# 基于网络编码的双路径组播树生成算法

曲志坚,纪越峰,柏 琳,王肖玲,邢焕来
(北京邮电大学信息光子学与光通信教育部重点实验室,北京 100876)

**摘 要:** 为了将网络编码技术引入到全光组播网络中,提出了能够在多项式时间完成的基于网络编码的双路径组播树生成算法.该算法主要包括两大步骤:首先,从给定的组播网络中根据节点间度平衡的原则为源节点和每个目的节点之间确定一条有向路径,从而建立一棵传统有向树并保证有向树中任意节点的出度尽可能小,减少节点之间的关联性;其次,在所建立的传统有向树的基础上,从每一个目的节点到源节点根据冲突回溯原则建立源节点和每个目的节点之间的第二条路径,并保证源节点到任意目的节点间的两条路径为分离路径.算法中包含的约束原则能够保证所建立的双路径组播树包含最少的编码节点,从而使得所建立的组播树支持光域网络编码高效率实现,实现基于网络编码的全光组播并提升全光组播的性能.

**关键词:** 网络编码; 全光组播; 分离路径; 组播树
**中图分类号:** TN929; TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 10-2456-04

# An Algorithm of Establishing Network Coding-Based Two-Disjoint Path Multicast Tree

QU Zhi-jian, JI Yue-feng, BAI Lin, WANG Xiao-ling, XING Huan-lai
(*Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communication, Ministry of Education, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing* 100876, *China*)

**Abstract:** To introduce network coding into all-optical multicast networks, a polynomial time algorithm of establishing network coding-based two-disjoint path multicast tree is presented in the paper. There are two major steps in the algorithm: firstly, determining a directed path between the source node and each destination node in the given multicast network according to the degree balance principle of the intermediated nodes. The traditional directed multicast tree is obtained by determining the directed paths between the source node and all destination nodes, and the out-degree of each intermediated nodes are reduced as small as possible. Secondly, confirming the second path between the source node and the destination nodes from each destination node to the source node according to the conflict-backtracking principle and keep the two paths are disjoint paths in the traditional directed multicast tree. The multicast tree which is established by the algorithm contains minimum number of coding nodes, and can well support the all-optical network coding in photonic domain.

**Key words:** network coding; all-optical multicast; disjoint path; multicast tree

## 1 引言

随着通信网络的发展,组播业务的应用越来越广泛.如何提高组播网络的吞吐量、链路利用率、均衡网络负载、优化网络资源,成为当今通信网络研究的重要课题.网络编码[1]具有提高网络吞吐量、均衡网络负载、增加网络带宽的利用率、减少网络资源损耗、提高网络安全性、减少能量消耗等优点,为设计具有更高容量与更加优化的未来网络提供了切实可行的支持.网络编码将原先分立于物理层和网络层的两个核心概念,即编码和路由有机的融为一体,彻底改变了传统的存储转发模式,建立起一种全新的网络体系结构及信息编码和传输模式.

另一方面,光网络正以其高速率、大容量的数据传输能力,智能和灵活的网络管理能力,良好的健壮性和生存性成为未来网络发展的必然趋势.光组播更清楚物理 WDM 层的拓扑结构,能提高带宽使用效率降低传输延时从而能够建立更高效率的组播树,比 IP 组播更直接、效率更高[2].然而,目前缺少随机的光存储设备,全光组播不可避免的会面临数据冲突等问题从而引起光组播数据丢包率的上升,降低光组播性能.

将网络编码技术引入到光组播当中[3]能够结合网络编码和光组播两方面的优势,还可以为光组播网络中遇到的问题提供一种新颖的解决手段[4].基于网络编码的组播可以分为两个部分:建立组播树并确定编码节点;为编码节点分配编码向量.在组播树构建方面,相关研究已经展开了如何在满足网络编码组播的前提下尽量减少组播占用资源方面的研究[5,6],基于网络编码

收稿日期:2009-03-28;修回日期:2010-06-21;
基金项目:国家 973 重点基础研究发展规划(No.2007CB310705);国家自然科学基金 (No.60772024),国家 863 高技术研究发展计划(No.2008AA01A328),高等学校博士学科点专项科研基金(No.200800130001)

的组播树中,编码节点不仅仅要对收到的信息进行转发,还需要对其进行计算完成编码操作,因此要求组播树中编码节点的数量要尽可能少.在为编码节点分配编码向量方面,相关研究主要集中在网络编解码算法以及编码向量的分配策略上[7,8].

目前,受全光器件的限制,在光域上还无法完成复杂的线性编解码运算.如果在编码节点进行光电光变化将增加系统开销,体现不出网络编码和全光网络的优势.因此,如何在全光下实现网络编码是一个值得深入研究的问题.在基于网络编码光组播研究过程中,我们首先提出了采用移位和异或运算实现全光网络编码机制[9],为了将所提出的编码机制应用于全光组播网络中,实现基于网络编码的全光组播,本文提出了一种从有向网络拓扑中生成基于网络编码的双路径组播树的生成算法.

## 2　问题描述

通常建立基于网络编码组播树的方法是在给定的网络中从源节点到目的节点确定两条或者多条分离路径(从源节点到同一个目的节点的所有路径中不包含任何相同的链路).虽然常用的基于启发式算法的网络编码组播树建立方法[3,10]也能够建立双路径组播树,但是这些算法的出发点是致力于降低算法的复杂度,并在给定的组播网络中确定源节点和任意目的节点之间的满足要求的分离路径数目,从而建立基于网络编码的组播树.这些算法的实现过程中并没有考虑如何减少组播树所占用的链路数量,以及降低组播树中编码节点的数量.因此,基于这些算法所建立的组播树包含较多的冗余链路和冗余编码节点.组播树中冗余链路必将导致冗余的编码节点,冗余的编码节点将导致不必要的编码运算.在缺少随机存取器的高速光网络中,冗余的编码运算不可避免的会导致光组播在时延、稳定性和组播成功率等方面的降低.此外,不必要的编码节点还将增加系统实现的硬件成本.若对这些算法进行改进,使其包含对组播树的优化将显著增加算法的搜索次数,导致算法复杂性急剧增大.

在本文中,我们提出了一种全新的算法用于建立基于网络编码的双路径组播树,所建立的组播树只包含必须的编码节点,适合在光网络中实现.在本文接下来的讨论中我们将使用有向无环图 $G=(V,E)$表示组播网络拓扑结构,其中 $V$ 代表所有节点集合, $E$ 代表所有链路集合.在图 $G$ 中所有链路具有单位容量,即每条链路在单位时间间隔内仅能传输单位数据.在单源组播中,源节点为 $s$,用于产生数据,其中 $s\in V$;目的节点用于接收源节点产生的数据,是数据的终点.$t_i$ 代表第 $i$ 个目的节点,其中 $i=1,2,3,\cdots,N$,$N$ 为目的节点的个数.

## 3　基于网络编码双路径组播树生成算法

所提出的基于网络编码双路径组播树生成算法包含两个主要步骤,首先生成一棵传统的有向树,然后在有向树的基础上建立基于网络编码的双路径组播树.

### 3.1　建立传统有向树

首先通过从网络拓扑中建立一棵有向树来为每个目的节点选择一条从源节点到目的节点的路径.所建的有向树是网络拓扑的一个度最小并且节点间出度最平衡的生成树,包含了网络拓扑中所有度为 1 的边.建立有向树是建立组播树的基础,能够通过减少节点出度来减少节点之间的联系从而减少编码节点的数目.建有向树的算法描述如下所示:

(1)选择网络拓扑中所有入度为 1 和出度为 1 的边并将其标记为 $T$.如果某一节点的所有入射边中包含相应父节点出度为 1 的边,则选择这条边并将这一节点的其他入射边删除.重复(1)直到所有的度为 1 的边都被选择.

(2)如果网络拓扑中还存在入度大于 1 的节点,任选一个节点检查所有与此节点直接相连的父节点,并选择一个出射边有最少 $T$ 标志个数的父节点,标志连接此两个节点的链路为 $T$,删除本节点的所有其他入射边.如果与本节点直接相连所有的父节点的出射边含有相同数量的 $T$ 标志,则随机选择一个父节点并将与其相连的链路标为 $T$,删除本节点所有其他入射边.如果所有的节点(除源节点)的入度都为 1,建树成功;否则到(1).

本算法的详细描述如下所示:

```
1.  begin
2.  put all {s_i} into Q_t;/*{s_i}表示所有虚拟源节点,Q_t 表示队列*/
3.  while (Q_t 中元素改变) {
4.   n_x = n_h;// n_h 表示队列的头元素
5.  if (deg+(n_x) == 1) {
6.  将队列头节点的入射边标记为 T;
7.  if (deg-(n_x) = = 1 or deg-(n_x) == 0){
8.  将队列头节点的入射边标志为 T;删除与本条边相连的子节
    点的所有其他入射边;将 n_h 从队列中删除;}
9.  else{将与其相连的并且不在队列中的所有子节点加入到队
    列;将 n_h 加入到队尾;}}
10.  else if (deg-(n_x) == 1 or deg-(n_x) == 0){
11.  将队列头节点的出射边标志为 T;将所有子节点加入到队
     列;将 n_h 加入到队尾;}else
12.  {将所有子节点加入到队列;将 n_h 加入到队尾;}}
13.  if (Q_t == null) break;}
14.   n_x = n_h;
```

15. 任选一个节点选择一个出射边有最少 $T$ 标志个数的父节点;标志连接此两个节点的链路为 $T$;删除本节点的所有其他入射边;
16. if ($\deg^-(n_x)==1$ and $\deg^+(n_x)==1$) { 从队列删除 $n_h$;goto 3;}
17. {将 $n_h$ 加入到队尾;goto 14;}
18. end

### 3.2 建立双路径组播树

在传统有向树的基础上建立基于网络编码的双路径组播树的算法描述如下所示:

(1)从传统有向树中随机选择一个目的节点,并为其恢复一条在建立有向树过程中删除的链路,并选择相应的父节点.

(2)如果父节点的入射边不包含在从源节点到此目的节点的路径中,则确定这两条路径.否则,回到父节点的另外子节点,删除本子节点的入射边,选择其一条不包含在有向树中的入射边及相应父节点(冲突回溯),重复(2).

(3)从目的节点到源节点确定所选择的两条分离路径,并将其标志为 $T$.

(4)如果某一节点的两条入射边都标志为 $T$,则这个节点一定为编码节点;若还有目的节点未被选择,到(1)继续执行.

(5)如果所有的目的节点都被选择了,则建树成功;否则建树失败(最小割为 1).

本算法的详细描述如下所示:

1. begin
2. 将所有目的节点{$t_i$}放入集合 $C_s$;清除所有标志;
3. while ($C_s$! =null){ 随机选择目的节点 $t_i$;$n_x=t_i$;将 TDT 中的从 $s$ 到 $t_i$ 的路径中的所有链路置标志 P;/* TDT 表示已经建立的传统有向树 */
4. *if*($n_x$ 的入射边标志为 $P$){
5. *if*(存在建 TDT 过程中删除的边){
6. 随机选择一条这样的边;$n_x=n_f$;/* $n_f$ 为 $n_x$ 的父节点 */} else{清除所有标志 $P$;将刚刚搭建的从 $s$ 到 $t_i$ 的新路径标志 $P$;*if*(入射边没有 $T$ 标志){删除 TDT 中的边 $n_x->n_c$;$n_x=n_c$;}/* $n_c$ 为 $n_x$ 的子节点 */
7. else 不删除此入射边;} else{
8. 选择这条入射边;$n_x=n_f$;9. *if* ($n_x==s$){
10. 将得到的两条分离路径标志 $T$;删除 $P$;从集合中删除 $t_i$;若某节点的两条入射边都标志为 $T$,此节点为编码节点;}}}
11. end

至此,基于网络编码的双路径组播树已经建立.在建树的过程中,我们采用的方法不同于传统方法直接在给定的组播网络中为源节点和目的节点确定两条分离路径,而是根据节点出度平衡的原则首先为源节点到所有目的节点建立一条路径,并且保证每个中间节点的出度尽可能最小.以确定的第一条路径为基础,从每个目的节点到源节点根据冲突回溯的原则,为每个目的节点确定两条分离路径,从而完成基于网络编码的双路径组播树的建立.该算法的主要优点是能够建立包含最少编码节点数目的组播树,主要是通过减少节点出度,以及回溯是避免冲突链路实现的.次外,算法可以在多项式时间内完成.建立传统有向树时,每一个节点最多比较 $k$ 次,其中 $k$ 为网络拓扑中的链路数量,所以 $n$ 个节点最多比较 $nk$ 次,并且比较最多会重复 $ln$ 次,其中 $l$ 为常数,因此建立传统有向树的时间复杂度最差为 $O(lkn^2)$;建立基于网络编码双路径组播树时的算法复杂度大约为 $O(lk^2n^2)$.

## 4 仿真结果分析

图 3 是我们对几个典型网络进行了仿真分析,网络中最上面的节点代表源节点,最下面的节点代表目的节点,中间带圈的为编码节点.仿真中我们用 CJHJ 编写的仿真程序,程序运行的环境是 P4 CPU 1.7GHz ,512M 内存的计算机.

图 3 中,a1,b1,c1 为原始组播网络,a2,b2,c2 为运行算法时建立的传统有向树,a3,b3,c3 为运行算法时建立的双路径组播树,从仿真结果中可以看出算法能够很好的完成建树操作.

值得注意的是,运行算法所得到的最终的双路径组播树形式并不是唯一的,其不同点仅仅是编码节点在组播树中的位置不同.主要原因是在传统有向树基础上建立双路径组播树时选择目的节点的顺序不同,造成编码节点在组播树中的位置不同.但是,在给定的

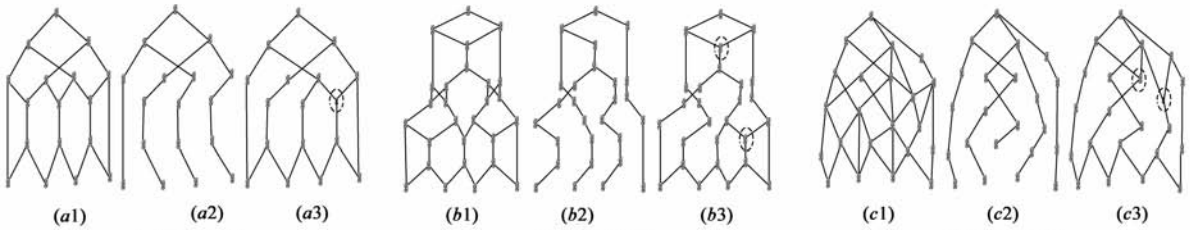



图3 基于网络编码双路径组播建树仿真结果

同一网络下生成的不同组播树之间的编码节点数量是相同的,此外,所有可能生成的不同组播树间的组播性能并不受所建立组播树中编码节点位置影响.

我们还对基于网络编码的光组播和传统组播的吞吐量和文件传输时间等组播性能进行了仿真分析比较,仿真结果如图 4 所示.

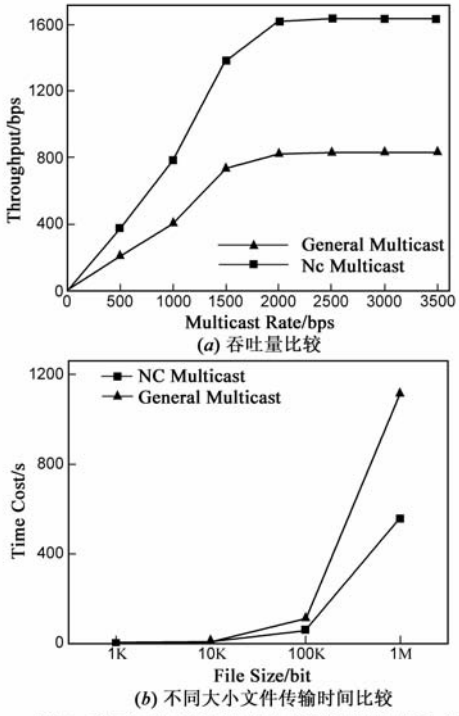



**图4　基于网络编码组播与传统组播性能比较**

图 4(*a*)比较了基于网络编码组播和传统组播之间的平均吞吐量.从仿真结果来看,当吞吐量稳定时,基于网络编码双路径组播的吞吐量大约为传统组播的两倍.图 4(*b*)比较了两种不同组播模式在相同组播速率条件下传输相同大小的文件所花费的时间.从仿真结果中可以看出,随着文件的增大基于网络编码的组播方式传输文件所花费的时间明显小于传统组播方式.基于网络编码组播传输文件花费大约为传统组播传输相同大小的文件所花费时间的一半,但是多于一半,多出的时间主要花费在编码运算上.

## 5　结论

本文提出了一种能够在多项式时间内完成的用于建立基于网络编码的双路径组播树建树算法.该算法的主要优点是在建树过程中能够通过减少中间节点的出度来减少中间节点之间的关联,并在建树过程中采用冲突回溯原则,减少冲突链路数量从而使得所建立得组播树中包含最少的编码节点数量.这些特征能够保证所建立的组播树在缺少随机存储设备的高速光网络中高效率的实现网络编码技术,从而为将网络编码技术引入到光组播网络中提供必要的前提条件和基础.

**参考文献:**

[1] R Ahlswede, N Cai, S -Y R Li, et al. Network information flow [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46(4): 1024 – 1016.

[2] X Liu, H Wang, L Bai, et al. Performance analyses of serial-mode multicasting scheme in optical packet switched networks [J]. Photonic Network Communications, 2009, 17(3): 202 – 208.

[3] Manley Eric D, Deogun Jitender S, Xu Lisong. Network coding for optical-layer multicast[A]. In BROADNETS 2008[C]. London, UK, 2008. 452 – 459.

[4] Minkyu Kim, Muriel Médard, Una-May O'Reilly. Network coding and its implications on optical networking[A]. In OFC 2009 [C]. San Diego, California, USA, March 22, 2009. OThO3.

[5] S Bhadra, S Shakkottai, P Gupta. Min-cost selfish multicast with network coding[J]. IEEE Transaction on Information Theory, 2006, 52(11): 5077 – 5087.

[6] X Huanlai, J Yuefeng, Bai Lin, et al. An adaptive-evolution-based quantum genetic algorithm for QoS multicast routing problem[J]. Chinese Journal of Electronics, 2009, 18(3): 525 – 529.　(下转 2464 页)

**作者简介:**



**曲志坚**　男,1980 年 11 月生于山东省青岛市,北京邮电大学信息光子学与光通信教育部重点实验室博士研究生.研究方向为全光组播与网络编码技术.
E-mail: zhijianqu@gmail.com



**纪越峰**　男,1960 年 10 月生,教授,北京邮电大学博士生导师.研究方向为宽带通信网、光通信.
E-mail: jyf@bupt.edu.cn



**柏　琳**　女,1965 年 7 月生,北京邮电大学教授,硕士生导师.研究方向为宽带通信网.
E-mail: bailin@bupt.edu.cn