

文章编号:1001-9081(2009)01-0025-03

时延受限费用最小多播树算法

杨春德¹,任静静²

(1. 重庆邮电大学 数理学院,重庆 400065; 2. 重庆邮电大学 计算机科学与技术学院,重庆 400065)

(renjingjing1029@163.com)

摘要:在一种构造费用最小多播树算法(RSTF)的基础上,考虑了网络的时延,提出一种新的时延受限费用最小多播树算法。通过随机网络的仿真结果表明,新算法与 KPP 算法相比在费用、时延方面有很好的性能。

关键词:时延受限;费用最小多播树;随机网络;

中图分类号:TP301.6 **文献标志码:**A

Delay-constrained minimum cost multicast tree algorithm

YANG Chun-de¹, REN Jing-jing²

(1. College of Mathematics and Physics, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing, 400065, China;

2. College of Computer Science and Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: Based on the Random Selective Tree Node First (RSTF) algorithm that constructs minimum cost multicast tree and considering the delay of the network, this paper presented a new algorithm constructing delay-constrained minimum cost multicast tree. The simulation about random network model shows that compared with KPP the new algorithm has better performance in terms of cost and time delay.

Key words: delay-constrained; minimum cost multicast tree; random network

0 引言

多播是一种群组通信的手段,要求将信息从一个数据源同时传送到多个目的地,多播路由问题实质上就是构建覆盖源端与接收端的路由树的问题。随着通信网络的发展,诸如视频点播、电视会议、分布式网络游戏、实时远程控制等实时多媒体应用日益增多,这些应用服务对于端到端服务质量有着严格的要求,最基本的服务质量参数包括时延、损失率和带宽等。时延是一个重要的服务质量参数,其中时延受限的费用最小多播路由是目前多播领域的一大研究热点,本文提出一种构造时延受限的费用最小多播树的算法。

时延受限的费用最小多播树问题可以形式化为时延受限的 Steiner tree(Delay-Constrained Steiner Tree, DCST)问题,同样是一个 NP-Complete 问题。构造时延受限的 Steiner tree 算法需要满足两个重要条件:1) 所建立的多播树满足端到端的时延约束;2) 所建立的多播树的费用最小。关于 DCST 的重要算法,目前已经有一些研究成果,比较典型的有 MDT^[1]、KPP^[2]、BSMA^[3]、CDKS^[4] 等。其中,MDT 运用 Dijkstra 算法来计算从源节点到各个目的节点的最短时延路径,合并相同的链路来构建多播树。该算法的时间复杂度为 $O(|V|^2)$,其中 $|V|$ 是网络节点数,但该算法所构建的多播树费用较大。KPP 算法是对 KMB 算法进行了扩展,首先求出网络中任意 2 个节点之间满足时延约束的最小代价路径,并基于此路径构造只包含源节点和目的节点的完全图,最后运用最小生成树的启发式算法来构造多播树。该算法的时间复杂度为 $O(\Delta |V|^3)$,其中 Δ 是端到端的时延上限。BSMA 算法结合了最小时延路径算法和 K 路由算法,首先在源节点和目的节点之间使用 Dijkstra 最短路径算法来构建最小时延树,

然后在满足时延约束的条件下运用第 k 条最短路径(费用)算法来得到低代价路径,用低代价路径来替换多播树中的代价较高的超边。该算法的时间复杂度为 $O(k|V|^3 \log |V|)$ 。CDKS 算法结合了最小费用路径算法和最小时延路径算法,首先计算从源节点到各个目的节点的最小费用路径,对于不满足时延约束的路径用最小时延路径来代替。该算法的时间复杂度为 $O(|V|^2)$,构建的多播树代价较小,仅次于 KPP 和 BSMA,但时间复杂度大大低于两者。

本文的贡献在于,在 RSTF^[5](Random Selective Tree Node First)算法的基础上进行了扩展得出一种关于 DCST 的新算法(Delay-Constrained Random Selective Tree Node First, DCRSTF)。

1 网络模型和问题定义

给定一个带权无向网络图 $G = (V, E)$, V 是节点集, E 是边集。每条边 $e (e \in E)$ 上定义两个函数:代价函数 $c(e): E \rightarrow \mathbf{R}^+$; 时延函数 $d(e): E \rightarrow \mathbf{R}^+$, 其中 \mathbf{R}^+ 表示正实数集。 $s \in V$ 是源节点, $M \subset V - \{s\}$ 表示端节点集合, n 是网络节点个数, m 是端节点个数。

定义 1 $P(u, v)$ 表示节点 u 到节点 v 的路径,路径 P 的时延为路径上的各个链路的时延和,记为: $D(P) = \sum_{e \in P} d(e)$, 路径 P 的代价为路径上的各个链路的代价和,记为: $C(P) = \sum_{e \in P} c(e)$ 。最短路径:节点 $u, v \in V$ 之间的最短路径是指从 u 到 v 费用最小的路径,用 $SP(u, v)$ 来表示。两点距离:节点 $u, v \in V$ 之间的距离是指最短路径的费用,即 $C(SP(u, v))$ 。节点 u 到树的最短路径是指该节点到树的各个节点最短路径中费用最小的路径,该路径用 $PS(u, v)$ 表示($u \in V - V_t, v \in V_t$),其

收稿日期:2008-07-04;修回日期:2008-09-27。

作者简介:杨春德,男,重庆人,副教授,主要研究方向:网络信息安全、统计学习理论;任静静(1985-),女,山东德州人,硕士研究生,主要研究方向:网络多播路由算法。

中节点 v 被称为节点 u 的树中最小接应点。节点到树的最短路径也称为树到节点的最短路径, 节点到树的最短路径的费用称为节点到树的最小距离。

定义 2 Steiner 节点。多播树中除源节点和目的节点以外的节点。路径节点: 节点 u ($u \in V - V_i$) 到生成树的最短路径上, 节点与最小接应点之间的 Steiner 节点称为该节点的路径节点。

定义 3 Δ 是给定的源节点和目的节点间的时延上限, DCST 是一棵根为源节点 s , 包含所有端节点的树 T , 满足:

1) 对 M 中的每个节点 u , 树 T 中从 s 到 u 的唯一路径 $P(s, u)$ 的时延小于 Δ , 即 $D(P) < \Delta$ 。

$$2) \sum_{e \in T} c(e) \text{ 最小, 即 } \sum_{e \in T} c(e) < \sum_{e \in T^*} c(e).$$

2 算法描述与分析

2.1 DCRSTF 的基本思想

本文的算法是以 RSTF 为基础, 因此有必要对该算法进行简单的介绍。RSTF 算法的思想: 设已生成组播树为 T_k , T_k 中的节点集为 V_k , 树外端节点集为 M_k , 从 M_k 中随机选取 κ 个端节点, 组成节点集 B , 计算出从 V_k 到 B 中费用最小的路径, 该路径对应的树中节点为 v , 对应的 B 中的节点为 u 。然后计算 v 到 $M_k - B$ 中费用最小的路径, 该路径对应的 $M_k - B$ 中的节点为 u' , 将两条路径中费用较小的路径加入到组播树中。参数 κ 可根据需要设定, 当 κ 增大时, 组播树的费用随之减少, 算法的运行时间则随之增加。

在该算法中, 将一个端节点 i 加入到多播树 T_k 前, 其搜索范围很大, 搜索时间较长。假设 T_k 中的节点为 V_k , 余下的端节点为 M_k , RSTF 的搜索次数为 $|V_k| + \kappa + |M_k - \kappa|$ 。为减小搜索次数, 改进最短路径的搜索过程, 以较小的存储空间为代价, 获得较高的计算效率。改进后的 RSTF 算法的思想如下:

1) 初始化。令 $k = 1$, 从源节点 s 开始, 将只包含 s 的树作为 T_1 , 此时 $T_k = T_1$, $V_k = V_1 = \{s\}$, 计算 M_k 中所有节点到生成树 T_k 的最小距离和最短路径并存储。

2) 从 M_k 中随机选取 κ 个端节点组成集合 B , 计算出从 V_k 到 B 中代价最小的那条路径, 该路径对应的树中节点为 v , 对应的 B 中的节点为 u 。然后计算 v 到 $M_k - B$ 中费用最小的路径, 该路径对应的 $M_k - B$ 中的节点为 u' , 将两条路径中代价较小的路径上的端节点以及该节点的路径节点加入到组播树中, 从 M_k 中删除加入到多播树中的端节点。

3) 对新加入的节点重复以下过程: 考查 M_k 中所有端节点到新加入节点的距离, 若该距离小于该端节点到生成树 T_k 的距离, 将该距离作为端节点到 T_k 的距离并对存储的最小距离和路径进行修改。

4) 重复第 2 ~ 3 步直到 M_k 为空。

改进后的 RSTF 算法的搜索次数大大减少, 搜索次数为 $\kappa + |M_k - \kappa|$, 但需要增加相应的数组用来记录 M_k 中所有节点到生成树 T_k 的最小距离和路径。DCRSTF 在改进的 RSTF 算法的基础上, 寻找满足时延约束的路径来构建多播树, 基本思想如下:

1) 计算所有端节点到源节点满足时延的最短路径, 将该路径的代价、时延及路径记录在目的节点相应的向量组中, 设网络中所有点到源节点的时延均为零。

2) 从 M_k 中随机选取 κ 个端节点组成集合 B , 从 B 中选出到多播树中代价最小的路径, 该路径对应的树中节点为 v , 对

应的 B 中的节点为 u , 然后选出 v 到 $M_k - B$ 中代价最小的路径, 该路径对应的 $M_k - B$ 中的节点为 u' , 将两条路径中代价较小的路径上的端节点以及该节点的路径节点加入到组播树中, 从 M_k 中删除加入到多播树中的端节点。

3) 对新加入的节点重复以下过程: 修改新加入节点到源节点的时延, 考查所有未添加的端节点到新加入节点的代价 C , 以及由此得到的到源节点的新时延 D , 若 C 小于该端节点到多播树的代价且 D 小于时延限制, 则将 C 作为该端节点到多播树的代价, D 作为该端节点到源节点的时延, 并修改该端节点到多播树的最短路径。

4) 重复第 2 ~ 3 步直到 M_k 为空。

该算法具体描述如下:

定义结构体存储端节点的向量组中的相应的值, 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满足时延的最小代价。 $D(v)$ 表示节点 v 到源节点的时延, $cost1(u, v)$ 表示 u, v 之间的满足时延的最小路径的代价, $cost2(u, v)$ 表示 u, v 之间最小路径的代价, $delay(u, v)$ 表示 u, v 之间的最小路径的时延。 M 代表端节点集, N 代表网络节点集。

```

for (u ∈ M)
    | u.par = s;
    u.dist = cost1(u, v); |
for (v ∈ N)
    | D(v) = 0; |
While (M ≠ ∅)
    | 从 M 中选 κ 个节点组成集合 B;
    for (w ∈ B)
        | 选出 w.dist 最小的点 m; |
        x = m.par;
        for (z ∈ M - B)
            |
            | 选出 cost2(z, x) 的值最小且时延满足约束的点为 y; |
            if (m.dist > cost2(y, x))
                | m = y;
                | 把 x 到 y 的最短路径 P 加入到多播树上; |
            else
                | 把 m.dist 对应的路径 P 加入到多播树上; |
            M = M - m;
            for (u ∈ P 上的节点集)
                | 修改 D(u);
                for (w ∈ M)
                    | if (cost2(u, w) < w.dist && (delay(u, w) + D(u) < Δ))
                        | w.dist = cost2(u, w);
                        w.par = u; ||| |

```

2.2 算法的计算复杂度

假设总节点数为 n , 端节点数为 m 。算法初始化的两个 for 循环时间复杂度为 $O(m + n)$, 在 while 循环中, 第一个 for 循环的次数为 κ , 第二个 for 循环的次数为 $(m - \kappa)$, 根据添加路径上的每个节点对剩余端节点进行修改的循环次数最多为 (mp) (p 为添加路径上节点的最大数目), while 的最大循环次数为 m , 节点和边的加入次数最大不超过 n 。因此该算法的时间复杂度为: $O(m(\kappa + m - \kappa + mp) + m + n + n) = O(m^2(1 + p) + n)$ 。与前面介绍的典型的 DCST 算法相比, 本文提出的 DCRSTF 算法时间复杂度大大降低, 该算法所构造的多播树的代价有着很好的性能, 在后面的仿真实验中给出了详细的分析。

3 仿真与分析

为了产生具有实际网络特征的随机网络图,本文采用文献[6]中的方法生成随机网络模型: n 个节点随机的分布在直角坐标系内(节点的坐标均为整数),节点之间的欧几里得距离作为其费用,节点之间的连通性由连通概率 $P(u,v)$ 决定, $P(u,v)$ 的值由 u,v 之间的距离决定。

$$P(u,v) = \beta e^{-d(u,v)/L\alpha} \quad (1)$$

其中: $d(u,v)$ 是 u 和 v 之间的距离; L 是任意两节点间的最大距离; α 和 β 是调节网络图特征的参数,当 α 增加时,长边相对短边的比增加, β 增加,节点的度也随着增加。本文中的参数: $\alpha = 0.4, \beta = 0.6$,为了讨论方便起见,随机网络图的边的费用取欧几里得距离的十分之一,边的时延与边的费用相等。本文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 算法与提出的 DCRSTF 进行比较。仿真实验中的值是在相同条件下进行 100 次实验的平均值。

图 1 是网络节点为 100,多播树代价随端节点数变化的曲线。从图中可以看出,两种算法都是随着端节点数的增加多播树代价增加,DCRSTF 的性能略优于 KPP。

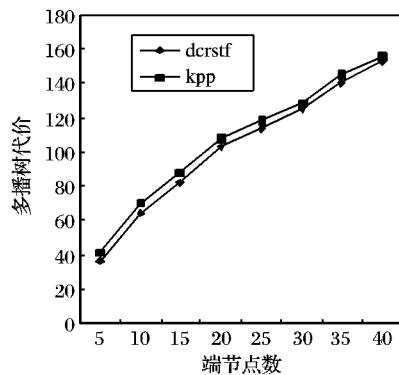


图 1 多播树代价与端节点数的关系

图 2 是目的节点数为 5,多播树代价随网络节点数变化的曲线。因为节点坐标的范围为 $[0, 200]$,随着节点数目的增多,节点间的距离有变小的趋势,因此边的费用和时延都有变小的趋势,故图中曲线有下降趋势,DCRSTF 的性能明显优于 KPP。

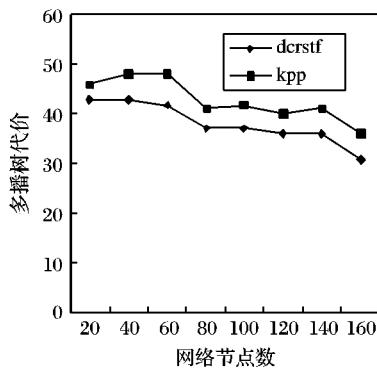


图 2 多播树代价与网络节点数的关系

图 3 是目的节点数为 5,多播树中源点到端节点的最大时延与网络节点数的变化曲线。曲线下降的原因与图 2 曲线下降的原因相同,DCRSTF 的性能优于 KPP。

图 4 是网络节点数为 100,多播树中源点到端节点的最大时延与端节点数的变化曲线。从图中可以看出,DCRSTF 的性能优势不是很明显。

通过仿真实验可看出:该算法与 KPP 算法相比,在费用

和时延方面有很好的性能。

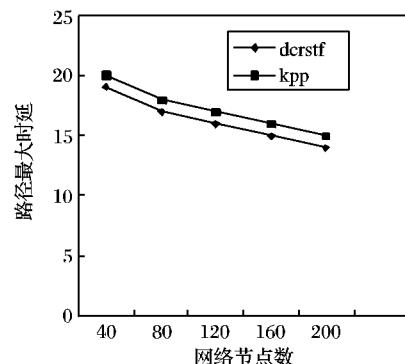


图 3 路径最大时延与网络节点数的关系

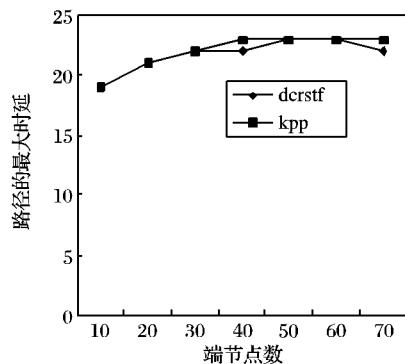


图 4 路径最大时延与端节点数的关系

参考文献:

- [1] SALAMA H F, REEVES D S, VINITIS Y. Evaluation of multicast routing algorithm for real-time communication on high-speed networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1997, 15(3): 332 - 334.
- [2] KOMPELLA V P, PASQUALE J C, POLYZOS G C. Multicast routing for multimedia communication[J]. IEEE Transaction on Networking, 1993, 1(3): 286 - 292.
- [3] PARSA M, ZHU Q, GARCIA-LUNA-ACEVES I J. An iterative algorithm for delay-constrained minimum-cost multicasting[J]. IEEE/ACM Transaction on Networking, 1998, 6(4): 461 - 474.
- [4] SUN Q, LANGENDOERFER H. Efficient multicast routing for delay-sensitive applications [EB/OL]. [2008 - 05 - 05]. <https://eprints.kfupm.edu.sa/36950/1/36950.pdf>.
- [5] 喻建平, 李汉兵, 谢维信. 一种新的广域网组播树生成算法 [J]. 深圳大学学报:理工版, 2001, 18(2): 10 - 18.
- [6] WAXMAN B M. Routing of multipoint connections[J]. IEEE Journal of Selected Areas in Communications, 1988, 6 (9): 1617 - 1622.
- [7] 胡光岷, 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.
- [8] 李汉兵, 喻建平, 谢维信. 局部搜索最小路径费用算法 [J]. 电子学报, 2000, 28(5): 92 - 95.
- [9] 高玲玲, 李伟生. 一种新的时延受限多播路由算法 [J]. 计算机技术与发展, 2006, 16(10): 5 - 7.
- [10] KUN Z, YONG Q, HONG Z. Dynamic multicast routing algorithm for delay variation-bounded Steiner tree problem [J]. Knowledge-Based Systems, 2006, 19(7): 554 - 564.
- [11] WANG LI - PO, LIU WEN , SHI HAI - XIANG . Delay constrained multicast routing using the noisy chaotic neural networks[J]. IEEE Transaction on computer, 2008: 1 - 8
- [12] GANJAM A, ZHANG H, Internet multicast video delivery[J]. Proceedings of IEEE Press, 2005, 93(1) 159 - 170.