

叠加组播测度量化均衡路由机制研究

陆 俊, 阮秋琦

(北京交通大学信息科学研究所, 北京 100044)

摘 要: 针对路由机制测度均衡基本问题与成组通信中不同数据类型需要不同 QoS 转发路径需求, 提出一种基于叠加组播的测度量化均衡路由机制, 通过对 QoS 路由选择中两个重要测度叠加延迟代价与节点接入带宽代价进行量化均衡, 实现根据不同 QoS 需求进行数据转发的路由选择机制. 多组实验表明机制能够获得有效均衡, 量化度控制能够量化地动态调整路径延迟和接入带宽, 具有较好的动态适应性.

关键词: 叠加组播; 均衡路由; 量化分析

中图分类号: TP393.02 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2006) 07-1316-05

Quantified Cost Balanced Routing for Overlay Multicast

LU Jun, RUAN Qiu-qi

(Institute of Information Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract This paper focuses on the quantitative analysis issue to the routing metrics tradeoff problem, and presents a quantified cost-balanced overlay multicast routing scheme (QCost-Balanced) to the metric tradeoff problem between overlay path delay and access bandwidth at Multicast Server Nodes (MSN) for real-time applications over Internet. Simulation experiments demonstrate the scheme achieves a better gain in both MSN access bandwidth and overlay path delay, and better performance in terms of metrics tradeoff and routing adaptation.

Key words overlay multicast; cost-balanced routing; quantitative analysis

1 引言

多媒体流媒体应用的大规模部署, 通常都需要来自底层的组播传输支持. 然而由于最初组播模型先天的不足, 许多难点 (如组成员管理, 接入控制与域间路由) 仍待解决, 因此缺乏 IP 组播的大规模部署^[1].

针对组播的部署问题, 研究者已经提出许多基于叠加组播^[11]的替代方案. 提出的叠加组播路由方案^[12~7]主要区别在于根据具体不同的应用需求, 采用不同的路由测度 (metric) 构建与维护组播路由树.

组播路由选择的基本问题是带宽测度和延迟测度的均衡问题^[9], 在叠加组播中则转换为叠加节点接入带宽测度与叠加路径延迟测度间的均衡问题. 以上提及方案中或多或少地忽略了路由测度间的均衡关系, 以及缺乏统一灵活的路由选择测度框架. 因此本文研究目的是对路由选择测度均衡进行量化分析与构建统一路由选择框架.

本文提出一种叠加组播测度均衡量化方案 (QCost-Balanced), 用于优化叠加路径延迟测度与节点接入带宽测度的均衡问题. 通过统一线性归一化均衡优化函数实现以

上测度的均衡优化和量化控制.

2 路由测度均衡问题

图 1 为叠加组播网络, 其基本配置问题是: 给定一组分配一定接入带宽的 MSN 服务节点, 构建组播路由树在满足应用性能要求前提下最大化网络资源的使用. 配置中两个重要因素分别是节点接入带宽和叠加路径延迟. 节点接入带宽代表了叠加网络的主要代价^[6], 而叠加路径延迟则用于保证实时应用的 QoS 需要^[8]. 叠加组播路由选择方案则主要是在这两个测度间实现一种均衡. 就数学上而言, 这是一个多目标决策优化问题^[12], 多目标决策优化问

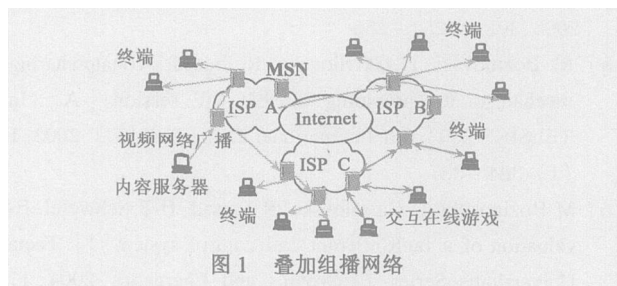


图 1 叠加组播网络

收稿日期: 2005-02-18 修回日期: 2006-01-16

基金项目: 北京市基金项目 (No. SY100040409)

题包括两个必要步骤: 目标归一化和均衡函数定义。

量化均衡方案的目的就是: 构建一棵根于汇聚 M SN (RPM SN) 节点的有向生成树, 使得叠加路径延迟与节点接入带宽实现有效量化均衡, 满足应用 QoS 需求。首先定义两个用于路由优化的测度:

(1) 时延代价测度: 叠加路径延迟 L_{ij}

被定义路径转发树 T 中从 M SN 节点 i 到 M SN 节点 j 经过的点到点路径延迟的总和, 即 $L_{ij} = l_{ip} + \dots + l_{qj}$

(2) 带宽代价测度: M SN 节点接入带宽占用率 R_{ij}

M SN 节点接入带宽占用率可以用 M SN 节点带宽度数^①加以定义: 若 M SN i 节点带宽度数为 d_i , 则与 M SN j 间建立直接逻辑连接的接入带宽占用率为 $r_{ij} = 1/d_i$, M SN i 到生成树中任意 M SN j 的接入带宽占用率为经过中间 M SN k 接入带宽占用率总和, 即 $R_{ij} = r_{ip} + \dots + r_{qj}$

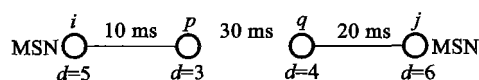


图 2 叠加组播代价

如图 2 所示, 若节点 p 和 q 间叠加延迟为 $30n_s$ 则节点 i 和 j 的叠加路径延迟 L_{ij} 是 $60n_s$ 。若节点 p 和 q 间无其他节点, 则节点 i 和 j 的接入带宽占用率 $R_{ij} = 1/d_i + 1/d_p + 1/d_q = 0.78$ 。则每个节点平均接入带宽占用率 19.5%, 其物理意义是建立节点 i 和 j 连接, 每个节点平均需要使用自身 19.5% 的接入带宽。

本文量化均衡路由的目的是: 构造根于汇聚 M SN 节点 r 的有向生成树, 通过统一优化目标函数, 实现叠加路径 L_{ij} 和接入带宽占用率 R_{ij} 定义广义路径延迟与广义接入带宽占用率 (详见 3.1 节) 实现基于服务客户数加权的节点动态优化分配。

假设 c_i 是 M SN 服务终端 (Client) 数, 方案中通过对叠加延迟 L_{ij} 和接入带宽占用率 R_{ij} 定义广义路径延迟与广义接入带宽占用率 (详见 3.1 节) 实现基于服务客户数加权的节点动态优化分配。

定义 量化代价均衡路由有向生成树问题 (QCost-Balanced: Quantified Cost-Balanced Directed Spanning Tree Problem): 给定一无向完全图 $G = (V, E)$, 每个节点 $v \in V$ 最大接入带宽度数 $d_{max}(v) \in \mathbb{N}$, 每条叠加路径 $e \in E$ 延迟带代价 $L(e) \in \mathbb{Z}^+$; 在 G 中寻求一根为汇聚节点 r 有向生成树 T, 通过归一化路由测度均衡组合 $f = \alpha^* \sum_{i \in S} c_i L_{ri} + \beta^* \sum_{i \in S} c_i R_{ri}$ 最小化操作, 实现延迟测度 $\sum_{i \in S} c_i L_{ri}$ 和带宽测度 $\sum_{i \in S} c_i R_{ri}$ 间均衡的最优化 (其中 S 是 T 中不包含汇聚节点 r 的其他所有节点集合), T 中节点满足接入带宽受限条件 $d_i(v) \leq d_{max}(v)$, $v \in T$ 。

QCost-Balanced 问题可归纳为以下的优化问题:

$$\begin{aligned} \text{Minimize: } f &= \alpha^* \sum_{i \in S} c_i L_{ri} + \beta^* \sum_{i \in S} c_i R_{ri} \\ \text{s.t. } &\begin{cases} d_i(v) \leq d_{max}(v), & \forall v \in T & (c1) \\ L_{ij} < L_{ik} + L_{kj}, & i, j, k \in S & (c2) \\ 0 \leq \alpha, \beta \leq 1, & \alpha + \beta = 1 & (c3) \end{cases} \end{aligned}$$

其中 $\sum_{i \in S} c_i L_{ri}$ 和 $\sum_{i \in S} c_i R_{ri}$ 是为实现量化均衡优化目

的对 $\sum_{i \in S} c_i L_{ri}$ 和 $\sum_{i \in S} c_i R_{ri}$ 进行归一化后的形式; f 为量化均衡优化函数 (α 和 β 分别为均衡加权参数), 由此建立起一个新的包含叠加延迟与接入带宽的统一测度。

3 测度量化均衡启发式方案

本文 QCost-Balanced 方案采用分布式启发式局部搜索法, 主要包括树初始化与渐进优化过程。接下来重点阐述渐进优化均衡过程。

3.1 局部搜索优化目标

QCost-Balanced 属于分布式方案, 方案局部搜索中, 引入子树叠加路径延迟 $\Lambda_i^{[7]}$ 作为延迟测度, 同时类比定义广义子树总接入带宽占用率 Δ_i 作为带宽测度, 用于局部搜索选路标准。

子树叠加路径延迟: 定义为以 M SN i 为根子树中所有 M SN 叠加路径延迟的总和, 可表示为:

$$\Lambda_i = \sum_{j \in \text{children}(i)} (s_j L_{ij} + \Lambda_j) \quad (1)$$

子树接入带宽占用率: 定义为以 M SN i 为根子树中所有 M SN 节点带宽占用率的总和, 可表示为:

$$\Delta_i = \sum_{j \in \text{children}(i)} (s_j r_{ij} + \Delta_j) \quad (2)$$

式 (1) 和式 (2) 中, L_{ij} 为 M SN i 到其子节点 M SN j 间 unicast 路径延迟; r_{ij} 为 M SN i 到其子节点 M SN j 间的接入带宽占用率 $r_{ij} = 1/d_i$ (d_i 为 M SN i 的度数), $\text{children}(i)$ 为路由生成树中 M SN i 的子节点 M SN 集合, client_i 为节点 i 直接服务的客户数, 可定义子树总服务客户数 s_i :

$$s_i = |S_i| = \text{client}_i + \sum_{j \in \text{children}(i)} s_j \quad (3)$$

式 (3) 中 S_i 为以 M SN i 为根子树中节点的服务客户集合。

则上一节 QCost-Balanced 问题的优化目标就可以表示为在根节点 (root M SN) r 子树中, 通过对归一化均衡代价函数 $f = \alpha^* \bar{\Lambda}_r + \beta^* \bar{\Delta}_r$ 的最小化求解, 获得 $\bar{\Lambda}_r = \Lambda_r / s_r$ 和 $\bar{\Delta}_r = \Delta_r / s_r$ 间的最优量化均衡。其中 $\bar{\Lambda}_r$ 为平均子树叠加路径延迟, $\bar{\Delta}_r$ 为平均子树总接入带宽占用率, Λ_r 的物理意义是路由选择树中 M SN 服务客户的平均叠加延迟 (ms); Δ_r 的物理意义则是路由选择树中 M SN 服务客户的平均接入带宽占用率 (%)。为方便起见, 在接下来的部分, 将叠加路径延迟缩写为叠加延迟; M SN 接入带宽占用率缩写为接入带宽; 平均子树总叠加路径延迟缩写为平均子树延迟; 平均子树总接入带宽占用率缩写为平均子树带宽。

3.2 测度归一化与均衡参数加权

3.2.1 测度归一化

本文采用前一次迭代测度值作为当前迭代值归一化的基准。整个过程如图 3 所示: 平均子树延迟 $\bar{\Lambda}$ 和平均子

① 假设汇聚 M SN 的数据发送速率为 B_{bps} (B 可以通过统计或者设定一个基本速率事先得到), 任意 M SN i 节点接入带宽为 b_i bps, 则 M SN i 的节点带宽度数为 $d_i = L_{bi} B$; 即 M SN i 最多可以和其他 M SN 建立 d_i 条逻辑连接^[11]。

树带宽 $\bar{\Delta}$ 分别为路由选择测度平面的 x 和 y 轴, 路由选择测度 $\bar{\Lambda}$ 和 $\bar{\Delta}$ 通过局部搜索操作逐渐得到优化(减少); 若局部搜索过程持续 50 个周期, 则 $No.1$ 和 $No.50$ 分别是第一次迭代和最后一次迭代; 优化过程 $No.i$ 次的归一化值可表示为:

$$\bar{\Lambda}_i = \bar{\Lambda}_i / \bar{\Lambda}_{No.1}; \quad \bar{\Delta}_i = \bar{\Delta}_i / \bar{\Delta}_{No.1} \quad (4)$$

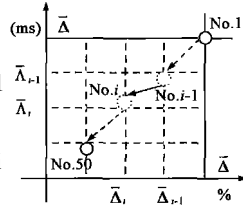


图3 测度归一化

3.2.2 均衡参数加权

本文目的是测度均衡的量化实现, 同时定义一个统一的均衡路由选择框架, 能够根据应用的不同需求灵活配置. 因此定义单位圆实现均衡参数的量化加权. 相关参数 a 和带宽相关参数 b 据有相同均衡重要性的情况为 $a = b = 0.5$.

3.3 局部搜索操作

渐进优化阶段, 采用启发式局部转移操作实现上节讨论的优化目标. 通过归一化均衡测度准则 $f = a * \bar{\Lambda} + b * \bar{\Delta}$ 实现. 由均衡准则 f 决定局部转移操作是否进行, 进而在最佳叠加延迟和最佳接入带宽间实现均衡选择. 为方便性能比较, 方案中选择与 $min\text{-avg-latency}^{[7]}$ 方案相同的 5 个基本局部转移操作. 启发式局部转移操作包含以下变量: (1) $\bar{\Lambda}_g$ 和 $\bar{\Delta}_g$ 分别是 M SN 节点 g 当生成树拓扑的平均子树延迟和平均子树带宽; 而 $\bar{\Lambda}_i^g$ 和 $\bar{\Delta}_i^g$ 分别是某个可能局部转移拓扑的平均子树延迟和平均子树带宽; (2) a 和 b 分别是均衡加权参数.

Local Transform (g, id)	
1	$\bar{\Lambda}_{min} = \bar{\Lambda}_g; \bar{\Delta}_{min} = \bar{\Delta}_g; \text{availID} = -1$
2	Get available set M for No. id type local transformation
3	For all $i \in M$
4	Calculate $\bar{\Lambda}_i^g$ and $\bar{\Delta}_i^g$ for available operate i
5	If $(a * \bar{\Lambda}_i^g / \bar{\Lambda}_g + b * \bar{\Delta}_i^g / \bar{\Delta}_g) < a * \bar{\Lambda}_{min} / \bar{\Lambda}_g + b * \bar{\Delta}_{min} / \bar{\Delta}_g$ then
6	$\bar{\Lambda}_{min} = \bar{\Lambda}_i^g$ and $\bar{\Delta}_{min} = \bar{\Delta}_i^g; \text{availID} = i$
7	End if $5 \sim 7: QCostBalanced$
5'	if $(\bar{\Lambda}_i^g < \bar{\Lambda}_{min})$ then-
6'	$\bar{\Lambda}_{min} = \bar{\Lambda}_i^g; \text{availID} = i$
7'	End if $5' \sim 7': min\text{-avg-latency}$
8	End for
9	M SN g No id local transform operation by availID

图4 QCostBalanced局部转移操作图

启发式局部转移操作如图 4 所示, 包含两个输入参数: M SN 节点 g , 基本操作类型 id ; 整个过程如图 5 所示, 若 m_{∞} 为最佳拓扑, 则 g 按照图 5(b) 子节点提升实现建立连接, 按照虚线去除已有连接.

图 4 中 5' ~ 7' 行列出比较方案 $min\text{-avg-latency}$ 的局部转移操作, 不同于 $min\text{-avg-latency}$ 只考虑叠加延迟, 方案的最大特点是将两个测度的均衡进行量化处理, 进而获得较好的路由代价.

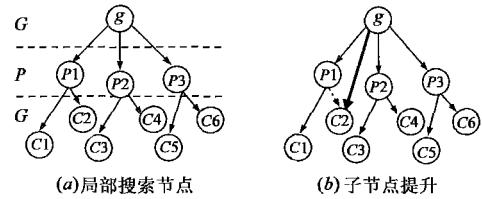


图5 局部转移操作

4 性能分析与实验结果

4.1 性能理论分析

理论上, 优化搜索结果将以较大概率落在以梯度为基础定义的向量集合——极锥范围内^[12], 如图 7 所示: $\nabla \bar{\Lambda}$ 和 $\nabla \bar{\Delta}$ 分别为叠加延迟和接入带宽的下降梯度方向向量, 第 i 次局部转移与向量将测度空间分成四个区域. 由凸集理论可知: 区域

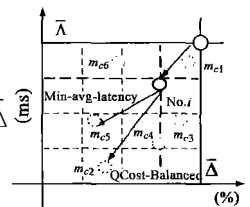


图6 局部搜索均衡

I 为劣解区域, 区域 II 和 IV 为非劣解区域, 区域 III 为向量 $\nabla \bar{\Lambda}$ 和 $\nabla \bar{\Delta}$ 构成的极锥; 极锥代表一个好的方向, 若构成极锥的两个向量分别代表两个目标函数的梯度, 即沿着这个方向上的解会使所有目标函数可以同时得到改善^[12].

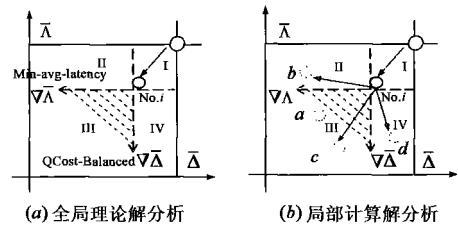


图7 QCost-Balanced性能理论分析

图 7(a) 中, QCost-Balanced 全局理论解可行域包括 II、III 和 IV, $Min\text{-avg-latency}$ 全局理论解可行区域包括 II 和 III 但是, 前者同时兼顾两个测度而以更大概率落在极锥区域 II 内, 后者只考虑一个测度而将以更大概率落在非劣解区域 III 内, 因此与 $Min\text{-avg-latency}$ 相比, QCost-Balanced 能够更大概率同时优化叠加延迟和接入带宽两个测度. 方案实现中存在计算复杂性和搜索算法效率限制, QCost-Balanced 计算解并不完全等同于以上分析的全局理论解, 能够实现全局最优. 方案实现采用局部计算解, 选择次优, 包括全局理论解的三种情况, 如图 7(b) 所示. 设 $Min\text{-avg-latency}$ 此时计算解为 a , 则 QCost-Balanced 计算解, 与 $Min\text{-avg-latency}$ 相比: 若落入区域 II 内 (b 表示), 得到非劣解, 表现为以 $\bar{\Lambda}$ 增加代价换取 $\bar{\Delta}$ 减少; 若落入区域 III 内 (c 表示), 得到最优解, 表现为 $\bar{\Lambda}$ 和 $\bar{\Delta}$ 同时减少; 若落入区域 IV 内 (d 表示), 得到非劣解, 表现为以 $\bar{\Lambda}$ 增加代价换取 $\bar{\Delta}$ 减少. 方案正是通过选择均衡参数 a 和 b , 控制方案局部计算解中落入区域, 实现路由测度 $\bar{\Delta}$ 和 $\bar{\Lambda}$ 的有效量化均衡, 因

而 QCost-Balanced 对路由测度具有代价均衡作用。

4.2 性能实验比较

实验环境是基于 $ns-2^{101}$ 的自行设计事件驱动路由选择模型. 仿真测试网络规模为 100 到 600 的节点以仿真网络路由器, 节点平均度数为 4 M SN 位置则从网络节点随机选择确定; M SN 节点间延迟范围为 40ms 到 178ms 分别选择 M SN 节点数为 32 和 96 进行实验. 方案性能分析的参照方案为 $m\ in\ avg\ latency^{[7]}$, 为在同等条件下进行比较, 对 $m\ in\ avg\ latency$ 进行了必要的简化: 省略随机交换 (random swap) 局部转移操作.

表 1 路由测度 $\bar{\Delta}_t$, $\bar{\Delta}_r$ 均衡性能^②

100节点	平均子树延迟 $\bar{\Delta}_t$ (ms)			平均子树带宽 $\bar{\Delta}_r$ (%)		
M SN 规模	32	64	96	32	64	96
$m\ in\ avg\ latency$	178.84	175.99	181.32	69.16	70.57	107.41
QCost-Balanced	185.47	166.17	188.32	54.54	67.47	93.33
增益比	1.0371	0.9442	1.0386	0.7886	0.9562	0.8691

600节点	平均子树延迟 $\bar{\Delta}_t$ (ms)			平均子树带宽 $\bar{\Delta}_r$ (%)		
M SN 规模	32	64	96	32	64	96
$m\ in\ avg\ latency$	263.94	387.29	369.29	60.39	91.34	90.69
QCost-Balanced	276.14	381.77	346.53	54.33	75.70	87.76
增益比	1.0462	1.0092	0.9384	0.8997	0.8288	0.9677

表 1 为方案路由测度均衡性能对比结果. 实验 1 (100 节点网络) 结果表明, 方案 M SN 节点子树平均带宽分别为比较方案 $m\ in\ avg\ latency$ 的 78.86%, 95.62% 和 86.91%, 同时方案子树平均延迟依次为 103.71%, 94.42% 和 103.86%; 集合 2 (600 节点网络) 结果表明方案子树平均带宽分别为 89.97%, 82.88% 和 96.77%, 相比之下子树平均延迟为 104.62%, 100.92%, 和 93.86%. 两组实验都表明, 本方案在某些情况下可以获得最佳的均衡效果, 路由测度子树平均延迟与子树平均带宽将同时减少. 由此可以根据具体应用不同的服务需求在两个测度间进行有效均衡, 以最小代价获得最佳资源配置.

4.3 量化均衡性能分析

本节通过实验说明方案通过统一路由测度框架设计具有的量化均衡特性. 实验设计如下: 从规模为 100 节点网络中随机产生一个含 32 个 M SN 叠加网络, 对每一对均衡参数 a 和 b 设置, 连续进行重复实验. 结果取 9 次实验的平均值作为实验结果, 结果如图 8 所示. 由此可以得到如下结论:

(1) 平均子树延迟 $\bar{\Delta}_t$ 随均衡参数 a 的增加而逐渐下降, 这是由于延迟测度在代价单位圆中逐渐占有更多的面积, 在路由选择中所占重要性提高的结果;

(2) 平均子树带宽 $\bar{\Delta}_r$ 随带宽相关均衡参数 b 在代价单位圆中比例减少基本上呈增加趋势, 除了个别情况 ($a:b=0.3:0.7$) 例外;

②增益比: QCost-balanced/ $m\ in\ avg\ latency$

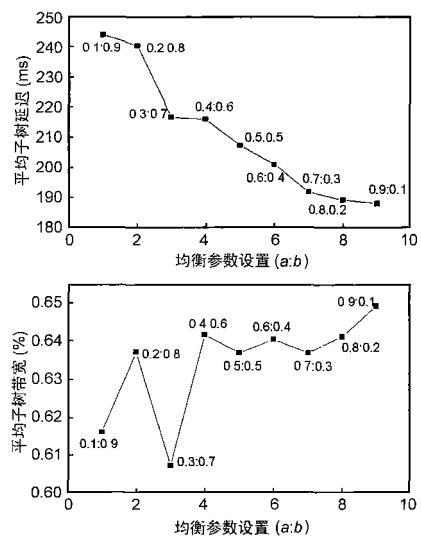


图 8 路由测度 $\bar{\Delta}_t$ 与 $\bar{\Delta}_r$ 量化均衡性能比较

(3) 例外表明支持叠加组播的底层网络拓扑可能会影响路由性能;

(4) 通过量化均衡控制, 方案可以进一步设计成为其他应用的统一路由框架 (方案 $m\ in\ avg\ latency$ 是 QCost-Balanced 在 $a=1, b=0$ 情况下的特例).

5 结论

本文针对协同工作中不同数据类型需要不同 QoS 转发路径需求, 提出一种基于叠加组播的量化均衡路由机制. 实验表明机制能够获得有效均衡, 通过均衡量化参数控制能够量化地动态调整路径延迟和接入带宽在路由选择中的均衡关系, 实现有效量化均衡控制与路由动态适应性.

参考文献:

[1] G Manim aan, P Mohapatra Multicasting: an enabling technology[J]. IEEE Network, 2003, 17(1): 6-7.

[2] Li B, Hou YT, Sohaby K, Ullman A M, Zhang Z, Peterson LL. Guest editorial: recent advances in service overlay networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2004, 22(1): 1-5.

[3] Zhi L, P Mohapatra Hostcast: a new overlay multicasting protocol[A]. Icc03 Proceedings[C]. Anchorage, Alaska: IEEE Press, 2003: 702-706.

[4] Eli Bnash, Yuval Shavut Approximation and heuristic algorithms for minimum-delay application layer multicast trees[A]. IEEE Infocom 04 Proceedings[C]. Hong Kong: IEEE Press, 2004: 2697-2707.

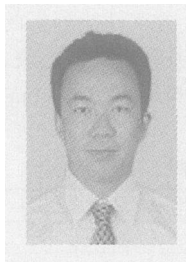
[5] Y Hua Chu, S G Rao, S Seshan and H Zhang Enabling conferencing applications on the Internet using an overlay multicast architecture[A]. ACM Sigcomm 01 Proceedings

- [C]. San Diego, CA: Assoc Computing Machinery, 2001. 55–67.
- [6] Shi S Y, Tumer J S. Routing in overlay multicast networks [A]. IEEE Infocom 02 Proceedings [C]. New York City: IEEE Press, 2002. 1200–1208.
- [7] B. Sun an, K. Christopher K. Koushik, B. San rat, K. San ir. Construction of an efficient overlay multicast infrastructure for real-time applications [A]. IEEE Infocom 03 Proceedings [C]. San Francisco: IEEE Press, 2003. 1521–1531.
- [8] Bo Li, Jiangchuan Liu. Multirate video multicast over the Internet: an overview [J]. IEEE Network, 2003, 17(1): 24–29.
- [9] H. Fujinoki. Performance evaluation of multicast routing algorithms to trade-off path length and bandwidth consumption and of a protocol to reduce messaging overhead [D]. South Florida Dept of CS and Engineering Univ of South Florida, 2001.
- [10] Kevin Fall. The nsManual (formerly ns Notes and Documentation) [EB/OL]. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/nsdocumentation>, 2003-03-23.
- [11] S. Shi, J. Turner. Multicast routing and bandwidth dimension-

ing in overlay networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in communications, 2002, 20(8): 1444–1455.

- [12] 龙子泉, 陆菊春. 管理运筹学 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002.

作者简介:



陆 俊 男, 1976年2月出生于昆明, 博士研究生. 主要研究领域: 计算机支持的协同工作 (CSCW) 与网络组播.

E-mail: lujun@hotmai.com



阮秋琦 男, 1944年生, 教授, 博士生导师, 北京交通大学信息科学研究所. 主要研究领域: 数字图像处理, 计算机视觉, 计算机图像学与虚拟现实.