

随机网络编码对文件共享的增益

王俊义

WANG Jun-yi

湘潭大学 数学与信息计算科学学院, 湖南 湘潭 411105

School of Mathematics and Computational Science, Xiangtan University, Xiangtan, Hunan 411105, China

E-mail: wangjy523@163.com

WANG Jun-yi. Benefit of random network coding for file-sharing. *Computer Engineering and Applications*, 2009, 45(4): 108-110.

Abstract: The paper studies the case that the download time or download success rate gain brought by random network coding, compared to store-and-forward mechanism, on the file-sharing program and the impact of Bit Error Ratio (BER) on random network coding's performance in a collision-based wireless Mesh network. The simulation results show that, in the Blind-Forward node collaborative manner, when the number of source node is 1 and source node is randomly placed, random network coding can make download time reduce 30% to 40%. Furthermore, when the number of source node increases to 2, and the source nodes is placed fixedly, in both Blind-Forward and Selective-Forward node collaborative manners, compared to store-and-forward mechanism, the random network coding is greater extent in reducing download time.

Key words: random network coding; wireless Mesh network; IEEE 802.11 protocol

摘要: 研究了在有冲突的无线 Mesh 网络中, 相对于存储转发机制, 随机网络编码对文件共享所带来的下载时间或下载成功率的增益, 以及比特错误概率(Bit Error Ratio, BER)对随机网络编码性能的影响。仿真结果表明, 当源节点数为 1 且随机放置时, 在盲转发(Blind-Forward)节点协作方式下, 随机网络编码能够将下载时间减少 30%~40%。当源节点数为 2 且固定放置时, 相对存储转发机制, 在盲转发和选择性转发(Selective-Forward)节点协作方式下, 采用随机网络编码均较大程度地减少了下载时间。

关键词: 随机网络编码; 无线 Mesh 网络; IEEE802.11 协议

DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.2009.04.030 文章编号: 1002-8331(2009)04-0108-03 文献标识码: A 中图分类号: TN925.5

1 引言

2000年, Rudolf Ahlswede 等人在文献[1]中, 提出了网络编码的概念。采用网络编码机制的网络, 允许中继节点不仅可以存储转发接收到的信息, 而且可以将收到的信息合并后再转发。最后在信宿节点处, 通过高斯消去法, 还原信源节点的信息。采用网络编码通常可以达到网络组播容量的上限。

2003年, 李硕彦等给出了线性网络编码^[2]的构造方法, 并且指出, 对于一般的组播网络, 采用线性网络编码可以达到组播容量的上限。但采用线性网络编码需要这个网络拓扑的集中信息, 然而, 在分布式网络中, 节点通常无法得到网络拓扑的集中信息。

针对线性网络编码的上述缺点, 同一年, T.Ho 等人在文献[3]中提出了随机线性网络编码(简称随机网络编码), 随机网络编码允许网络节点在一个给定的有限域 F_q ($q=2^u$, u 为一正整数)上独立随机地产生一个输入到输出的线性映射。类似于线性网络编码, 在信宿节点通过高斯消去法, 还原信源信息。T.Ho 等证明了在 $q=2^8$ 时, 信宿节点能够还原信源信息的概率为 99.6%^[3]。并且随机网络编码不需要集中式的控制, 且具有较强的鲁棒性。因此可以应用于 AD HOC、P2P、SENSOR、MESH 等

分布式及动态网络。自此之后, 许多学者开始把网络编码应用于各种分布式系统^[4-7]。

其中, Anwar Al Hamra 等在文献[4]中, 研究了理想无冲突的无线 Mesh 网络中, 采用随机网络编码对文件下载时间的增益。通过仿真验证了在无线 Mesh 网络中, 随机网络编码可以在不同的节点协作方式下减少文件的下载时间。

但是, 众所周知, 无线 Mesh 网络中节点之间传输数据实际上不可能是无冲突的。因此在用冲突的无线 Mesh 网络中研究随机网络编码对文件下载时间或下载成功率的增益, 将更具实际意义。因此, 论文研究了有冲突无线 Mesh 网络中, 随机网络编码对文件共享所带来的增益, 并得出了比特错误概率(BER)对随机网络编码性能的影响。

2 MAC 随机接入机制

与文献[4]中要求 MAC 层理想无冲突不同, 本文采用了类似于 IEEE802.11 协议中基于窗口的 MAC 层随机接入机制^[8]。在此机制中, 要发送数据的节点称为潜在发送节点, 每个潜在发送节点均包含 4 个窗值: 竞争窗值 W 、当前窗值 CW 、最小窗值 W_{\min} 和最大窗值 W_{\max} 。各个潜在发送节点通过各自的窗值来

基金项目: 湖南省教育厅科研项目(the Research Project of Department of Education of Hunan Province of China under Grant No.08c884)。

作者简介: 王俊义(1977-), 博士, 主要研究领域为网络编码。

收稿日期: 2008-09-17 修回日期: 2008-10-30

控制自己对无线介质的访问。

每轮发送开始时, $CW=0$ 的潜在发送节点将发送数据块。如果两个相邻的节点在同一轮之中发送数据块, 则它们之间会发生冲突, 发生冲突的节点接收不到其他节点发送给它的数据块(即节点不能同时接收和发送数据块)。在接收节点处, 当不同节点向该节点传送数据时, 该节点只接收距离自己最近的节点的数据。

在存储转发的机制下, 如果节点的某次发送与其他节点发生了冲突, 则该节点将不断地重复发送该信息, 直至成功发送(没有发生冲突)为止, 然后才会发送下一个数据块; 而如果采用了网络编码, 节点会在重复发送之前用当前所有的数据块重新生成新的编码数据块, 而不是简单地重复发送旧的编码数据。

如果一个节点已经发完了其所有数据块, 其将不再是潜在发送节点, 不再参与对无线介质的竞争, 直到又有新的数据可供发送为止。

在每次发送之后, 发送过数据的节点会更新各自的竞争窗值和当前窗值。如果本次发送成功, 则将 W 的值置 W_{\min} , 并且在 $(0, W)$ 之间随机选择一个数作为 CW 的值; 若在发送过程中与其他的发送节点发生冲突, 则将 W 的值更新为 $2W$, 如果得到的新 W 的值小于 W_{\min} , 则以此值作为新的 W ; 否则, 将 W 的值置为 W_{\min} , 再用此 W 生成新的 CW 。

接收到新数据的节点会成为新的潜在发送节点, 它们的 W 值被置为 W_{\min} , 并以此生成随机的 CW 值。每一轮发送结束后, 所有潜在发送节点的当前窗值 CW 均减去 1, 之后, 新一轮发送开始。

3 节点协作机制

无线 Mesh 网络中, 节点的协作机制有很多种, 在这里仅考虑两种截然相反的协作机制^[4]。

第一种是基于扩散法的协作机制, 包括两种情况: BF 和 BF-NC, 分别对应采用网络编码和不采用网络编码的情况。

BF(Blind-Forwarding): 节点将自己接收到的数据块保存在一个先入先出的队列中, 每当竞争到无线介质(即可以向邻节点发送数据块), 无论邻节点是否需要, 它都会按照先收先发的原则, 把自己最早接收到的数据块发送出去。在这种机制下, 每个节点传送的数据块数目就等于它收到的数据块数目。

BF-NC(Blind-Forwarding with Network Coding): 在这种机制下, 当一个节点收到一个新的数据块的线性组合后, 一旦竞争到无线介质, 它就产生并发送一个新的数据块, 这个数据块是它自己所拥有的所有数据块的线性组合(即进行网络编码), 通过扩散法把这个数据块传送给它的邻居。

第二类机制和第一类完全相反, 也包含两种情况: SF 和 SF-NC, 分别对应采用网络编码和不采用网络编码的情况。在这类机制中, 每个节点有一个列表, 其中包含了它的每个邻居节点所拥有数据块的全部信息。

SF(Selective-Forwarding): 在这种机制下, 每个节点连续地检查它自己所拥有的列表, 如果发现自己有邻节点需要的数据块, 它就竞争无线介质, 把这个数据块发送出去, 如果这样的数据块很多, 它就发送最稀有的(为最多节点所需要的)数据块, 如果最稀有的数据块也不只有一个的话, 它就随机地选择一个发送出去。

SF-NC(Selective-Forwarding with Network Coding): 在这种机制下, 每个节点连续地检查它自己所拥有的表格, 如果发

现自己有邻节点需要的数据块, 就把自己拥有的所有数据块进行线性组合(即进行网络编码), 产生一个新的数据块发送出去。在这个情况下不存在稀有数据块的问题。

在上述节点协作机制和 MAC 接入机制下, 通过下列的仿真步骤来实现文件共享。

4 仿真环境与仿真步骤

4.1 仿真环境

为了测试随机网络编码应用于无线 Mesh 网络中所能带来的性能增益, 基于公式 $N = \frac{10 \cdot S}{\pi \cdot R^2}$ (其中 S 表示节点数目, S 表示正方形面积, R 代表节点覆盖半径) 构建一个无线 Mesh 网络, 并在此网络上实现节点之间的文件共享。对于任意一个节点来说, 处于以其为圆心, 以 R 为半径的圆中的所有节点均为其邻节点。节点之间的协作采用盲转发(Blind-Forward, BF)或选择性转发(Selective-Forward, SF)机制^[4]。

仿真过程为整个文件从源节点发送到所有用户节点的过程(即实现文件共享)。在仿真过程中, 节点完成一次发送或接收所花费的时间称为一轮, 在每一轮中, 仅有数据发送且 $CW=0$ 的节点可以同时发送数据。

仿真过程为整个文件从源节点发送到所有用户节点的过程(即实现文件共享)。在仿真过程中, 节点完成一次发送或接收所花费的时间称为一轮, 在每一轮中, 仅有数据发送且 $CW=0$ 的节点可以同时发送数据。

4.2 仿真步骤

(1) 将完整的文件分成 N 个等长数据块, 存储在某(个)些源节点中, 其他节点被称为用户节点。当采用传统的路由存储转发方式时, 每个节点每一轮只能发送一个原始的数据块; 当采用网络编码时, 则发送一个由原始数据块编码之后产生的编码数据块。

(2) 竞争到无线介质的节点发送自己的数据块, 如果一个节点与其邻节点同时发送数据, 则发生冲突, 发生冲突的节点在本轮中无法接收其他节点发送给它的任何数据块, 且发生冲突的节点均认为自己没有成功发送数据块。反之, 节点成功发送数据块。

(3) 若节点成功接收到了其邻节点发送的数据块, 则进一步检查该数据块是否为接收过的数据块, 如果不是, 将该数据块存储下来。

(4) 所有的节点按照第 2 章中的 MAC 接入机制更新自己的窗值, 并竞争无线介质。

(5) 如果某个节点收到了 N 个互异的数据块, 则该节点即完成了整个文件接收, 退出无线介质的竞争。否则重复步骤 2~4 直到所有节点都完成接收为止。

5 仿真结果及性能分析

图 1 和图 2 分别给出了当源节点数目为 1, 而且随机地放置于整个网络之中, 节点的 W_{\min} 为 5, W_{\max} 为 20 时, 所有节点接收完文件所需的轮数和节点数目的关系。

图 1 中节点之间采用盲转发(BF)的节点协作方式。通过仿真发现, 在此情况下, 随机网络编码能够将平均下载时间减少 30%~40%。这主要是由于无线 Mesh 网络中, 数据是以广播的方式传送的, 会造成一定区域内接收节点的数据都近似相同的情况, 在 BF 的协作方式下, 这些节点之间的发送将是无效的。而在盲转发和网络编码结合(BF-NC)方式下, 编码后的数据块包含了多个数据块的信息, 从而增大了该数据块被接收节点需要的概率, 避免了多个节点重复发送相同数据块而造成资源的浪费, 因此减少了总的传输次数, 降低了下载时间。

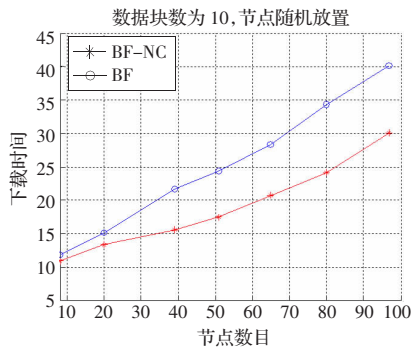


图1 源节点数为1,且随机放置,协作方式BF, $W_{\min}=5, W_{\max}=20$

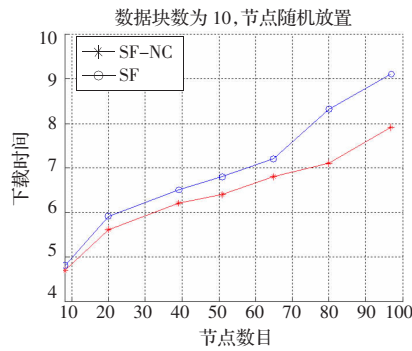


图2 源节点数为1,且随机放置,协作方式SF, $W_{\min}=5, W_{\max}=20$

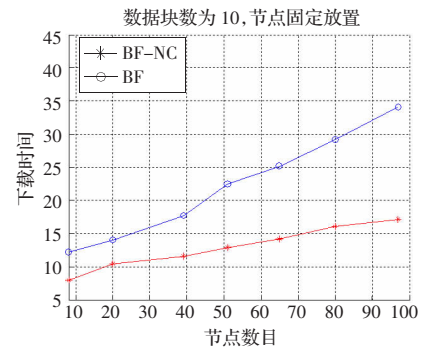


图3 源节点数为2,且固定放置,协作方式BF, $W_{\min}=5, W_{\max}=20$

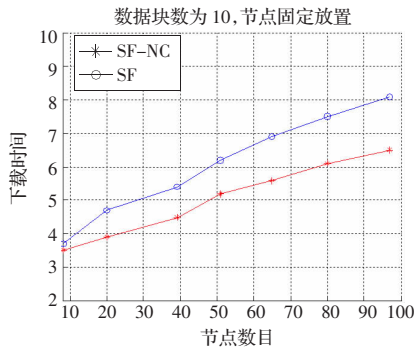


图4 源节点数为2,且固定放置,协作方式SF, $W_{\min}=5, W_{\max}=20$

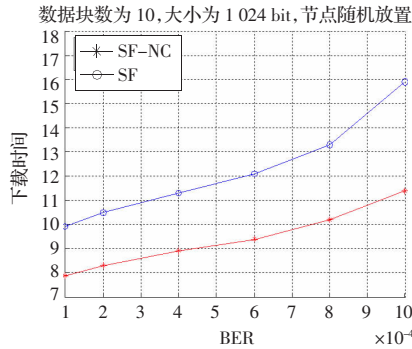


图5 源节点数为1,且随机放置,协作方式SF, $W_{\min}=5, W_{\max}=20$

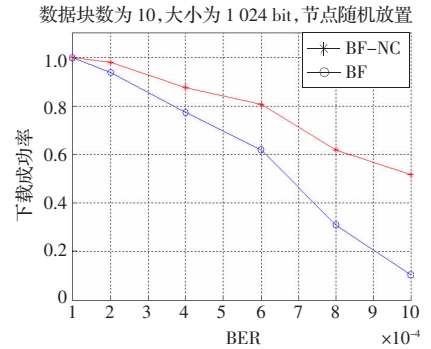


图6 源节点数为1,且随机放置,协作方式BF, $W_{\min}=5, W_{\max}=20$

图2中,节点采用选择性转发(SF)协作机制,节点只在邻节点需要自己的数据块时才会发送,避免了无用数据的发送,因此,在这种协作方式下,随机网络编码对性能的提高有限。但当用户数较多时,仍然有一定的性能增益,原因是当多个数据块被邻居节点需要时,在SF-NC节点协作方式下,可以编码合并这些数据块,只进行一次发送即可。

图3和图4中,源节点数为2,固定地放置于正方形区域的对角的顶点上,节点的 W_{\min} 为5, W_{\max} 为20。如图所示,在这种情况下,无论是采用盲转发还是选择性转发节点协作方式,随机网络编码均能较大程度地降低下载时间。原因是2个源节点会使节点接收到的数据存在更大的差异性,网络中数据的差异性可以使随机网络编码发挥更大的作用。

图5分析了在SF协作方式且比特错误概率(BER)在 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 情况下,BER对下载时间的影响。从图中可以看出,在SF和SF-NC节点协作方式下,随着BER的增加,下载时间都有所增加,但在SF-NC情况下的增长幅度要远小于SF。因为在网络链路质量下降的情况下,增加了网络中数据的差异性,在使用随机网络编码的情况下,可以减少节点数据发送的次数,从而降低下载时间,弥补了链路质量变坏所造成的下载时间的增加。

图6给出了在BF协作方式且BER在 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 情况下,BER对下载成功率的影响。所谓下载成功率,就是网络中能够完整下载这个文件的节点数与节点总数的比值。从图可以看出,随着BER的增加,随机网络编码对节点下载成功率的影响就越大,这主要是由于BER的增加,导致了网络链路的性能下降,使得整个网络的性能变坏,从而导致下载成功率的下降。但网络性能的下降,会导致网络中的编码数据具有更大的差异性,更加适合网络编码的解码特性。从而能在一定程度上弥补BER增加所导致的下载成功率的下降。从图中也可以看出,当

BER增大到一定程度时(比如 $BER=10^{-3}$),随机网络编码所带来的增益无法弥补链路质量变坏所导致的负面作用,因此仍有部分节点无法完成文件的下载。

参考文献:

- [1] Ahlswede R, Cai N, Li S-Y, et al. Network information flow[J]. IEEE Trans on Inf Theory, 2000, 46(4): 1204-1216.
- [2] Li S-Y, R, Yeung R W, Cai N, et al. Linear network coding[J]. IEEE Trans on Inf Theory, 2003, IT-49(2): 371-381.
- [3] Ho T, Medard M, Shi J, et al. On randomized network coding[C]// Proc 41st Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing, Oct 2003: 11-20.
- [4] Hamra A A, Barakat C, Turletti T. Network coding for wireless mesh networks: A case study[C]// IEEE WoWMoM 2006, June 2006: 9-22.
- [5] Wang D, Zhang Q, Liu J. Partial network coding: Theory and application in continuous sensor data collection[C]// IWQoS 2006, New Haven, CT, USA, June 2006: 93-101.
- [6] Wang J Y, Yang G, Lin X H, et al. Continuous data collection in wireless sensor networks through PNC and distributed storage[C]// International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 21-25 Sept 2007: 2568-2571.
- [7] Sagduyu Y E, Ephremides H. On joint MAC and network coding in wireless Ad Hoc networks[J]. IEEE Trans on Inf Theory, 2007, 53(10): 3697-3713.
- [8] IEEE 802.11-2001 Wireless LAN Medium Access Control(MAC) and Physical Layer(PHY) specification[S]. 2001.
- [9] Philips K, Panwar S S, Tantawi A N. Connectivity properties of a packet radio network model[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1989, 35: 1044-1047.