

基于网络编码的多用户通信

刘沙沙,梅中辉,王庆斌

(南京邮电大学 通信与信息工程学院,江苏 南京 210003)

摘要:网络编码可以降低通信系统的中断概率,提高系统的可靠性。为了降低通信系统的中断概率,提出一种非二进制的网络编码协作通信方案。非二进制网络编码对接收到的外来用户信息和自身的信息不再进行简单的二进制异或,而是根据一定的组合方式进行叠加。各用户根据是否正确解码接收到的非自身信息来决定是否进行网络编码,目的端同时接收到多个发送端的信息,利用相干检测得到需要的信息。公式推导和系统仿真表明在瑞利衰落环境下,该方案能有效降低系统的中断概率。

关键词:协作通信;非二进制网络编码;中断概率

中图分类号:TP31

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2013)02-0141-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2013.02.035

Multi-user Communications Based on Network Coding

LIU Sha-sha, MEI Zhong-hui, WANG Qing-bin

(Institute of Communication and Information Engineering, Nanjing University of
Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: Network coding can reduce the outage probability and enhance the reliability of communication system. In order to reduce the outage probability of the communication system, a non-binary network coding of cooperative communication scheme is proposed. Non-binary network coding is not simple binary XOR for the information of out users, but superposition based on certain combinations. Every user decides whether to implement network coding according to the correct decoding received information of out users. The destination can receive signals from multiple senders, and uses coherent detection to get the information which it wants. Formula derivations and system simulation results show that under Rayleigh fading channels, the proposed scheme can effectively reduce the outage probability.

Key words: cooperative communication; non-binary network coding; outage probability

0 引言

协作通信的目的就是充分利用网络中的节点资源来帮助有通信需求的节点进行高速、可靠的无线通信^[1],协作通信技术融合了分集技术与中继传输技术的优势,在不增加天线数量的基础上,可在传统通信网络中实现并获得多天线与多跳传输的性能增益。其基本思想是在多用户环境中,系统中的每个移动终端都有一个或多个合作伙伴,合作伙伴在传输自己信息的同时帮助其伙伴传输信息,由于协作通信中的合作伙伴彼此共享天线,从而产生虚拟 MIMO 系统,获得发射分集增益,使单天线的移动终端也可实现空域分集服

务的质量,改善系统性能。两用户一中继的模型和两用户相互协作的模型是协作通信中两种基本的通信模型。图论中的最大流最小割定理表明,一个通信网络可以传输的最大流量等于其最小割。通信网络可以通过有向图来进行表示,由于传统的网络采用存储转发的模式,并不能实现网络的最大流,所以并不能达到最佳的效果。

为了提高网络的吞吐量,允许中间节点处理接收到的信息,R. Ahlswede 等^[2]提出了网络编码的概念,在网络编码中中继节点不再只是简单地放大转发接收到的信息,而是将其接收到的信息进行一定的编码后再发送出去。网络编码的本质是利用中继节点的编码能力来提高系统性能,它本身就包含了节点协作的思想^[3,4]。目前,网络编码已被证明是可以逼近网络容量理论传输极限的有效方法,具有确定拓扑结构的有线及无线网络编码已经受到广泛的关注,网络编码应用于无线网络,可提高网络的吞吐量,减少数据包的传输次数,降低无线节点的能量损耗,增强网络的容错性和

收稿日期:2012-05-08;修回日期:2012-08-10

基金项目:国家科技重大专项(2010ZX03003-003);国家“973”重点基础研究发展计划项目(2011CB302903)

作者简介:刘沙沙(1987-),女,河南平顶山人,硕士研究生,研究方向为无线通信与信号处理技术;梅中辉,硕士研究生导师,副教授,研究方向为网络编码技术、协作通信技术等。

鲁棒性,提高网络的安全性等^[5~7]。二进制的异或网络编码已经在典型的协作通信模型中被广泛的应用和研究。

考虑到线性编码的简单性和实用性,Li,Yeung 和 Cai 在后续工作^[8]中提出了线性网络编码,并构造了码率达到最大流量的线性码,从而证明了线性码的最优性。这一工作奠定了网络编码的理论和应用基础,因而引起了更多人对网络编码的注意。M. Xiao 等^[9,10]从基本的两用户协作模型研究了非二进制线性网络编码的中断概率,并拓展到多用户协作模型。Joao Luiz Rebelatto 等^[11]在 M. Xiao 的基础上做了进一步的研究,提出和分析了独立块衰落信道下多用户发送不同的信息到一个共同的接收端的分布式网络编码,在不降低系统的码率的情况下提高系统的分集增益。文中把非线性二进制网络编码引入到两发送端两目的端^[12]的协作通信模型中,并分析其中断概率。

在分析系统终端概率的同时,也分析不同网络编码情况下的协作分集增益。

系统的分集定义为:

$$D \triangleq \lim_{\text{SNR} \rightarrow \infty} \frac{-\log P}{\log \text{SNR}} \quad (1)$$

1 系统模型

如图 1 所示, T_1, T_2 为两发送端分别向目的端 R_1, R_2 发送信息 I_1, I_2 , T_1, T_2 互为对方的中继。目的端 R_1 只接收 T_1 的信息, R_2 只接收 T_2 的信息,该系统工作方式半双工的方式,在第一时隙内 T_1 分别向 T_2, R_1, R_2 发送信息,第二时隙内 T_2 分别向 T_1, R_1, R_2 发送信息,第三时隙内 T_1, T_2 分别向 R_1, R_2 发送信息。传统的协作方案有协作转发和二进制协作网络编码,文中提出一种非二进制的协作网络编码方案,对其工作工程进行描述并对其中断概率进行分析。此文中以 I_1 为例来分析其中断概率。系统的完全中断概率为 I_1 和 I_2 在系统中均中断的概率。对于此文中的模型来说,假设两个发送端发送的信息是相互独立的, I_1 和 I_2 在两个接收端处是否被相应的接收端正确解码分离出来是互不影响的。

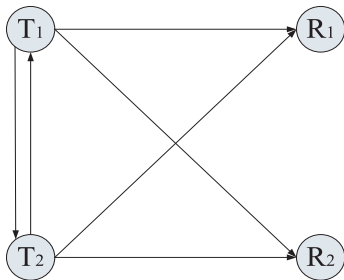


图 1 系统模型

假设所有的链路速率都为 R , 并且所有的信道具

有相同的信噪比 SNR, 当互信息小于链路传输速率时发生中断, 其中 h_{ij} 为独立同分布的信道的衰落因子, 并且服从均值为 0 均方差为 1 的瑞利分布, 互信息可表示为^[3,5,7]:

$$I = \log(1 + |h_{ij}|^2 \text{SNR}) \quad (2)$$

中断概率为:

$$\begin{aligned} Pe &= \Pr\{I < R\} \\ &= \Pr\{\log(1 + |h_{ij}|^2 \text{SNR}) < R\} \\ &= \Pr\left\{|h_{ij}|^2 < \frac{2^R - 1}{\text{SNR}}\right\} \\ &= 1 - \exp\left(-\frac{2^R - 1}{\text{SNR}}\right) \approx \frac{2^R - 1}{\text{SNR}} \end{aligned} \quad (3)$$

2 二进制网络编码的中断概率

二进制网络编码的过程如下: 前两个时隙内的工作方式如下所述: 在第一时隙内 T_1 分别向 T_2, R_1, R_2 发送信息, 第二时隙内 T_2 分别向 T_1, R_1, R_2 发送信息, 第三时隙内 T_1, T_2 分别向 R_1, R_2 发送信息, T_1, T_2 分别对接收到的对方信息进行解码, 然后和自身的信息进行异或网络编码操作, 然后发送给目的端 R_1, R_2 。若任意一个发送端未正确解码对方的信息, 则第三时隙发送自身的信息至两个目的端, 成功解码对方的外来信息的信息的用户则继续进行网络编码。若两个发送端均未正确解码对方的信息, 则第三时隙分别发送自身的信息至两个接收端。

当两个发送端均能正确解码对方的信息时, 接收端 R_1 接收到四个信息 $I_1, I_2, I_1 \oplus I_2, I_1 \oplus I_2$, 两个 $I_1 \oplus I_2$ 不能恢复出两发送端的信息, 只要 R_1 接收到的 I_1 和 I_2 不能被正确解码就不能正确恢复出 I_1 的信息, 其中断概率为:

$$P_1 = Pe * Pe \quad (4)$$

若两用户有一方不能正确解码外来信息, 接收端 R_1 接收到的信息为 $I_1, I_2, I_2, I_1 \oplus I_2$ 或者是 $I_1, I_1, I_2, I_1 \oplus I_2$, 其中 I_1 不能被接收端正确解码, 则剩余的信息就不能够完全正确恢复出 I_1 , 其中断概率为:

$$\begin{aligned} P_2 &= 3Pe^3(1 - Pe) + Pe^4 \\ &+ 2Pe^3(1 - Pe) + Pe^4 \end{aligned} \quad (5)$$

若两用户均不能正确解码外来信息, 则接收端 R_1 接收到的信息为 I_1, I_1, I_2, I_2 , 其中断概率为:

$$P_3 = Pe * Pe * Pe * Pe \quad (6)$$

对于 I_1 来说, 其中断概率可以表示为:

$$\begin{aligned} P_{11} &= P_1 + P_2 + P_3 \\ &= Pe * Pe + 3Pe^3(1 - Pe) + Pe^4 \\ &+ 2Pe^3(1 - Pe) + Pe^4 + Pe^4 \\ &\approx Pe^2 \end{aligned} \quad (7)$$

其分集增益为2。因为系统是对称的,用同样的分析方法分析 I_2 的终端概率,可以得出 I_2 的中断概率表达式和 I_1 的一样,即 $P_{11} = P_{12}$,则系统的完全中断概率即 I_1, I_2 均中断的概率可以表示为:

$$P_a = P_{11} * P_{12} = Pe^4 \quad (8)$$

3 非二进制网络编码的中断概率

非二进制网络编码的工作方式如下所述:在第一时隙内 T_1 分别向 T_2, R_1, R_2 发送信息,第二时隙内 T_2 分别向 T_1, R_1, R_2 发送信息,第三时隙内 T_1, T_2 分别向 R_1, R_2 发送信息。

第三时隙的两用户分别对自身的信息和所接收到的对方的信息进行非二进制网络编码,其工作原理如图2所示。

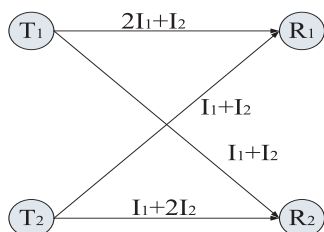


图2 非二进制网络编码系统

若任意一个发送端未正确解码对方发送的外来信息,则第三时隙发送自身的信息至两个目的端。若两个发送端均未正确解码对方的信息,则第三时隙分别发送自身的信息至两个接收端。成功解码对方的外来信息的用户则继续进行网络编码。

当两个发送端均能正确解码对方的信息时,接收端 R_1 接收到四个信息 $I_1, I_2, I_1+I_2, 2I_1+I_2$,其中任意两个以及两个以上的信号被接收端正确译码就可以恢复出 R_1 的发送信息 I_1 ,则其中断概率为:

$$P_1' = Pe * Pe * Pe * Pe + (1 - Pe) * Pe * Pe * Pe \quad (9)$$

当两个发送端只有一个能正确解码对方的信息时,接收端 R_1 接收到的信号分别为 I_1, I_1, I_2, I_1+I_2 或者为 $I_1, I_2, I_2, 2I_1+I_2$,则其中断概率为:

$$P_2' = 2 [Pe * Pe * Pe * Pe + 2 * (1 - Pe) * Pe * Pe * Pe] \quad (10)$$

当两个发送端均未正确解码对方的信息时,接收端 R_1 接收到的四个信息分别为 I_1, I_1, I_2, I_2 ,则其中断概率为:

$$P_3' = Pe * Pe * Pe \quad (11)$$

对于 I_1 其中断概率为:

$$P_{21} = (1 - Pe)^2 * P_1' + (1 - Pe) * Pe * P_2' + Pe^2 * P_3' \approx Pe^3 \quad (12)$$

其分集增益为3。因为系统是对称的,所以 I_2 的

中断概率表达式和 I_1 一样,即 $P_{21} = P_{22}$,则系统的中断概率可以表示为:

$$P_b = P_{21} * P_{22} = Pe^6 \quad (13)$$

非协作传输下一个传输时段内 I_1, I_2 只被自身发送一次,其中断概率均为 Pe ,则其系统的中断概率为 Pe^2 。因为未进行协作,所以不存在分集增益。

4 仿真结果及分析

仿真结果如图3和图4所示。可以看到非二进制网络编码的中断概率明显低于二进制网络编码的中断概率和非协作模式下的中断概率,二进制网络编码的中断概率明显低于非协作模式下的中断概率。随着信噪比的增大,中断概率和信噪比成反比例降低。在信噪比为20dB时,非二进制的网络编码中断概率要优于二进制网络编码两个数量级。从中断概率的角度来看,二进制网络编码在协作通信系统中的具有更好的性能。

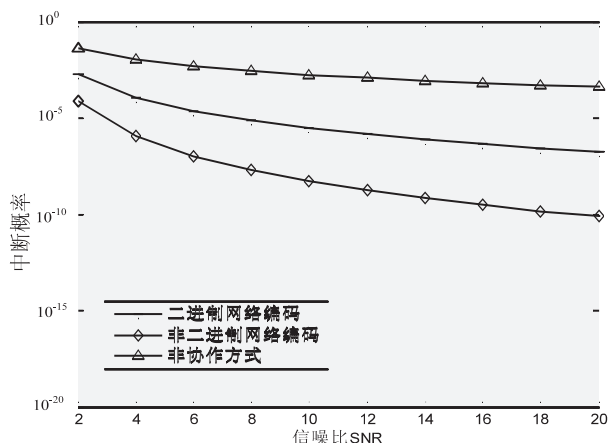


图3 $R=0.5$ 时的中断概率

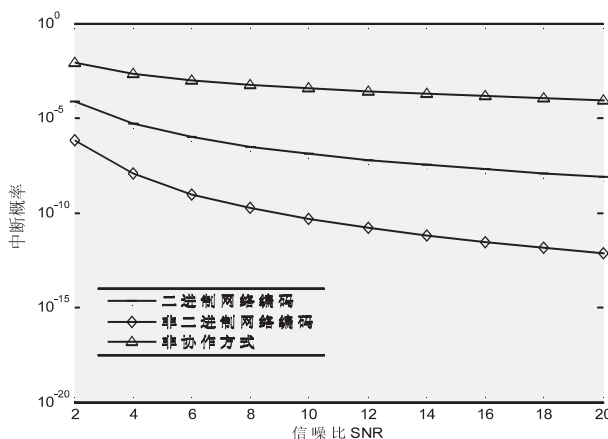


图4 $R=0.25$ 时的中断概率

对比图3和图4,可以看到不同的速率下中断概率也有所不同,速率越低中断概率越小,这是因为速率越低互信息小于速率的概率就越低,同样中断概率也小。可传输速率与中断概率成指数关系,作为指数的可传输速率越小,中断概率就越小。

5 结束语

为了降低系统的中断概率,文中给出了在两发送端两接收端模型下的网络编码协作方案。在该方案中,不同于以往的二进制异或网络编码,文中使用非线性网络编码方案,即各用户自身的信息和接收到的能被正确解码的外来用户信息进行线性叠加,然后发送给接收端,接收端利用多用户检测技术来分离和恢复出需要的信息。各用户根据能否正确解码接收到的非自身信息来决定是否进行网络编码。对不同传输方案下的中断概率进行分析和仿真结果表明文中提出的方案能有效地降低系统的中断概率,具有更好的性能。文中提出的方案可应用于对中断概率要求比较严格的协作通信方案中。

参考文献:

- [1] Proakis J G. 数字通信[M]. 张力军,张宗橙,郑宝玉,等译. 第4版. 北京:电子工业出版社,2006.
- [2] Ahlswede R, Cai N, Li S Y R, et al. Network information flow[J]. IEEE Trans. on Inf. Theory, 2000, 46(4): 1204–1216.
- [3] 李世唐,郑宝玉. 机会式网络编码的用户协作[J]. 南京邮电大学学报(自然科学报), 2010, 30(2): 27–30.
- [4] Xiao L, Fuja T E, Klieaer J, et al. A network coding approach to cooperative diversity[J]. IEEE Trans on Information Theo-

ry, 2007, 53(10): 3714–3722.

- [5] 徐娜,汪翔,倪卫明. 一种提高协作通信性能的新方法[J]. 信息与电子工程, 2010, 8(6): 742–745.
- [6] 黄琼,倪铭璟,唐伦,等. 蜂窝小区内基于网络编码技术的中继协作传输机制研究[J]. 计算机应用研究, 2001(1): 275–278.
- [7] 李世唐,郑宝玉,黄川,等. 机会是网络编码的系统中断性能[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(9): 2242–2246.
- [8] Li S Y R, Yeung R W, Cai Ning. Linear network coding[J]. IEEE Trans on Info Theory, 2003, 49(2): 371–381.
- [9] Xiao M, Medard M S. M-user cooperative wireless communications based on nonbinary network codes[C]//Proc. of IEEE Int. Symp. on Inf. Theory Workshop. [s. l.]: [s. n.], 2009: 316–320.
- [10] Xiao M, Medard M S. M-user cooperative communications based on linear network codes[J]. IEEE transactions on communications, 2010, 58(12): 3345–3351.
- [11] Rebelatto J L, Uchoa-Filho B F, Li Yonghui, et al. Generalized Distributed Network Coding Based on Nonbinary Linear Block Codes for Multi-user Cooperative Communications[C]//IEEE ISIT 2010. Austin, Texas, USA: [s. n.], 2010.
- [12] 施玉晨,白宝明,王静. 基于机会网络编码的多用户协作通信方案设计[J]. 西安电子科技大学报(自然学报), 2011, 38(2): 36–41.

(上接第 140 页)

- Word with Pervasive Networks[J]. IEEE Pervasive Computing, 2002, 1(1): 59–69.
- [2] Latiff N M A, Tsimenidis C C, Sharif B S. Performance Comparison of Optimization Algorithm for Clustering in Wireless Sensor Networks[C]//IEEE International Conference on Mobile Ad hoc and Sensor Systems. [s. l.]: [s. n.], 2007: 1–4.
- [3] Nam Do-hyun, Min Hong-Ki. An Energy-Efficient Clustering Using a Round-Robin Method in a Wireless Sensor Network[C]//5th ACIS International Conference on Software Engineering Research. [s. l.]: [s. n.], 2007: 54–60.
- [4] Heinzelman W R, Chandrakasan A, Balakrisham H. Energy-efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks[C]//Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences. [s. l.]: [s. n.], 2000.
- [5] Heinzelman W B, Chandrakasan A P, Balakrisham H. An Application-specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2002, 1(4): 660–670.
- [6] 孙利民,叶驰,廖勇. 传感器网络的路由机制[J]. 计算机科学, 2004, 31(3): 54–57.
- [7] Handy M J, Hasse M, Timmermann D. Low energy clustering hierarchy with deterministic cluster-head selection[C]//4th International Workshop on Mobile and Wireless Communica-

tions Network. [s. l.]: [s. n.], 2002: 368–372.

- [8] Ran Ge, Zhang Huazhong, Gong Shulan. Improving on LEACH Protocol of Wireless Sensor Networks Using Fuzzy Logic[J]. Journal of Information & Computational Science, 2010, 7(3): 767–775.
- [9] Muruganathan S D, Ma D C F, Bhasin R I. A Centralized Energy-Efficient Routing Protocol for Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2005, 43(3): 8–13.
- [10] 李岩,张曦煌,李彦中. LEACH-EE-基于 LEACH 协议的高效聚类路由算法[J]. 计算机应用, 2007, 27(5): 1103–1105.
- [11] Manjeshwar A, Agrawal D P. TEEN: a routing protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks[C]//Proceeding of the 15th International Parallel and Distributed Processing Symposium. [s. l.]: [s. n.], 2001: 2009–2015.
- [12] 刘园莉,李腊元,卢迪. 节能的无线传感器网络分簇路由协议的研究[J]. 传感技术学报, 2010, 23(12): 1792–1797.
- [13] 龙际珍,陈沅涛,邓冬梅,等. 基于 LEACH 协议的助理簇头分簇算法[J]. 计算机工程, 2011, 37(7): 103–105.
- [14] 杨琴,孙李. 基于最小跳数的无线传感器网络路由协议[J]. 计算机工程, 2008, 34(22): 129–131.
- [15] 邢云冰,史浩山,赵洪钢. 基于备用节点的无线传感器网络 LEACH 协议的改进[J]. 传感技术学报, 2007, 20(7): 1592–1596.

基于网络编码的多用户通信

作者: [刘沙沙](#), [梅中辉](#), [王庆斌](#)
作者单位: [南京邮电大学 通信与信息工程学院, 江苏 南京210003](#)
刊名: [计算机技术与发展](#)
英文刊名: [Computer Technology and Development](#)
年, 卷(期): 2013 (2)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjtz201302038.aspx