

无线 Mesh 网中网络编码节点选取分析

沈小建^{1,2} 陈志刚¹ 叶 晖¹ 夏卓群¹

(中南大学信息科学与工程学院 长沙 410083)¹ (湖南工业大学计算机与通信学院 株洲 412008)²

摘 要 无线 Mesh 网可以使用网络编码技术显著提高多跳链路的传输性能。但网络编码是有代价的,如何选择编码节点以减少网络编码的代价是研究的重点。对无线 Mesh 网中的网络编码节点的选取进行了讨论,提出了一种基于超关键节点的网络编码节点选取算法。该算法是在 Ford-Fulkerson 标号算法找增广链的时候,统计路径上的每个节点的入度,并在节点上保存从不同输入链路获得的信息,从而确定哪些是超关键节点,这些超关键节点将是编码节点。仿真实验表明,在实现组播最大流的前提下,该算法能有效减少网络编码的节点数。

关键词 无线 Mesh 网,网络编码,超关键节点,组播

中图法分类号 TP393 文献标识码 A

Analysis of Network Coding Nodes Selection in Wireless Mesh Networks

SHEN Xiao-jian^{1,2} CHEN Zhi-gang¹ YE Hui¹ XIA Zhuo-qun¹

(College of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)¹

(School of Computer and Communication, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412008, China)²

Abstract Wireless mesh networks can significantly improve the transmission performance of multi-hop links by using network coding techniques. However, there is the cost of network coding, how to choose encoding nodes in order to reduce the cost of network coding is the focus of study. This paper discussed network coding nodes selection in wireless mesh networks, proposed a algorithm of network coding node selection based on super-key nodes. When Ford-Fulkerson labeling algorithm finds augmented chain, the algorithm statistics in-degree of each node on path and saves the obtained information from different link in node, then confirms which nodes are super-key nodes. These super-key nodes are encoding nodes. Simulation results show that the proposed algorithm reduces the number of encoding nodes obviously while achieving the multicast maximum flow.

Keywords Wireless mesh networks, Network coding, Super-key nodes, Multicast

1 引言

网络编码就是网络中的节点将接收到的信息进行编码后再转发出去的组播技术^[1],它是通信领域上的最新研究成果。在传统的网络中,作为中继的节点只能对接收到的信号进行复制、放大和转发,这对于网络资源有时候是一种浪费。网络编码技术打破了这种限制,它允许中继节点对接收到的信息进行编码,并将接收到的多个数据包按照某种特定算法重新组合再发送出去。

无线 Mesh 网的物理层广播特性和业务流的双向性非常适合使用网络编码。网络编码会对无线 Mesh 网通信的性能产生影响^[2]:(1)提高网络吞吐量,采用网络编码能获得网络组播的最大流限,特别是在带宽受限的无线 Mesh 网中,网络编码对于增大数据流可以达到理论上限。(2)增强网络健壮性,在实际应用中,无线 Mesh 网节点和链路有时会失效,从

而影响网络的鲁棒性。传统的网络链接恢复方法是重新路由。但是,采用网络编码可以降低节点或链路失效对其他节点完整获取数据的影响,从而有效地提高系统的健壮性。

网络编码节点的选取实质就是网络编码代价方面的研究。文献[3,4]对无线网络中的编码代价问题进行了研究,这些研究有重要的借鉴价值。文献[5,6]运用线性规划理论对网络编码的代价进行了分析与建模,提出了最小代价网络编码的理论模型。与传统的路由机制相比,网络编码操作需要消耗额外的计算资源,增加了成本和代价,因此如何减少网络编码的代价是非常值得研究的。减少网络编码的节点数是降低网络编码代价的有效方式。文献[7,8]中对如何确定一个节点是否进行网络编码进行了研究,文献[7]中提到“包含多个输入链路的关键节点才需执行网络编码操作”,但拥有多条输入链路只是进行编码的必要条件而不是充分条件,如图 1 所示。

到稿日期:2009-11-20 返修日期:2010-01-29 本文受国家自然科学基金项目(90602044),总参预研基金(9140A15030308QT4801)资助。

沈小建(1976—),男,博士生,讲师,CCF 学生会员,主要研究方向为无线 Mesh 网络与网络编码,E-mail: shenxiaojian76@yahoo.com.cn;陈志刚(1964—),男,博士,教授,博士生导师,CCF 理事,主要研究方向为网络计算与分布式处理、计算机网络;叶 晖(1979—),男,博士生,讲师,主要研究方向为移动 P2P 网络;夏卓群(1977—),男,博士生,讲师,主要研究方向为无线 Mesh 网络与网络编码。

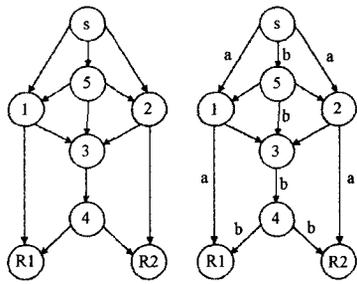


图1 不需要进行网络编码的多输入链路节点示例

图1所示的网络中,节点1,2,3虽然有多条输入链路,但是如图3(b)所示的传输方法,节点1,2,3不必采用网络编码进行数据发送同样可以使两个接收者同时收到a和b。

既然要达到最大组播速率,网络编码并不是所有节点都必须引入的。那么通过恰当的选择进行网络编码的节点,可以在保证网络组播速率的前提下,尽可能地降低与网络编码有关的开销。基于此,本文提出了一种基于超关键节点的网络编码节点选取算法,该算法能有效减少传输路径上所需编码节点的数量。

本文第2节简要介绍了无线 Mesh 网和网络编码等相关知识;第3节提出了一种基于超关键节点的网络编码节点选取算法;第4节对提出的方法进行实验仿真;最后总结全文。

2 相关知识

2.1 无线 Mesh 网

无线 Mesh 网(Wireless Mesh Networks)作为一种低耗费、高效率的“最后一公里”无线接入系统,正成为学术界和工业界的前沿热点研究领域。无线 Mesh 网是一种新型的宽带无线网络结构,即一种高容量、高速率的分布式无线网络。无线 Mesh 网有多种结构,图2是一种基于802.11标准的典型结构。该网络结构分为三层,最低一层为 Mesh 终端 C 组成的“终端用户层”,终端设备包括手机、笔记本电脑、PDA 等设备,构成标准 802.11 接入网;“终端用户层”之上是“无线 Mesh 层”,由 Mesh 网关 G 和 Mesh 路由器 R 构成,终端用户可以通过该层接入核心网络,终端用户之间也可以通过该层进行数据交互;无线 Mesh 网的第三层为“核心网络层”,主要提供各种网络互连服务^[9]。

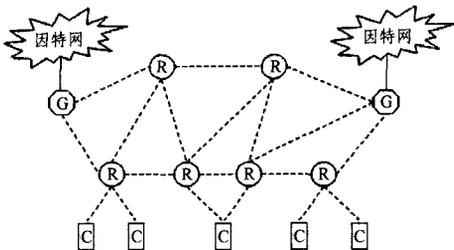


图2 无线 Mesh 网典型结构

无线 Mesh 网与传统无线网络相比有一些优点:(1)可靠性大大增强;(2)具有冲突保护机制;(3)简化链路设计;(4)网络的覆盖范围增大;(5)组网灵活,维护方便;(6)投资成本低,风险小。

2.2 网络编码

网络编码是进入 21 世纪后通信领域的一项重大突破,它

是 Ahlswede 等人于 2000 年提出来的^[1],他们提出在路由器中混合不同信息来提高多播的容量。图3所示为一无线通信领域 3 节点拓扑的实例:节点 A 和 B 通过节点 R 相互传递信息 a, b, 节点 A 和 B 不能直接传递信息。图3中的箭头表示有向链路,假设每条链路的容量为 1。图3(a)采用传统的通信方式, A 首先向 R 发送信息 a, 再 B 向 R 发送信息 b, R 再依次把信息 a 和 b 分别广播给节点 A 和 B。这样经过 4 条链路的传输节点 B 可以获得信息 a, 而节点 A 可以获得信息 b。如果应用网络编码技术,在节点 R 处将 a 和 b 作模 2 和运算后直接转发出去,则在节点 B 处,根据接收到的信息可恢复出 a 来;同理,在节点 A 处也可以恢复出信息 b 来。采用了网络编码技术后(见图 3(b)),只需要使用 3 条链路就可以实现传统方式的所有通信要求。从实例可以看出,网络编码技术可以显著地提高多点传送的数据率。

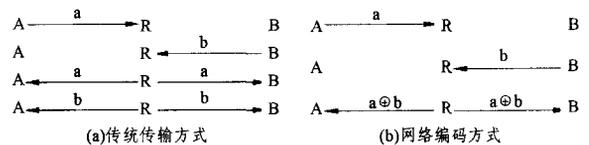


图3 无限传统传输方式与网络编码方式比较
(a, b 为信息, A, B, R 为节点)

国际上不少的研究者对网络编码进行了探讨。Katti 等人提出了基于机会的网络编码方法 COPE 算法^[10],该算法采用网络编码中最简单和常用的异或线性编码(XOR),即输入 K 个数据包 (x_1, x_2, \dots, x_K) ,使用方法 $y = x_1 \oplus x_2 \oplus \dots \oplus x_K$ 计算得到一个混合包。首次研究了网络编码在无线 Mesh 网环境中协议层面上的具体实现问题,并在 20 个节点的网络测试床上完成了协议的实现。在 COPE 协议中,每个节点对传输媒体进行侦听,获得它的邻居节点的状态信息,决定进行编码的机会,并在本地的 FIFO 缓存结构内进行编码,然后进行基于机会的路由。文献[11]实现了一种分布式随机线性编码,该方法适应于多播网络中有多个源节点进行数据传播和压缩。文献[12]对无线多跳网络中信号不衰减的情况下是否使用网络编码的性能进行了对比。文献[13]把重叠编码和线性编码结合起来,在无线网络实现混合数据包的传播,该方法可以较大地提高网络的性能,但是重叠编码不容易实现。

3 网络编码的节点选取方案

3.1 WMN 体系结构

WMN 中的节点共有 3 种实体,如图 2 所示,即 Mesh 网关 G、Mesh 路由器 R、Mesh 终端 C。本文讨论在由 Mesh 网关 G 和 Mesh 路由器 R 组成的无线 Mesh 层中如何选取网络编码节点。

3.2 超关键节点法

Ford-Fulkerson 标号算法是一个典型的寻找网络最大流的方法^[14]。算法的思想是对 f (初始时,取 f 为零流)寻找增广链,若存在,则通过调整路上的值使 f 增大而得到一个新流,再对新流重复此过程,直到不存在增广链。在寻找增广链的过程中,对路径上的节点统计其入度,并在节点上保存从不同输入链路获得的信息。

确定超关键节点原则如下:具有两个以上的输入链路(除

从 Mesh 终端 C 来的输入链路外),且从不同输入链路的输入信息至少有两个不同。只需在超关键节点上进行网络编码,超关键节点的数量越少,所需的编码节点数也就越少,网络编码的总代价就越小。基于这种思想,得到了超关键节点的网络编码算法。具体的算法步骤如下:

步骤 1 初始化网络 $D=(V,A)$ 。将链路容量设为 1,即 $c_{xy}=1$,各链路的初始可行流为 0,即 $f_{xy}=0$ 。 λ_y 为节点 y 的入度,初始设定 $\lambda_y=0$ 。 I_{xy} 为从链路 xy 输入 y 的信息, $I_y^m(m=1,2,\dots,\lambda_y)$ 为 y 从所有输入链路获得的信息。将 $t_i \in T$ 定义为第 i 个信宿,初始设定 $i=1$ 。

步骤 2 若 $i < |T|$,寻找信源 S 至信宿 $t_i \in T$ 的增广链。

(1)若存在增广链 P 属于 $E \setminus \{e=xy \text{ 且 } x \text{ 不是 Mesh 终端 } C\}$,则 $\lambda_y = \lambda_y + 1, I_y^m = I_{xy}$,转步骤 3。

(2)若不存在增广链, $i=i+1$,重复步骤 2。

步骤 3 对 f 增广。令 $y=t_i$ 。若 y 的标号为 (x^+, δ_y) ,则 $f_{xy} = f_{xy} + \delta_y$;若 y 的标号为 (x^-, δ_y) ,则 $f_{xy} = f_{xy} - \delta_y$ 。

步骤 4 若 $i=|T|$,则算法停止;否则 $i=i+1$,转步骤 2。

执行上述算法后,就在每个信源和接收节点之间建立了一个路径簇。在寻找出的路径的节点上,如果 $\lambda_y \geq 2$ 且 $I_y^1, I_y^2, \dots, I_y^{\lambda_y}$ 中至少有两个不相同,则 y 节点为超关键节点,执行相应网络编码算法(如随机网络编码算法)。

该算法是在 Ford-Fulkerson 标号算法基础上进行的,因此该算法的复杂度与 Ford-Fulkerson 标号算法的复杂度是一致的。设容量网络 D 的顶点数为 n ,弧数为 m ,且 D 中所有弧容量均为整数, c_{\max} 为弧容量的最大值。 D 中截得弧数最多为 $n-1$,故这个截得容量不超过 nc_{\max} ,所以 D 中最大流的流值不超过 nc_{\max} 。由于每次增广至少使流值增加 1,因此增广的次数最多为 nc_{\max} 。而寻找一条增广链并沿增广链进行增广的计算量为 $O(m)$ 。于是该算法的复杂度为 $O(mnc_{\max})$ 。

4 仿真实验与分析

本文使用 NS2 自带的拓扑产生工具 setdest 产生具有实际网络特性的无线 Mesh 网络拓扑^[15,16]。 m 个节点随机分布在一个面积为 $m \times m$ 矩形区域内,节点 x 和 y 相连的概率取决于节点之间的距离,此概率为 $P(\{x,y\}) = \beta \times \exp(-d(x,y)/(L^\alpha))$,其中: $d(x,y)$ 表示节点 x 和 y 之间的距离, L 表示 m 个节点中的最大距离; α 和 β 是 $[0,1]$ 上的随机因子,用于调节网络链路的稠密程度。实验在使用 Linux 系统的微机上,使用 NS2 仿真工具分 3 组进行,分别仿真路由组播(Multicast without NC);传统的网络编码组播(Traditional NC);超关键节点的网络编码组播(Super-key nodes NC),即只对超关键节点进行网络编码。在随机拓扑条件下,分别对节点数为 20,40,60,80,100,120,140,160 的网络进行了网络编码节点数和网络吞吐量的统计。

图 4 表示网络编码的节点数与网络编码规模的关系。可以看出,网络编码的节点数随着网络规模增大而增加,但是对于传统的网络编码组播,其编码节点数曲线比较陡峭,而基于超关键节点的网络编码的节点数增加比较平缓。这是因为:随着网络规模增大,可用链路也随之增多,这样形成超关键节

点的可能性在降低。

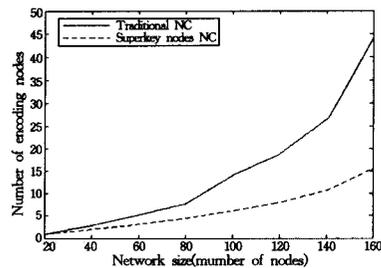


图 4 网络编码的节点数与网络规模的关系

图 5 表示网络吞吐量与网络规模的关系。从图 5 可以看出,基于超关键节点的网络编码能够取得与传统网络编码同样的网络吞吐量,均能显著提高网络的吞吐量,并实现组播理论容量,其原因是实现组播理论容量并提高网络吞吐量是基于超关键节点的网络编码算法的前提。

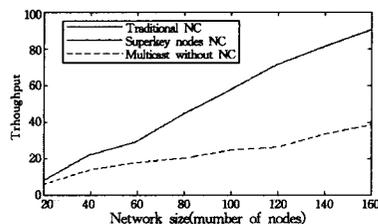


图 5 网络吞吐量与网络规模的关系

结束语 本文提出了一种基于超关键节点的网络编码节点选取算法。该算法是在 Ford-Fulkerson 标号算法找增广链的时候,统计路径上的每个节点的入度,并在节点上保存从不同输入链路获得的信息,从而确定哪些是超关键节点。网络编码操作只需在超关键节点上执行即可。仿真实验表明,该算法能够在实现组播理论容量的前提下,显著减少网络编码的节点数。

参考文献

- [1] Ahlswede R, N Cai, Li S R, et al. Network information flow [J]. IEEE Transactions Information Theory, 2000, 46(4): 1204-1216
- [2] Hamra A A, Barakat C, Turletti T. Network coding for wireless mesh networks; a case study[C]// IEEE WoWMoM 2006. IEEE Communication Society, 2006: 173-182
- [3] Yunnan W, Kung S Y. Reduced-complexity network coding for multicasting over ad hoc networks[C]// IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Philadelphia; IEEE Communication Society, 2005: 501-505
- [4] Zhang J Y, Fan P Y. On network coding in wireless ad-hoc networks[C]// The 2nd International Conference on Mobile Technology, Applications and Systems. Washington; ACM Press, 2005: 1498-1506
- [5] Bhattad K, Ratnakar N, Koetter R, et al. Minimal network coding for multicast[C]// IEEE International Symposium on Information Theory. Melbourne Australia; IEEE Communication Society, 2005: 1730-1734

(下转第 91 页)

基于本文 CUEP 码纠错后的音频波形图,可见采用 CUEP 码的失真较小,听觉效果也有所改善。图 3(d)为各种噪声下分别采用 UEP 和 EEP 纠错后音频信号的 SNR 曲线,其中信道错误概率为 0.03% 到 1%,可以清晰地看出音频传输采用 UEP 纠错比采用 EEP 纠错的 SNR 值提高了 2dB 到 5dB。

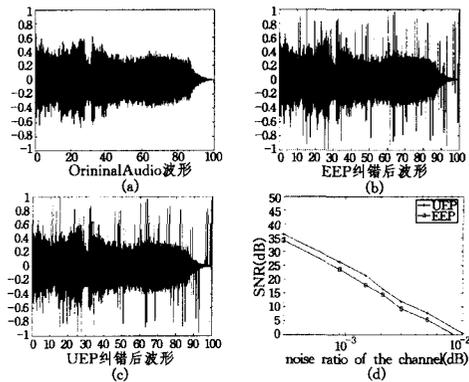


图 3 对 ringin.wav 的仿真结果

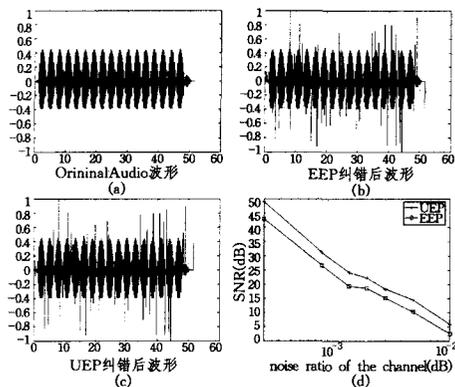


图 4 对 ringout.wav 的仿真结果

从仿真结果可以看出,UEP 解码恢复的波形更接近原始声音,PSNR 值明显比 EEP 解码出来的要高。本文为了说明问题只采用了(15,13)CUEP 码,实际操作时可以采用其他循环码,以获得更多的不等保护能力。

结束语 利用 CUEP 码对音频信息传输进行非均匀误码保护,保证高位信息的有效传输,提高了音频传输的可靠性和效率,将音频信号的 SNR 值提高了 2dB 到 5dB 左右,算法简单,纠错效果明显,抛弃了在编解码时需经行复杂的频域变换,而只需在空域对码字的不同比特位进行非均匀误码保护。将此算法应用到音频的编码器和解码器的设计中,可以精简编解码器的结构和算法复杂度,提高特别是低噪声信道下的音频传输可靠性,具有良好的应用前景。

参考文献

(上接第 73 页)

[6] Lun D, Medard M, Ho T, et al. Network coding with a cost criterion[C]// International Symposium on Information Theory and its Applications (ISITA). Parma, Italy: IEEE Communication Society, 2004: 342-348

[7] 陶少国, 黄佳庆, 杨宗凯, 等. 基于最大流的网络编码组播路由算法[J]. 计算机科学, 2008, 35(6)

[8] Youail R S, Cheng Wen-qing, Tao Shao-guo. Cost minimization for multi-source multi-sink network coding[C]// The 9th International Conference for Young Computer Scientists. IEEE Communication Society, 2008: 253-258

[9] 方旭明. 下一代无线因特网技术: 无线 Mesh 网络[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2006

[10] Katti S, Rahul H, Hu W, et al. XORs in the air: Practical wireless network coding[C]// Proc. of SIGCOMM '06. Pisa, Italy,

[1] Gan Tong, Ma Kai-kuang. Weighted unequal error protection for transmitting scalable object-oriented images over packet-erasure networks[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2005, 14(2): 189-199

[2] Rahnvard N, Fekri F. Unequal error protection using low-density parity-check codes Communications[C]// International Zurich Seminar on. 2006: 142-145

[3] 毛倩, 曾小清, 张树京. 一种适用于二进制循环不等保护码的译码算法[J]. 计算机应用

[4] Van Gils W J. Two topics on linear unequal error protection codes: bounds on their length and cyclic code classes[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1983, IT-29(6): 866-876

[5] Lan C, Narayanan K R, Xiong Zixiang. Source-optimized irregular repeat accumulate codes with inherent unequal error protection capabilities and their application to image transmission[C]// Conference Record of the Thirty-Seventh Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Volume 2, Nov. 2003: 1505-1509

[6] Lin Shu, Costello D J Jr. Error Control Coding[M]. Beijing, China: Machine Press

[7] Beaton R J, High L, Narayanan C, et al. Audioencoding within 128 kbit/s[C]// Proceeding of Conference IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing. June 1989: 388-391

Sep. 2006

[11] Ho T, Koetter R, Medard M, et al. A random linear network coding approach to multicast[J]. IEEE Trans. on IT, 2006, 52(10): 4413-4430

[12] Jin J, Ho T, Viswanathan H. Comparison of network coding and non-network coding schemes for multi-hop wireless networks[C]// Proc. of ISIT. Seattle, WA, July 2006

[13] Alimi R, Li (Erran) Li, Ramjee R, et al. iPack: in-Network Packet Mixing for High Throughput Wireless Mesh Networks[C]// Proc. of IEEE INFOCOM '08. Anchorage, AK, March 2008

[14] 张先迪, 李正良. 图论及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005

[15] 于斌, 孙斌, 温暖, 等. NS2 与网络模拟[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2007

[16] NS2[EB/OL]. <http://www.isi.edu/nsnam/ns>, updated, 2007