

MPLS over WDM 光互联网中多优先级标记交换路径路由算法研究

苏扬 徐展琦 刘增基

(西安电子科技大学综合业务网国家重点实验室 西安 710071)

(西安科技大学通信与信息工程学院 西安 710054)

摘要: 该文针对分层图模型的局限, 设计了结点光收发器数受限的 MPLS over WDM 光互联网的扩展分层图。提出并研究了 MPLS over WDM 光互联网中具有不同 QoS 约束的多种优先级标记交换路径的路由算法——区分综合路由算法(Differentiating Integrated Routing Algorithm, DIRA)。该算法综合考虑了对标记交换路径 QoS 的满足和网络资源的优化利用。与目前实用的 WDM 光网络路由算法的性能仿真对比表明, DIRA 在提高网络总的吞吐量, 降低有时延约束标记交换路径的阻塞率方面, 性能更优。

关键词: 光互联网; 扩展分层图; 区分综合路由算法; MPLS over WDM

中图分类号: TN915.03

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)01-0205-04

The Study on Routing Algorithms of Multi-priority Label Switch Path in MPLS over WDM Mesh Networks

Su Yang Xu Zhan-Qi Liu Zeng-Ji

(State Key Lab. of Integrated Service Networks, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

(School of Commu. & Info. Eng., Xidian Univ., Xi'an 710054, China)

Abstract: An extended layered graph of MPLS over WDM mesh networks is designed in this paper, which overcomes the shortcomings of original layered graph and involves the limited optical transceivers at routing nodes. Based on different QoS constraint, the priority of label switch paths is classified and the corresponding routing algorithm DIRA (Differentiating Integrated Routing Algorithm) is proposed and studied. The LSP's QoS and optimized network resources utilization are taken into account comprehensively in DIRA. The comparison of DIRA with the representative optical routing algorithms via simulation shows that it can reduce the blocking probability of delay-constraint LSP and improve the network throughput.

Key words: Optical network; Extended layered graph; Differentiating Integrated Routing Algorithm (DIRA); MPLS over WDM

1 引言

MPLS over WDM 光互联网中 LSP 的路由算法是一个 NP-hard 问题^[1], 该问题通常都采用分层图(Layered Graph, LG)模型^[2-4], 但 LG 模型存在两个缺陷: (1) 在 OXC 无波长转换能力的情况下, 如果一条 LSP 被多跳光路承载, LG 模型要求这些光路的波长必须相同, 但 GMPLS 规定波长本身可以被作为标记, 承载 LSP 的光路的波长允许不一致, 因此 LG 模型可能增大网络对 LSP 建立请求的阻塞率。 (2) LG 模型一般不考虑结点光收发器对网络阻塞率的影响, 但如果结点光收发器受限, 新建光路时可用光收发器数可能成为 LSP 选路的制约瓶颈。针对 LG 模型的缺陷, 我们设计一种扩展分层图(Extended Layered Graph, ELG), 利用 ELG, LSP 可以被波长不同的光路承载, 而光收发器等作为一种链路资源并被赋予相应的费用值。

MPLS over WDM 光网络路由算法中比较典型的是文献[5]提出的 MinTH (Minimizing the number of Traffic Hops) 和 MinLP (Minimizing the number of Light-Path) 算法, MinTH 力求使每个 LSP 的源、宿结点对跨越的光路跳数最小, MinLP 则要求承载 LSP 所要新建的光路数最少。MinTH 算法主要考虑对单个 LSP 服务质量的满足, MinLP 算法则考虑对网络链路资源的优化利用。本文基于 ELG 提出一种考虑多个优先级 LSP 及其服务质量的区分综合路由算法——DIRA (Differentiating Integrated Routing Algorithm)。

2 扩展分层图 ELG

给定一个 MPLS over WDM 光互联网的原始物理拓扑 $G(N, L)$, N 为结点集, L 为双向光纤链路集, 每条光纤链路提供 W 个波长, 假定网络结点中的 OXC 无波长转换能力。ELG 将原始物理拓扑 G 复制成 W 个波长平面, 每个波长平面上再划分出逻辑层和物理层, G 中的路由器结点 i 映射为每个波长平面逻辑层上的一个逻辑结点 i_L , OXC 则映射为一个物理结点。路由器结点 i 在 ELG 上还有一个标记交换点

2005-04-21 收到, 2005-11-30 改回

国家自然科学基金(90104012)和 华为高校科技基金(YJCB2005 040SW)资助课题

i_s, i_d 既可以是 LSP 的源或宿, 也可以是 LSP 的中间结点。ELG 中有 4 种类型的链路——光路、波长链路、O-E-O 链路、标记转换边。光路、波长链路和 LG 模型中的定义相同, O-E-O 链路连接同一波长平面上的逻辑结点和物理结点, i_s 与每个波长平面的 i_L 通过 W 条权值为零的标记转换边相连, 这样保证一条 LSP 可以被波长不同的光路承载。如果路由器结点 i 有 m 个可用的调谐式光收发器, 在任何波长平面上, 其逻辑结点与物理结点之间就有 m 条 O-E-O 链路。在 ELG 上新建一条双向光路时, 这条光路占用的波长链路、源端和宿端的 O-E-O 链路都应被删除。

图 1 是 ELG 的示例图, 在图 1(a) 的原始物理拓扑中, 所有路由器均集成 OXC, 并配置两个调谐式光收发器, 每条双向光纤有 λ_1 和 λ_2 两个波长。图 1(b) 中, λ_1 波长平面上的两条已建双向光路 $l_1(1,2)$ 和 $l_1(1,3)$ 分别承载了 LSP₁(1,2) 和 LSP₂(1,3), 此时结点 1 的逻辑结点和物理结点在 λ_1, λ_2 波长平面都不邻接。如果结点 1 和 4 需建立 LSP₃(1,4), 结点 1 和 4 之间不能新建光路, 但可以在结点 2 和 4 之间新建一条波长为 λ_1 或 λ_2 的光路 $l(2,4)$, LSP₃(1,4) 由 $l_1(1,2)$ 和 $l(2,4)$ 两跳光路来承载。

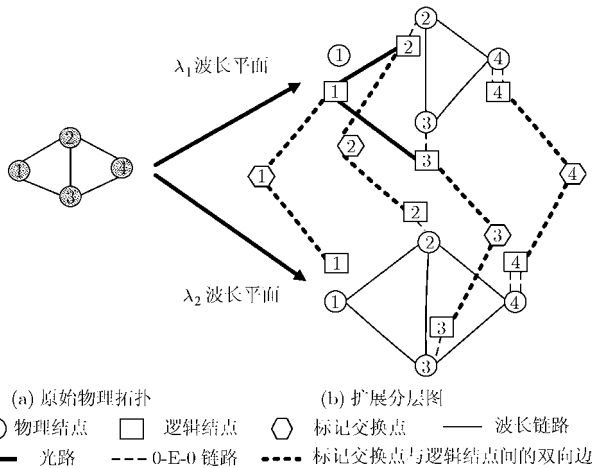


图 1 MPLS over WDM 光互联网的扩展分层图

3 区分综合路由算法——DIRA

3.1 对 LSP 服务质量和路由策略的考虑

按照转发业务流的 QoS 要求, LSP 可划分成 3 个优先级: 高优先级(HP, High Priority)、普通优先级(NP, Normal Priority)和低优先级(LP, Low Priority)。HP LSP 和 NP LSP 均有端到端时延约束, 二者统称为有时延约束的 LSP, 但 HP LSP 时延约束的紧迫度高于 NP LSP。对于 LP LSP, 其 QoS 仅考虑请求带宽, 在满足请求带宽的情况下, 网络对 LP LSP 的业务流“尽力转发”。

一个由 n 跳光路承载的 LSP, 当采用 WFQ 队列调度和漏桶整形时, LSP 中端到端时延最小的业务流 T 的时延上界为^[6]

$$D_{\min} = \frac{\sigma_T}{R} + \frac{n \cdot L_{\max}}{R} + \sum_{i=1}^n \frac{L_{\max}}{C_i} + \sum_{i=1}^n \pi_i \quad (1)$$

σ_T 是 T 的突发长度, R 是 T 的预留带宽, L_{\max} 是 T 的最大分组长度, C_i 是第 i 跳光路的带宽, π_i 是第 i 跳光路的传输时延。显然有时延约束 LSP 的时延 D 应满足 $D \leq D_{\min}$, 现取 $D = D_{\min}$, $C_i = C$ (C 是波长链路的容量)。在主要考虑 O-E-O 转换过程中路由器在电域的处理和排队时延^[7]并忽略光路传输时延的情况下, LSP 允许的最大光路跳数 H 为

$$H = \left\lfloor \frac{D_{\min} - \sigma_T / R}{L_{\max} / R + L_{\max} / C} \right\rfloor \quad (2)$$

对于有时延约束的 LSP, 一旦其光路跳数大于 H , 这条路径将不被接纳。

基于式(2), 本文中有时延约束 LSP 的路由策略为: 首先在逻辑拓扑上利用已建光路, 按光路跳数最小准则, 以多路路由方式为 LSP 寻径。如果在逻辑拓扑上不存在路径或满足光路跳数限制的路径, 则需要新建光路为 LSP 寻径, 新建光路应使 LSP 的源、宿结点间光路跳数最小。

LP LSP 的路由策略为: 首先在逻辑拓扑上为 LSP 寻找最小费用值路径, 如果没有路径而需要新建光路, 设置一个阈值 B_δ , 只有可用光收发器数大于 B_δ 的结点之间允许新建光路, 这样通过避开光收发器紧缺的结点来减轻光收发器对后续 LSP 建立请求的制约。

3.2 链路费用值

首先给出以下符号和变量: $p_{m_p n_p}^k$ 为 ELG 上 λ_k 波长平面上物理结点 m_p 和 n_p 之间的波长链路。 $l_{i_L j_L}^{k,q}$ 为 ELG 上 λ_k 波长平面上逻辑结点 i_L 和 j_L 之间的第 q 条光路。 T_i 为结点 i 的空闲光收发器数。 $S_{i_L j_L, k, q}^y$ 为布尔变量。 $S_{i_L j_L, k, q}^y = 1$ 表示标记交换路径 y 由光路 $l_{i_L j_L}^{k,q}$ 承载, 否则 $S_{i_L j_L, k, q}^y = 0$ 。 $f_{m_p n_p}^{i_L j_L, k, q}$ 为布尔变量, $f_{m_p n_p}^{i_L j_L, k, q} = 1$ 表示波长链路 $p_{m_p n_p}^k$ 被光路 $l_{i_L j_L}^{k,q}$ 占用, 否则 $f_{m_p n_p}^{i_L j_L, k, q} = 0$ 。

对于任何优先级的 LSP, DIRA 将波长链路的费用值都设为 1, 对于 LP LSP, 光路的费用值为

$$\forall i_L, j_L, k, q \quad C(l_{i_L j_L}^{k,q}) = \begin{cases} \left(\sum_{m_p, n_p} \sum_{f_{m_p n_p}^{i_L j_L, k, q}} \right) / \alpha, & \sum_y S_{i_L j_L, k, q}^y > 0 \\ +\infty, & \sum_y S_{i_L j_L, k, q}^y = 0 \end{cases} \quad (3)$$

对于配置了 B 个光收发器的路由器结点 i , 其对应 LP LSP 的 O-E-O 链路费用值为

$$\forall i \quad C(i_{e_{O-E-O}}^i) = \begin{cases} (B - T_i + 1)\alpha, & B_\delta < T_i \leq B \\ +\infty, & T_i \leq B_\delta \end{cases} \quad (4)$$

α 是不小于 N (网络结点个数) 的一个常数。

对于有时延约束 LSP, 光路、O-E-O 链路的费用值设定要保证寻径过程中承载 LSP 的光路跳数最小, O-E-O 链路费用值为

$$\forall i \quad C(i_{e_{O-E-O}}^i) = \begin{cases} \beta, & 1 \leq T_i \leq B \\ +\infty, & T_i = 0 \end{cases} \quad (5)$$

β 是一远大于波长链路费用值的常数。

光路的费用值为

$$C(I_{i,j,l}^{k,q}) = \begin{cases} 2\beta + \left(\sum_{m_p} \sum_{n_p} I_{m_p n_p}^{i,j,l,k,q} \right) / \beta, & \sum_y S_{i,j,l,k,q}^y > 0 \\ +\infty, & \sum_y S_{i,j,l,k,q}^y = 0 \end{cases} \quad (6)$$

光路的费用值也表示出一条光路对光收发器和波长链路的占用。

3.3 算法描述

DIRA 算法的具体步骤如下：

步骤 1 初始化扩展分层图 ELG；

步骤 2 等待 LSP 请求：如果是请求带宽为 B_q 的有时延约束 LSP 建立请求 $T(s, d, B_q, D_{min})$ ，执行步骤 3；如果是 LP LSP 建立请求 $T(s, d, B_q)$ ， $b_R = B_q$ ，执行步骤 5；如果是 LSP 拆除请求，执行步骤 7；

步骤 3 删除 O-E-O 链路，在 ELG 的逻辑拓扑上运行 Dijkstra 最短路算法，如果没有路径或路径跳数大于 H ， $b_R = B_q$ ，执行步骤 5；如果得到跳数为 h_0 并且 $h_0 \leq H$ 的最小费用值路径 P_0 ，计算 P_0 的瓶颈链路带宽 b_0 ，

(a) 如果 $b_0 \geq B_q$ ， P_0 占用带宽标记为 B_q ， P_0 所经过光路的剩余带宽减去 B_q ，执行步骤 6；

(b) 如果 $b_0 < B_q$ ， P_0 占用带宽标记为 b_0 ， P_0 所经过光路的剩余带宽减去 b_0 ， $b_R = B_q - b_0$ ， $j = 1$ ，执行以下迭代：

```

(c) For  $i = 1$  to  $h_0$ 
    { 删除第  $i$  跳光路；
    call Dijkstra( $s, d$ )；
    If 存在跳数不超过  $H$  的路径 Then
        记录该路径为  $P_j$  并计算  $P_j$  的瓶颈链路带宽  $b_j$ ；
        If  $b_j \geq b_R$  Then
             $P_j$  占用的带宽标记为  $b_R$ ；
             $P_j$  所经过光路的剩余带宽减去  $b_R$ ，退出循环并执行步骤 6；
        Else
             $P_j$  占用的带宽标记为  $b_j$ ；
             $P_j$  所经过光路的剩余带宽减去  $b_j$ ；
             $b_R = b_R - b_j$ ； $j = j + 1$ ；
        End If
    End If
    恢复第  $i$  跳光路；
    Next  $i$ ；}
    
```

步骤 4 恢复步骤 3 中删除的 O-E-O 链路；

步骤 5 将可用带宽小于 b_R 的光路费用值设为 $+\infty$ ，运行 Dijkstra 最短路算法。

(a) 如果得到最小费用值路径，并且对于有时延约束 LSP 建立请求，最小费用值路径的光路跳数不超过 H ，将该路径经过的已建光路的剩余带宽值减去 b_R 。如果有新建光路，在 ELG 上增加新建的光路，删除新建光路占用的波长链路，O-E-O 链路，记录每个结点空闲光收发器数，然后执

行步骤 6；

(b) 对于有时延约束 LSP 建立请求，如果没有路径或路径的光路跳数大于 H ，首先释放从步骤 3(b) 开始记录的路径的占用带宽，拒绝 LSP 连接请求，返回步骤 2；

(c) 对于 LP LSP 建立请求，如果没有路径，拒绝 LSP 连接请求，返回步骤 2；

步骤 6 接纳 LSP 建立连接请求，返回步骤 2；

步骤 7 释放该 LSP 占用的带宽，修改承载该 LSP 的各条光路的剩余带宽，如果某条光路的剩余带宽等于波长链路的容量，拆除该光路，在 ELG 上恢复其占用的波长链路和 O-E-O 链路，返回步骤 2。

DIRA 算法的计算复杂度取决于在 ELG 上运行 Dijkstra 算法的复杂度，对于 LP LSP，算法复杂度为 $O(W^2 N^2)$ 。对于跳数限制为 H 的有时延约束 LSP，在 ELG 的逻辑拓扑上最多需要运行 H 次 Dijkstra 算法，计算复杂度为 $O(HW^2 N^2)$ ，而直接在 ELG 上运行 Dijkstra 算法的计算复杂度为 $O(W^2 N^2)$ ，因此算法总的计算复杂度为 $O(HW^2 N^2)$ 。

4 仿真及数据分析

采用如图 2 所示的 19 结点、31 条双向光纤链路的网络拓扑，对 DIRA, MinTH, MinLP 3 种算法进行仿真对比，假设每条双向光纤链路提供 8 个波长，每个波长容量为 2.5Gb/s，每个结点的光收发器都可调谐。LSP 建立请求是到达率为 γ 的泊松过程，请求的源、宿结点对随机产生，请求带宽在 (0, 2.5Gb/s) 之间均匀分布，LSP 的持续时间服从参数为 $1/\mu$ 的负指数分布，这样网络的总负载为 γ/μ (Erlang)。一旦连接请求被拒绝，则立即丢弃。仿真中模拟 LSP 连接请求产生次数 10^6 次，其中高、普通、低优先级 LSP 数量的比例为 3:3:4，假设 HP LSP 聚合视频流，NP LSP 聚合语音流，按照文献[8]所给的这两种业务流的 QoS 参数设置，HP LSP 的最大光路跳数 $H_H = 5$ ，NP LSP 的最大光路跳数 $H_N = 3$ 。针对 LP LSP 的光收发器阈值 B_s 的取值见表 1。

链路费用值表达式中参数 α, β 的取值为 $\alpha = \beta = 400$ 。

网络阻塞率定义为被拒绝建立连接的 LSP 请求带宽之和与所有申请连接的 LSP 请求带宽总和的比值。

图 3 显示在相同网络负载下，网络阻塞率随着结点光收

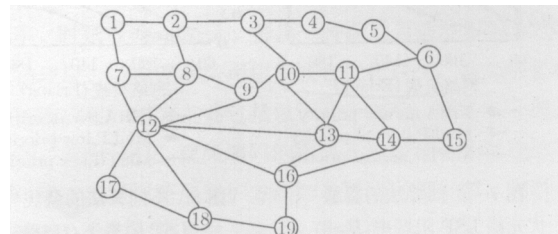


图 2 仿真网络的拓扑

表 1 不同网络负载(单位: Erlang)下 B_s 的取值

	$\gamma/\mu \leq 60$	$60 < \gamma/\mu \leq 120$	$\gamma/\mu > 120$
B_s	0	$\lfloor \frac{1}{8} B \rfloor$	$\lfloor \frac{1}{4} B \rfloor$

发器数的增多而下降,这说明结点光收发器数对网络阻塞率有影响。图 4 显示执行 DIRA 所得到的 HP LSP 阻塞率最低, LP LSP 阻塞率最高,说明 DIRA 符合不同优先级 LSP 的阻塞率公平性。

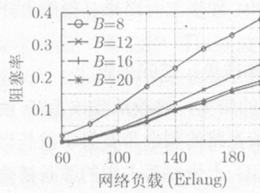


图 3 不同光收发器数的 DIRA 算法阻塞率

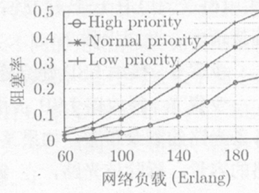


图 4 DIRA 算法中不同优先级 LSP 阻塞率(B=8)

图 5 显示在网络负载较轻(80Erlang)时,对所有 LSP 连接请求,DIRA 和 MinLP 的阻塞率性能无明显区别, MinTH 阻塞率稍高,但随着负载加重,DIRA 阻塞率性能优于 MinLP 和 MinTH。从图 6-图 8 可以看出,对于有光路跳数限制的 LSP,DIRA 阻塞率性能最好。对于 LP LSP,DIRA 的阻塞率高于 MinTH 和 MinLP。这是因为一方面 DIRA 对有光路跳数限制的 LSP 在逻辑拓扑上采用分路路由机制;另一方面,DIRA 针对 LP LSP 在网络负载较大时设置了光收发器阈值,在一定程度上避免了 LP LSP 对光收发器和波长链路的过度占用,保证这些网络资源能更多地被高等级 LSP 利用,因此 DIRA 是以增大对低优先级 LSP 的阻塞来降低对有时延约束的高等级 LSP 的阻塞。

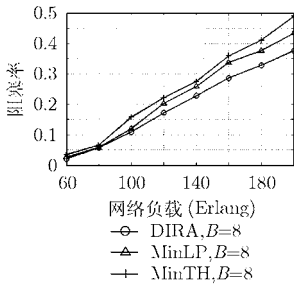


图 5 不同算法的总阻塞率

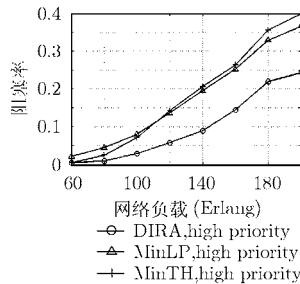


图 6 不同算法的高优先级 LSP 阻塞率(B=8)

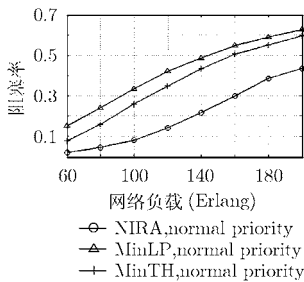


图 7 不同算法的普通优先级 LSP 阻塞率(B=8)

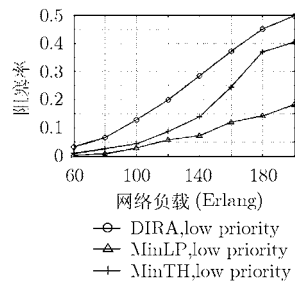


图 8 不同算法的低优先级 LSP 阻塞率(B=8)

通过图 9 可以看出,由于 NP LSP 最大允许光路跳数为 3,因此不同负载下其平均光路跳数均最小。网络负载较轻时,LP LSP 的平均光路跳数最大,随着负载加重,LP LSP 阻塞率增加的同时,其平均光路跳数也减小,甚至低于 HP LSP 的平均光路跳数,网络重载时 LP LSP 光路跳数的减小可以避免其消耗过多的光路带宽资源。

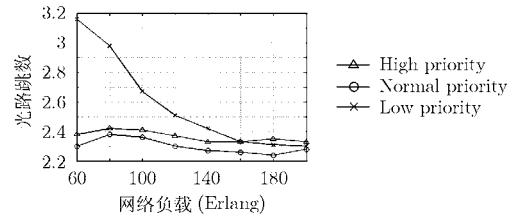


图 9 DIRA 算法中不同优先级 LSP 的平均光路跳数(B=8)

5 结束语

本文设计了一种 MPLS over WDM 光互联网的扩展分层图,其特点是允许 LSP 被多跳波长不同的光路承载,同时将结点光收发器等效为一种链路资源。根据业务流 QoS 约束的不同,我们划分了标记交换路径的优先级,并给出针对多优先级标记交换路径选路的区分综合路由算法——DIRA。该算法综合考虑了对网络资源的优化利用和单个 LSP 服务质量的满足。仿真实验表明,在提高网络总的吞吐量和降低有时延约束 LSP 的阻塞率等方面,DIRA 具有较优的性能。

参考文献

- [1] Cinkler T, Marx D, and Larsen C P, *et al.* Heuristic algorithms for joint configuration of the optical and electrical layer in multi-hop wavelength routing networks. *IEEE INFOCOM 2000*, Tel-Aviv, Israel, March 2000: 1000-1009.
- [2] Chen C and Banerjee S. A new model for optimal routing and wavelength assignment in wavelength division multiplexed optical networks. *IEEE INFOCOM 1996*, San Francisco, USA, April 1996: 164-171.
- [3] Assi C, Shami A, and Ali M A. Optical networking and real-time provisioning: An integrated vision for the next generation Internet. *IEEE Network Magazine*, 2001, 15(4): 36-45.
- [4] Kodialam M and Lakshman T V. Integrated dynamic IP and wavelength routing in IP over WDM networks. *IEEE INFOCOM 2001*, Anchorage, Alaska, April 2001: 358-366.
- [5] Zhu H Y, Zang H, and Zhu K Y, *et al.* A novel generic graph model for traffic grooming in heterogeneous WDM mesh networks. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2003, 11(2): 285-299.
- [6] 朱慧玲, 杭大明, 马正新等. QoS 路由选择: 问题与解决方法综述. *电子学报*, 2003,31(1): 1-8.
- [7] Zhu Huiling, Hang Daming, and Ma Zhengxin, *et al.* Quality of Service Routing: Problems and Solutions. *Acta Electronica Sinica*, 2003, 31(1): 1-8.
- [8] Wei J Y. Advances in the management and control of optical Internet. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2002, 20(4): 768-785.
- [9] Zhao J, Hassanein H, and Wu J Y, *et al.* End-to-end QoS routing framework for differentiated services networks. *Computer Communications*, 2003, 26(6): 566-578.

苏扬: 男, 1972年生, 副教授, 博士, 主要研究方向为下一代网络体系结构及服务质量控制。
 徐展琦: 男, 1962年生, 教授, 主要研究方向为宽带通信网络。
 刘增基: 男, 1937年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为通信网。