

一种新的时延受限多播路由算法

高玲玲, 李伟生

(北京交通大学 计算机与信息技术学院, 北京 100044)

摘要:为了满足多播业务的实时性要求、提高资源利用率,提出一种新的时延受限最小代价树多播路由算法。该算法基于最小代价多播树的生成方法,对节点之间的时延进行动态修改,寻找满足时延限制的最短路径,可快速找到满足时延约束的多播树。实验结果表明,该算法生成速度快、代价性能良好、能够满足多媒体网络的实时性要求。

关键词:时延约束;多播路由;服务质量;多播树

中图分类号:TP301.6

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2006)10-0005-03

A New Delay Constraint Multicast Routing Algorithm

GAO Ling-ling, LI Wei-sheng

(School of Computer and Information Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: A new algorithm for delay-constrained minimum-cost multicast routing directed at ensuring real time requirement and resource usage of multicast tree is proposed. The algorithm is based on an algorithm of creating minimum-cost multicast tree, changes the delays among nodes dynamically, finds shortest path which satisfies delay constraint, and gets delay-constrained minimum-cost tree quickly. A large number of simulations demonstrate that the algorithm has nice creating speed and nice cost performance, and can satisfy the real time requirement of network.

Key words: delay constraint; multicast routing; quality of service; multicast tree

0 引言

多播是一种实现从源节点同时向多个目标节点发送信息的通信形式。随着高性能网络技术的迅速发展,多播在各种多媒体应用中发挥着越来越重要的作用。例如视频点播(VOD)、视频/音频会议、计算机支持的协作工作等都需要网络具有多播服务的能力。其中许多多播应用还需要满足端到端时延限制,优化网络资源利用率则是同时要满足的重要目标,因此,建立满足端到端时延约束的最小代价树成为多播路由问题中的研究热点。由文献[1]可知,满足时延约束的 Steiner 问题是 NP 完全的,通常通过启发式算法求近似解。

对此,人们已经提出了不少解决方案:KPP 算法^[1]扩展了 KMB 算法,构造满足时延约束的完全图,利用 Prim 算法求出完全图的最小覆盖树,其时间复杂度为 $O(\Delta |V|^3)$;BSMA 算法^[2]则用 Dijkstra 算法求出从源节点到各个目的节点的时延最小路径,构成多播树,然后替换树中代价较高的边,改进多播树的总代价,其时间复杂度为 $O(k |V|^3 \log V)$,上述两种算法都有很好的性能;基于拉格朗日松弛的算法^[3]解决了前两种算法没有解决的动态

问题,其目标节点可以动态地加入或退出多播组,它把添加节点问题简化成寻找添加节点与源节点间的时延受限最小代价路径,通过一个启发式算法来解决;文献[4]和[5]分别基于拉格朗日松弛方法和禁忌搜索方法来生成多播树,其性能较好,但算法的时间复杂度还是较高。

文中对时延受限多播路由问题进行分析,在最小代价生成树算法 FMPH^[6]的基础上,提出了一种新的满足时延约束的最小代价多播路由算法(DCMC 算法)。该算法基于最小代价多播树的生成方法,动态修改端点之间的时延,寻找满足时延限制的最短路径,快速生成满足时延约束的多播树。实验结果表明,算法代价性能要优于 KPP 算法,且时间复杂度非常低。

1 多播路由问题的模型

对所讨论的多播路由问题作如下假设和定义。设网络用加权简单无向图 $G = (V, E)$ 来表示,其中 V 是网络中所有节点的集合; E 为图 G 中边的集合。用 $|V|$ 表示网络中的节点数, $|E|$ 表示网络中的链路数。 s 为源节点, $D = \{d_1, d_2, d_3, \dots, d_m\}$, $D \subset V$ 是一个目标节点集,即多播组, m 为多播组中节点的个数。链路代价函数为 $C(C: E \rightarrow R^+)$, 时延函数为 $D(D: E \rightarrow R^+)$, 路径 $P(u, v) = (v_1, v_2, \dots, v_p)$, Δ 为路径时延上限。路径 P 的时延为各链路时延的和: $D(P) = \sum_{i=1}^{p-1} D(v_i, v_{i+1})$, 代价为各链路代

收稿日期:2006-01-16

作者简介:高玲玲(1981-),女,江苏东台人,硕士研究生,研究方向为网络通信、算法设计分析;李伟生,教授,研究方向为网络与数据库技术,算法设计与分析(图论算法、最优化算法、并行算法)。

价的和: $C(P) = \sum_{i=1}^{p-1} C(v_i, v_{i+1})$ 。

定义 1 多播树 $T = (V', E')$ 覆盖源节点 s 和多播组 D , 并且 T 中每条路径 P 的 $D(P) \leq \Delta$, T 的总代价为 $C(T) = \sum_{e \in E'} C(e)$ 。

由上述可知, 随着每次加入一个目标节点, 多播树就由 T_i 变为 T_{i+1} , 总共 m 个目标节点, 组成多播树序列 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$, 当所有目标节点加入多播树时, 就完成生成算法。

2 时延受限多播路由算法

由于文中是基于 FMPH 算法的, 因此对该算法作简单介绍。该算法是在 MPH 算法的基础上来求最小代价树, 它改进最短路径节点的搜索过程, 以较小的存储空间为代价, 获得很高的计算效率。其基本思想如下^[7]:

设 M_k 为未添加多播树上的目标节点。

1) 初始化: 令 $k = 1$, 从源节点开始, 将单节点 s 作为多播树 T_1 。计算 M_k 中所有目标节点到多播树 T_1 的最小距离和最短路径, 并记录。

2) 从 M_k 中选出到多播树代价最小的节点, 并将该节点和该节点到多播树最短路径上所有节点一起加入多播树, 从 M_k 中删除该节点。

3) 对新加入的每个节点: 考察 M_k 中每个节点 u 到新加入节点的距离, 若该距离小于 u 到多播树 T_k 的距离, 则将该距离作为 u 到多播树 T_k 的距离, 并记下 u 到多播树 T_k 的最短路径。

4) 重复 2)、3), 直到 M_k 为空。

文中提出的 DCMC 算法以上述算法为基础, 动态修改节点之间的时延, 寻找满足时延限制的最短路径来构建多播树。基本思想如下:

(1) 计算所有目标节点到源节点的最短路径及路径的代价和时延, 记录在一个向量组中, 并设网络中所有点到源节点的时延均为零。

(2) 从未加入多播树的目标节点中选出到多播树代价最小, 并且到源节点的时延满足时延限制的点。

(3) 将寻找到的目标节点及该点到多播树的路径一起加入多播树, 从目标节点集合中删除该节点。

(4) 对新加入多播树的节点重复以下过程: 修改新加入节点到源节点的时延, 考察所有未添加的目标节点到新加入节点的代价 C , 以及由此得到的新时延 D , 若 C 小于该目标节点到多播树的代价且 D 小于时延限制, 则将 C 作为节点到多播树的代价, D 作为节点到源节点的时延, 并记下该节点到多播树的最短路径。

(5) 重复 (2)、(3)、(4) 直到所有目标节点都加入到多播树上。

因为现有性能较好的时延受限算法时间复杂度都比较高, 而 FMPH 算法的时间复杂度很低, 代价性能却与 MPH 算法相同, 文中以 FMPH 算法为基础, 修改了最短

路径的选择条件, 加入了对节点之间时延的记录, 并对时延记录进行动态改变, 但 FMPH 算法的整体搜索思想却没有改变, 因此, 文中提出的 DCMC 算法有时间复杂度低、代价性能高的优点。

DCMC 算法具体描述如下:

定义结构体存储目标节点信息, 设节点 u , u . par 表示连接该节点的多播树节点, u . dist 表示该节点到多播树的最小代价, u . delay 表示该节点到多播树路径的时延。 $D(v)$ 表示节点 v 到源节点的时延, $\text{cost}(u, v)$ 表示 u, v 之间最短路径的代价, $\text{delay}(u, v)$ 表示 u, v 之间最短路径的时延。

```
for(u ∈ D)
{
    u. par = s;
    u. dist = cost(u, s);
    u. delay = delay(u, s);
}
for(v ∈ N) { D(v) = 0; }
while(D ≠ ∅)
{
    MinDist = ∞;
    for(w ∈ D)
    {
        { 选出满足时延限制的路径代价最小的点 m;
        将选中的最短路径添加到生成树上; }
        x = m. par;
        D = D - m;
        for(u ∈ P) {
            修改 D(u);
            for(w ∈ D) {
                if(cost(u, w) < w. dist && (delay(u, w) + D[u]) < Δ)
                {
                    w. dist = cost(u, w);
                    w. delay = delay(u, w) + D[u];
                    w. par = u;
                }
            }
        }
        x = u;
    }
}
```

3 算法分析

3.1 时间复杂度分析

定理 1 文中提出的算法在最坏情况下时间复杂度为 $O((p+1)m^2 + |V|)$ 。

证明: 算法初始化的两个 for 循环时间复杂度为 $O(m + |V|)$ 。在 while 循环中, 从待添加目的节点中选择合适的节点及路径的时间复杂度为 $O(m)$, 根据添加路径上的每个节点对剩余目标节点的信息进行修改的循环次数最多为 $O(mp)$, (设 p 为添加路径上节点的数目, $p \ll |V|$), while 的循环次数为 m 。因此, 最坏情况下, 该算法的时间复杂度为: $O(m(m + mp) + m + |V|) = O((p +$

1) $m^2 + |V|$ 。

3.2 仿真实验分析

仿真实验中采用 Waxman^[7]的网络拓扑结构。任意两个节点 u 和 v 之间是否存在链路由概率函数 $P(u, v) = \beta \exp \frac{-d(u, v)}{\alpha L}$ 确定, 其中 $d(u, v)$ 是 u, v 之间的欧拉距离, L 是任意两节点间的最大距离, α 决定短链路的密度, 取值 0.4, β 决定链路密度, 取值 0.2。网络的链路代价等于网络节点间的距离, 链路时延等于 0 和 1 之间的一个随机数乘以节点间距离再加 0.1, 仿真在每个数据点的试验次数为 1000, 然后统计平均值。

文中选择了时延受限算法中代价性能良好、常用作比较标准的 KPP^[1] 算法来与提出的 DCMC 算法进行比较。首先比较了网络节点和目标节点分别变化时, 算法生成的多播树的总代价。由图 1 的曲线可以看出, 网络节点数比较少时, 两种算法代价差别不大, 随着网络节点数的增加, DCMC 算法的代价与 KPP 算法的代价差距将越来越大, 也就是说, DCMC 算法在代价性能上的优越随着网络节点数的增加将会越来越明显。在图 2 中, DCMC 算法的性能还是比 KPP 算法好, 但是差距不如图 1 显著。

其次比较网络变化时, 多播树的最大时延。由图 3 可见, DCMC 算法产生的最大路径时延较大, 而 KPP 算法的路径时延相对较小。当网络规模增大时, 两者的时延性能差距更明显。这将是后面要进一步改进的地方。

最后比较两种算法在网络变化时的时间复杂度。由图 4 可以看出, DCMC 算法的计算时间要比 KPP 算法小。在实验结果中, 随着网络节点数的增加, DCMC 算法的计算时间要远远小于 KPP 算法。这符合理论结果, 因为 KPP 算法的时间复杂度与网络节点数成立方关系, 而 DCMC 算法与网络节点数是线性的关系, 只与目标节点数成平方关系。

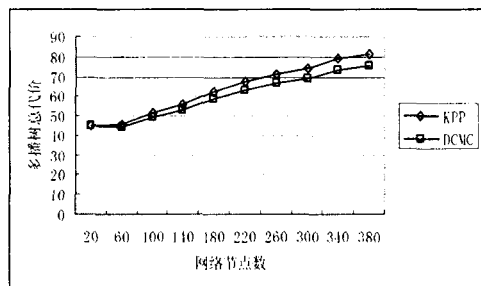


图 1 网络节点数与多播树代价 ($\Delta = 50, M = 5$)

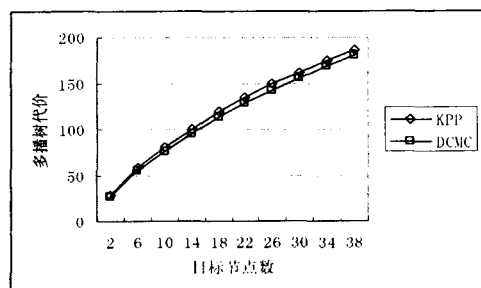


图 2 目标节点数与多播树代价 ($\Delta = 50, N = 100$)

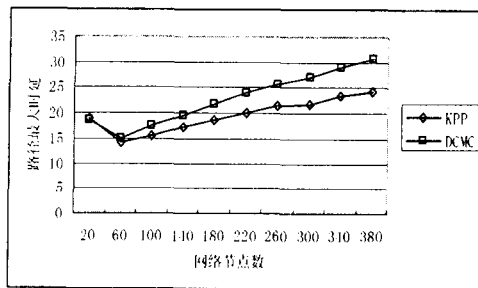


图 3 网络节点数与最大时延 ($\Delta = 50, M = 5$)

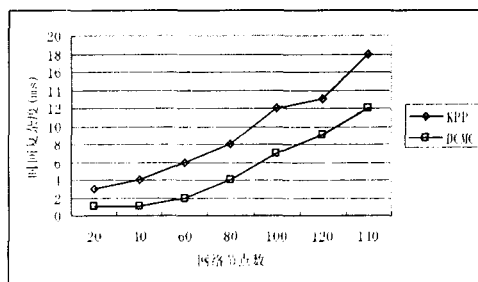


图 4 网络节点数与计算时间 ($\Delta = 50, M = 5$)

4 小 结

文中对时延受限多播路由问题进行了研究, 提出了一种新的满足时延约束的多播路由算法。该算法在最小代价多播树的生成算法基础上, 可快速生成满足时延约束的多播树, 而且取得了良好的网络开销性能。实验表明, 与 KPP 算法相比, 该算法时间复杂度小、代价性能好, 在代价、延迟和计算复杂度间能获得较好的平衡。

参考文献:

- [1] Kompella V P, Pasqual J C, Polyzos G C. Multicast routing for multimedia communication [J]. IEEE/ACM Trans on Networking, 1993, 1(3): 286 - 292.
- [2] Zhu Q, Parsa M, Garcia - Luna - Aceves J J. A source - based algorithm for delay - constrained minimum - cost multicasting [A]. Proceedings of IEEE INFOCOM [C]. Boston, MA, USA: IEEE, 1995. 377 - 385.
- [3] Hong S, Lee H, Park B H. An efficient multicast routing algorithm for delay - sensitive applications with dynamic membership [A]. Proceedings of IEEE INFOCOM [C]. San Francisco, CA, USA: IEEE, 1998. 1433 - 1440.
- [4] 王 珩, 王 华, 孙亚民. 一种基于拉格朗日松弛的时延约束多播路由算法 [J]. 通信学报, 2004, 25(5): 83 - 92.
- [5] 张 琨, 王 珩, 刘凤玉. 一种基于禁忌搜索的时延约束组播路由算法 [J]. 计算机工程, 2005, 31(11): 22 - 24.
- [6] 胡光振, 李乐民, 安红岩. 最小代价多播生成树的快速算法 [J]. 电子学报, 2002, 30(6): 880 - 882.
- [7] Waxman B M. Routing of multipoint connections [J]. IEEE Journal of Selected Areas in Communications, 1988, 6(9): 1617 - 1622.