

基于网络编码的多播路由算法研究

尹吉星,任平安

(陕西师范大学 计算机科学学院,陕西 西安 710062)

摘要:网络编码的提出在一定程度上提高了多播通信的传输性能。简要总结了网络编码多播传输理论的研究进展,并对网络编码多播路由问题进行了研究。分析了已有算法的优势及不足,同时考虑影响资源消耗的因素,文中提出了一种基于最短路径和最大共享链路集的网络编码多播路由算法。通过在随机网络拓扑模型下的性能仿真实验分析,发现与传统的IP最短路径多播和约简网络下网络编码多播路由算法相比,该算法可显著减少网络带宽资源消耗,同时能够有效均衡链路负载。

关键词:网络编码;多播路由;IP多播;共享链路;资源消耗

中图分类号:TP393

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2014)05-0079-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2014.05.019

Study on Network Coding Based on Multicast Routing Algorithm

YIN Ji-xing, REN Ping-an

(School of Computer Science, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China)

Abstract: The introduction of network coding has improved transmission performance of multicast communication in some extent. The theoretical researches on network coding multicast transmission are briefly summarized, and a research on network coding multicast routing is given. The advantages and disadvantages of the existing algorithms are also analyzed. Besides, considering the factors which influence resources consumption, a new algorithm based on network coding multicast routing of shortest paths and largest share links, is proposed. Performance simulation results show that compared with the traditional IP multicast algorithm and network coding multicast under simplified network, this algorithm can significantly reduce the consumption of network bandwidth resources, and can balance the links load efficiently.

Key words: network coding; multicast routing; IP multicast; share links; resources consumption

0 引言

在2000年,网络编码理论被Ahlswede等人^[1]提出,证明在网络多播通信传输系统中,在中间节点使用网络编码能够达到网络多播的最大流量。Li等人^[2]深入研究了线性网络编码,并且得出运用线性网络编码就可以达到网络最大容量的结论。网络编码还具有减少资源消耗、均衡链路负载、提高网络的鲁棒性等优点。

传统的多播传输,通过构造多播分布树,如Steiner树^[3],来建立路由。由于网络编码能够在中间节点对消息数据进行处理,突破了链路瓶颈,在传输路由方式上,基于网络编码的多播路由与传统的多播路由有很大不同。如何最小化编码节点,节省网络带宽资源,即要求尽可能选择最佳的编码路径族进行编码,是网络

编码路由问题研究的重点。Lun等人^[4]提出了基于网络编码的最小费用多播算法,将传统路由问题转换成线性规划问题。Wang等人^[5]提出了一种约简网络上查找最短路径族的多播路由算法。该算法与之相比降低了计算复杂度,同时在带宽资源消耗上却非常接近。对于路径长度均衡的网络,该算法找到的编码路径族的组合情况具有随机性,无法确定找到的编码路径族之间具有最大的共享链路数目,使得对资源的消耗降到最低。Luo等人^[6]则从链路共享度出发,提出一种基于链路共享度的网络编码多播路由算法,该算法能够确定各编码路径族有最大的共享链路集,但是无法确保每条路径的长度尽可能短。文中结合最短路径和最大共享链路集,提出一种新的网络编码路由,进一步降低链路的带宽资源消耗,选出最佳的编码路径。

收稿日期:2013-07-08

修回日期:2013-10-14

网络出版时间:2014-02-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61070189)

作者简介:尹吉星(1987-),男,硕士研究生,研究方向为网络编码;任平安,副教授,硕士生导师,研究方向为网络编码。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20140211.1450.016.html>

1 网络编码理论

1.1 网络编码基本原理

通过图 1 所示的蝶型网络图来说明网络编码原理。假设链路单位容量, 无时延。根据最大流最小割原理, 信宿节点 X, Y 可以同时接收到信源 S 发出的消息 a 和 b 。由于链路 UZ 只能传输 a 或者 b , 出现传输瓶颈, 使得传统路由难以实现同时在信宿节点接收到 a, b 。而使用网络编码, 节点 U 将收到的消息 a 和 b 进行异或并转发出去, X 接收到 a 和 $a \oplus b$, 通过异或得出 b 。同理, Y 将接收到的 $a \oplus b$ 和 b 异或可以得出 a 。即可达到传输最大流量。

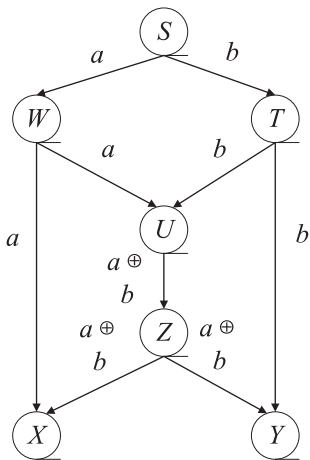


图 1 单信源二信宿的蝶型网络图

1.2 网络编码理论模型

通常用有限的有向无环图 $G = (V, E)$ 表示多播通信网络, 其中 V 表示节点集, E 表示边集。信源节点通常用 S 表示, 信宿节点集用 T 表示。这里 G 为单位容量无时延网络。假设多播传输的最大流为 h , 信源 S 产生的消息向量为 $\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_h)$, 信宿节点 t 的 h 条输入链路分别用 e_1, e_2, \dots, e_h 表示, 则 t 接收到的消息为向量 $\mathbf{Y} = (Y(e_1), Y(e_2), \dots, Y(e_h))^T$, e_i 的全局编码向量 $\mathbf{G}(e_i) = (G(e_i)_1, G(e_i)_2, \dots, G(e_i)_h)^T$, 有

$$\begin{bmatrix} Y(e_1) \\ Y(e_2) \\ \vdots \\ Y(e_h) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G(e_1)_1 & G(e_1)_2 & \cdots & G(e_1)_h \\ G(e_2)_1 & G(e_2)_2 & \cdots & G(e_2)_h \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ G(e_h)_1 & G(e_h)_2 & \cdots & G(e_h)_h \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_h \end{bmatrix} = \mathbf{G}\mathbf{X}^T$$

信宿节点成功译出信源发出的信息的条件是编码系数矩阵满秩, 当矩阵满秩时, 通过 $\mathbf{X} = \mathbf{G}^{-1}\mathbf{Y}$ 可以译出 S 发出的消息向量 \mathbf{X} 。使得矩阵满秩, 则要保证系数矩阵中各编码向量之间线性独立。Ho 等人^[7]的研究证明, 使用随机网络编码, 在一个足够大的有限域

$F_q(2^{16})$ 中选择编码系数, 矩阵满秩的概率接近 1。信宿节点就可以以非常高的概率译出原始信息。

1.3 随机网络编码

Ho 等人^[7]提出的随机网络编码算法是一种分布式的编码算法。算法的思想是: 编码时将所有输入链路的消息线性合并, 采用的编码系数均在一定大小的有限域随机选取。解码时采用高斯消元法^[8], 通过解方程组得到原始消息。随机网络编码实现思路很简洁, 非常容易在实际的网络通信中实现。因此, 在实际的应用中, 随机网络编码的使用更普遍。

2 NCMSPLSL 路由算法

文献[9]提出, 在单位容量无时延网络中, 若信源 S 和信宿 $t \in T$ 的最大流是 h , 则能在 S 和 $t \in T$ 之间建立 h 条边分离路径。与传统的 IP 多播建立路由由树来实现多播通信方式不同, 网络编码多播路由算法就是要为每个信宿节点 $t \in T$ 找到相应的边分离路径族。

为了讨论方便, 文中引入以下概念。

定义 1(边分离路径)^[9]: 如果信源到某个信宿的两条或多条路径之间没有相同的链路, 则称这些路径相互之间为边分离路径。

定义 2(共享链路): 如果某条链路被信源到达多个信宿的路径共同使用, 这样的链路即共享链路。

定义 3(链路共享度)^[6]: 在一个有向无环图 $G(V, E)$ 中, 其中 V 为节点集, E 为边集。 $Ru(i)$ 表示节点 i 的入度, $Cu(i)$ 表示节点 i 的出度。对有向链路 $e = (p, q)$, $e \in E$, 记 $V_i(e) = p$, $V_o(e) = q$, e 的链路共享度: $D(e) = Ru(V_i(e)) + Cu(V_o(e)) - 1$ 。

定义 4(最短路径族网络): 在网络图 $G(V, E)$ 中, 设 S, T 分别为信源, 信宿节点集。通过搜索从 S 到每个非信宿节点的最短路径, 得到的路径集加上图 G 中信宿节点的输入链路构成的网络, 称为最短路径族网络, 记为 G' 。

考虑单位容量无时延网络 $G(V, E)$, 设 S, T 分别为信源, 信宿节点集, 多播容量为 C , 可使用 Ford-Fulkerson 算法^[10] 求出 S 到每个信宿节点的最大流 $\maxflow(S, t_i)$, $C = \min_i \maxflow(S, t_i)$ 。

2.1 算法描述

为了降低网络编码多播传输的资源消耗, 文中在构建编码路径族时优先考虑查找信源 S 到信宿 $t \in T$ 的最短路径, 针对路径族中长度最大的路径集, 考虑其最大共享链路集, 进一步减少编码路径族的长度, 降低网络的链路带宽资源消耗。基于此, 文中提出了一个基于最短路径族和最大链路集共享度的网络编码多播路由算法(NCMSPLSL)。

对一个单位容量无时延的单源多播网络 $G(V,$

E),多播容量为 C ,求信源节点到每个信宿节点的 h 条边分离路径($h \leq C$)。

Step1:输入单源多播网络 $G(V, E)$,信源节点 S ,信宿节点集 T ,边分离路径数目 h ,记录待查找路径长度的数组 L ,记录最大长度的路径数目 n ,将每条链路距离设为 1,计算 E 中各链路的共享度,令 $i=1, k=0$ 。

Step2:在网络 G 中,使用 Dijkstra 最短路算法搜索 S 到每个中间节点的最短路径及长度,得到最短路网络 G' 。

Step3:分别计算 G' 中从源节点 S 到每个信宿节点 $t_i (t_i \in T)$ 的边分离路径的数目 m_i 及它们的最小值 m ,同时计算每条链路的共享度。

Step4:如果 $h \leq m$,转 Step5;否则转 Step6。

Step5:在 G' 中,运用 Dijkstra 算法找出源节点到 t_i 的最短路径 P_{ik} ,同时记录路径的长度 $L[k]$ 。每找到一条路径,在 G' 中删除链路集 P_{ik} ,令 $k=k+1$,继续执行同样操作,直到 $k=h$ 。转 Step7。

Step6:在 G' 中,运用 Dijkstra 算法找出从源节点 S 到 t_i 的最短路径 P_{ik} ,同时记录路径的长度 $L[k]$ 。每找到一条路径,在 G' 中删除链路集 P_{ik} ,令 $k=k+1$,继续执行同样操作,直到 $k=m$ 。在网络图 G 中,删除 G' 中已得到的 m 个链路集,得剩余网络图,在图中,继续执行同样操作,直到 $k=h$ 。

Step7:比较记录的路径长度与 $L[h]$ 相同的个数,记为 n 。比较 h 与 m ,若 $h \leq m$,在图 G' 中恢复这 n 个被删除的链路集,并删除 S 到与 t_i 直接相连的节点中长度不小于 $L[k]$ 的节点,若 $h > m$,则在图 G 中恢复这 n 个被删除的链路集,并删除 S 到与 t_i 直接相连的节点中长度不小于 $L[k]$ 的节点。

Step8:在剩余网络图中, V' 为顶点集。由文献[6]启发依次求出最大链路集共享度 n 条边分离路径。

(1)参数设置:令 $\psi = \Phi, \psi' = V'$,使用 $\text{Suc}(p)$ 表示搜索路径上节点 p 的后继节点, $D(p, q)$ 表示链路 (p, q) 的共享度,统计各链路的共享度。 A_p 表示信源 S 到节点 $p (p \in V')$ 的路径上所有链路共享度之和,初始化 $A_p = 0, A_s$ 为一个足够大的整数 N 。

a. 如果 $\psi = V'$,则 A_{t_p} 为信源 S 到信宿 t_p 的最大链路集共享度之和,通过数组 Suc 记录的数据可以得出最大的共享度路径,转入(2);

b. 从 ψ' 中找到共享度 A_p 最大的节点 p ,把它从 ψ' 中删除,加入 ψ 。在 ψ 中,对所有从 p 出发的有向链路 (p, q) ,若 $A_q < A_p + D(p, q)$,则令 $A_q = A_p + D(p, q)$, $\text{Suc}(p) = q$ 。转入 a。

(2)若链路 (p, q) 存在于信宿 t_p 的边分离路径中,则将其对应的链路从网络拓扑图中删除,更新剩余图的链路共享度。

(3)若找到的路径数少于 n ,则转入(1)继续查找,直到找出 n 条结束。

Step9:若 $i < |T|$,令 $G = G(V, E), i = i + 1$,将已找到的路径各链路长度设为 0,增加不同路径族之间链路的共享性。转 Step4;否则输出 $|T|$ 组路径集 $P (P = \{P_1, P_2, \dots, P_{|T|}\}, P_i = \{P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{ih}\}, 1 \leq i \leq |T|)$ 。

2.2 算法复杂度分析

在网络图 G 中,假定 V 为顶点集, T 为信宿节点集,首先使用 Dijkstra 最短路算法查找信源到各中间节点的最短路径,需要计算 $O(|V|^2)$ 次。查找到所有的信宿节点的 h 条边分离路径最少需要计算 $O((h+1)|T||V|)$ 次,最多需要 $O(2h|T||V|)$ 次,所以整个算法的平均计算复杂度为 $O(|V|^2 + \frac{3h+1}{2}|T||V|)$ 。

3 性能分析

3.1 拓扑模型

使用文献[11]提出的 Waxman 模型来搭建仿真环境。Waxman 模型是一种随机模型,能够生成具有实际网络特性的网络拓扑图: n 个节点随机分布在一个面积为 $n \times n$ 的矩形区域,节点 u 和 v 相连的概率由节点之间的距离决定。概率公式表示为 $P(\{u, v\}) = \beta \exp \frac{-d(u, v)}{L\alpha}$ 。参数说明: $d(u, v)$ 表示节点 u 和 v 之间的距离; L 表示距离最远的两个节点对应的距离; α, β 是在区间上关于网络链路稠密程度的影响因子。

3.2 资源消耗

平均带宽资源消耗用公式 $W = \sum_{(u, v) \in E} w_{uv} / h$ 表示。 w_{uv} 表示链路 (u, v) 上消耗的带宽资源; h 为多播传输速率。仿真参数设定:节点总数为 100,信宿节点数目在 20~90 之间变化,节点的平均度数为 3.5。图 2 表示平均带宽资源与信宿节点数目的关系。

从图中可以看出,相同的网络拓扑环境下,随着信宿节点数目增加,网络平均带宽资源消耗也在不断增大。因为随着信宿节点数的增加,网络中的链路使用率增大,带宽资源的使用量也相应增大。但是基于文中算法的多播路由算法在网络带宽资源消耗上远低于传统的 IP 多播路由算法,并且与约简网络下网络编码多播路由算法相比,在资源消耗上也有明显降低。这是由于传统的 IP 多播路由在建立多播分布树时,到达每个信宿节点的路径只有一条,且随着信宿节点数目的增加,建立多播分布树需要的链路数目也不断增加,所以带宽资源消耗不断增大。而基于网络编码的多播路由传输数据时可以共享链路,所以资源消耗量会降

低。文中算法在约简网络下的网络编码多播路由基础上,结合最大共享链路集来选取最短路径,进一步降低了对带宽资源的消耗,因此得到上面的结论。

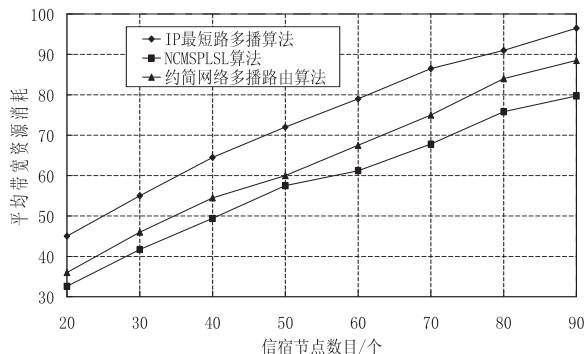


图 2 平均带宽资源消耗与信宿节点数目之间的关系

3.3 负载均衡性

负载均衡性采用文献[12]中提到的以多播路由算法中每一条链路上使用的带宽消耗的方差作为衡量标准。令 W 表示链路上的平均带宽资源消耗, n 为链路总数, w_{uv} 表示链路 (u, v) 上消耗的带宽资源。有 $W = \frac{1}{n} \sum_{(u,v) \in E} w_{uv}$, 方差 $\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{(u,v) \in E} w_{uv}^2 - W^2$ 。使用方差来衡量网络的负载均衡性。对于相同多播速率, 带宽消耗的方差越小, 表明网络中使用的链路越均匀, 负载均衡性越好。

仿真参数设定: 节点总数为 100, 信宿节点数目在 20~90 之间变化, 节点的平均度数为 3.5。图 3 表示网络负载均衡性与信宿节点数目的关系。

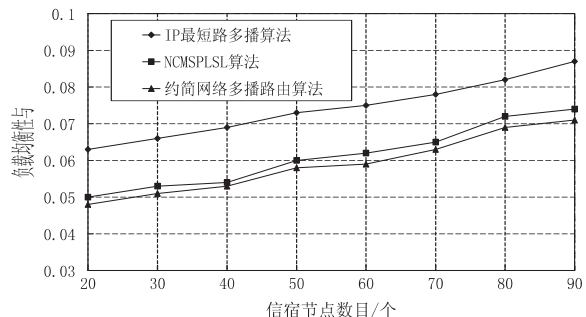


图 3 网络负载均衡性与信宿节点数目的关系

从图中可以看出,随着信宿节点数目增加,网络的负载均衡性均不断降低。因为随着信宿节点数的增加,网络中的链路使用率增大,消耗的带宽资源也相应增大,使得方差的值也跟着增大,从而导致网络负载均衡性降低。但是与传统多播路由算法相比,使用文中算法的网络负载均衡性显著提高,并非常接近约简网络下的网络编码多播路由算法。因为传统的多播路由构建路径分布树时,信源与每个信宿节点之间只使用一条路径传输,这样传输的信息流就集中在部分链路中。而与约简网络下的网络编码多播路由算法相比,文中算法负载均衡性稍微降低一些。根据网络编码多

播路由的原理,在构建信源到每个信宿节点的编码路径族时,可以使用多条路径传输信息,所以网络中传输的信息流分布在多条路径中,使得链路负载较均衡。文中算法在约简网络编码多播路由算法的基础上,考虑路径长度均衡网络中,为了进一步减少资源的消耗,寻找共享链路集最大的路径,使得网络的负载均衡性相对降低。


4 结束语

文中总结了网络编码多播传输理论的研究进展,重点对网络编码多播路由问题进行了研究与分析,并通过网络编码多播的数学模型,考虑降低网络带宽资源消耗的多种因素,提出了一种基于最短路径族和最大共享链路集的网络编码多播路由算法。通过性能分析,证明文中提出的算法与传统 IP 多播以及约简网络下网络编码多播路由算法相比,可显著减少网络带宽资源消耗,同时有效地均衡网络负载。

参考文献:

- [1] Ahlswede R, Cai Ning, Li S Y R, et al. Network information flow[J]. IEEE Trans on Information Theory, 2000, 46(4): 1204-1216.
- [2] Li S Y R, Yeung R W, Cai Ning. Linear network coding[J]. IEEE Trans on Information Theory, 2003, 49(2): 371-381.
- [3] Zosin L, Khuller S. On directed Steiner tree[C]//Proc of 13th annual ACM SIAM symposium on discrete algorithms. [s. l.]: [s. n.], 2002: 59-63.
- [4] Lun D S, Ratnakar N, Medard M, et al. Minimum-cost multicast over coded packet networks[J]. IEEE Trans on Information Theory, 2006, 52(6): 2608-2623.
- [5] 王 静, 刘景美, 王新梅. 基于网络编码的多播路由算法性能分析[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(11): 2605-2608.
- [6] 罗 莉, 覃团发, 罗建中, 等. 基于链路共享度的网络编码多播路由算法[J]. 电讯技术, 2011, 51(3): 79-83.
- [7] Ho T, Leong B, Koetter R, et al. Byzantine modification detection in multicast networks using randomized network coding [C]//Proc of IEEE international symposium on information theory. [s. l.]: [s. n.], 2004.
- [8] Leon S J. 线性代数[M]. 张丽静, 张文博, 译. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [9] Yeung R W, Li S Y R, Cai N, et al. Network coding theory [M]. [s. l.]: Now Publishers Inc, 2006.
- [10] 王朝瑞. 图论[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2010.
- [11] Waxman B M. Routing of multipoint connections[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1988, 6(9): 1617-1622.
- [12] 康巧燕, 孟相如, 王建峰. 网络编码对组播通信的性能改善[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(3): 150-152.

基于网络编码的多播路由算法研究

作者: [尹吉星](#), [任平安](#), [YIN Ji-xing](#), [REN Ping-an](#)
作者单位: [陕西师范大学 计算机科学学院, 陕西 西安, 710062](#)
刊名: [计算机技术与发展](#) 
英文刊名: [Computer Technology and Development](#)
年, 卷(期): 2014(5)

本文链接: http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjfz201405019.aspx