

文章编号:1001-893X(2010)05-0089-05

基于网络编码的用户协作分集系统性能分析^{*}

覃团发, 罗会平, 刘家锋, 罗建中

(广西大学 计算机与电子信息学院, 南宁 530004)

摘 要:针对非协作通信和传统协作通信系统不能达到高天线分集增益的问题, 提出基于网络编码的用户协作系统模型。研究了基于网络编码不同协作用户的天线分集增益, 并分析非协作机制、传统用户协作机制和基于网络编码用户协作机制的中断概率。理论分析和系统仿真表明, 基于网络编码的用户协作系统能显著降低系统中断概率, 获得更大的分集增益, 且协作用户数越多, 系统分集度越好。

关键词:协作通信; 网络编码; 分集增益; 中断概率

中图分类号:TN911.22; TP393.01 **文献标识码:**A doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2010.05.020

Performance Analysis of User Cooperative Diversity System Based on Network Coding

QIN Tuan-fa, LUO Hui-ping, LIU Jia-feng, LUO Jian-zhong

(School of Computer and Electronic Information, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: In order to solve the problem that non-cooperative communication and the conventional cooperative communication systems only obtain low antenna diversity gain, a user cooperative system model based on network coding is proposed in this paper. The antenna diversity gain with different users by implementing network coding is investigated, the outage probability performance of non-cooperative communication scheme, traditional user cooperative scheme and network coded user cooperative scheme are analysed. Theoretical analysis and experimental simulation show that cooperative scheme with network coding can reduce the system outage probability remarkably and obtain a higher diversity gain. The more cooperative users, the better diversity gain.

Key words: cooperative communication; network coding; diversity gain; outage probability

1 引 言

网络编码最初由 Ahlswede 等人^[1]提出, 它融合编码和路由的概念, 通过允许对来自不同链路的信息进行编码组合, 使网络节点既实现路由功能又实现编码功能。网络编码在无线 Mesh、无线传感器网

络、Ad Hoc 网络等无线网络中都有着极大的应用价值。文献[2]指出, 应用网络编码可减少数据分发所用时间, 提高网络吞吐量。经过网络编码优化后的无线 Mesh 网络^[3]可节省网络资源, 提高系统性能。在分布式天线系统中网络编码可有效降低系统中断概率, 节约硬件成本并提高频谱利用率^[4]。

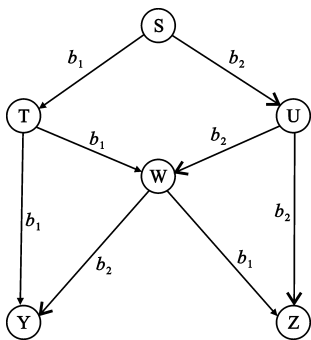
^{*} 收稿日期: 2009-12-09; 修回日期: 2010-03-10
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60962002); 广西高校人才小高地建设创新团队资助计划项目(桂教人[2007]71号); 广西信息与通讯技术重点实验室资助项目(20904)
Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No. 60962002); Program to Sponsor Teams for Innovation in the Construction of Talent Highlands in Guangxi Institutions of Higher Learning (GuiJiaoRen[2007]71); Foundation of Guangxi Key Laboratory of Information and Communication (No. 20904)

空间分集是一种对抗无线环境下衰落的有效方式。分集技术通过多个收发天线的多径传输来提高系统的抗衰落性能,降低传输误比特率。目前,关于协作分集的研究^[5]多数采用编码协作分集,将其应用在信道上来获得编码增益。文献[6]将网络编码应用在无线网络中的移动用户上,作为一个尝试性的工作,忽略其它分布式信道编码,证明网络编码能够降低系统中断概率。

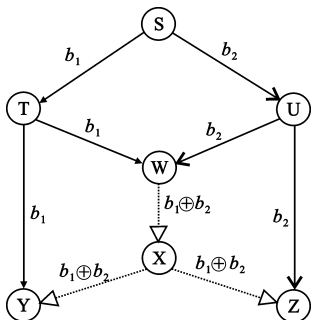
本文参考文献[6]的系统模型,假设用户间信道可靠,提出非协作通信机制、传统协作通信机制和网络编码的协作通信机制 3 种协作机制,根据误码率与其系统中断概率的关系,分析三者相同信噪比下的性能表现。同时,分析了网络编码在多用户环境下对系统分集增益的改善。实验表明,基于网络编码用户协作机制能够显著降低系统中断概率,提高系统可靠性。

2 网络编码和协作分集技术

2.1 网络编码



(a) 示例 1



(b) 示例 2

图 1 通信网络举例
Fig.1 Communication networks example

以图 1 所示网络为例来简单说明网络编码的概念^[7]。如图 1(a)所示,信源 S 发送数据 b_1 和 b_2 给

接收器 Y 和 Z,一种方案是在信道 ST、TY、TW 和 WZ 上发送 b_1 ,信道 SU、UZ、UW 和 WY 发送信息 b_2 。图 1(b)中,同样发送数据 b_1 和 b_2 给接收器 Y 和 Z,解决方案可以让 ST、TW、TY 发送信息 b_1 ,信道 SU、UW、UZ 发送信息 b_2 ,信道 WX、XY、XZ 发送 b_1 、 b_2 组合信息 $b_1 \oplus b_2$,这样,节点 Y 接收到信息 b_1 和 $b_1 \oplus b_2$ 之后, b_2 同样可以被解码出来。

不难看出,只有使用图 1(b)中的网络编码方案才可以在单位时间内从信源 S 发送 2 bit 信息到接收器 Y 和 Z,显示出了网络编码的优越性。

2.2 协作分集

现有的多天线都设置在基站端,移动终端很难安置多天线,主要原因有:移动终端对体积、质量和功耗的要求远比基站苛刻得多;理想的 MIMO 多天线系统要求相邻天线之间的间距要远大于信号波长,多个收发天线之间的传输信道相互独立(或至少是不相关的),而移动终端由于体积限制,无法做到这一点。为了解决这个问题,Sendonaris 等人提出一种新的空域分集技术——协作分集^[8]。

传统的基于分布式空时码的分集方案是将多个独立或接近独立的信道进行合并以降低无线信道的随机特性。然而,当分集度达到一定程度时,由于其统计特性已经接近 AWGN 信道,分集度的进一步增加对系统性能的改善不大。基于此,文献[6]提出了在协作分集系统中使用网络编码技术,以期获得更好的系统性能。

本文将通信机制分为 3 类,即非协作通信机制、传统协作通信机制和网络编码的协作通信机制。

对于非协作通信,源用户仅向基站发送自身数据。对于协作通信,如图 2 所示,一个完整的通信周期分为 2 个时间段,记为 T_1 和 T_2 。在传统的协作通信中, T_1 时间段内两用户分别广播自身数据给其协作用户和基站,在 T_2 时间段内协作用户无条件转发在 T_1 时间段接收到的用户数据给基站。

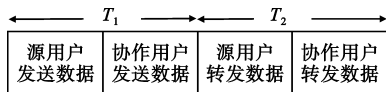


图 2 协作通信的通信周期
Fig.2 Cooperative communication cycle

网络编码的协作通信如图 3 所示,每个用户在 T_1 时间段内发送自身的数据给基站和协作用户;在 T_2 时间段内,两用户通过各自独立天线发送经过网

络编码后的数据给基站。

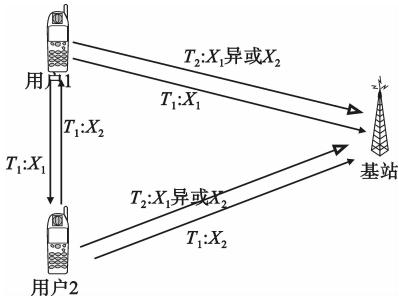


图 3 两用户的网络编码协作通信

Fig.3 Two users cooperative communication with network coding

3 用户协作系统性能理论分析

分集增益通常用分集度来衡量,基于信噪比 (signal-noise-rate, SNR) 统计特性的中断概率是研究某种协作方案分集度大小的常用方法。中断概率定义为当基站不能准确接收来自某一用户的数据时,系统通信出现中断,从而产生中断概率这一统计特性。通常情况下,分集增益决定了采用该方案时系统的中断概率的曲线斜率。系统分集度越高,中断概率越小,性能越好。因此,系统中中断概率的斜率可以用来衡量系统的分集度。

假定用户协作只发生在用户间信道可靠的情况下,在每个时间段内,信道是慢衰落且在 T_1 和 T_2 内静态独立。系统模型如图 3 所示。假设用户 1 和用户 2 在第 T_1 内的误比特率分别为 p_1 和 p_2 ,在第 T_2 内两个协作终端的发送误比特率分别为 p_{N1} 和 p_{N2} 。

传统协作通信的中断概率为

$$P_{S1} = p_1 p_{N2} + p_2 p_{N1} - p_1 p_2 \cdot p_{N1} p_{N2} \quad (1)$$

网络编码协作机制的中断概率为

$$P_{S2} = (1 - p_2) p_1 \cdot p_{N1} p_{N2} + (1 - p_1) p_2 \cdot p_{N1} p_{N2} + p_1 p_2 \quad (2)$$

为便于分析,假设所有信道的误比特率都是相等的,即 $p_1 = p_2 = p_{N1} = p_{N2} = p$,则式(1)和式(2)可简化为

$$P_{S1} = (2p^2 - p^4) \sim O(p^2) \quad (3)$$

$$P_{S2} = (p^2 + 2p^3 - 2p^4) \sim O(p^2) \quad (4)$$

由式(3)~(4)得到:

$$\forall p \in (0, 1), \Delta(P_S) = P_{S1} - P_{S2} = p^2(p - 1)^2 > 0 \quad (5)$$

非协作通信机制下,用户 1 和用户 2 在时段 T 内的误比特率分别为 p_a 和 p_b ,并假设有 $p_a = p_b =$

p ,由此可得非协作机制下系统的中断概率为

$$P = 1 - (1 - p_a)(1 - p_b) = p(2 - p) \sim O(p) \quad (6)$$

从式(3)、式(4)和式(6)可知,传统协作机制和网络编码机制均可达到分集增益 2,非协作通信的分集增益为 1。基于网络编码用户协作的中断概率小于传统协作机制。

无线网络中三用户协作如图 4 所示。传统协作通信机制下,在 T_2 时间段内任一用户均不能同时传送另外两个用户的数据给基站。因此,传统协作通信不能实现用户数大于 2 时的协作通信功能,基于此,下面仅讨论多用户的网络编码协作机制。

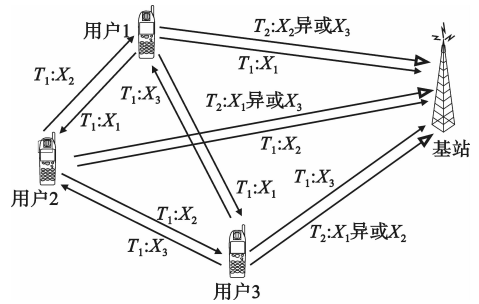


图 4 三用户网络编码协作通信

Fig.4 Three users cooperative communication with network coding

从图 4 可以看到,网络编码机制在各用户间提供一种公平的协作方式。每个用户均充当源用户和协作用户两个角色。在 T_1 时段内,每个用户发送自身的数据给其它协作用户;在 T_2 时段内,每个用户通过网络编码算法将来自其它协作伙伴的数据处理之后发送出去。当有一个或多个用户的信息不能被基站正确接收时,系统中断发生。假设系统的中断概率为 P_S ,用集合 $\mathfrak{R} = \{a, b, c, a \oplus b, a \oplus c, b \oplus c\}$ 表示在整个时段内系统发送的数据包集合。令集合 $\delta \subseteq \mathfrak{R}$,且 δ 表示基站没有正确接收到的信号。很显然,当 $|\delta| \leq 2$ 时,3 个用户发送的数据在编码信息的协助下均可被正确解码。而当 $|\delta| \geq 4$ 时,易知系统中断发生的概率为 1。当 $|\delta| = 3$ 时,除以下 4 种情况外,3 个用户发送的数据均可完全恢复出来:

- (1) 当 $\delta = \{a, b, c\}$,所有的数据都不能被正确解码出来;
- (2) 当 $\delta = \{a, a \oplus b, a \oplus c\}$,不能正确解码出数据 a ;
- (3) 当 $\delta = \{b, a \oplus b, b \oplus c\}$,不能正确解码出数据 b ;
- (4) 当 $\delta = \{c, b \oplus c, a \oplus c\}$,不能正确解码出数

据 c 。

假设 δ 非以上 4 种情况,例如 $\delta = \{b, c, a \oplus c\}, \delta^c = \{a, a \oplus b, b \oplus c\}$, δ^c 表示基站正确接收到的数据,经过 $b = a \oplus (a \oplus b)$ 和 $c = b \oplus (b \oplus c)$ 可以正确解码出数据 a, b, c 。

假定系统信道服从准瑞利慢衰落分布,信号 $s \in \Re$,信道增益 $C_s \in (0,1)$ 。假设所有用户的发送功率相等,对于三用户协作下的中断概率,有:

$$P_s = \frac{|N|+1}{\binom{|N|}{|N|}} p_s^3 (1-p_s)^3 + p_s^4 (1-p_s)^2 + p_s^5 (1-p_s) + p_s^6 = \frac{1}{5} p_s^3 + O(p_s^4) \sim O\left(\frac{1}{SNR}\right)^3 \tag{7}$$

网络中含有 N 个用户时,用户 i 在 T_2 时段需发送 $x_i \oplus \sum_{j=1}^N x_j$ 。根据式(7)可以得到更一般的中断概率表达式:

$$P_s = \frac{N}{\binom{2N}{N+1}} p_s^N (1-p_s)^N + \sum_{k=N+1}^{2N} p_s^k (1-p_s)^{2N-k} = \frac{N}{\binom{2N}{N+1}} p_s^N (1-p_s)^N + O(p_s^{N+1}) \sim O\left(\frac{1}{SNR}\right)^N \tag{8}$$

从式(8)可以看出,中断概率与信噪比的 N 次方成反比,因此理论上系统可以达到分集增益 N 。但是,当 $N \rightarrow \infty$,式(8)的前提条件已经不再满足:每个用户要确保系统内其它 $N-1$ 用户的数据都能够准确地解调出来;同时,当 $N \rightarrow \infty$,系统的发送功率将趋于无穷大,这在实际系统中是不可能的。一种解决方法是假设在 T_2 时间段用户 i 发送用户子集的数据,而不是全部用户的数据^[6]。

4 实验仿真结果

系统的每个用户配置一副天线,多用户通过协作实现空间分集。本文采用 2PSK 调制方式,信道噪声为加性高斯白噪声。其信噪比与误码率的关系为

$$p \approx \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{SNR}) \tag{9}$$

由公式(1)、(2)、(6)、(9)可以得出两用户下非

协作通信、传统协作通信和网络编码的协作通信中断概率曲线,如图 5 所示。利用公式(2)、(7)、(9)分析两用户、三用户、四用户下基于网络编码的用户协作机制的性能曲线图,如图 6 所示。

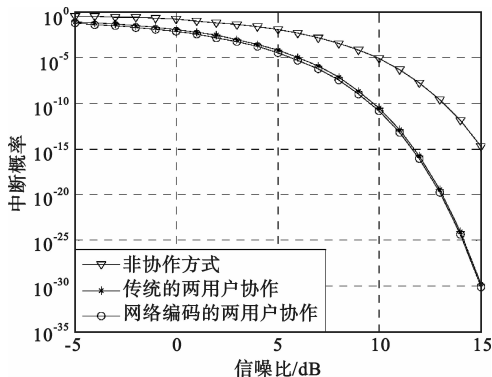


图 5 两用户协作下,信噪比与中断概率的关系
Fig.5 SNR versus outage probability under 2 users cooperation

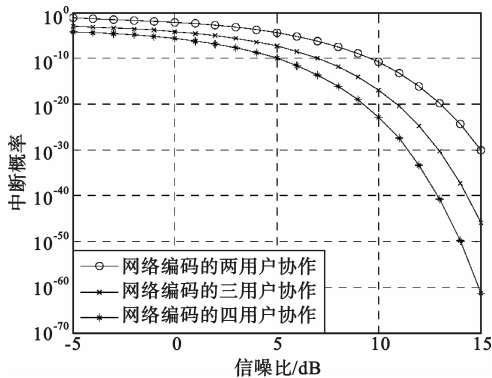


图 6 不同用户数协作性能比较
Fig.6 Performance comparison of different number of users cooperation

从图 5 和图 6 可以得出以下结论:

- (1) 传统两用户协作通信和基于网络编码的两用户协作通信均可以达到分集增益 2,并且网络编码的两用户协作通信中断概率小于传统两用户协作通信中断概率,这与式(5)中分析是一致的;
- (2) 协作用户数越多,系统中中断概率越小,系统性能越好。在相同的网络编码条件下,四用户协作的平均中断概率与三用户协作相比,降低了 94.91%;三用户协作的平均中断概率与两用户协作相比,降低了 98.54%,与理论分析得到的协作用户数越多系统性能越好的结论相符合;
- (3) 协作用户数越多,分集增益度越大。相比非协作通信,两用户协作机制能够达到分集增益 2,三用户协作下的网络编码分集增益为 3,四用户协作下的网络编码分集增益为 4。非协作通信系统性

能最差,这是因为非协作通信仅依靠单一信道发送传送数据,抗信道衰落能力较差。

5 结 论

本文以网络编码协作通信系统模型为出发点,通过理论分析,研究网络编码对系统分集增益和中断概率的影响。基于网络编码的思想,允许多协作伙伴对接收到的信息进行编码组合,解决传统协作通信系统不能达到高天线分集增益的问题,降低系统的中断概率。实验仿真表明,网络编码用户协作机制能够显著提高系统性能,特别在多用户时优势更加明显。但是从系统的工作过程不难看出,网络编码的使用对用户的硬件处理性能要求有所提高,系统功耗、信号时延都会增加。网络编码对数据同步要求较高,需要对信道状态实时跟踪,所以仅适用于慢衰落信道。

参考文献:

- [1] Ahlswede R, Cai N, Li S-Y R, et al. Network Information Flow [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46(4): 1204 - 1216.
- [2] 覃团发,廖素芸,罗会平. 无线 mesh 网络中网络编码的文件共享模型[J]. 电讯技术, 2008, 48(5): 17 - 20.
QIN Tuan-fa, LIAO Su-yun, LUO Hui-ping. The file sharing model based on network coding for wireless mesh network[J]. Telecommunication Engineering, 2008, 48(5): 17 - 20. (in Chinese)
- [3] 覃团发,廖素芸,罗会平,等. 支持网络编码的无线 Mesh 网络路由协议[J]. 北京邮电大学学报, 2009, 32(1): 14 - 18.
QIN Tuan-fa, LIAO Su-yun, LUO Hui-ping, et al. A network coding aware routing protocol in wireless mesh network [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2009, 32(1): 14 - 18. (in Chinese)
- [4] 覃团发,罗会平. 基于网络编码的分布式天线系统性能分析[J]. 中兴通讯技术, 2009, 15(1): 43 - 45.
QIN Tuan-fa, LUO Hui-ping. The performance analysis of distributed antenna systems based on network coding[J]. ZTE Communications, 2009, 15(1): 43 - 45. (in Chinese)
- [5] Hunter T E, Nosratinia A. Cooperation Diversity through Coding [C]//Proceedings of IEEE ISIT. Lausanne, Switzerland: IEEE, 2002: 220 - 228.
- [6] Chen Y, Kishore S, Li J. Wireless Diversity through Network Coding [C]//Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference(WCNC). Las Vegas, NV: IEEE, 2006: 1 - 6.
- [7] Li S Y R, Yeung R W, Cai N. Linear network coding[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2003, 49(2): 371 - 381.
- [8] Sendonaris A. User Cooperation Diversity Part I and II[J]. IEEE Transactions on Communications, 2003, 1(11): 1927 - 1938.

作者简介:

覃团发(1966 -),男,广西宾阳人,1997年获博士学位,现为广西大学计算机与电子信息学院教授、副院长,主要研究方向为无线多媒体通信、网络编码、视频编码和图像检索;

QIN Tuan-fa (male) was born in Binyang, Guangxi Zhuang Autonomous Region, in 1966. He received the Ph. D. degree in 1997. He is now a professor and also the Vice Dean of School of Computer and Electronic Information, Guangxi University. His research interests include wireless multimedia communications, network coding, video encoding and image retrieval.

Email: qintuanfa@163.com

罗会平(1982 -),女,浙江台州人,2006年获学士学位,现为广西大学计算机与电子信息学院硕士研究生,主要研究方向为网络编码、协作分集;

LUO Hui-ping (female) was born in Taizhou, Zhejiang Province, in 1982. She received the B.S. degree in 2006 and is now a graduate student at Guangxi University. Her research interests include network coding and cooperative diversity.

Email: luohuiping@mail.gxu.cn

刘家锋(1983 -),男,山东济宁人,2008年获学士学位,现为广西大学计算机与电子信息学院硕士研究生,主要研究方向为网络编码和无线传感器网络;

LIU Jia-feng (male) was born in Jining, Shandong Province, in 1983. He received the B.S. degree in 2008 and is now a graduate student at Guangxi University. His research interests include network coding and wireless sensor network.

Email: ljfscr@126.com

罗建中(1984 -),男,广西合浦人,2006年获学士学位,现为广西大学计算机与电子信息学院硕士研究生,主要研究方向为传感器网络、网络编码。

LUO Jian-zhong (male) was born in Hepu, Guangxi Zhuang Autonomous Region, in 1984. He received the B.S. degree in 2006 and is now a graduate student at Guangxi University. His research interests include network coding and wireless sensor network.

Email: jzluo.gxu@gmail.com