源越多的链路, 其代价越小, 工作通路选择这些链路的几率越大, 从而使负载更均匀地分散到网络各链路中, 这在本文第2.2节已经做了理论分析。

从图4(b)可以看出, 随着参数 η 增加, 资源利用率 RUR 值在减小, 表明资源利用率随着 η 值增加而提高。因为当 $\eta=0$ 时, 式(2)中可用链路的代价函数都等于 c_l (即链路的基本代价), 因此选择的路由是最短的路径。由于没有考虑资源共享度, 必然容易出现图2中描述的问题, 从而造成预留资源没有被充分共享。而随着 η 值增大, 式(2)中不需要分配新预留资源的链路, 其代价越小, 保护通路选择这些链路的几率越大, 从而使资源充分共享, 因此资源利用率提高, 这在本文第2.2节中已经做了理论分析。

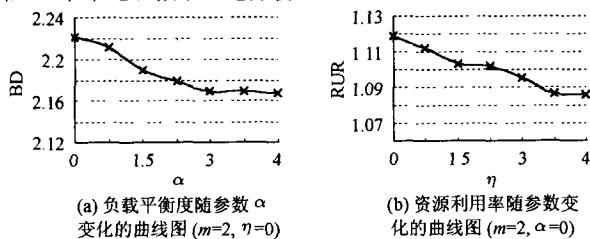
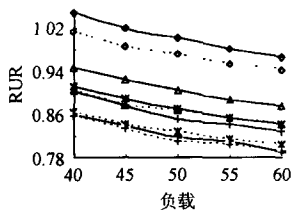
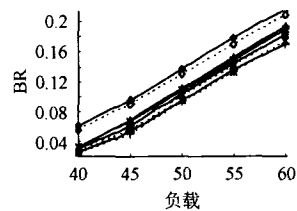


图4 负载为20

结合本文第2.2节的分析, 显然, 提高负载平衡度和资源利用率, 可以降低业务阻塞率。因此需要确定适当的 (α, η) 参数值。本文通过大量测试后, 可采用 $(\alpha, \eta) = (4, 4)$ 来优化链路代价函数。在下面的讨论中, $DSSPP(m, 0, 0)$ 表示 $(\alpha, \eta) = (0, 0)$, 此时等效于采用最短路径搜索。而 $DSSPP(m, 4, 4)$ 表示 $(\alpha, \eta) = (4, 4)$, 此时等效于采用最小代价路径搜索。

图5 资源利用率
随负载变化的曲线图图6 阻塞率
随负载变化的曲线图

从图5可以看出, 在相同的 m 值时(即子通路长度一定), 不论网络负载如何变化, $DSSPP(m, 4, 4)$ 的资源利用率 RUR 值总比 $DSSPP(m, 0, 0)$ 的 RUR 值小, 表明前者的资源利用率比后者高。这是因为 $DSSPP(m, 4, 4)$ 在调整链路代价时, 考虑了负载均衡度和资源共享度。因此 $DSSPP(m, 4, 4)$ 的阻塞率应该比 $DSSPP(m, 0, 0)$ 的阻塞率小, 因为前者资源利用率高, 后续业务请求有更多的空闲资源可用, 从而阻塞率低, 图6的仿真结果正好说明了这一点。

在相同的 (α, η) 值时, 不论网络负载如何变化, 随着 m 值增加, $DSSPP$ 的 RUR 值在减小, 表明资源利用率随着子通路长度的增加而提高。因此, 随着 m 值增加, $DSSPP$ 的阻塞率应该减小, 图6的仿真结果正好说明了这一点。

从图6可以看出, $DSSPP(ML, 4, 4)$ 的阻塞率比 $SPP^{[6]}$ 的阻塞率略低。因为 SPP 只考虑了资源共享度而没有考虑负载平衡度, 因此容易出现本文第2.2节中图1描述的问题, 造成阻塞率较高。还有一个原因是由于 SPP 的资源利用率比 $DSSPP(ML, 4, 4)$ 的资源利用率略低, 这从图5中可以看出。

通过模拟随机单 SRLG 故障, 得到了算法的平均保护切换时间和平均业务丢失率, 分别如图7和图8所示。从图7可以看出, 随着 m 值增加, $DSSPP$ 的平均保护切换时间 APST 值在增大。这是因为子通路长度越长, 其保护通路的长度就会增加, 从而导致式(3)中的 n 值和 h 值增大, 因此保护切换时间增加。在 m 值一定的情况下, 最小代价路径搜索(即 $(\alpha, \eta) = (4, 4)$ 时)的 APST 值比最短路径搜索(即 $(\alpha, \eta) = (0, 0)$ 时)的 APST 值大。从本文第2.2节的分析可知, 为了选择最小代价路径, 工作通路和保护通路可能会绕道较远的距离, 因此最小代价路径的长度一般比最短路径长, 这导致式(3)中的 n 值和 h 值增大, 因此保护切换时间增加。比较 SPP 算法, 发现其 APST 值只比 $DSSPP(ML, 4, 4)$ 的 APST 值略小, 这是由于 SPP 的工作通路和保护通路都较长的缘故。

图8也是通过模拟单 SRLG 故障, 得到的平均业务丢失率。可见, 没有业务丢失, 说明 $DSSPP$ 能有效地保护单 SRLG 故障。

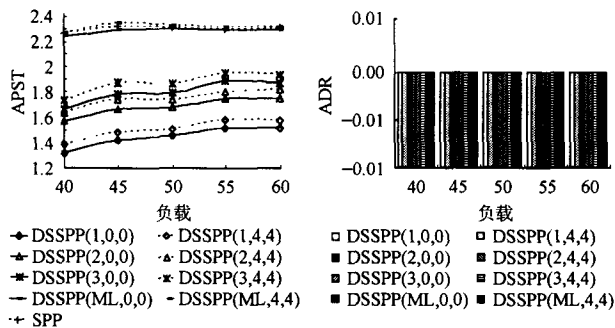


图7 平均保护切换时间
随负载变化的曲线图

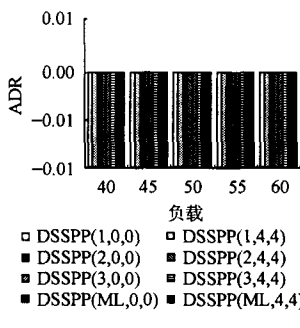


图8 平均业务丢失率
随负载变化的直方图

以上仿真表明,考虑负载均衡度和资源共享度的 DSSPP 算法,通过设置控制参数后,其资源利用率、阻塞率和保护切换时间性能都优于 SPP。同时,网络操作人员可以灵活地配置参数(m, α, η)值,使算法在资源利用率(阻塞率)和保护切换时间之间进行性能折衷,从而满足用户的不同需求。

5 结束语

WDM 网络中由于光纤链路共享了某些物理资源,因此具有一定的故障相关性,这种故障相关性可用共享风险链路组(SRLG)来表示。针对单 SRLG 故障,本文提出了一种动态共享子通路保护算法,即 DSSPP 算法。DSSPP 充分考虑了负载均衡度和资源共享度。仿真表明,DSSPP 在保护单 SRLG 故障基础上,不仅能有效地提高资源利用率和降低阻塞率,而且能灵活地在资源利用率(阻塞率)和保护切换时间之间进行性能折衷。

参考文献

[1] Ramamurthy S, Sahasrabudhe L, Mukherjee B. Survivable WDM mesh networks. *Journal of Lightwave Technology*, 2003, 21(4): 870 – 883.

[2] Jozsa B G, Orincsay D, Kern A. Surviving multiple network failures using shared backup path protection. in Proc. of the IEEE International Symposium on Computers and Communication, Turkey, 2003, 2: 1333 – 1340.

[3] He W S, Somani A K. Path-based protection for surviving double-link failures in mesh-restorable optical networks. in Proc. of the IEEE Conference on Global Telecommunications, Hong Kong, China, 1-5 Dec. 2003, 5: 2558 – 2563.

[4] Papadimitriou D, Poppe F, Jones J, *et al.*. Inference of shared risk link groups, Internet Draft, draft-many-inference-srlg-00.txt, Feb. 2001.

[5] 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.

[6] 何荣希, 张治中, 王晟, 等. IP/MPLS over WDM 网中基于共享风险链路组限制的共享通路保护算法, *电子学报*, 2002, 30 (11): 1638 – 1642.

[7] Guo L, Yu H F, Li L M. Joint routing-selection algorithm for a shared-path with differentiated reliability in survivable wavelength-division-multiplexing mesh networks. *Opt. Express*, 2004, 12 (11): 2327 – 2337.

[8] 何荣希, 王晟, 李乐民. 光网络中支持多粒度的子通路保护算法. *电子科技大学学报*, 2003, 32 (3): 245 – 250.

[9] 何荣希, 王光兴. WDM 疏导网络中的子通路保护算法. *东北大学学报*, 2003, 24 (7): 647 – 650.

[10] 郭磊, 虞红芳, 李乐民. WDM 网状网中一种动态共享子路径保护算法. 第九届全国青年通信学术会议, 重庆, 2004: 597 – 603.

郭磊, 男, 1980年生, 博士生, 研究方向为 WDM 光网络技术。
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。