

# 网状 WDM 网中的共享通路保护设计算法

虞红芳,王 晟,李乐民

(电子科技大学宽带光纤传输与通信系统技术重点实验室,四川成都 610054)

**摘 要:** 本文研究了网状 WDM 网中的 SRLG(Shared Risk Link Groups;共享风险链路组)分离约束下的静态共享通路保护设计问题-给定网络物理拓扑、业务量需求矩阵和工作路由,为每个波长需求确定保护路由,使得所需的备份资源最小.这个问题可以用整数线性规划公式来描述.由于这是一个 NP-C 问题,因此,本文提出一种启发式算法 MSC(Maximally Share the Capacity)加以解决,该算法的核心思想是改变链路权重使得保护路由之间尽量共享资源.仿真结果表明,本文算法能有效地降低所需的备份资源,提高了网络的资源利用率.

**关键词:** 网状 WDM 网; SRLG 分离; 共享通路保护; 备份资源; 启发式算法

**中图分类号:** TN913.24 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2004) 04-0635-04

## Shared-Path Protection Design Algorithm for Meshed WDM Network

YU Hong-fang, WANG Sheng, LI Le-min

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

**Abstract:** The paper considers the static shared-path protection problem under SRLG (Shared Risk Link Groups) constraint in meshed WDM networks-determining the backup route for each wavelength demand to minimize spare capacity required, given the network topology, traffic matrix and primary routes of all demand. This problem can be formulated as Integer Linear Programming, a NP-C problem, which is computationally intractable for large size of networks. So, we present a heuristic algorithm to address the problem. The key idea of the algorithm is to maximally share the capacity. Simulation results show that the developed scheme effectively reduces the required spare capacity and enhances the network resources utilization.

**Key words:** meshed WDM network; SRLG-disjoint; shared-path protection; spare capacity; heuristic algorithm

### 1 引言

近年来,基于 WDM(波分复用)技术的骨干网以其容量大和可靠性高等特点推动了 Internet 的迅猛发展.随着各种新型业务如视频点播、带宽租用、VPN(Virtual Private Network)等不断涌现,对容量的需求也爆炸性地增长.网状结构由于能够提供快速和有效的容量配置,现已成为长距离骨干网的主要组网方式.网状 WDM 网提供的基本业务是在两个业务接入点间建立一系列波长通道,即光路(Lightpath).在网络边缘的客户(如 IP/ATM 路由器)使用这些光路作为传输数据/语音业务的大容量管道.由于一条光路可能聚合了大量的用户业务,光路的失效将会造成巨大的损失.因此基于 WDM 技术的网络生存性问题得到了特别地关注.

当前网络生存性技术有多种,基于通路的保护机制由于恢复速度很快而且实现简单,已成为解决网络生存性的有效机制.这种机制原理是为每个业务需求建两条“物理分离”的光路,分别为工作路由和保护路由.一旦工作路由失效,可以立刻切换到保护路由上运行.物理分离根据防止失效程度不

同具有多种含义,如节点分离、链路分离和区域分离等. IETF 于 2001 年在草案中提出了共享风险链路组(Shared Risk Link Groups, SRLG)的概念,对“物理分离”概念进一步抽象和扩展. SRLG 是指共享相同物理资源(也就是具有共同失效风险)的一组链路.每个 SRLG 都有唯一的标识,称为 SRLG 标识(SRLG Identifier).网络操作者通过指定物理链路属于不同的 SRLG 来满足不同用户对可靠性的要求.显然, SRLG 概念的引入,能更灵活地保证网络生存性.本文着眼 SRLG 分离的通路保护机制.在网状 WDM 网中,通路保护机制又分为专用保护(Dedicated Protection)和共享保护(Shared Protection).专用保护中,不同的保护路由间不共享资源.典型的例子如 1+1 保护与 1:1 保护.而在共享保护中,只要工作路由是 SRLG 分离的,彼此没有共享风险,它们的保护路由就可以共享资源.显然,共享保护,网络资源利用率较专用保护高,网络所能容纳的业务更多.目前已有不少文献对网状 WDM 网中的共享通路保护问题进行了研究.文献[4]比较了专用保护与共享保护的性,但没有给出具体的实现方法.文献[5]和[6]给出了静态业务需求下的共享通路保护问题的 ILP 描述,文献[7]给出了在动

收稿日期:2002-07-29;修回日期:2003-03-17

基金项目:国家自然科学基金(No. 60002004, No. 60302010);电子科技大学校青年基金(No. YF020102);教育部科学技术研究重点项目(No. 02064)

态环境下计算工作路由和保护路由的方法,但都没有考虑 SRLG 分离的约束.文献[8]尽管引入了 SRLG 的概念,但在具体分析时只考虑了一种特定的风险情况(管道级风险),没有给出通用意义下的 SRLG 分离限制的解决方法.因此,本文将研究通用 SRLG 分离的静态共享通路保护问题的解决方法.

同时,现有的静态通路共享保护设计问题主要关注的是如何设计工作路由和保护路由,使得总的网络资源最小.这个问题在网络规划初期是很有必要的.但当网络开始运行后,对正在承载业务的工作路由作调整是不现实的.因此,本文所要解决的静态保护设计问题是保持工作路由不变,对保护路由重新计算和优化,使得预留的备份资源尽量少.

本文组织如下:第二节结合 SRLG 概念,给出了整数线性规划方法来描述这个问题.由于它是一个 NP-C 问题,在第三节提出了一种启发式的 MSC(Maximally Share the Capacity)算法,这个算法的核心思想是通过改变链路的代价使保护路由尽量经过可以共享资源的链路.最后利用 NSFNET 网络拓扑,在不同负载的业务量需求矩阵下对所提的算法进行了仿真研究,通过与专用保护算法 DPP 和传统的共享通路保护算法 SPP 比较,表明 MSC 算法具有较好的性能,能有效地减少备份资源.

## 2 问题描述

本文研究的保护问题是已知网络拓扑、业务需求矩阵和工作路由,为所有业务需求计算保护路由,使得所需的备份资源最少.采用的机制是基于 SRLG 分离的共享通路保护:即工作路由和保护路由必须为 SRLG 分离;同时如果两条工作路由是 SRLG 分离,则它们对应的保护路由就可以共享资源.

设网状 WDM 网络物理拓扑为  $G(N, L)$ ,其中  $N$  代表节点集, $L$  代表链路集.对于每条链路  $(ij) \in L$ ,网络操作者根据网络故障风险情况,指定 SRLG 标识集  $y_{ij}$ (包含一个或多个 SRLG 标识).所有 SRLG 标识构成了全网的 SRLG 标识组集合  $Y$ ,即  $Y = \bigcup_{(ij) \in L} y_{ij}$ .采用 O-E-O 技术,OXC 设备很容易实现波长转换能力.因此本文假定所有网络设备都具有波长转换能力,在资源分配时不考虑波长连续性限制.每条链路都由一对方向相反的单向光纤组成,每根光纤可支持  $W$  个可用波长数(每根光纤的波长数相同).业务需求矩阵用  $D$  表示.

下面给出此问题的 ILP(Integer Linear Program, 整数线性规划)描述.

已知变量:

$s_d$  和  $t_d$  分别为需求  $d \in D$  的源和目的;  $y_{ij}$  为链路  $(ij)$  所属的 SRLG 标识集;  $L$  为表示某个风险  $f \in Y$  发生故障后所影响的链路集,显然若  $(ij) \in L_f$ ,则  $f \in y_{ij}$ .  $X_{ij}^d$  为如果需求  $d$  的工作路由经过链路  $(ij)$  为 1; 否则为 0.

需确定下列变量:

$Y_{ij}^d$ : 如果需求  $d$  的保护路由经过链路  $(ij)$  为 1; 否则为 0.

$Z_{ij}^d$ : 如果需求  $d$  在风险  $f$  发生故障时重路由经过链路  $(ij)$  为 1; 否则为 0.

$R_{ij}$ : 链路  $(ij)$  所需的保护波长数.

优化目标:

$$\min \sum_{(ij) \in L} R_{ij} \quad (1)$$

$Y_{ij}^d$  的流守恒约束:

$$\sum_{j:(ij) \in L} Y_{ij}^d - \sum_{j:(ji) \in L} Y_{ji}^d = \begin{cases} 1, & i = s_d \\ -1, & i = t_d, \quad d \in D \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

$Z_{ij}^d$  的流守恒约束:

$$\sum_{j:(ij) \in L, (ij) \notin L_f} Z_{ij}^d - \sum_{j:(ji) \in L, (ji) \notin L_f} Z_{ji}^d = \begin{cases} \sum_{(ij) \in L_f} X_{ij}^d, & i = s_d \\ - \sum_{(ij) \in L_f} X_{ij}^d, & i = t_d, \quad f \in Y \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

某个 SRLG 故障发生后,恢复的路由必定经过保护路由:

$$Z_{ij}^d \leq Y_{ij}^d, \quad d \in D, (ij) \in L, f \in Y, (ij) \notin L_f \quad (4)$$

链路上的备份资源  $R_{ij}$  应满足:

$$\sum_{d \in D} Z_{ij}^d \leq R_{ij}, \quad (ij) \in L, f \in Y, (ij) \notin L_f \quad (5)$$

在共享通道保护下,如果两条工作路由是 SRLG 完全分离的,由于单个 SRLG 失效不会使它们同时失效,因此它们的保护路由可以经过相同的链路,并且可以在公用链路上共享资源(备用波长),这一原则可由式(4)和(5)体现.链路容量的约束,即工作路由所占用的资源加上备份资源应小于等于链路容量:

$$\sum_{d \in D} X_{ij}^d + R_{ij} \leq W, \quad (ij) \in L \quad (6)$$

由于上述目标函数的求解是一个 NP-C 问题<sup>[5,6]</sup>,不适合规模较大的网络,因此本文提出用启发式算法求解.

## 3 启发式算法

为了使所需的备份资源最少,必须考虑:①保护路由经过的跳数少;②对可以共享备份资源的链路要优先经过.因为这些保护路由使用相同的波长,这样给保护路由预留波长的链路少,使占用的备用资源更少;③工作路由由经过的跳数越长,它的保护路由与其他保护路由由共享资源的机会愈大.

基于上述考虑,本文启发式算法的思想描述如下:按工作路由的跳数从长到短排序,依次计算保护路由.在计算保护路由时,对可以共享资源的链路的代价保持不变;对不可以共享资源的链路的代价加上一个很大的常量  $C$ (本文  $C$  的取值为网络中所有链路的代价和乘以五).在新的链路代价下,计算最短路由作为保护路由.通过这种方法,可以使保护路由由优先经过可以共享资源的链路.我们称该启发式算法为最大共享资源 MSC(Maximally Share the Capacity)算法.

把所有共享同一资源的保护路由由看作一个共享组,显然链路上存在多个共享组.判断是否可以共享链路的备份资源,就是观察链路已有共享组中是否至少存在一个共享组,它所包含的所有工作路由与现有工作路由的 SRLG 是分离的(没有公共的 SRLG ID).若不存在,则链路需要分配新的备份资源;反之,可以共享已有的备份资源.

为了便于描述,下列算法只考虑业务容量需求为一个波长容量的情况(对于业务容量需求大于一个波长容量的情况,只需将算法略作修改即可).算法步骤如下:

(1)根据物理拓扑  $G$ ,业务需求矩阵  $T$  和每个业务需求的工作路由.得出每条工作路由的包含的 SRLG 集合和每条链路的可用资源.

(2)初始化链路代价矩阵和变量.由于我们关注的是备份资源最少,因此将网络所有边的代价均定义为 1.

(3)将工作路由按跳数从长到短排序.

(4)从最长的工作路由开始,被此工作路由使用了的链路从虚网络中删除;与工作路由有相同 SRLG 的链路从虚网络中删除;判断链路是否可以共享资源,相应地修改链路权重.

(5)在此虚网络中按新的代价矩阵计算最短路径,此最短路径即为保护路由.更新保护路由所经过的链路的剩余资源和备份资源.

(6)更新保护路由所经过的链路的共享组信息.

(7)对下一条工作路由由重复以上过程,直到为所有的工作路由由都找到保护路由为止.

#### 4 仿真分析

测试用的物理网络是 NSFNET,共有 16 个节点,25 条链路,圆圈中为节点的编号,链路旁边的数字表示它的 SRLG ID 如图 1 所示.每个节点具有波长转换能力;每条链路由一对方向相反的单向光纤组成;每根光纤上可以支持 30 个波长;每个波长的容量设为单位容量 1.

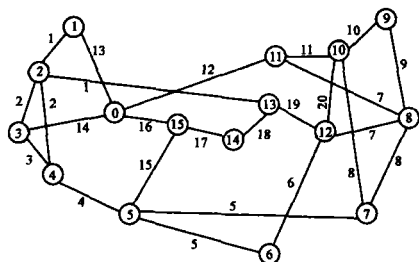


图 1 NSFNET 网络拓扑

假设各节点的业务产生互相独立,所有节点对总的业务需求数为  $V$ .仿真时,我们采用随机分布的信源模型,将  $V$  由小变大.每个业务需求的工作路由为两点间的最短路由.

本文从资源利用率和共享度两个方面来衡量算法性能.设工作路由需要的资源数(波长数)为  $R_p$ ,保护路由由需要的资源数为  $R_s$ ,则资源利用率  $\delta = R_p / (R_p + R_s)$ .显然资源利用率高,所需的备份资源就少.共享度表示保护路由所经过的每条链路平均被共享的次数,它是保护路由的跳数之和与所需的备份资源的比值.本文将与专用通路保护算法 DPP(Dedicated Path Protection)和传统的共享通路算法 SPP(Shared Path Protection)比较. DPP 算法为每个业务需求建立一条与工作通路 SRLG 分离的保护通路,不同业务请求的保护路由由间不允许共享资源.传统的 SPP 算法也是基于最短路由算法,计算保护路由时不改变链路的权重,按跳数最小计算路由.在分配资源时,检查链路资源是否可以共享.

仿真结果如图 2 和 3 所示(为保证实验结果的准确性,对每个  $V$  的取值,下述结果都是在 20 次实验后所取的平均值).

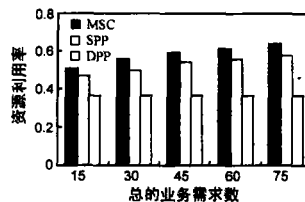


图 2 专用保护与共享保护的资源利用率比较

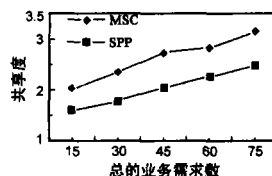


图 3 MSC 算法与 SPP 算法共享度比较

从图 2 可以看出,不管总业务需求数如何变化,专用通路保护比共享通路保护算法的资源利用率均要低,需要更多的备份资源.在共享通路保护算法中, MSC 算法又比传统 SPP 算法的资源利用率要高.从图 3 看出, MSC 算法的共享度比传统的 SPP 算法要高,保护路由之间能最大程度地共享备份资源.

为了更清楚地说明问题,表 1 列出了在业务需求总数为 8 的某个业务量矩阵下,采用传统的 SPP 算法和本算法所得到的保护路由.如表 1 所示,在计算第 6 条保护路由时, MSC 算法计算得到的保护路由为(3,2,13,12,8,11),它可以与其他保护路由共享三条链路.而 SPP 算法计算得到的保护路由为(3,4,5,7,8,11),只可以共享一条链路.表 1 说明了虽然 MSC 算法保护路由的平均跳数增加了,但有更多的保护路由之间共享了资源,使得备份资源有很大程度地降低,提高了资源利用率.由于本文所关注得目标是备份资源最少,因此保护路由为与达到最大程度资源共享,在寻路时走的并非是最短路径,从而使得平均跳数增加了.

表 1 MSC 算法与 SPP 算法比较

工作路由		SPP		MSC	
路由	包含的 SRLG	保护路由	跳数	保护路由	跳数
(13,2,1,0)	{1,13}	(13,14,15,0)	3	(13,14,15,0)	3
(8,7,5,4)	{8,5,4}	(8,12,13,2,4)	4	(8,12,13,2,4)	4
(8,11,0)	{7,12}	(8,7,5,15,0)	4	(8,7,5,15,0)	4
(10,12,6)	{20,6}	(10,7,5,6)	3	(10,7,5,6)	3
(14,15,5)	{17,15}	(14,13,2,4,5)	4	(14,13,2,4,5)	4
(3,0,11)	{14,12}	(3,4,5,7,8,11)	5	(3,2,13,12,8,11)	5
(0,15,14)	{16,17}	(0,1,2,13,14)	4	(0,11,8,12,13,14)	5
(3,4,5)	{3,4}	(3,0,15,5)	3	(3,0,15,5)	3
所需的备份资源		22		18	
资源利用率		$18 \div (18 + 22) = 0.45$		$18 \div (18 + 18) = 0.5$	
平均跳数		$30 \div 8 = 3.75$		$31 \div 8 = 3.875$	
共享度		$30 \div 22 = 1.36$		$31 \div 18 = 1.72$	

#### 5 结论

本文研究了网状 WDM 网中静态共享通路保护设计问

题,即在给定的网络拓扑和业务矩阵,以及工作路由的情况下,如何进行保护路由的计算使得所需的备份资源最少.此类保护设计问题是非常有应用价值的.尤其当网络运行后,改变正在承载业务的工作光路由是不现实的,但可对保护路由重新设计和优化,从而减少备份资源.同时为达到灵活的网络生存性,本文引入 SRLG 概念,描述了通用 SRLG 分离约束下的保护设计问题,并给出了求解该问题的整数线性规划公式.由于这是一个 NP-C 问题,因此提出一种启发式算法 MSC (Maximally Share the Capacity) 予以求解.仿真结果表明,该算法能有效地提高全网的资源利用率,降低对备份资源的需求.

#### 参考文献:

- [ 1 ] T E Stern, K Bala. Multiwavelength optical networks: A layered approach [Z]. Prentice Hall, May 1999.
- [ 2 ] Sudipta Sengupta, Ramu Ramamurthy. From network design to dynamic provisioning and restoration in optical cross-connect mesh networks: An architectural and algorithmic overview [J]. IEEE Networks, 2001, (July/Aug.): 36 - 45.
- [ 3 ] F Poppe, J Jones, S Venkatachalam, et al. Inference of shared risk link groups [DB/OL]. Internet Draft, draft-many-inference-srlg-00. txt, 2001 - 02.
- [ 4 ] Zhensheng Zhang, James Fu, et al. Lightpath routing for intelligent optical networks [J]. IEEE Networks, 2001, (July/Aug.): 28 - 35.

- [ 5 ] S Ramamurthy, B Mukherjee. Survivable WDM mesh networks: Part I- Protection [A]. Proceedings, IEEE INFOCOM '99 [C]. New York, 1999. 2. 744 - 751.
- [ 6 ] Bharat T Doshi, Subrahmanyam Dravida. Optical network design and restoration [J]. Bell Labs Technical Journal, 1999, (Jan./Mar.): 1.
- [ 7 ] Sheng-li YUAN, Jason P Jue. Shared protection routing algorithm for optical networks [J]. Optical Networks Magazine, 2002, 3(3): 20 - 27.
- [ 8 ] Hui ZANG, Can-hui OU, Biswanath Mukherjee. Path-protection routing and wavelength assignment in WDM mesh networks under shared-risk-group constraints [A]. APOC 2002 [C]. Beijing, China, 2002. 49 - 59.

#### 作者简介:



虞红芳 女, 1975 年 2 月生于浙江萧山, 1999 年电子科技大学硕士毕业留校任教, 现为宽带光纤传输与通信系统技术重点实验室在职博士研究生, 目前主要研究方向为光网络的优化设计包括光网络生存性、虚拓扑设计、重配置问题以及业务量工程技术。

王 晨 (见本期第 7 页)

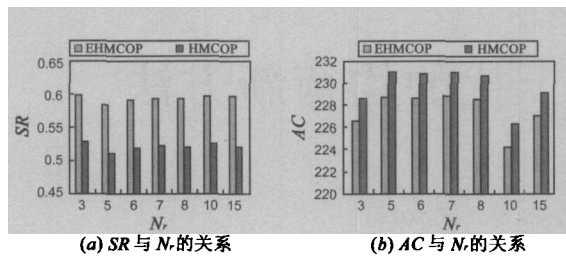


图 3 第一组实验的 SR 与 AC 结果

不难看出, EHMCOPI 算法在各种约束情况下都比 HMCOP 性能好, 无论成功的次数, 还是路径的平均主代价都优于 HMCOP 算法. 在不同的约束条件下, 性能改善的程度是不同的. 从图 4(a) 中可见, 在约束非常严格(如  $b_1 = 0.7$ ) 和约束非常宽松(如  $b_1 = 1.1$ ) 的情况下, 成功比例几乎没有区别. 约束严格时, 两个算法都很难找到满足条件的路径, 从 NO 的大小可见,  $b_1 = 0.7$  时, 90% 以上的路径请求都无法满足; 反之, 约束宽松时, 两个算法都可以容易地找到满足约束地路径; 因此, 在这两个极端, EHMCOPI 算法的性能改善程度有限.

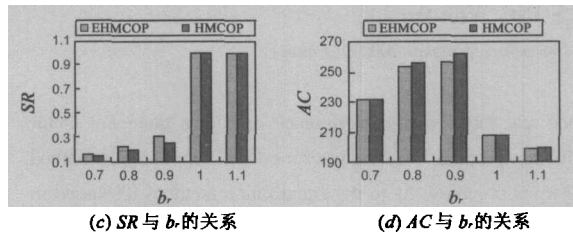


图 4 第二组实验的 SR 与 AC 结果

图 4 中可以看出,  $b_1$  越大, ME 也越大. 这说明约束越宽松, EHMCOPI 算法计算出主代价较小的路径越容易. 这是由于约束越宽松, 正向计算时查找主代价较小的路径受到的限制越小, “可行路径检查” 的效果也越明显. 但是, 图 4(b) 表明, 约束宽松时, 尽管与 HMCOP 算法相比, EHMCOPI 算法得到主代价小的路径次数多, 平均主代价 AC 的大小却没有明显改善. 这意味着主代价的改进程度并不大.

## 5 结论

针对多个加性约束的 MCOP 问题, 我们改进了现有的 HMCOP 算法, 分别提出了“多路径记录”和“可行路径检查”两个具体措施, 以克服 HMCOP 算法中存在的正向和反向路径记录不完备的问题, 所提的算法称为 EHMCOPI 算法. 给出了算法的伪码描述, 分析了算法的复杂度, 并结合两个具体的实例分析了 EHMCOPI 算法是如何解决 HMCOP 算法所存在的问题的. 最后通过仿真实验, 详细比较了本文所提的算法与 HMCOP 算法. 结果表明, 在成功比例、平均路径主代价等关键性能指标上, 新算法都比 HMCOP 算法好.

## 参考文献:

- [1] X Xiao, L M Ni. Internet QoS: A big picture[J]. IEEE Network, 1999, 13(2): 8 - 18.
- [2] T M Chen, T H Oh. Reliable services in MPLS[J]. IEEE Communication Magazine, 1999, 37(12): 58 - 62.
- [3] Z Wang, J Crowcroft. Bandwidth-delay based routing algorithms[A]. Proc of IEEE global Telecommunications Conference 1995, GLOBECOM'95[C]. Singapore: IEEE, 1995. 2129 - 2133.
- [4] R K Ahuja, T L Magnanti, J B Orlin. Network Flows: Theory, Algorithms, and Applications[M]. Prentice Hall, Inc, 1993.
- [5] J M Jaffe. Algorithms for finding paths with multiple constraints[J]. Networks, 1984, 14: 95 - 116.
- [6] A Orda. Routing with end-to-end QoS guarantees in broadband networks[J]. IEEE/ACM Trans on Networking, 1999, 7(3): 365 - 374.
- [7] F Ergun, R Sinha, L Zhang. QoS routing with performance-dependent costs[A]. Proc. of the INFOCOM 2000 Conference[C]. Tel Aviv, Israel, IEEE: 2000, (1): 137 - 146.
- [8] H F Salama, D S Reeves, Y Viniotis. A distributed algorithm for delay-constrained unicast routing[A]. Proc. of the INFOCOM 97 Conference[C]. Kobe, Japan: IEEE, 1997, 4(1): 84 - 91.
- [9] J Zhou. A new distributed routing algorithm for supporting delay-sensitive applications[A]. Proc of (ICCT'98)[C]. Beijing, China: IEEE, 22-24 Oct. 1998: S37-06(1 - 7).
- [10] D Eppstein. Finding the k shortest paths[A]. Proc. of the 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science[C]. Santa Fe, New Mexico, USA: IEEE, 1994. 154 - 165.
- [11] T Korkmaz, M Krunz, S Tragoudas. An efficient algorithm for finding a path subject to two additive constraints[A]. Proc of the International Conference on Measurement and Modeling of Computer Systems (ACM SIGMETRICS'00 Conference)[C]. Santa Clara, California, International Conference on Communication Technology, USA: ACM, 2000, 1: 318 - 327.
- [12] T Korkmaz, M Krunz. Multi-Constrained Optimal Path Selection[A]. Proc of the IEEE INFOCOM 2001. Conference Proc[C]. Anchorage, Alaska, USA: 2001. 834 - 843.
- [13] T H Cormen, C E Leiserson, R L Rivest. Introduction to Algorithms[M]. The MIT press and McGraw-Hill: sixteenth edition, 1996.
- [14] K I Calvert, M B Doar, E W Zegura. Modeling internet topology[J]. IEEE Communications Magazine, 1997, 35(6): 160 - 163.

## 作者简介:

王 晟 男, 1971 年生于四川成都, 博士, 副教授, 目前主要研究方向为通信网与宽带通信技术.

李乐民 男, 1932 年生于浙江吴兴, 教授, 博士生导师、工程院院士, 主要研究方向为通信网与宽带通信技术.