

一种不共享风险的双路径选路算法¹

温海波 王 晟 李乐民

(电子科技大学宽带光纤传输与通信系统技术国家重点实验室 成都 610054)

摘 要 光网络中, 为一个连接请求建立连接时, 从光路保护方面来说, 不仅需要为其寻找到一条工作路由, 而且需要提供一条备份路由, 并要求这两条路径物理分离。对于光网络还提出了共享风险链路组的概念。该文提出一种新的启发式算法, 完成两条路径共享风险链路组分离, 同时总费用尽量低, 并对算法进行了分析与仿真。

关键词 共享风险链路组, K 路由

中图分类号 TN919.3

1 引 言

随着光网络设备技术的进一步发展和成熟, 具有更高性能的光交叉连接器 (OXC, Optical Cross Connector) 和光分插复用器 (OADM, Optical Add/Drop Multiplexer) 等正在不断涌现, 如何利用这些设备设计和构造新的光传送网络 (OTN, Optical Transport Network), 从网络设计、控制和管理角度, 研究和开发新的协议, 以保证 OTN 具有更高的可扩展性 (Scalability)、灵活性和生存性, 正日益受到人们的广泛关注。

其中的一个重要问题是如何在 OTN 中自动建立和拆除光通路。目前, 已有多家标准化组织和企业联盟都在制定相应的标准: OIF (Optical Inter-networking Forum) 和 ODSI (Optical Domain Service Interconnect) 联合制定的 UNI1.0^[1] 已获通过; 2001 年 7 月 IETF (Internet Engineering Task Force) 通过了一个 GASON 草案^[2]; IETF 正在研究采用 MPLS 的控制面协议实现光网络控制, 从 1999 年底直到今年初, 有关工作才在 IETF 的众多草案文本中体现了出来^[3-7], 并被统一地称为 GMPLS/MPLambdaS 协议族。

所有这些工作目的都是规范光网络的控制面协议, 但对其中涉及到的有关算法细节没有作细致的规定。例如光路的保护问题。由于一条光路可能聚合了大量的用户业务, 因此光路的失效造成的损失难以承受, 公认的观点是必须在光层提供合适的保护 / 恢复机制。

一种有效的提供光路保护的机制是为每个光路请求建立两条路径, 分别称为工作路径和保护路径, 一旦工作路径失效, 可以立刻将业务切换到保护路径上运行。显然, 要保证这一机制有效运行, 计算出的两条路径必须是“物理分离”的。物理分离根据防止的失效程度有三种含义, 即节点分离、链路分离和范围分离^[8]。所谓共享风险链路组 (Shared Risk Link Groups, SRLG)^[9-11] 的概念是对“物理分离”概念的进一步扩展和抽象, 其定义为一组链路共享同一物理资源, 比如具有相同的失效风险、经过同一灾区。网络操作者通过指定物理链路的 SRLG 来满足不同的要求。例如, 所有穿过同一光缆的光纤属于同一 SRLG; 类似地, 所有穿过同一光纤的波长通路属于同一 SRLG。甚至, 网络操作者为了能在地震、洪水等非常情况下也能确保服务, 可以指定穿过同一灾区的物理链路具有同一 SRLG 标识。同时每条链路可以同时属于多个 SRLG。SRLG 分离的两条路径可以减少同时失效的可能性, 提高了光路的抗毁机制。

因此, 提供通路保护的路由计算问题可以描述为: 给定网络拓扑以及业务的源宿节点, 要求找到两条以源节点为起点, 以宿节点为终点的路径, 且这两条路径是 SRLG 分离的 (即工作

¹ 2001-11-08 收到, 2002-07-08 改回

国家自然科学基金项目 (基金号: 69990546、60002004); 教育部科学技术研究重点项目 (02064); 电子科技大学青年科学基金项目 (YF020102)

路径上的所有链路与保护路径上的所有链路都不共享风险)。

传统的计算两条物理分离(注意, 不是 SRLG 分离)路径的方法有两种。第一种可以称作“裁剪相继最短路”算法^[12,13]。这是最直观, 也是最通常使用的方法: 先计算一条最短路作为工作路径, 然后在网络拓扑图中删除所有属于工作路径上的链路, 最后在裁剪后的拓扑上计算一条最短路作为保护路径。另一种可以称为“变换相继最短路”算法, 这是由 Suurballe^[14]提出的, 其基本思想仍然是两次调用最短路算法, 不过在两次调用之间不是对图进行链路裁剪, 而是对图进行权值变换。

下面分析一下直接采用这两种方法进行 SRLG 分离路径对的计算的情况。

先来考察“裁剪相继最短路”算法。将该算法扩展到计算 SRLG 分离路径对是容易的, 只需在进行裁剪时不仅删除工作路径的所有链路, 而且删除所有与这些链路具有相同 SRLG 属性的其它链路就可以了。但是, 该算法有两个缺点: 首先它是不完备的, 即可能存在次优路径对, 但采用该算法无法得到可能存在的次优路径对(参见第 3 节的进一步分析); 其次, 该算法计算出的两条路径只是保证工作路径最优, 两条路径的指标之和未必最佳, 这在很多场合下是不合理的。例如, 光网络中最佳路由的常用计算指标之一是路径跳数最小, 其物理含义是保证该业务占用的资源最少, 因为增加一跳就多占了一跳链路上的资源。由于光网络中进行 1 + 1 独占式通路保护时, 工作路径和保护路径上的资源都被占用了, 不能再被其它业务占用, 因此更合理的最佳路由指标应该是工作 / 保护路径的跳数之和最小。但采用“裁剪相继最短路”算法计算时, 只能保证工作路径跳数最小, 工作 / 保护路径跳数之和可能很大。

“变换相继最短路”算法可以计算出两条路径, 且两条路径的指标之和最佳; 并且该算法是完备的。但是遗憾的是, “变换相继最短路”算法只适用于链路分离 / 节点分离的情况(原算法只适用于链路分离, 但只需在进行变换时稍作修正就可适用于节点分离情况), 不适用于更抽象、更完整的 SRLG 分离要求。实际上, 正是由于该算法是变换相继最短路, 若指标和最佳的两条路中有具有相同 SRLG 属性的链路, 则该算法无法完备求解, 因为此时可能存在两条次优路满足要求。

综上所述, 现有的算法尚无法完备解决 SRLG 分离路径对的计算问题。本文首次提出了解决 SRLG 分离且低费用的路径对的查找问题的路由 LPSD 算法 (Low-cost Pair of SRLG-Disjoint paths algorithm)。其基本思想是在“变换相继最短路”算法的基础上, 引入部分 K 路由的思想^[15], 并且放宽了“两条路径总费用最佳”这一要求, 同时不考虑 OXC 处的波长变换(假设只要相应链路的带宽等满足要求, OXC 都能完成波长变换), 启发式地逼近最佳解。这不仅有利于降低算法的复杂度, 而且由于缩小了搜索空间, 使得算法的效率可以满足实际的工程要求。

2 SRLG 分离的低费用双路径路由算法

2.1 网络模型

用赋权图 $G = (V, A, C, S)$ 表示一个通信网络, 其中 V 代表网络中节点的集合; A 是一组双向链路的集合, 每条链路由两个相反方向的路径(或者称为子链路, 有向边)组成, 比如两个相邻节点 i, j 间存在链路, 因此两个子链路分别为 $a_{i,j} = (i, j)$ 和 $a_{j,i} = (j, i)$; C 是各边对应的费用(cost)的集合; S 代表各边对应的 SRLG 号。 $c_{i,j}$ 表示子链路 (i, j) 的费用 cost, $c_{i,j} = c_{j,i}$ 。

设链路连接请求的源节点、宿节点分别为 s, t 。SRLG 分离低费用路径对问题, 实际上属于带有一个约束条件一个优化目标的 QoS(Quality of Service) 路由问题: 寻找两条路, 不妨设工作路为 P_w , 保护路为 P_p , 并且要求 (1) 式尽可能最小。

$$\sum_{(i,j) \in P_w} c_{i,j} + \sum_{(i,j) \in P_p} c_{i,j} \quad (1)$$

2.2 K 路由思想简述

K 路由算法实际上就是一种尝试法, 它是由普通的无环 K 路由 (Loopless K -shortest path) 算法^[15] 改进而来的。 K 路由算法有多种, 我们采用了所谓的偏离算法 (Deviation algorithm), 其主要步骤如下:

- (1) 找出全图所有节点到宿的最短 (这里指 cost 最小) 路径, 即最短路径生成树。
- (2) 生成树中源到宿的路径 Path 就是所求 K 路由中的第一条 (最短的一条)。
- (3) 对 Path 逐点进行摆动, 得到一些新的源到宿的路径, 组成候选路径集 X 。
- (4) 选取 X 中的最短路作为新的 Path, 若 Path 无环, 则 Path 就是下一条所求路由。
- (5) 反复执行步骤 (3) 和步骤 (4), 直到找够所需的 K 条路径, 或已穷尽 X 。

摆动之前, 需要对链路 cost 进行变化: $\overline{c_{i,j}} = \pi_j - \pi_i + c_{ij}$, $(i, j) \in A$ 。其中 π_j, π_i 是节点 j, i 到宿节点的最小 cost。

2.3 路由算法描述

Suurballe^[14] 提出了同时计算最短的链路分离路径对的算法, 但没有考虑在光网络中需要 SRLG 分离这一需求。我们在该算法基础之上, 引入部分 K 路由的思想, 提出了解决 SRLG 分离且低费用的路径对的查找问题的路由算法——LPSD。

LPSD 算法的流程图见图 1。其主要思想如下:

(1) 在图 G 从宿开始用最短路径算法 (比如 Dijkstra 算法^[16]) 计算基于 cost 的最短路径树, 得到从源 s 到宿 t 的最短路径 P_0 。改变链路的 cost: $\overline{c_{i,j}} = \Delta i - \Delta j + c_{i,j}$, $(i, j) \in A$, 其中 $\Delta i, \Delta j$ 是节点 i, j 到宿节点 t 的最小 cost; 同时将路径 P_0 上的有向边的 cost 值改为无穷, 得到图 G' 。(注意如果不存在 P_0 , 则网络无法找到满足要求的路径对, 算法结束。)

(2) 在图 G' 上从宿开始也采用 Dijkstra 算法计算基于 cost 的最短路径树。(a) 如果得到从源到宿的当前最短路径 P_1 , 同时得到每个节点到宿的最短路径 $P_{i,t}$ 。由于在 (1) 中 P_0 所经过的有向路径的 cost 为无穷, 因此新路不会与 P_0 有相同有向边。(b) 如果没有找到源到宿的最短路, 则宣告此网络不能建立满足 SRLG 分离的路径对 (事实上, 这种情况的出现说明该网络至少有一条链路是所有从源到宿的路径所必须经过的, 所以这种情况下不可能找到 SRLG 分离的路径对)。

(3) P_0, P_1 所经过的链路构成一集合, 从集合中删去 P_0, P_1 中有向边都经过的链路 (即相同链路, 例如 P_0 经过边 (i, j) , 而 P_1 经过 (j, i) , 此时我们称 P_0, P_1 经过相同链路, 则需删去节点 i, j 间的链路), 集合中剩下的链路中可以得到两条链路分离的路径。

(4) 判断 (3) 中所得的两条路径是否 SRLG 分离, 若分离则结束, 给出两条 SRLG 分离并且使 (1) 式为最小的路径 (即工作路、保护路费用和最小)。

(5) 如果 (3) 中所得两条路径不是 SRLG 分离, 则在图 G' 改变链路的 cost: $\overline{c_{i,j}} = \pi_j - \pi_i + c_{ij}$, $(i, j) \in A$, 其中 π_j, π_i 是节点 j, i 到宿节点 t 的最小 cost。

(6) 在改变了链路 cost 的图 G' 上对路径 P_1 进行摆动:

对于 P_1 上每一个节点 v_i , 选择与之相连的链路 (v_i, v_j) (该链路的 cost 最小, 但同时其 cost 大于等于 P_1 上与该点相连的下一链路的 cost 值), 新路 $Psv_i + (v_i, v_j) + Pv_jt$ 是在 v_i 处摆动得到的次优路, 新路加入到 X -list 集合 (记录摆动得到的路由的集合)。同时要记录摆动过的路径 P_1 。

(7) 从 X -list 取出 cost 最小的路由赋予 P_1 (此路由是图 G' 上当前的最优路), 删去 P_0, P_1 相同的链路, 从 P_0, P_1 剩下的链路中可以得到两条链路分离的路径, 查看它们是否 SRLG 分离, 是则停止; 否则, 返回 (6) 继续摆动, 直到找到 SRLG 分离的两条路径或者 X -list 为空宣告此网络拓扑无法提供 SRLG 分离的路径对为止。

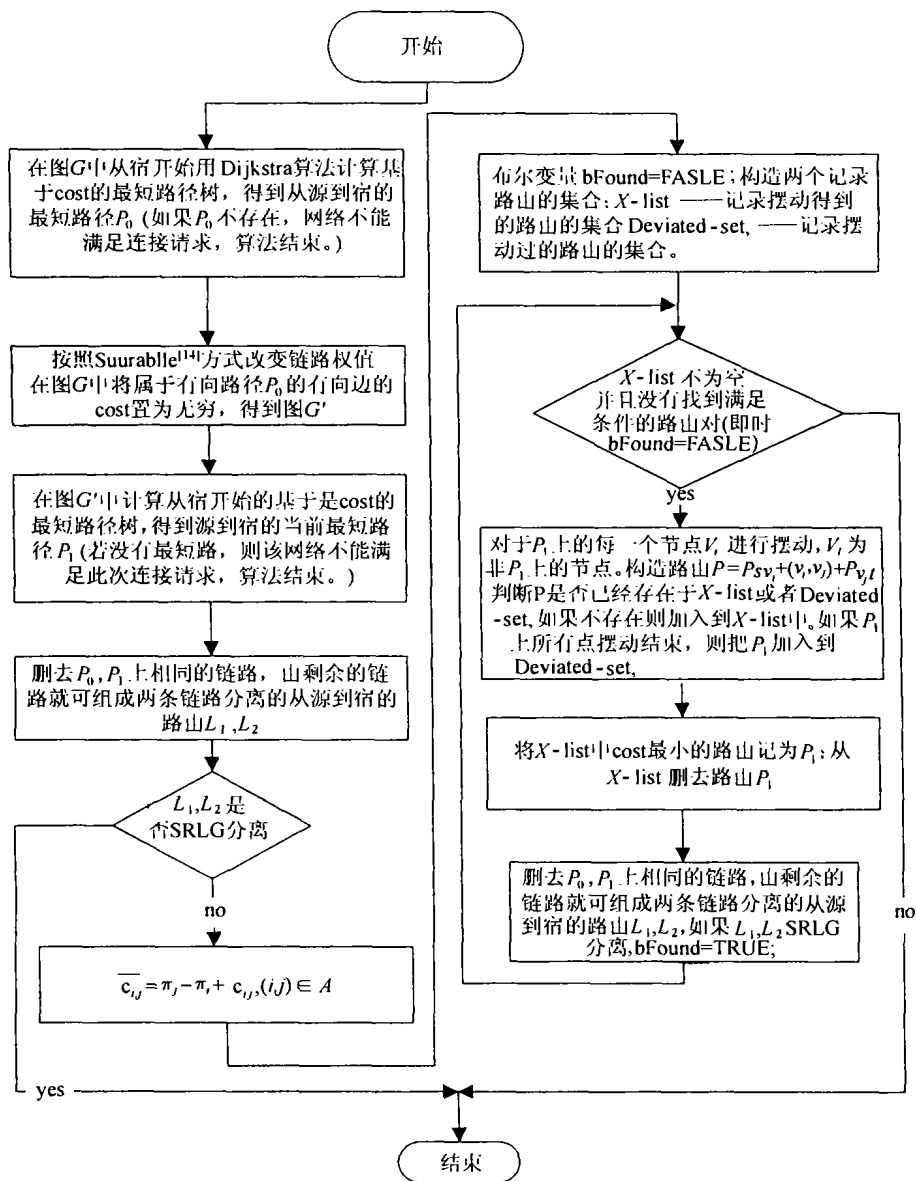


图1 LPSD 算法描述流程

3 算法特性分析

我们在 Windows2000 平台上使用微软的集成开发工具 VC++ 对 LPSD 算法进行仿真, 同时对比了传统的基于“裁剪相继最短路”的算法实现方式以及改进的 Suurballe 选路的算法。

(1) 完备性

基于“裁剪相继最短路”的算法先用 Dijkstra 等最短路径算法计算最优工作路径, 删掉任何与工作路径上的链路有着相同 SRLG 的链路, 然后在新的拓扑图基础上计算保护路径。这种方法很直观, 缺陷是不完备。在网络中找到最优的工作路径后, 删去工作路径以及与工作

路径有相同 SRLG 的链路后, 在剩余的网络拓扑中可能找不到保护路径; 但如果我们把原始网络中的次优路径作为工作路径, 删去次优路径以及与次优路径有相同 SRLG 的链路, 在剩余网络中我们可能找到保护路径。如图 2 所示, 圈中数字为节点标号 ID, 每条边上的数字为该链路的 cost 值, 假设各链路分别属于不同的 SRLG 组。通过基于“裁剪相继最短路”算法我们只能得到路径 $P_0 = \{0-1-2-3\}$, 而没有保护路径。而采用 LPSD 算法, 我们首先由步骤 (1) 得到路径 $P_0 = \{0-1-2-3\}$, 步骤 (2) 得到 $P_1 = \{0-2-1-3\}$, 删去 P_0, P_1 都经过的链路, 我们容易得到两条 SRLG 分离的路径 $\{0-1-3\}$ 、 $\{0-2-3\}$ 。由此可知 LPSD 算法可以比较完备地在一个网络中寻找路由。

而改进的 Suurballe 算法由于不能找到总费用次优的两条路径, 因此也不完备。

(2) 总费用低

由于我们的算法是把 SRLG 分离的双路径的总费用尽量低作为优化目标, 因此所得结果比基于“裁剪相继最短路”的算法所得结果优。图 3 为一个 5 节点的网络拓扑图, 各链路的数字分子为该边的 cost, 分母为 SRLG 号码 (例如 5/13,9, 这就表示该链路 cost 为 5, SRLG 为 13 和 9), 节点 0 为源节点, 节点 3 为宿节点。基于“裁剪相继最短路”的算法是使用 Dijkstra 算法寻找源到宿的最短路径 P_1 , 即 $\{0-1-2-3\}$; 在网络中删去与 P_1 有相同 SRLG 的链路, 再次使用 Dijkstra 算法, 我们得到路径 P_2 , 即 $\{0-4-3\}$ 。然而通过 LPSD 我们得到的两条路径 P'_1 为 $\{0-1-3\}$ 和 P'_2 为 $\{0-2-3\}$ 。 P_1 和 P_2 的 cost 和为 11, 而 P'_1 和 P'_2 的 cost 和为 8。对于从网络整个资源分配来说, 显然 LPSD 算法好。

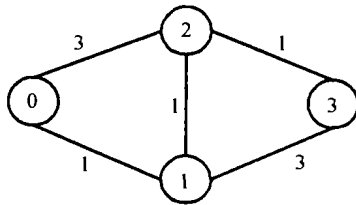


图 2 4 节点示意图

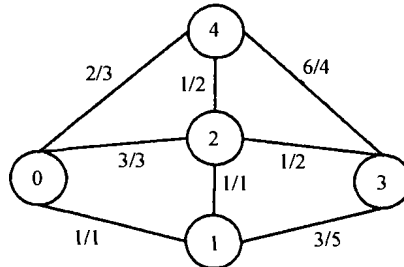


图 3 5 节点完备性说明示意图

(3) 在典型网络中几种算法比较

对 NSFNET(图 4) 和 CERNET(图 5) 进行仿真, 各链路的费用、SRLG 见图, 假设图 4 在节点对 (0, 13)、(1, 10), 图 5 节点对 (3, 9)、(3, 6) 存在这业务, 通过仿真我们得到表 1 和表 2 中的数据:

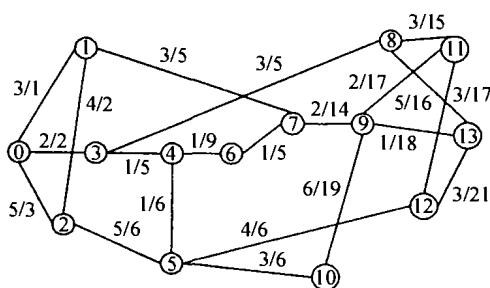


图 4 NSFNET: $G(14,21)$

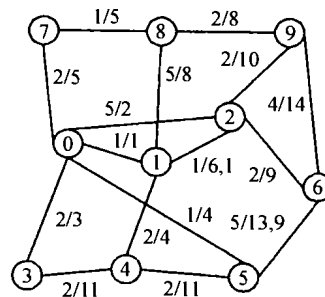


图 5 NSFNET: $G(10,16)$

表 1 改进 Suurballe 算法与 LPSD 算法数据

(源, 宿)	算法	路径	费用	SRLG 分离	总费用
(0, 13)	Suurballe 算法	0-1-7-9-13	9	否	20
		0-3-4-5-12-13	11		
	LPSD	0-3-4-6-7-9-13	8	是	25
		0-2-5-12-13	17		
(1, 10)	Suurballe 算法	1-0-3-4-5-10	10	否	17
		1-7-9-10	11		
	LPSD	1-7-9-10	11	是	23
		1-2-5-10	12		

表 2 基于“裁剪相继最短路”的算法与 LPSD 算法比较

(源, 宿)	算法	路径	费用	跳数	总费用
(3, 6)	基于“裁剪相继最短路”的算法	3-0-1-2-6	6	4	∞
		无	∞	∞	
	LPSD	3-4-1-2-6	7	4	18
		3-0-7-8-9-6	11	5	
(3, 9)	基于“裁剪相继最短路”的算法	3-0-1-2-9	6	4	19
		3-4-5-6-9	13	4	
	LPSD	3-0-7-8-9	7	4	14
		3-4-1-2-9	7	4	

从图 4 和表 1 中的数据我们可以看到, 改进的 Suurballe 算法虽然找到的两条路的总费用最低, 但其 SRLG 不分离; 而 LPSD 算法找到的两条路径不但 SRLG 分离而且总费用也比较低。从图 5 和表 2 我们可以看到, 基于“裁剪相继最短路”的算法存在两个缺陷: 一是不完备, 二是所得两条 SRLG 路径的总费用不优。而 LPSD 可以很好地解决这两个问题。

4 结 论

光网络中光路的保护是至关重要的, 因此对于一个光路请求需同时提供工作路径和保护路径, 并且这两条路径必须是 SRLG 分离的。传统的基于“裁剪相继最短路”的算法不能完备地解决 SRLG 问题, 同时不能保证所给出的两条路费用和尽量最小。简单改进的 Suurballe 算法也不能完成这一功能。LPSD 路由算法成功地解决了 SRLG 分离且总费用低的路径对的查找问题, 启发式地逼近最佳解, 可以满足工程要求。

参 考 文 献

- [1] User Network Interface(UNI) 1.0 Signaling Specification, OIF Draft Implementation Agreement, Contribution Number, OIF2000.125.7, October 1, 2001.
- [2] O. Aboul-Magd, M. Mayer, D. Benjamin, *et al.*, Automatic Switched Optical Network (ASON) Architecture and Its Related Protocols, draft-ietf-ipo-ason-00.txt, Internet Draft, July 2001.
- [3] D. Awduche, *et al.*, Multi-Protocol Lambda Switching, Combining MPLS Traffic Engineering Control with Optical Crossconnects, draft-awduche-mpls-te-optical-01.txt, Internet Draft, Nov. 1999.
- [4] D. Basak, *et al.*, Multi-protocol Lambda Switching: Issues in Combining MPLS Traffic Engineering Control with Optical Crossconnects, draft-basak-mpls-oxc-issues-00.txt, Internet Draft, Feb. 2000.
- [5] M. Krishnaswamy, *et al.*, MPLS control plane for Switched Optical Networks, draft-krishnaswamy-mpls-son-00.txt, Internet Draft, Feb. 2000.
- [6] K. Kompella, *et al.*, Extensions to IS-IS/OSPF and RSVP in support of MPL(ambda)S, draft-kompella-mpls-optical-00.txt, Internet Draft, Feb. 2000.
- [7] Y. Fan, *et al.*, Extensions to CR-LDP and RSVP-TE for Optical Path Set-up, draft-fan-mpls-lambda-signaling-00.txt, Internet Draft, Mar. 2000.

- [8] S. Dharanikota, R. Jain, *et al.*, Shared Risk Groups for Diversity and Risk Assessment in Optical Networks, Submitted to OFC2002, <http://www.cis.ohio-state.edu/~jain/papers/srgofc.htm>, <ftp://ftp.netlab.ohio-state.edu/pub/jain/papers/gblbb.zip>.
- [9] F. Poppe, J. Jones, S. Venkatachalam, *et al.*, Inference of Shared Risk Link Groups, Internet Draft, draft-many-inference-srlg-00.txt, February 2001.
- [10] B. Rajagopalan, D. Saha, Link Bundling in Optical Networks, draft-rs-optical-bundling-01.txt, Internet Draft, Work in Progress, October 2000.
- [11] J. Luciani, *et al.*, IP over Optical Networks: A Framework, Internet Draft, draft-many-ip-optical-framework-03.txt, March 2001.
- [12] J. Luciani, *et al.*, IP over Optical Networks-A Framework, Internet Draft, draft-ip-optical-framework-00.txt, IETF, February 2000.
- [13] V. Shandilya, Fault Tolerant LSP establishment in an MPLS network, draft-shandilya-fault-tolerant-lsp-00.txt, Internet Draft, July 2001.
- [14] J. W. Suurballe, R. E. Tarjan, A quick method for finding shortest pairs of disjoint paths, Networks, 1984, 14, 325-336.
- [15] Ernesto de Queiros Vieira Martins, Marta Margarida Braz Pascoal, Jose Luis Esteves dos Santos, An algorithm for ranking loopless paths, Research Report, CISUC, December 1999, http://citeseer.nj.nec.com/martins99_algorithm.html.
- [16] 严蔚敏, 吴伟民, 编著, 数据结构 (C 语言版), 北京, 清华大学出版社, 1997, 186-192.

A ROUTING ALGORITHM FOR FINDING LOW-COST PAIR OF NO-SHARED-RISK PATHS

Wen Haibo Wang Sheng Li Lemin

(Nat. Key Lab of Optical Fiber Transm. and Comm. Network, UESTC, Chengdu 610054, China)

Abstract In optical network, for anyone connection in order to provide protection mechanism, not only one working path for the traffic flow should be computed, but also one backup path should be provided, and they should be physical-disjoint. This paper proposes one heuristic algorithm, which can compute two SRLG-disjoint paths simultaneously, and the total cost of the two paths is near optimal. In this paper, some simulations and analysis are also given out.

;

Key words Shared risk link groups, K shortest paths routing

温海波: 男, 1976 年生, 博士生, 目前主要研究方向为: WDM 光网络技术.

王 晟: 男, 1971 年生, 博士, 副教授, 目前主要研究方向 ATM 技术, WDM 光网络技术.

李乐民: 男, 1932 年生, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士, 目前主要研究方向为: 宽带通信网和数字信息传输.