

基于网络编码的对等网络互惠资源共享方法

韦丽霜^{1,2}, 宋 伟¹

(1. 武汉大学计算机学院, 武汉 430072; 2. 柳州师范高等专科学校数学与计算机科学系, 广西 柳州 545004)

摘 要: 传统网络消息传播基于存储转发路由机制, 网络节点对于网络消息不进行任何处理, 网络编码理论允许节点对传播的信息进行编码处理。基于此, 利用网络编码数据包能携带更多网络信息的特点, 提出一种对等网络环境下的互惠资源共享方法, 保证对等网络资源共享的高可靠性和鲁棒性, 并通过仿真实验加以实现。仿真实验结果表明, 网络编码互惠资源共享方法能够提高对等网络资源共享服务的整体下载效率。

关键词: 对等网络; 网络编码; 资源共享; 线性编码; 编码向量

P2P Network Reciprocal Resource Sharing Method Based on Network Coding

WEI Li-shuang^{1,2}, SONG Wei¹

(1. Computer School, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Mathematics and Computer Science Department, Liuzhou Teachers College, Liuzhou 545004, China)

【Abstract】 Current network message transmission is based on store and forward mechanism. The network node does not process any messages. Network coding theory allows nodes coding and transmitting messages. This paper uses character of network coding package carrying more information to design reciprocal P2P network resource sharing method, which achieves reliability and robustness of P2P resource sharing. Through simulation experiment to evaluate the performance of P2P resource sharing system. Simulation experimental results show that network coding reciprocal resource sharing method makes P2P resource sharing application scalable and efficient.

【Key words】 Peer-to-Peer(P2P) network; network coding; resource sharing; linear coding; coding vector

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2011.15.023

1 概述

随着近年来 Internet 和计算机技术的飞速发展, 目前网络带宽已经成为制约网络计算机节点处理能力的瓶颈。网络编码理论就是利用节点机的处理能力对网络上的数据包进行处理, 从而达到提高网络传输效率的目的。网络编码理论的核心思想是利用网络中节点的编码计算能力, 由网络节点对其收到的输入链路上的数据进行编码处理, 然后把编码后的数据发送到输出链路上。信息接收节点利用收到的编码数据包, 根据自己的要求解码获得原始数据信息。与传统的存储转发路由消息传递机制不同, 网络编码数据包可以携带更多信息量, 从本质上来说, 网络编码理论利用节点的富余计算能力参与到网络数据传输的过程, 提高网络的带宽利用率。

相关研究表明, 网络编码理论具有提高网络吞吐量, 增强网络鲁棒性和容错能力的优点。对等网络本身是一种分布式、高度自治化的网络服务模式, 服务性能并不稳定, 提高对等网络服务的稳定性和鲁棒性对于对等网络应用的发展非常重要。本文基于网络编码方法实现了一种互惠对等网络资源共享, 利用网络编码提高对等网络资源共享服务平台的资源下载效率。

2 相关研究工作

网络编码理论^[1-2](Network Coding Theory)是网络通信理论的一个突破性进展, 近年来成为网络信息领域的研究重点和热点之一。2000 年, Ahlswede 等人在网络信息流论文^[3]中系统阐述了网络编码理论, 本文以如图 1 所示蝴蝶网络, 阐述网络编码提高网络带宽利用率的方法。

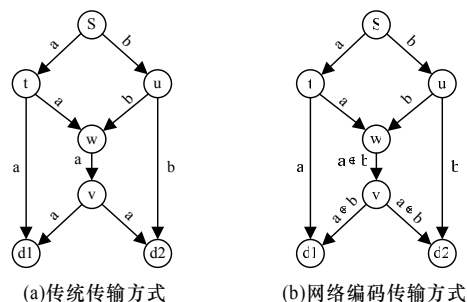


图1 网络编码原理

假定图 1 是一个理想组播网络, 每条链路都无时延和传输差错, 每条链路的传输容量为单位比特每单位时间, 数据能够在单位时间内传送到不同链路中去, 在图 1(a)中, S 是信源节点, d1 和 d2 是 2 个信宿节点, S 需要把 a、b 2 个不同数据包发送给 d1 和 d2。传统网络 a 中, d1 和 d2 只有一个可能在第一时间收到 2 个数据包, 而另外一个节点只能收到一个数据包, 因此对于 d1 和 d2 来说仅仅只有 1.5 比特的数据能够同时传送给目的节点。但引入网络编码后, 如图 1(b)所示, 此网络的组播容量为 2, 从图中可以看出, 在中继节点 w 处, 通过网络编码, 使输出边 w→v 上传输 2 个输入边

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(20100471145); 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(6082024)

作者简介: 韦丽霜(1975—), 女, 讲师, 主研方向: 网络编码理论; 宋 伟, 讲师、博士

收稿日期: 2011-01-26 **E-mail:** songwei@whu.edu.cn

携带信息的线性组合 $a \oplus b$, 那么在信宿节点 $d1$ 和 $d2$, 可分别由 $(a \oplus b) \oplus a$ 和 $(a \oplus b) \oplus b$ 恢复出所有信息 a 、 b , 这样每单位时间可以传输 2 比特数据明显优于传统网络。文献[4]证明, 利用网络编码可以达到网络最大流最小割理论确定的最大网络流量, 而这是基于存储转发的传统网络信息传输方法所无法达到的。

网络编码理论一经提出立刻吸引了学术界和产业界的广泛关注。2005 年, Gkantsidis 等将随机网络编码应用到 P2P 文件共享服务中^[5], 其原型系统就是微软推出的 P2P 文件共享软件系统——Avalanche, 通过理论分析表明, 网络编码有利于提高对等网络服务的鲁棒性。随后, Gkantsidis 在前期工作基础上, 通过实验分析证明在对等网络应用中随机网络编码具有较小的 CPU 和内存开销, 同时可以大幅度地提高对等网络资源共享的效率。文献[6-7]采用基于稀疏矩阵的网络编码实现了 P2P 网络中的资源共享, 实验结果显示相对于传统基于存储转发路由的 BT 协议, 网络编码获得了更好的网络带宽利用率。文献[8]利用仿真实验显示在 P2P 文件共享中采用网络编码, 系统性能优于未采用网络编码的情况。

网络编码应用于对等网络具有以下 3 个方面的主要优势: (1)不依赖于网络拓扑, 在 P2P 内容分发系统中, 由于对等网络的动态性和自治性, 节点通常并不知道网络拓扑结构信息, 这样数据包调度的复杂度将大大提高, 而网络编码并不依赖于网络拓扑来传播数据, 因此有利于提高对等网络的数据下载效率; (2)相对于传统存储转发路由, 网络编码数据包携带的数据信息量更大, 网络资源的完整性不再依赖于局部某个节点, 更有利于保持对等网络应用服务的鲁棒性; (3)基于网络编码节点之间通过共享编码数据包完成解码操作的内在需求, 更容易实现 P2P 网络资源共享服务过程中的激励机制。

网络编码理论具有诸多优点, 但目前并没有一个实际的利用网络编码的对等网络资源共享应用系统, 网络编码在一般对等网络环境下的性能也没有证明和深入探究, 编码操作本身是否会对节点造成负担也并不明确。本文将网络编码用于对等网络数据发布和共享, 利用线性网络编码实现对等网络环境下的互惠资源共享机制, 提高对等网络资源共享系统中用户下载文件资源的服务效率和稳定性。

3 基于网络编码的对等网络资源共享方法

本文利用线性网络编码实现对等网络环境下的资源共享, 其资源发布和共享如图 2 所示。发布资源节点将共享资源分为 n 个等规模的小数据块(数据块大小规模可以选择 512 B-4 KB) B_0, B_1, \dots, B_n , 当网络节点请求数据时, 无论是网络资源的源节点还是 P2P 网络的中间节点都对本地数据进行线性编码运算, 并以编码数据包来传送数据。

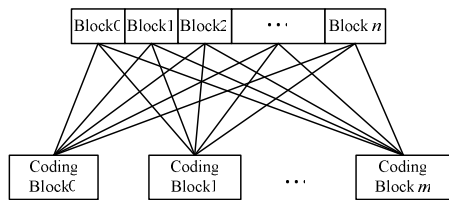


图2 网络编码方式

基于网络编码的对等网络资源共享过程中, 当网络节点向资源拥有节点(拥有完整资源数据包的节点)请求数据时, 与传统的分块资源共享方式不同, 资源拥有节点并不直接将数据包发送给数据请求节点, 而是利用线性编码将源数据包

进行编码处理得到一个编码数据包 Coding Block 作为数据发送和共享对象。在编码过程中, 数据发送节点根据本地数据内容, 随机选择一个 n 维的向量 $C(c_1, c_2, \dots, c_n)$ 作为网络编码向量, 将编码数据包 $CB = \sum_{i=1}^n c_i \times CB_i$, 以及对应的网络编码向量 $C(c_1, c_2, \dots, c_n)$ 传送给数据请求节点。

网络中间节点间在进行数据共享时, 假设中间节点 A 拥有 k 个网络编码数据包 $(CB_1, CB_2, \dots, CB_k)$, 各编码数据包对应的编码向量分别为 (C_1, C_2, \dots, C_k) , 当网络节点 B 要求和节点 A 共享数据时, 节点 A 随机选择编码向量 $C(c_1, c_2, \dots, c_k)$ 对本地的编码数据包再次进行线性编码, 节点 A 将编码数据包 $CB = \sum_{i=1}^k c_i \times CB_i$ 传递给数据请求节点 B , 此时对应的编码向量为节点 A 本地各编码向量的线性组合 $CB = \sum_{i=1}^k c_i \times C_i$ 。

为保证对等网络资源共享服务的顺利进行, 下面进一步研究节点解码获得原始文件数据的方法。根据上面的线性编码数据生成和共享规则可知, 对于任意网络编码数据包 CB , 都是由原始资源的 n 个数据块内容 (B_0, B_1, \dots, B_n) 通过线性编码得到的, 而且节点拥有各编码数据包的编码向量 (c_1, c_2, \dots, c_n) , 设 c_{ij} 为节点 A 上第 i 个编码包的编码向量 c_i 在第 j 维上的编码分量, 则对于节点 A 的 k 个编码数据包 $(CB_1, CB_2, \dots, CB_k)$ 来说, 节点 A 有下面等式成立:

$$\begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ c_{k1} & c_{k2} & \dots & c_{kn} \end{pmatrix} \times (B_1, B_2, \dots, B_n)^T = \begin{pmatrix} CB_1 \\ CB_2 \\ \vdots \\ CB_k \end{pmatrix}$$

因此, 原始数据可解码的命题可以转化为能够通过上式获得原始数据 (B_1, B_2, \dots, B_n) 。充要条件是编码向量系数矩阵满秩(秩为 n)。但用户收到 n 个编码数据包并不一定保证能够完成解码操作。有可能其中部分编码数据包是线性相关的。确保节点收到的线性编码数据包有效, 成为论文保证系统效率的关键。

根据对等网络资源共享方式, 本文以节点当前编码系数矩阵作为数据交换的依据, 设计基于网络编码的互惠交易方法。当节点 A 向节点 B 请求数据时, 以自身编码系数矩阵作为数据共享的依据。若节点 B 的编码系数矩阵满秩, 即节点 B 的编码数据包可完成解码, 拥有所有原始数据, 这时节点 B 分析节点 A 的编码系数矩阵, 利用本地原始数据包提供节点 A 所需的编码数据(使得节点 A 的编码系数矩阵秩增加的线性编码数据包, 具体如何提供本文不进行详细分析)。如果节点 B 也是一个资源请求节点, 即节点 B 的编码系数不满秩, 则节点 B 分析节点 A 的编码系数矩阵, 看是否在节点 A 、节点 B 之间存在互相感兴趣的数据, 即将节点 A 、节点 B 的编码系数矩阵 C_A 和 C_B 合并得到的矩阵 C_{A+B} , 看合并后的矩阵秩是否大于节点 A 、节点 B 各自编码系数矩阵秩, 即 $R(C_{A+B}) > R(C_A)$ 且 $R(C_{A+B}) > R(C_B)$, 如果存在互相感兴趣的数据, 节点 A 、节点 B 编码对方需要的数据进行数据交换, 从而实现对等网络环境下的公平数据共享, 具体数据共享算法如算法所示。本文假设所有节点都是无私、善意的, 即不考虑伪造编码系数矩阵的情况。

算法 基于网络编码的对等网络数据交换协议

输入 A 为数据请求节点; B 为被请求节点

1. A 将本地编码系数矩阵 CA 传递给节点 B ;
2. if(B 拥有全部原始数据)
3. B 根据 CA 传递 A 所需编码数据包;

4. if(B 并不拥有全部数据)
5. if($R(CA+B) > R(CA)$ and $R(CA+B) > R(CB)$)
6. B 组织 A 所需的编码数据包,并向 A 请求 B 所需的编码数据包;
7. else
8. 基于公平交易, B 不与 A 共享数据;

分析算法发现,不同数据节点之间共享数据需要进行数据交换,这种公平交易机制确保了对等网络资源共享的公平性,相对于传统数据包共享机制,在网络编码环境下每个编码数据包所包含的数据信息更多,这就加大了节点之间共享数据的可能性,从而提高了对等网络资源共享效率。

同时,算法中遏制了节点 free-riding 获益的可能,当一个 free-riding 节点希望和其他的中转节点进行数据交换时,由于它不愿意共享数据,因此也难以获取数据,若 free-riding 节点向资源拥有者请求数据,则资源拥有节点总是随机地选择少量数据包发送,这样 free-riding 节点难以获得全部数据,从而抑制对等网络中节点的 free-riding 行为,强制节点参与对等网络服务,提高对等网络的整体服务效率。下面通过仿真实验对本文的算法进行模拟,验证网络编码对 P2P 网络性能的提升。

4 模拟实验及结果分析

本节构建模拟仿真实验来分析基于网络编码互惠对等网络资源共享的效率。仿真实验采用 Java 语言在 Windows XP 环境下实现,仿真实验节点规模为 1 000 个,共享资源数量为 10 000,节点处的共享资源服从幂律分布。

4.1 资源下载效率实验

仿真实验中网络节点都基于公平交易实现数据共享。通过实验考查不同规模共享资源情况下网络节点下载资源的平均时间,实验结果如图 3 所示。

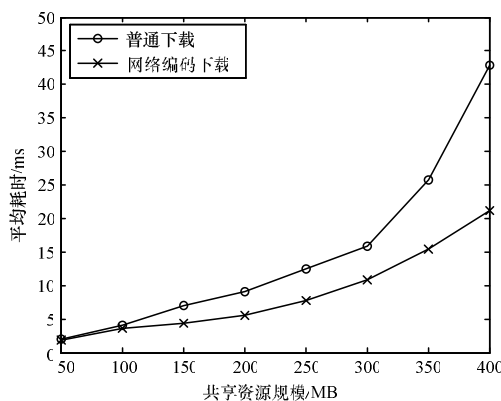


图3 下载平均耗时实验结果

通过仿真实验结果可以发现,网络编码使得对等网络资源共享应用具有更高服务效率,当资源规模更大时,网络编码方式显示出更大的优势,分析这种现象发现在基于互惠的普通资源共享方式下,由于节点之间资源的不对称,阻碍了对等网络资源共享,基于网络编码的对等网络资源共享机制更加有利于对等网络资源共享服务的高效开展和稳定,当资源更大时效果更加明显。

4.2 网络编码开销实验

相对于传统的对等网络资源共享方式,本文的方法需要

增加数据包的编解码操作,因此有必要考察编码操作的开销。实验考察对于不同大小规模文档完成网络编码的时间开销,网络编码包大小为 1 KB,仿真实验结果如图 4 所示。

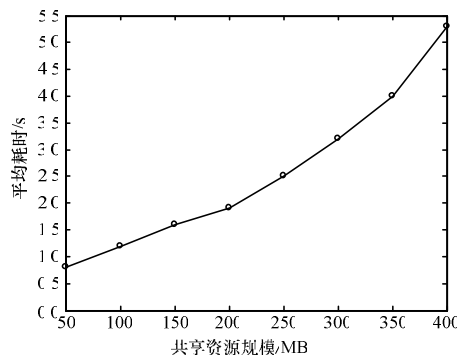


图4 网络编码开销实验结果

从实验数据可以发现数据包的编码开销并不大,对于一个 400 MB 文件的线性编码开销约为 5 s,因此,利用网络编码处理并不会给 P2P 网络节点带来太大的处理负担。

5 结束语

本文基于网络编码数据包携带更多数据信息的特点,研究了基于网络编码的对等网络互惠资源共享方法,并进行了仿真实验,实验结果表明,网络编码使得 P2P 资源共享显示了更好的下载性能。在 P2P 网络应用中,网络编码理论具有更加广阔的应用前景和研究价值。

参考文献

- [1] Yeung R W. Information Theory and Network Coding[M]. New York, USA: Springer, 2008.
- [2] Yeung R W, Li S R, Cai N, et al. Network Coding Theory[M]. [S. l.]: Now Publishers Inc., 2005.
- [3] Ahlswede R, Cai Ning, Li S R, et al. Network Information Flow[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46(4): 1204-1216.
- [4] Li S Y R, Yeung R W, Cai Ning. Linear Network Coding[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2003, 49(2): 371-381.
- [5] Gkantsidis C, Rodriguez P R. Network Coding for Large Scale Content Distribution[C]//Proc. of IEEE Conference on Computer Communications. [S. l.]: IEEE Press, 2005: 2235-2245.
- [6] Ma Guanjun, Xu Yinlong, Lin Minghong, et al. A Distribution System Based on Sparse Linear Network Coding[C]//Proc. of the 3rd IEEE Workshop on Network Coding. [S. l.]: IEEE Press, 2007.
- [7] Ma Guanjun, Xu Yinlong, Lin Minghong. On the Performance of Network Coding Based on P2P Content Distribution[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2006, 36(11): 1237-1240.
- [8] Yang Min, Yang Yuan. Peer-to-Peer File Sharing Based on Network Coding[C]//Proc. of IEEE International Conference on Distributed Computing Systems. [S. l.]: IEEE Press, 2008: 168-175.

编辑 索书志