

# 基于非对称有向网络的拓扑抽象算法研究

刘爱波, 陆月明, 纪越峰

(北京邮电大学电信工程学院, 北京 100876)

**摘 要:** 网络规模的扩大导致了路由可扩展性的下降, 因此未来的网络将向着分层多域的层次路由体系结构发展. 在层次路由中, 每个路由域通过拓扑抽象算法对内部拓扑进行汇聚并广播给外部节点, 拓扑抽象算法将直接影响到网络的路由性能. 本文提出了一种用于非对称有向网络的新型拓扑抽象算法——SHEF 算法, 该算法结合了面向源的拓扑抽象方法和最小生成树的概念, 基于重边优先的准则对非对称的有向网络进行拓扑抽象和汇聚. 仿真结果证明, 该算法的权值偏差比传统方法减少了 75%, 较好地解决了路由信息复杂度和准确性之间的矛盾, 具有良好的路由性能.

**关键词:** 拓扑抽象; 有向网络; 最小生成树; 非对称网络

**中图分类号:** TN915.02 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2006) 01-0180-05

## Research on Topology Aggregation in Asymmetric Directed Networks

LIU Aibo, LU Yue-ming, JI Yue-feng

(School of Telecommunication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract** Routing scalability may degrade due to the increasing network scale. So the global communication network in the future will intend to a hierarchical routing architecture with multiple routing domains and routing layers. In hierarchical routing, each routing domain compact its internal topology by topology aggregation algorithm and propagates the aggregated routing information to outside. So the topology aggregation algorithm will affect the routing performance greatly. In this paper, a novel topology aggregation method—SHEF algorithm—is proposed to compact the asymmetric directed graph. Based upon a heavy-edge-first rule, the source-oriented method and minimum spanning tree are integrated to aggregate the directed graph. Compared with the traditional method, the suggested algorithm can reduce the weight deviation by 75 percent. Simulation results show that SHEF has a good tradeoff between the routing information complexity and routing accuracy, as a result yields outstanding routing performance.

**Key words** topology aggregation; directed graph; minimum spanning tree; asymmetry network

## 1 引言

随着信息技术的迅速发展, 通信网络规模不断扩大, 网络结构逐渐向层次路由方向发展. 在 ATM 和自动交换光网络 (ASON) 的有关标准中, 已经明确定义并采用了层次化的路由体系结构<sup>[1,2]</sup>. 在分层路由结构中, 整个通信网络可以被划分为多个子网, 子网内部的详细拓扑信息可以通过拓扑抽象算法进行有选择的汇聚, 经过汇聚和简化后的路由信息将被广播到其他的子网中. 这种分层多域的路由结构可以大大减少域间路由信息的交互, 从而保证了大规模网络的路由可扩展性.

在分层路由体系结构中, 用于汇聚子网拓扑的拓扑抽

象算法是非常关键的, 拓扑抽象算法的准确性和复杂程度将直接影响到网络的路由性能. 拓扑抽象主要包括两方面<sup>[3]</sup>, 一是网络拓扑结构的简化, 即屏蔽部分内部拓扑细节, 计算拓扑概要. 另一方面是链路属性的抽象, 简化后的拓扑链路属性应尽可能反映原网络中链路属性值. 通常的链路属性包括累加属性和最大/最小属性两种, 累加属性是指时延、代价和损耗等一类具有累加特性的参数值, 可统称为权值. 而最大/最小属性主要是指带宽属性. 本文将对具有累加链路属性值的非对称有向网络及其拓扑抽象算法进行深入研究, 提出一种有效的有向图拓扑抽象算法, 并对其性能进行仿真和对比分析.

收稿日期: 2004-12-20 修回日期: 2005-09-16

基金项目: 国家杰出青年科学基金 (No. 60325104); 国家自然科学基金 (No. 60572021); 教育部高校博士后基金 (No. 20040013001); 国家 863 高技术研究发展计划 (No. 2005AA122210)

## 2 拓扑抽象基本原则

### 2.1 基本方法

网络中的一个子网通常可以用图  $G(V, E)$  来表示,  $V$  为顶点集,  $E$  为边集.  $V$  中与其他子网有连接关系的节点称为  $G$  的边缘节点, 边缘节点的集合记作  $B$ . 其他的节点称为  $G$  的内部节点.  $G$  可以是无向图, 也可以是有向图. 对于无向图  $G$ , 其拓扑抽象通常包括两个步骤, 如图 1 所示. 首先是构成以所有边缘节点为顶点的全联通图  $F(B, L)$ , 任何一对边缘节点之间的链路  $l_{ij} \in L$  称为逻辑链路, 其权值为原网络中这两个节点之间的最小路径的权值, 这也被称为  $F$  中的最小路径原则. 这一处理对于只有一个加性权值的网络来说不会导致路由信息的丢失.

在  $F$  的基础上, 可以进行进一步的简化, 通常的简化方法包括单节点抽象, 星型抽象<sup>[4]</sup>, 树形抽象, 生成子图抽象等. 文献[5]中提出将无向网络抽象成最小畸变子图的抽象算法. 文献[6]中研究了具有不同 QoS 参数网络的拓扑抽象问题. 在 Baruch 和 Yi Du 的研究中<sup>[7]</sup>, 他们将最小生成树算法、随机生成树算法以及他们的组合同其他的几种算法进行比较, 通过研究这些算法对网络吞吐量、网络负载等指标的影响, 发现最小生成树算法的性能是相当理想的. Awerbuch and Shavitt<sup>[8]</sup>提出基于 Bartal 树进行拓扑抽象, 他们使用  $t$ -tree, 即将  $t$  个随机的 Bartal 树的组合, 来表示网络的抽象拓扑. 这些树不是基于原始网络中的节点和边构建, 相反, 需要  $O(n)$  个虚拟节点来构建这些树, 这种抽象算法更注重的是保证平均的畸变度较小, 而不是从通信网络的性能出发, 这种算法的复杂度一般为  $O(b^4)$ ,  $b$  为边缘节点数, 因此并不十分实用. 在最近的研究中, King-Shan 和 Kharma 基于星型拓扑抽象方法对多参数网络的拓扑抽象进行了分析和改进<sup>[4]</sup>.

经过抽象的拓扑传播到其他路由域. 这些路由域的节点根据本地策略将收到的简化拓扑进行恢复和还原, 得到对全联通图  $F$  的估计图  $F'$ , 并基于  $F'$  进行路由选择和判断.

有向图的抽象比较复杂, 在以所有边缘节点为顶点的全联通图中, 每一对边缘节点之间都有两条方向相反的链路, 权值分别为  $w_{ij}$  和  $w_{ji}$ , 并且由于不对称性  $w_{ij} \neq w_{ji}$  且  $\rho = \max\{w_{ij}/w_{ji}, w_{ji}/w_{ij}\}$  称为该双向链路的不对称因子. 有向图抽象通常的做法是首先将该有向全联通图无向化<sup>[8]</sup>, 在每对边缘节点间用一条无向链路代替原有的两条反向链路, 无向链路权重  $W = \sqrt{w_{ij} * w_{ji}}$ . 基于得到的无向全联通图可以进

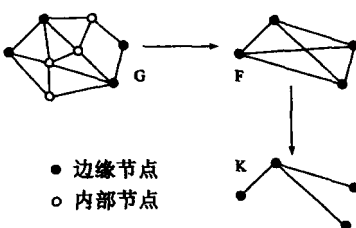


图 1 无向图拓扑抽象

行进一步的简化. 该方法比较简单, 但将导致网络不对称性信息的丢失, 因此路由性能较差.

### 2.2 面向源的拓扑抽象方法

有向图的另外一种抽象方法是文献[9]中提到的面向源的拓扑抽象算法. 该方法的基本思想如图 2 和图 3 所示. 路由域 1 的边缘节点 B、C、D 和 E 构成了全联通有向图. 当 A 节点计算以自己为源并经过路由域 1 或者以路由域 1 内的节点为终点的路径时, 只可能用到 B 节点到其他边缘节点的 3 条单向链路, 因此节点 B 并不需要将域中所有的拓扑信息通告给 A, 而可以只通告以 B 为根节点其他边缘节点为叶子节点的单向树. 这一简单的拓扑对于 A 来说实际上是路由域 1 没有任何信息损失的拓扑描述, 称为路由域 1 相对于节点 A 的有效路由信息. 面向源的拓扑抽象算法针对不同的外部节点广播相应的有效路由信息, 从而可以减少域间路由信息的交互.

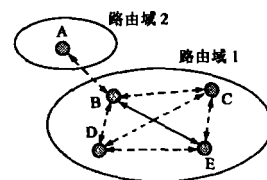


图 2 有向图的全网状图表示

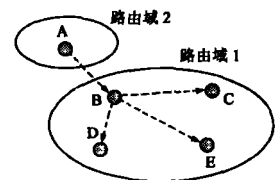


图 3 面向源 A 的抽象拓扑

当外部节点有  $m$  个不同路径到达某一路由域时, 该节点将最终获得关于该域的  $m$  个树形描述. 为了处理方便, 文献[8]中建议外部节点只接受最先到达的一个描述, 其余的描述将被忽略. 这一机制的前提条件是假设最先到达的描述对应的反向路径也将是最短的. 这一假设在对称网络中是成立的. 而在非对称网络中, 某一路径为最短路径并不意味着其反向路径也是最短的, 因此这一机制仍将导致路由的不准确性.

### 3 SHEF 算法描述

在上述基本方法和面向源方法的基础上, 本文提出了一种将最小生成树和面向源方法相接合的新型非对称有向网络拓扑抽象算法——面向源的重边优先 (Source-oriented Heavy Edge First, SHEF) 算法, 该算法可以避免传统有向图抽象方法中由于无向变换所导致的非对称信息的丢失, 并利用最小生成树来描述域内的拓扑信息, 减小面向源方法中由于非对称性所导致的路由不准确性, 从而得到关于原网络更加有效的抽象表述.

#### 3.1 最小生成树及其特性

对于图  $G(V, E)$ , 如果图  $G'(V', E')$  满足  $V' = V$  且  $E' \subseteq E$ , 则  $G'$  称为  $G$  的生成图. 当  $G'$  为树图时称为  $G$  的生成树.  $G$  的最小生成树 (minimum spanning tree, MST)  $T$  是指其权值最小的一颗生成树,  $G$  的 MST 并不一定是唯一的. 在文献[10]中, MST 被用来进行拓扑抽象, 并被证明是有效的. 这主要是由 MST 的特性所决定的.

以图 4 为例,  $T$  为全联通图  $F$  的最小生成树, 假设  $E =$

$F \rightarrow T$  是由  $F$  生成  $T$  过程中所去掉的边的集合.  $e_{ij} \in E_r$  表示  $E_r$  中从  $i$  到  $j$  的一条边, 那么由 MST 的最小权重特性可得:  $e_{ij}$  的权重

$w_{ij}$  将不小于图  $T$  中从  $i$  到  $j$  的唯一路径  $P_{ij}$  上任意链路  $e_{mn}$  的权重  $w(e_{mn})$ , 即

$$W_{ij} \geq \max_{e_{mn} \in P_{ij}} \{W(e_{mn})\} \quad (1)$$

另外, 如果  $F$  为某一网络的全联通图表示, 则  $F$  满足最小路径原则, 即  $w_{ij}$  不大于图  $T$  中  $P_{ij}$  的权重  $w(P_{ij})$ . 即

$$W_{ij} \leq \sum_{e_{mn} \in P_{ij}} W(e_{mn}) \quad (2)$$

式 (1) 和式 (2) 实际上给出了  $w_{ij}$  的上限与下限. 因此在只给出  $T$  的情况下, 可以根据这一上下限准则来估计从  $F$  到  $T$  过程中所去掉的边的权重. MST 的这一特性非常有利于拓扑的抽象和还原. 拓扑抽象后生成的 MST 被广播到其他路由域中, 这些路由域的节点可以根据接收到的 MST 利用其上下限特性对全联通图  $F$  进行较为准确的还原和估计.

### 3.2 SHEF 算法描述

不难看出, MST 具有非常有利于拓扑抽象和还原的特性, 同时面向源方法又能够很好的提取有效路由信息, 因此本文提出了一种 SHEF 算法, 该算法结合了面向源方法和最小生成树算法, 并基于重边优先准则来简化有向的全联通图. SHEF 算法具体的抽象算法描述如下:

(1) 根据有向图  $G$  构建其边缘节点的全联通有向图  $F$ ,  $e_{ij}$  和  $e_{ji}$  为边缘节点对  $(i, j)$  之间的双向逻辑链路, 权重  $w(e_{ij})$  和  $w(e_{ji})$  分别是  $G$  中  $i$  到  $j$  和  $j$  到  $i$  的最短路径的权重;

(2) 将  $F$  简化为每对节点间只有一条有向链路的有向图  $F^-$ , 具体方法是对于  $e_{ij}$  和  $e_{ji}$  保留权值大的边, 去掉权值小的边, 即遵循重边优先原则;

(3) 将  $F^-$  视为无向图, 构建其最小生成树  $T'$ , 构建方法如 3.1 节所述;

(4) 根据  $F^-$  中相应边的方向, 恢复所得最小生成树  $T'$  的各边方向, 得到有向树图  $T$ ;

(5) 每个边缘节点以自己为根节点, 其他边缘节点为叶子节点形成树图  $S$ , 构建方法如 2.2 节所述. 将  $S$  图和  $T$  图合并, 得到最终的抽象拓扑  $M$ .  $M$  中的每一条边  $e_i$  对应的边缘节点对在  $F$  中的不对称因子为  $\rho_i$ . 由  $e_i$  的权值  $w(e_i)$  和  $\rho_i$  可构成数据对  $(w(e_i), \rho_i)$ ;

(6) 为保存  $F$  中被删除的双向链路的不对称信息, 计算所有被删除双向链路的不对称因子的算数平均值  $\rho_a$  作为平均不对称因子;

(7) 将图  $M$  中的所有  $(w(e_i), \rho_i)$  数据对和平均不对称因子  $\rho_a$  广播到其他的域中.

化的路由信息后, 将对  $F$  进行恢复, 得到估计拓扑  $F'$ . 恢复方法如下:

对于  $M$  中已有的边, 可以通过  $(w(e_i), \rho_i)$  来恢复双向链路, 得到  $M^+$ . 对于  $M$  中没有连接的边缘节点对  $(i, j)$ , 设其双向链路分别为  $e_{ij}$  和  $e_{ji}$ , 在  $F$  中两者的权重分别为  $w(e_{ij})$  和  $w(e_{ji})$ , 在  $F'$  中两者的权重分别被估计为  $w'(e_{ij})$  和  $w'(e_{ji})$ . 设  $M^+$  中  $i$  到  $j$  的路径为  $P_{ij}$ , 其中最大权重边的权重为  $w$ , 而  $j$  到  $i$  的路径为  $P_{ji}$ , 其中的最大权重为  $w'$ . 根据 3.1 节所述 MST 的上下限性质、重边优先的生成原则和最小路径原则, 可得到下面三个不等式:

$$w(e_{ij}) \leq w(P_{ij}) \quad (3)$$

$$w(e_{ji}) \leq w(P_{ji}) \quad (4)$$

$$\max\{w(e_{ij}), w(e_{ji})\} \geq \max\{w, w'\} \quad (5)$$

令  $m^* = \max\{w, w'\}$ , 那么很容易得到下面的取值准则:

如果  $w(P_{ji}) \leq m^* < w(P_{ij})$ , 则在  $F$  中  $w(e_{ij}) > w(e_{ji})$ ,

此时取  $w'(e_{ij}) = \frac{w(P_{ij}) + m^*}{2}$ ,  $w'(e_{ji}) = w'(e_{ij}) / \rho_a$ ;

如果  $w(P_{ij}) \leq m^* < w(P_{ji})$ , 则在  $F$  中  $w(e_{ji}) > w(e_{ij})$ ,

此时取  $w'(e_{ji}) = \frac{w(P_{ji}) + m^*}{2}$ ,  $w'(e_{ij}) = w'(e_{ji}) / \rho_a$ ;

否则将无法判断  $F$  中  $w(e_{ij})$  与  $w(e_{ji})$  的大小关系, 此

时取  $w'(e_{ij}) = w'(e_{ji}) = \frac{\max\{w(P_{ij}), w(P_{ji})\} + m^*}{2 \sqrt{\rho_a}}$ .

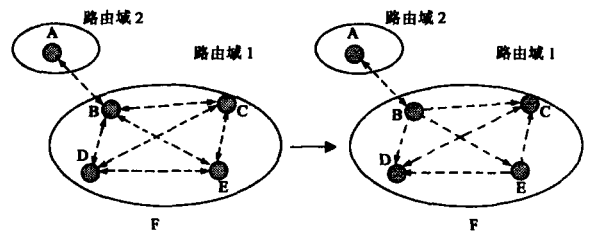


图 5 基于重边优先的全联通图简化

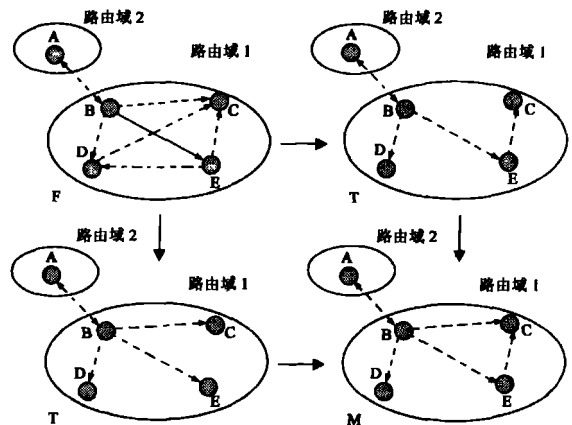


图 6 从  $F^-$  到  $M$  的生成过程示意

图 5 和图 6 给出了以 A 为源的 SHEF 算法过程示意, 拓扑抽象过程是由节点 B 完成的. 图 5 中,  $F$  首先经过重边

优先原则得到简化的  $F^-$ , 此时每对节点之间的连接都变成了单向链路。在图 6 中,  $F^-$  分别简化为有向的最小生成树  $T$  和以节点  $B$  为顶点  $C, D$  和  $E$  为叶子的树图  $T'$ ,  $T$  和  $T'$  合并得到最终的图  $M$ , 图  $M$  及相关参数会被节点  $B$  广播到路由域 2 中。

通过 SHEF 算法, 原有向图  $G$  被简化为最小生成树和以各边缘节点为顶点的组播树的合并图。如果  $G$  中的边缘节点数为  $b$ , 那么这种算法最多可能需要广播  $2(b-1)$  个  $(w(e_i), \rho)$  数据对和一个平均不对称因子, 因此其路由信息复杂度为  $O(b)$ , 是一种扩展性很好的算法。

#### 4 算法仿真和性能分析

为了分析和评估 SHEF 算法的性能, 构建了如图 7 所示的有向非对称网络模型。整个网络包括 8 个路由域。路由域 1 到 4 为核心路由域, 每个域包括 20 个节点, 其中 4 个为边界节点, 域内拓扑是随机生成的, 域内节点度服从 2 到 6 的均匀分布。4 个核心域之间形成全连接。域 5 到 8 为客户域, 为方便起见, 每个域包括一个节点, 并通过一条双向连接与核心域相连。网络中每条双向链路的权重取值方法是: 任取一个方向的权值  $w_1$  服从 5 到 40 的均匀分布, 反方向权值  $w_2$  为  $w_1$  与设定的链路不对称因子  $\rho$  的乘积, 即  $w_2 = w_1 * \rho$ 。在仿真中, 通过变化链路不对称因子  $\rho$  来分析 SHEF 算法的性能以及不对称性对网络性能的影响。其中较小的不对称因子取值范围小于 5 而较大的不对称因子取值范围为 10 到 30 之间。

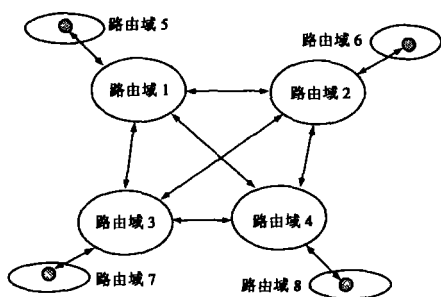


图 7 仿真网络模型

在仿真中, 通过计算解码网络中最短路径权值与原网络中相应最短路径权值的偏差来衡量拓扑抽象算法的准确性。路由请求均匀地分布在四个客户节点之间, 所得到的数据点为所有请求的平均值。仿真中共使用了 4 种不同的拓扑抽象算法, 以进行性能的对比分析。4 种算法分别是:

HEF——不引入面向源方法的重边优先算法

SHEF——面向源的重边优先算法

STAR——基于无向变换的星型拓扑抽象算法, 见文献

[4]

STAR\_SOURCE——面向源的星型拓扑抽象算法

图 8 和 9 给出了仿真结果。不难看出, 重边优先算法在性能上大大优于传统的星型拓扑抽象方法, 而面向源方法

的引入也减小了权值偏差, 增强了拓扑抽象的准确性。这就使得无论在较小不对称因子条件下还是在较大不对称因子条件下, STAR 方法都具有最大的权重偏差而 SHEF 算法始终保持最小的权重偏差。SHEF 算法的权值偏差比传统 STAR 算法的权值偏差平均减少了 75%。

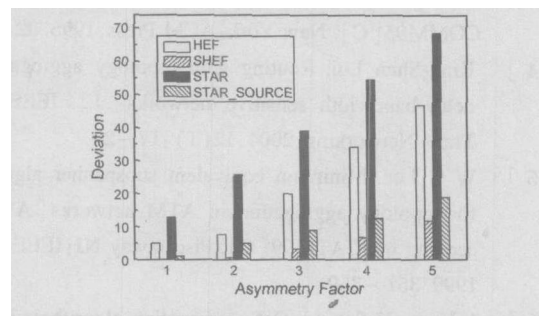


图 8 较小不对称因子下的最小路径偏差

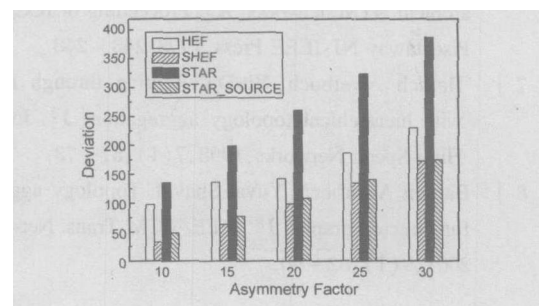


图 9 较大不对称因子下的最小路径偏差

拓扑抽象算法实际上是以网络精确度的降低换取可扩展性的增强。各种算法都是在网络信息复杂度和网络性能之间寻求最佳的折中点。在边缘节点数为  $b$  的网络中, SHEF 具有  $O(b)$  的信息复杂度并且实现简单。同传统的生成树算法和星型算法等具有相同的复杂度。同时, 面向源方法和最小生成树算法的结合能够利用有限的复杂度提供更丰富的有效路由信息, 因此可以保证较小的权重偏差, 较好地解决了路由信息复杂度和路由准确性之间的矛盾。由此可见, SHEF 是一种有效可行的拓扑抽象算法。

#### 5 结论

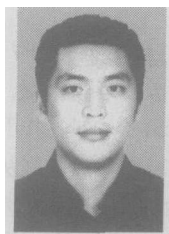
本文基于面向源的拓扑抽象方法和最小生成树提出了一种新型的非对称有向网络拓扑抽象算法——SHEF 算法。该算法通过重边优先准则对网络拓扑进行简化, 避免了传统方法中由于无向变换所导致的不对称性信息的丢失。该算法同时结合了面向源方法和最小生成树的良好特性, 能够较准确的反映原网络的拓扑属性。从仿真结果中可以看出, SHEF 算法能够在很大程度上减小由于拓扑抽象带来的权值偏差, 具有良好的路由性能。同时 SHEF 又具有较小的路由信息复杂度和容易编码实现的特性, 因此是一种有效可行的拓扑抽象算法。

#### 参考文献:

[1] afpnni0055.000 Private network-network interface

- specification version 1.0 (PNNI) [S].
- [ 2 ] ITU-T recommendation G. 7715. Architecture and requirements routing in the automatically switched optical network (ASON) [S].
  - [ 3 ] W C Lee Topology aggregation for hierarchical routing in ATM networks[ A ]. D Oran Proceeding of SIGCOMM 95 [C]. New York ACM Press 1995. 82- 92
  - [ 4 ] King-Shan Lui Routing with topology aggregation in delay-bandwidth sensitive networks[ J]. IEEE/ACM Trans Networking 2004 12( 1): 17- 29.
  - [ 5 ] W C Lee Minimum equivalent subspanner algorithms for topology aggregation in ATM networks[ A ]. Proceeding of ICATM 99[C]. Piscataway NJ IEEE Press 1999. 351 - 359.
  - [ 6 ] A Iwata H Suzuki QoS aggregation algorithms in hierarchical ATM networks[ A ]. Proceeding of ICC 98[ C]. Piscataway NJ IEEE Press 1998 243- 248
  - [ 7 ] Bauch Awerbuch Yi Du Routing through networks with hierarchical topology aggregation [ J]. Journal of High-Speed Networks 1998 7( 1): 57- 73
  - [ 8 ] Bauch Awerbuch Yuval Shavitt Topology aggregation for directed graphs [ J]. IEEE/ACM Trans Networking 2001 9(1): 82- 90
  - [ 9 ] T Korkmaz M Kunz Source-oriented topology aggregation with multiple QoS parameters in hierarchical networks[ J]. ACM Trans Modeling Computer Simulation 2000 10( 4): 295- 325.
  - [ 10 ] W C Lee Spanning tree method for link state aggregation in large communication networks[ A ]. Proceeding of N-FOCOM 95[C]. Piscataway NJ IEEE Press 1995. 297- 302

#### 作者简介:



刘爱波 男, 1980年 7月生于吉林, 2001年在  
北京邮电大学获得学士学位, 目前在北京邮电大学  
电信工程学院攻读博士学位, 主要研究领域为智能  
光网络和信令控制.

E-mail: aaboli@ 263. net

陆月明 男, 1969年 11月生于江苏, 2000年获西安交通大学计  
算机系统结构博士学位, 后在 Lucent从事研究工作, 现为北京邮电大  
学教师, 主要从事智能光网络和计算机网络的研究工作.

纪越峰 男, 1960年 10月出生上海, 现为北京邮电大学教授,  
博士生导师, 主要从事光通信与宽带信息网的研究工作.