

一种考虑延迟和丢包率的最小代价应用层组播树

姜山, 郑庆华, 南宏朕

(西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对度约束方式难以减少应用层组播树的延迟和丢包率的问题, 提出了一种延迟和丢包率综合代价最小的应用层组播树构树算法. 为避免度约束的局限性, 给出一个包含延迟和丢包率的复合代价函数, 以此来计算传输代价, 进而构建了一种最小复合代价组播树的问题模型. 为了求解该问题模型, 提出了一种基于最大延迟路径贪婪算法的变异算法, 同时在构树时对总传输代价进行优化. 通过实验, 给出复合代价函数的具体参数建议. 对比相关算法, 文中的构树算法在总传输代价方面有更好的性能.

关键词: 应用层组播; 低延迟; 丢包率; 传输代价; 组播树

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)02-0001-05

A Minimum Cost Application-Level Multicast Tree for Concerning Delay and Loss Rate

JIANG Shan, ZHENG Qinghua, NAN Hongzhen

(School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: It is not efficient for the approach of constraining outdegree to enhance delay and loss rate synthetically for an application-level multicast tree. This paper proposes an application-level multicast tree which achieves minimum cost in terms of delay and loss rate. A cost function which consists of delay and loss rate is given to compute transmission cost of the multicast tree, and the problem model about how to construct the minimum multiplex-cost multicast tree is also given. Unlike existing problem models, this model abandons the approach of constraining outdegree. Furthermore, a variation of the maximal delay path greed algorithm is proposed to address the problem model. This variation algorithm optimizes total cost of a multicast tree. Finally, our extensive experimental results help to give the concrete suggestion about the parameters which the cost function involves, and demonstrate that the proposed application-level multicast tree construction algorithm has higher efficiency in total cost of the multicast tree than another related algorithm has.

Keywords: application-level multicast; low delay; loss rate; transmission cost; multicast tree

基于 Internet 的实时多媒体服务越来越受到人们的欢迎, 并得到广泛的应用. 此类实时多媒体服务需要有效的数据“一对多”分发方法. 应用层组播是一种非常有效的实时数据分发方法^[1]. 目前, 已经提出了多种应用层组播协议, 如 Narada、NICE、Yoid、

ALMI 和 Scribe 等^[2-5]. 无论何种协议, 实现数据包在组播节点中的快速分发一直是应用层组播的主要追求目标. 但是, 对于实时多媒体服务, 应用层组播的数据分发路径必须要考虑丢包率方面的性能, 组播树的构建是其中的关键.

目前,已有一些用于构建不同类型的应用层组播树的研究方法^[5-11],它们的区别在于约束条件不同,目标代价函数不同,共同点是寻求一个运算复杂度适中的求解近似最小代价生成树这个 NP-hard 问题的方法.这类研究针对各自的应用目标已取得了较好的效果.然而,这些方法都没有很好地考虑应用层组播分发路径的丢包率,只是简单地通过为每个节点设置最大出度来控制分发路径的流量,从而希望达到控制丢包率的目的.出度约束有局限性:①应用层组播树的分发路径往往是由多条不同地域的底层链路组成的,然而节点出度只能简单地表示节点附近局部网络的传输性能,因此无法通过局部的传输性能去准确地衡量和控制整条分发路径的丢包率;②度约束无法考虑网络背景流量对丢包率的影响,所以采用节点出度约束方式控制分发路径的丢包率是无法考虑背景流量的,因此这种方法不够精确;③现有的构树算法没有给出求解节点最大出度的有效方法,因此这些算法还有待完善和改进.

针对现有方法忽略了应用层组播树的丢包率性能,本文旨在提出一种综合考虑延迟和丢包率的最小代价应用层组播树构建方法.首先,要有效评估分发路径的传输代价.我们要求传输代价不仅考虑分发路径的延迟,而且还考虑路径的丢包率.为此,我们给出一个包含了延迟和丢包率参数的代价和函数用于计算传输代价.其次,要在应用层组播过程中使得传输代价最小.我们将所有应用层节点形成的覆盖网络抽象成一个边带权的图,并给出一个新的更全面的求解应用层组播树的问题模型.不同于现有相关问题模型,该模型没有约束节点的出度,这是因为分发路径的传输代价已经考虑了丢包率性能.进一步,针对求解最小代价组播树问题,我们提出一种启发式的构树算法.该算法是基于最大延迟路径贪婪算法的变异形式,它为每个节点所选取的分发路径基本上为根节点到其节点的最小代价路径.最后,对我们的最小代价组播树算法进行实验,通过分析实验结果给出代价和函数的关键参数——丢包率影响因子的2种最优值定义,并给出代价和函数的具体参数建议.另外,通过对比其他相关构树算法,证明本文的构树算法在总代价性能上具有较好的优越性.

1 问题模型

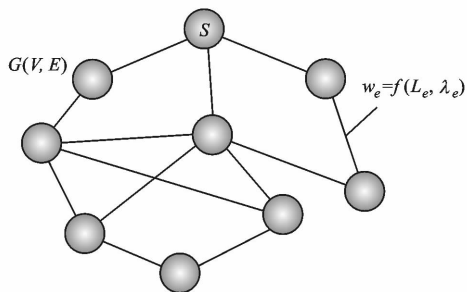
本文构建最小代价应用层组播树时,分发路径的传输代价同时考虑延迟和丢包率.

在如图1a所示覆盖网络中,图中节点记为 v ,两个节点之间的链接记为 e , e 的延迟为 L_e ,丢包率为 λ_e ,节点 s 经过路径 $E_{s,v}=(s,\cdots,v)$, $E_{s,v}\subset E$,到达 v ,则 s 至 v 的累计延迟 $L_{s,v}$ 、累计丢包率 $\lambda_{s,v}$ 分别用如下公式计算

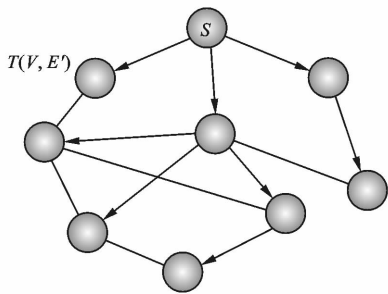
$$L_{s,v} = \sum_{e \in E_{s,v}} L_e \quad (1)$$

$$\lambda_{s,v} = 1 - \prod_{e \in E_{s,v}} (1 - \lambda_e) \quad (2)$$

传输代价应同时考虑延迟和丢包率,即链接 e 的代价由 L_e 和 λ_e 共同决定,则其代价 $w_e = f(L_e, \lambda_e)$,其中 $f(L, \lambda)$ 为代价函数.路径 $E_{s,v}$ 的代价为 $w_{s,v} = \sum_{e \in E_{s,v}} w_e$,即路径代价为路径中每条链接代价之和.在代价函数中,链接代价 w_e 由链接延迟和丢包率共同决定.在使用此代价构建组播树的同时考虑到延迟和丢包率,使得获得的组播树能够同时保证延迟和丢包率的优化.由于传输代价在延迟基础上进一步考虑了丢包率,所以称此代价为“复合代价”.



(a) 覆盖网络



(b) 最小复合代价组播树

图1 覆盖网络及其最小复合代价组播树

本文定义一种代价函数,其表达式为

$$f(L, \lambda) = L - k \ln(1 - \lambda) \quad (3)$$

式中: k 表示丢包率在复合代价组成中所占比重,称之为丢包率影响因子; L 为延迟参数; λ 为丢包率参数.

代价函数同时包含了丢包率参数和延迟参数,且函数中含有对数形式,因此该复合代价及其函数

的量纲为1.另外,对于延迟参数 L 以毫秒为单位.

Blanchard等^[12]认为,对系统代价的分析和计算应该具有数学理论性,这样可以让系统分析具有普适性和可扩展性.参照文献^[12],我们给出系统代价计算方法的2个数学性质:函数可加性和代价可加性.函数可加性是指代价函数之和等于各参数之和的代价函数.代价可加性是指代价函数可表示为各个参数独立函数之和.可证本文的代价函数定义均符合这2项性质.

本文将所有应用层节点所形成的覆盖网络抽象成一个边带权的图,其最小复合代价应用层组播树(Minimum Multiplex-cost application-level multi-cast Tree, MMT)的问题模型定义为:给定一个图 $G(V, E)$,其任意边 $e, e \in E$,设延迟为 L_e 、丢包率为 λ_e 以及相应权值 $w_e = f(L_e, \lambda_e) = L_e - k \ln(1 - \lambda_e)$,求解 G 的一个始于根节点为 $s \in V$ 的最小代价有向分发树 $T(V, E')$,如图1b所示,使得所构建的分发树中节点最大代价获得最小值,同时使链路总代价尽可能小.

2 构建最小复合代价应用层组播树

本文提出一种用于构建最小复合代价应用层组播树的算法,称之为MMT算法. MMT算法是基于最大延迟路径的贪婪算法的一种变异形式,因此在此算法中,节点到根节点最短路径延迟越大,加入组播树的时间越早.

为了叙述方便,先描述几个术语. 设 $G(V, R)$ 是连通图, $T(V, R')$ 是待求树,初始状态时, $T = \emptyset$,即 $V_T = \emptyset$; T' 表示 T 相对于图 G 的补集, $V_{T'} = V$. 构建组播树的过程是将 T' 中的每个节点以及相关的一条边逐一纳入到 T 的过程.

对于前述问题模型,初始状态下本算法设 T 仅包含根节点 s ,并记 $w_s = 0$,剩余树 T' 包含 V 中除 s 外的所有组播节点.

步骤1 对于所有节点 $v \in T'$,计算根节点 s 至节点 v 的最小代价 w_v ,从大到小进行排序,对应节点序列为 $S = \{v_1, v_2, \dots\}$,记其最大值 w_{v_1} 为 $w_{\max}$,将 v_1 取为节点 v .

步骤2 对于所有节点 $v' \in T$,计算节点 v' 至节点 v 的最小代价 $w_{v',v}$,并从小到大进行排序,对应节点序列为 $S' = \{v'_1, v'_2, \dots\}$,并将 v'_1 取为节点 v' .

步骤3 若 $w_{v'} + w_{v',v} \leq w_{\max}$,则转到步骤4,否则将序列 S' 中下一节点取为节点 v' ,重复步骤3操作.

步骤4 将节点 v' 与 v 节点间最小代价路径 $R_{v',v} =$

$(v', \dots, v)$ 中节点从节点 v' 的下一节点开始逐点记为节点 v'' 进行如下操作.

(1)如果节点 $v'' \notin T$,则将节点 v'' 以及相应最小代价路径 $R_{v',v''}$ 中未加入 T 中的边加入组播树 T ,同时记 $w_{v''} = w_{v'} + w_{v',v''}$,并将 v'' 从 T' 和 S 中删除.

(2)如果节点 $v'' \in T$,说明加树过程出现回路,原有路径中此节点代价偏高.将 T 中 v'' 与其父节点相连的边从 T 中删除,并将节点相应最小代价路径 $R_{v',v''}$ 中未加入 T 中的边加入组播树 T ,修改 $w_{v''} = w_{v'} + w_{v',v''}$,若其变化 $\Delta w \neq 0$,则对 T 中节点 v'' 的所有子树节点进行 $w_{v'''} = w_{v''} + \Delta w$ 操作.

步骤5 若序列 S 非空,则取第一个节点记为 v ,返回步骤2,否则结束操作,完成组播树 T 的构建.

3 实验及分析

本实验在NS-2仿真平台下^[13],通过GT-ITM提供的Transit-Stub模型随机产生一个453节点的模拟分层网络^[14],对于每条链路随机设定固有延迟和背景丢包率.由于本实验是对MMT算法进行验证,所以在网络拓扑构建成功,并在此基础上构建组播树后,使用分层拓扑中的延迟、丢包率参数计算所构建组播树的性能.

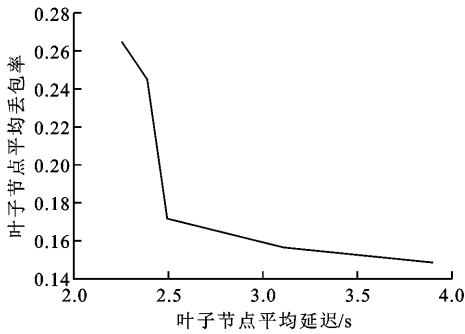
3.1 不同 k 值下的MMT算法实验

对于MMT算法,其传输代价和函数中的参数 k 决定延迟和丢包率在代价中的比重.但是,组播树性能是延迟、丢包率的统一表现,所以为了使得组播树总体最优,需要平衡两者的比重,使得组播树在延迟、丢包率中获得综合最优.本实验首先根据丢包率和延迟随 k 值的变化规律给出2种最优 k 值定义,并在此基础上找到合适的 k 值.

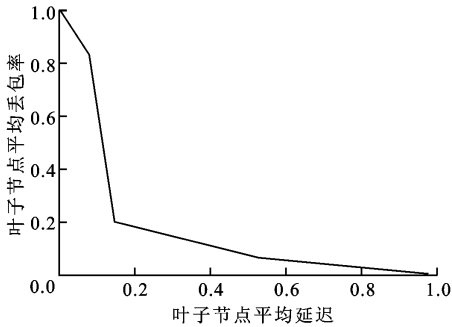
在模拟分层网络中,随机选取组播树根节点(即数据源)和组播节点,不断更改丢包率影响因子 k 计算传输代价,在此基础上构建MMT组播树,计算叶子节点的延迟和丢包率,并记录其2个参数间的相关关系.

图2为不同 k 值下丢包率和延迟的相关性,图2a为原始相关关系,曲线上任意一点表示当 k 为特定值时MMT的延迟(横坐标)和丢包率(纵坐标)的大小.

比例最优 k 值:由图2a可知,随着 k 的变化,延迟、丢包率逐渐发生变化,且其变化是反向的.假设当延迟和丢包率的变化比例(增加比例或下降比例)相同时,它们对组播质量的影响是相等的,则有组播质量与延迟丢包率之积成反比.当延迟与丢包率之

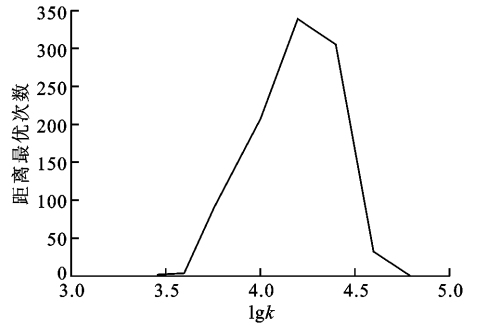


(a)原始相关关系

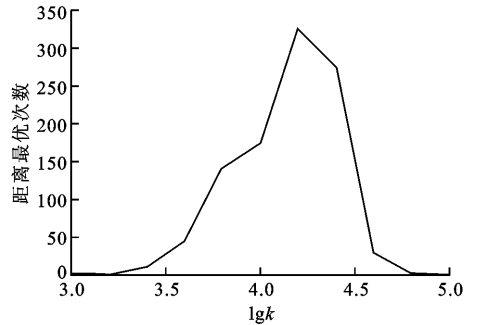


(b)归一化后的相关关系

图 2 MMT 的延迟与丢包率的相关性



(a)距离最优 k 值



(b)比例最优 k 值

图 3 两种最优 k 值分布

积获得最小值时,组播质量最优,所对应的 k 值称为比例最优 k 值. 在图 2a 中,比例最优 k 值是指横坐标与纵坐标乘积最小的点所对应的 k 值.

距离最优 k 值:对图 2a 所示原始关系进行如下线性归一化操作,对于丢包率和延迟分别将最小值归一化为 0,最大值归一化为 1,归一化结果如图 2b 所示,假设对于归一化的相关性,当延迟和丢包率的变化相同时,它们对组播质量的影响是相等的,由此可知,当一个点离点(0,0)的距离越近,其所对应的组播质量越好. 特别地在图 2b 中,当它离点(0,0)的距离最近时,可以认为延迟和丢包率达到一个平衡点,所对应的 k 值称为距离最优 k 值.

在模拟分层网络中,重复随机选取根节点和组播节点,对每组随机节点,重复使用不同 k 值构建 MMT 组播树求取 2 种最终 k 值,分别进行 1 000 组实验,其结果如图 3 所示.

图 3a 为所获得的距离最优 k 值分布,图 3b 为比例最优 k 值分布. 由此可知, $10^{4.2}$ 为 2 种计算方法在多数情况下取到的相同值,所以将其作为 MMT 组播树构建过程中代价和函数的推荐 k 值.

3.2 与 H-MDM 算法的比较

H-MDM 算法是另一种基于最大延迟的贪婪算法^[9],在构树时,同样也没有约束节点出度,但 H-

MDM 的传输代价只考虑传输延迟. 为了保证算法比较的同等性,本实验在使用 H-MDM 构树时,也采用“复合代价”来作为传输代价.

本实验在模拟分层网络中,不断增加组播节点数量,并按照推荐 k 值计算复合代价,根据此代价分别构建 H-MDM 组播树和 MMT 组播树,计算出组播树链接总代价进行比较,结果如图 4 所示.

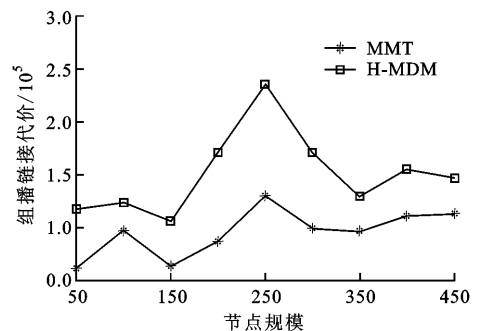


图 4 H-MDM 与 MMT 构建组播树链接代价比较

MMT 算法在总代价上比 H-MDM 算法更好. MMT 算法相比 H-MDM 算法在设计上不增加最大代价,但却降低了链接的总代价,即 MMT 相对于 H-MDM 算法在不降低最大代价性能的基础上提升了组播树的链接总代价性能.

4 结 论

本文将所有应用层节点形成的覆盖网络抽象成一个边带权的图,并给出一个新的更全面的求解应用层组播树的问题模型.该模型虽然没有约束节点的出度,但能更有效地实现组播树的丢包率控制.这是因为采用延迟和丢包率的和函数形式来计算组播树的传输代价,当组播树代价最小时,组播树在延迟和丢包率性能方面可以达到较高的综合水平.同时,本文的MMT算法可以很好地近似求解最小代价组播树.通过实验,我们给出了代价和函数的具体参数建议.此外,与H-MDM算法的对比实验也进一步论证了MMT算法在组播树的总代价方面有着更好的性能.

在下一步工作中,计划将该方法集成于国家科技支撑计划课题的“村镇教育资源远程服务系统”,从而在实际应用中验证和完善MMT的性能.

参考文献:

- [1] HOSSEINI M, AHMED D, SHIRMOHAMMADI S, et al. A survey of application-layer multicast protocols [J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2007, 9 (3): 58-74.
- [2] GUO Deke, CHEN Honghui, LIU Yunhao, et al. Bake: a balanced kautz tree structure for peer-to-peer networks[C]// Proceedings of INFOCOM. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 2450-2457.
- [3] DAN G, FODOR V, CHATZIDROSSOS I. On the performance of multiple-tree-based peer-to-peer live streaming [C]// Proceedings of INFOCOM. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007: 2556-2560.
- [4] POMPILI D, SCOGLIO C, LOPEZ L. Multicast algorithms in service overlay networks [J]. Computer Communications, 2008, 31 (3): 489-505.
- [5] TAN Suwei, WATERS G, CRAWFORD J, et al. A survey and performance evaluation of scalable tree-based application layer multicast protocol, Technical Report No. 9-03[R]. Kent, UK: University of Kent, 2003:1-35.
- [6] BOLOT J C, CEDEX S A. The case for FEC-based error control for packet audio in the Internet[J]. ACM Multimedia Systems, 1997.
- [7] 曹佳, 鲁士文. 应用层组播的最小延迟生成树算法[J]. 软件学报, 2005, 16 (10): 1766-1773.
- CAO Jia, LU Shiwen. A minimum delay spanning tree

algorithm for the application-layer multicast[J]. Journal of Software, 2005, 16 (10): 1766-1773.

- [8] HOSSEINI M, GEORGANAS N D. End system multicast routing for multi-party videoconferencing applications[J]. Computer Communications, 2006, 29(11): 2046-2065.
- [9] BROASH E, SHAVITT Y. Approximation and heuristic algorithms for minimum delay application-layer multicast trees[C]//Proceedings of INFOCOM. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2004:2697-2707.
- [10] SHI S Y, TUMER J S. Multicast routing and bandwidth dimensioning in overlay networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2002, 20(8):1444-1455.
- [11] LUO Chong, WANG Wei, TANG Jian, et al. A multiparty videoconferencing system over an application-level multicast protocol [J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2007, 9(8):1621-1632.
- [12] BLANCHARD B S, FABRYCKY W J. Systems engineering and analysis [M]. 2nd ed, Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice Hall, 1990.
- [13] NS, the network simulator [EB/OL]. (2008-06-17) [2010-07-01]. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
- [14] ZEGURA E W, CALVERT K L, BHATTACHARJEE S. How to model an internet work[C]// Proceedings of INFOCOM. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1996:594-602.

[本刊相关文献链接]

可演化网络中移动代理的性能分析及优化方法. 西安交通大学学报, 2010, 44(12):5-9.

移动 Ad Hoc 网络中提高路由稳定性的动态备份多径路由. 西安交通大学学报, 2010, 44(12):16-21.

一种高吞吐量的无线传感器网络多信道 MAC 协议. 西安交通大学学报, 2010, 44(12):32-37.

网络生存适应性的多目标评估. 西安交通大学学报, 2010, 44(10):1-7.

传感器数据中事件样本与错误样本的系统化区分框架. 西安交通大学学报, 2010, 44(10):30-35.

一种改进的加权质心定位算法. 西安交通大学学报, 2010, 44(8):1-4.

面向目标覆盖的无线传感器网络确定性部署方法. 西安交通大学学报, 2010, 44(6):6-9.

使用交叉熵检测和分类网络异常流量. 西安交通大学学报, 2010, 44(6):10-15.

(编辑 武红江)