

时延约束的链路选择平衡优化组播路由算法

刘维群,李元臣

(洛阳师范学院 信息技术学院,河南 洛阳 471022)

(lryyc@163.com)

摘要:针对时延约束的最小代价组播树生成方法,提出一种快速有效的时延约束组播路由算法。该算法改进了KPP算法,设计了代价和时延动态优化的链路选择函数。在选择路径时,该算法综合考虑了时延和代价两个参数,保证了组播树的性能,降低了时间复杂度。仿真结果表明,该算法能正确地构造出时延约束组播树,同时还具有较低的代价和计算复杂度。

关键词:组播通信;链路选择函数;路由;服务质量;Steiner树

中图分类号: TP393.02 **文献标志码:** A

Delay-constrained multicast routing algorithm based on optimized path selection

LIU Wei-qun, LI Yuan-chen

(College of Information Technology, Luoyang Normal University, Luoyang Henan 471022, China)

Abstract: A fast and effective delay-constrained multicast routing algorithm was put forward according to the generation of delay-constrained multicast tree. Referencing KPP, this algorithm designed a new path selection function which can balance cost and delay. In the mean time, this algorithm guaranteed the performance of multicast tree and has lower complexity while considering the optimization of cost and delay. The simulation results show that this algorithm can not only construct delay-constrained multicast tree correctly, but also has a less cost and a lower computational complexity than KPP.

Key words: multicast communication; path selection function; routing; Quality of Service (QoS); Steiner tree

0 引言

组播(Multicast)通信技术以有效降低网络带宽需求,减轻网络负载为主要特点,在网络业务中应用广泛。组播应用的服务质量(Quality of Service, QoS)要求主要有带宽、时延、时延抖动等,对于采用组播方式的多媒体业务来说,时延和代价是两个必须考虑的指标。因而,作为支持多媒体应用的关键技术之一,时延约束的组播路由问题的研究是组播路由算法研究的重要课题。组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,在通信过程中有许多约束条件,路由时这些约束条件可以转化为构建一棵组播树,即在满足QoS约束条件下,不断选取使目标函数达到最优的链路加入到组播树中,直至所有参与组播的目的节点都进入组播树。从优化网络资源出发,要求组播树具有尽可能小的代价,同时满足较严格的QoS约束。

时延约束的组播路由问题往往形式化为Steiner树问题,它是一个NP完全问题^[1],已经有了一些较成熟的算法。KPP算法^[2]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,时间复杂度为 $O(\Delta|V|^3)$;限界最短组播(Bounded Shortest Multicast Algorithm, BSMA)^[3]用Dijkstra算法求出从源节点到各个目的节点的时延最小路径替换树中代价较高的边,构成组播树,时间复杂度为 $O(k|V|^3\log V)$;受限的Dijkstra启发式(Constrained Dijkstra Heuristic, CDKS)算法^[4]运用Dijkstra最短路径算法计算从源节点到各个目的节点的最小代价路径来构造组播树,时间复杂度为 $O(|V|^2)$ 。

本文详细分析了KPP算法,提出一种满足时延约束的最小代价组播路由算法OKPP(Optimized KPP)。该算法基于最

小代价组播树的生成方法,动态修改节点之间的时延,寻找满足时延约束的最短路径,快速生成满足时延约束的组播树。实验结果表明,OKPP算法性能优于KPP算法,且时间复杂度低。

1 组播路由问题的网络模型

一般地,网络可表示为赋权无向图 $G=(V,E)$ 。其中 V 是网络中节点的集合, E 为网络中通信链路即边的集合。对于 E 中的每一条边 $e=(x,y)(e\in E,x,y\in V)$,定义了代价函数 $C(e):E\rightarrow\mathbf{R}^+$ 和时延函数 $D(e):E\rightarrow\mathbf{R}^+$ 。对于任意节点 $u,v(u,v\in V)$ 间的路径 $P(u,v)$ 上的时延表示为 $Delay(u,v)=\sum_{(x,y)\in P(u,v)} D(x,y)$,代价表示为 $Cost(u,v)=\sum_{(x,y)\in P(u,v)} C(x,y)$ 。事实上,对图 G ,时延约束的Steiner树就是给定源节点 $s\in V$,目标节点集(组播节点) $D\subseteq V-\{s\}$,在图 G 中寻找一棵以 s 为根节点,包含 D 中所有节点的组播树 $T=(V_T,E_T)(T\subseteq G,D\subseteq V_T\subseteq V,E_T\subseteq E)$,使之满足:

$$1) \min \left(\sum_{e \in E_T} C(e) \right);$$

2) $\forall w \in D$, 使 $\sum_{e \in P(s,w)} D(e) \leq \Delta$ (Δ 为正实数,表示时延约束上限)。

2 KPP算法分析

组播路由的代价是用来均衡时延与链路代价之间关系的一种路径选择策略,是组播树建立的基础。KPP算法运用最小生成树算法思想对待路径代价,运用最短路径树算法思想处理路径延迟,希望每次加入到组播树的链路代价最小。基本思想如下。

收稿日期:2010-10-11;修回日期:2010-11-13。 基金项目:河南省科技攻关项目基金资助项目(102102210441;102102210467)。

作者简介:刘维群(1971-),女,河南内乡人,副教授,硕士,主要研究方向:网络管理、嵌入式系统、神经网络; 李元臣(1966-),男,河南新蔡人,副教授,硕士,主要研究方向:网络性能分析、网络管理、嵌入式系统。

步骤1 以 $v'(v' \in s \cup M)$ 为顶点构造完全封闭图 G' 。

步骤2 每次选取代价最小的边加入到图 G' 的生成树 T' 中,各边的选择函数(边的选取规则)为式(1)、(2)之一:

$$f_{cd}(u, v) = \begin{cases} \frac{Cost(u, v)}{\Delta - (p(u) + Delay(u, v))}, & p(u) + Delay(u, v) < \Delta \\ \infty, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

$$f_c(u, v) = \begin{cases} Cost(u, v), & p(u) + Delay(u, v) < \Delta \\ \infty, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

其中: $p(u)$ 是生成树 T' 上从源节点 s 到节点 u 的时延, $Cost(u, v)$ 是图 G' 中链路 (u, v) 的代价, $Delay(u, v)$ 是链路 (u, v) 的时延。

步骤3 把生成树 T' 的边还原成约束的最小代价路径。

步骤4 如果存在环路,则进行消环处理。

如果存在一棵满足时延约束条件的最小组播树,上述算法通过以上两个选择函数必定可以找到此组播树。但由于算法要首先求出一个完全归约图,希望每一个目的节点的路径延迟值最小,即路径剩余时延 $\Delta - (p(u) + Delay(u, v))$ 最大,无法在 $Cost()$ 与 $Delay()$ 之间进行平衡,算法的时间复杂度较高。例如,如果源节点 s 到目的节点 d_i 的最短时延接近时延上限 Δ 时,通常 s 到 d_i 的满足时延要求的路径就较少;反之,如果 s 到 d_i 的最短时延距离 Δ 比较远,则会有比较多的满足时延要求的路径。

因此,最佳路径的选择标准应以网络代价和路径时延两个参数为依据。OKPP 算法综合考虑了时延和代价两个约束条件。

3 链路选择平衡优化组播路由算法

3.1 链路选择函数

针对 KPP 算法路径剩余时延最大化的缺点,文献[5]定义了改进的链路选择函数:

$$Cost(v) = I_D(u, v) Cost(u) + Cost(u, v) \quad (3)$$

I_D 为指示函数,定义为:

$$I_D(u, v) = \begin{cases} \frac{Delay(u)}{Delay(v) + Delay(u)}, & u \in D \\ 1, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

其中:式(3)中 $Cost(v)$ 为源节点 s 到节点 v 的代价, $Cost(u, v)$ 为从节点 u 到节点 v 的代价, $u \in T$;式(4)中函数 $Delay(u)$ 为从源节点 s 到节点 u 的链路时延。链路选择函数表示了当链路时延接近时延上限 Δ 时,组播树的构造效率较高。但由于赋予链路时延大的节点以较高的优先级,将导致源节点到新加入的节点的时延增大,剩余时延小,效率降低。

基于上述分析,链路选择函数不仅要考虑给予目的节点以优先级,同时还要给予低时延路径一定的优先权。因此, $Cost(v)$ 应表示代价较小的路径和剩余时延较大的路径的折中。这样,在选择路径时,由于对低时延路径给予了一定的优先,降低了通过最小时延路径建树的概率,提高了效率。基于上述分析,本文给出如下的链路选择函数:

$$Cost(v) = \begin{cases} \frac{I_D(u) Cost(u)}{(\Delta - (p(u) + Delay(u, v)))^\lambda}, & p(u) + Delay(u, v) < \Delta \\ \infty, & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

其中 $\lambda > 0$ 作为网络代价和路径时延的平衡参数。

指示函数 I_D 定义为:

$$I_D(u) = \begin{cases} \frac{p(u)}{(\Delta + p(u))}, & u \in D \\ 1, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

当 λ 较小时, $Cost(v)$ 较大,偏重于代价的优化;当 λ 较大时, $Cost(v)$ 较小,偏重于延迟的优化。

3.2 OKPP 算法的基本思想

本文提出的 OKPP 算法的基本思想是:在形成组播树 T 时,从源节点 s 开始根据选择函数 $Cost(v)$ 求出最优路径树加入树 T ,直到所有目的节点都并入树 T 中。算法描述如下。

步骤1 $T = \{\}$, $S = \{s\}$, $Cost(s) = 0$ 。调用 Dijkstra 算法计算出源节点 s 到所有目的节点 d_i 的时延最小组播树,若时延大于 Δ ,则不满足条件,算法结束。

步骤2 利用式(5)求出源节点 s 到每个与之连接的节点 v 的 $Cost(v)$ 。

步骤3 将未访问的节点构造 Fibonacci 堆用于输出最小节点。对于所有的 $Cost(v)$,如果 v 为目的节点则选择符合 $\min(Cost(v))$ 的 v 并入树 S ,即 $S = S \cup \{v\}$ 。

步骤4 对于树 S 中与 v 相连接的节点 u ,利用式(5)计算各自到源节点 s 的 $Cost(u)$,选择符合 $\min(Cost(u))$ 的 u 并入树 S ,即 $S = S \cup \{u\}$ 。

步骤5 重复步骤3、步骤4,直到所有的目的节点都已并入树 S 。

步骤6 如果存在环路,则利用文献[6]的消环算法 LBA 进行消环处理,并把树 S 并入树 T 中。

如图1所示的网络,若源节点为 S , A, D, E, G 为目的节点,边上的参数对表示(代价,时延),时延约束 $\Delta = 32$ 。按照 KPP 算法得到的组播树如图2所示(粗线表示),总代价为75。取 $\lambda = 20$,对图1按照 OKPP 算法构造的组播树如图3所示,总代价为65,优于 KPP 算法。

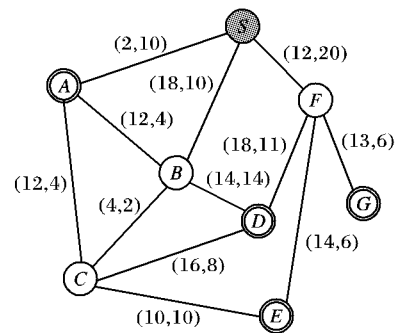


图1 网络拓扑图

4 OKPP 算法分析与仿真实验

4.1 算法性能分析

定理1 只要满足给定时间约束条件的组播树存在,通过 OKPP 算法总能构建符合时延约束条件的组播树。

证明 如果满足给定时间约束条件的多播树存在,那么源节点到各目的节点之间至少存在一条满足时延要求的路径其 $Delay(v) < \Delta$ 。如果该算法找到的满足时延的树 T' 不能覆盖所有目标节点,则要寻找源节点到树 T' 外的目标节点的时延最小路径。根据算法步骤4、步骤5求出的任一时延最小路径肯定满足时延约束条件,因此树 T' 与之合并构成的覆盖所有目的节点的组播树一定满足时延约束。证毕。

定理2 算法的时间复杂度为 $O(n^2)$ 。

证明 设 $n = |V|$ 表示节点个数, $m = |D|$ 为组播节点个数, $m < n$ 。算法中用 Dijkstra 算法计算源节点 s 到所有目的节点 d_i 的时延最小组播树, 时间复杂度为 $O(n^2)$; 从 Fibonacci 堆中输出最小节点的操作, 时间复杂度为 $O(\log n)$; 利用选择函数建树和文献[5]类似, 时间复杂度为 $O(|E| \log n)$; 文献[6]给出了消环算法 LBA 的时间复杂度为 $O(mn)$ 。因此, 算法的时间复杂度为 $O(n^2) + O(\log n) + O(|E| \log n) + O(mn) = O(n^2)$ 。证毕。

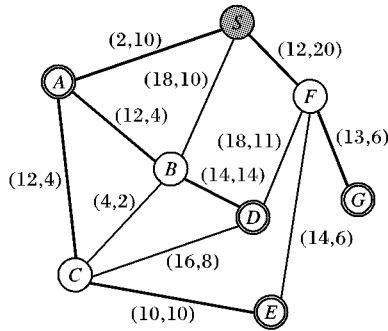


图2 按照 KPP 算法建造的组播树

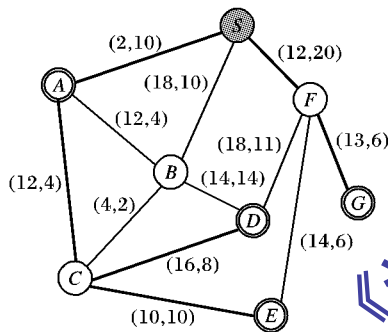


图3 按照 OKPP 算法建造的组播树

4.2 仿真实验

实验采用改进的 Waxman 方法产生随机网络模型^[7-8], 该模型产生的随机图与真实网络比较接近, 广泛用于路由算法的模拟实验。网络节点随机分布在 200×200 笛卡尔坐标系内 (相当于 $2000 \text{ km} \times 2000 \text{ km}$ 的矩形区域), 边存在的概率为:

$$p(u, v) = \beta \exp\left(-\frac{d(u, v)}{\alpha L}\right) \quad (7)$$

其中: $d(u, v)$ 表示节点 u 到 v 的距离; L 是任意两个节点间的最大距离; 参数 α, β 在 0 和 1 间取值, 其值的选取可以控制生成的图的密度特性。链路的代价定义为两个节点的距离, 链路的时延定义为代价乘以一个 $0 \sim 1$ 的随机数。实验中, $\alpha = 0.3, \beta = 0.2, \lambda = 20$, 实验次数为 100, 取其平均值作为测量值。对本文的 OKPP 算法以及 KPP 算法和 BSMA 就组播树的代价进行了实验分析, 结果如图 4, 5 所示。

从图示曲线可以看出, 随着节点的增加, OKPP 算法的总代价优于 KPP 算法和 BSMA。这是因为选取合适的参数 λ 能很好地调节代价和时延的关系, 有效降低组播树的代价。

4.3 算法特点与改进

OKPP 算法在引入新选择函数的同时考虑了链路的代价和时延, 降低了构建组播树的代价。但由于平衡因子 λ 对算法的性能有很大的影响, 如何选取十分重要。主要通过两种方法确定: 一是通过经验确定 λ ; 二是多次运行算法, 从中挑选最优的 λ 。

根据文献[7]提出的共享边的概念, 若能在组播树的构造过程中尽可能选取组播节点间最短路径通过次数较多的链

路, 则算法的效率会更高, 这将是下一步研究的重点。

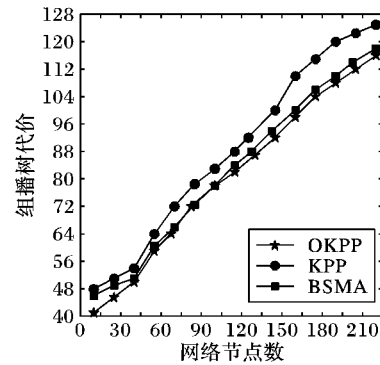


图4 组播树代价随网络节点数变化趋势

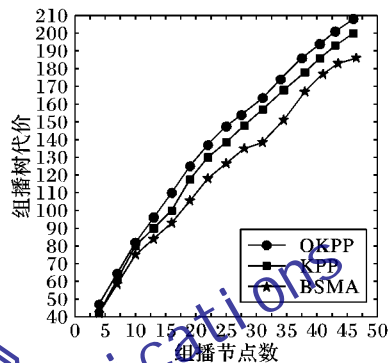


图5 组播树代价随组播节点数的变化

5 结语

本文提出的算法基于 KPP 算法的基本思想, 综合考虑了时延和代价, 给出了平衡代价和时延的链路选择函数, 与基于信源的 KPP 等算法相比, 具有较低的复杂度, 更具实用性。仿真结果表明, 该算法具有良好的网络性能和较优的组播树总代价。

参考文献:

- [1] ROUSHAS G N, BALDINE I. Multicast routing with end-to-end delay and delay variation constraints [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1997, 15(3): 346-356.
- [2] KOMPELLA V P, PASQUAL J C, POLYZOS G C. Multicast routing for multimedia communication [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1993, 1(3): 286-292.
- [3] ZHU QING, PARSA M C, GARCIA-LUNA-ACEVES J J. A source-based algorithm for delay-constrained minimum-cost multicasting [C]// INFOCOM '95: Fourteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies: Bringing Information to People. Washington, DC: IEEE Computer Society, 1995, 1: 377-385.
- [4] SUN QUAN, LANGENDOERFER H. An efficient delay-constrained multicast routing algorithm [J]. Journal of High Speed Networks, 1998, 7(1): 43-55.
- [5] AISSA M, MNAOUER A B. A new delay-constrained algorithm for multicast routing tree construction [J]. International Journal of Communication Systems, 2004, 17(10): 985-1000.
- [6] 王珩, 孙亚民. 一种基于链路优化的时延约束组播路由算法[J]. 南京理工大学学报, 2004, 28(1): 80-84.
- [7] 李元臣, 刘维群. 基于共享边的时延约束组播路由算法[J]. 计算机应用, 2009, 29(11): 1213-1215.
- [8] WAXMAN B W. Routing of multipoint connections [J]. IEEE Journal on Selected Area in Communications, 1988, 6(9): 1617-1622.