

双时隙多用户线性网络编码协作的中断概率分析

唐震洲, 李 昌, 阮秀凯, 胡 倩

(温州大学物理与电子信息工程学院, 浙江温州 325035)

摘 要: 线性网络编码协作(LNCC)是一种将线性网络编码与协作通信相结合的技术,能够提高频带利用率,降低中断概率. 该文从理论上分析了双时隙 $M(M \geq 2)$ 用户 LNCC 的紧近似中断概率,并通过 Monte Carlo 仿真验证了理论分析的正确性. 同时,通过分析渐近中断概率,该文给出了双时隙 M 用户 LNCC 的分集阶数. 为了说明线性网络编码为协作通信带来的额外增益,该文将双时隙 M 用户 LNCC 与分集阶数相同的传统 M 用户放大-转发协作系统进行了性能比较. 结果发现,给定相同的有效频谱效率,前者的中断概率要显著低于后者.

关键词: 协作通信; 线性网络编码; 中断概率; 多用户

中图分类号: TN925

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2016)02-0289-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2016.02.007

Outage Probability of Two-Slots Multiuser Linear Network Coded Cooperation

TANG Zhen-zhou, LI Chang, Ruan Xiu-kai, HU Qian

(College of Physics and Electronic Information Engineering, Wenzhou University, Wenzhou, Zhejiang 325035, China)

Abstract: Linear network coded cooperation (LNCC) is a technology that integrates linear network coding into cooperative communication. It can improve the spectrum efficiency and decrease outage probability of data transmissions. In this paper, the outage probability of the two-slots LNCC with $M(M \geq 2)$ users is theoretically analyzed, tight approximated outage. Monte Carlo simulations are conducted to verify the theoretical analyses. Moreover, the asymptotic outage probability and the diversity order of two-slots M -users LNCC are also studied. In order to demonstrate the benefits introduced by linear network coding to cooperative communication, the performance comparison between the two-slots M -users LNCC and the traditional M -users Decode-and-Forward cooperation with the same diversity order is carried out. The results show that given the same effective spectrum efficiency, the outage probability of two-slots M -users LNCC is greatly lower than that of the latter.

Key words: cooperative communications; linear network coding; outage probability; multiuser

1 引言

线性网络编码协作 (Linear Network Coded Cooperation, LNCC) 是一种结合了协作通信 (Cooperative Communications, CC) 与线性网络编码 (Linear Network Coding, LNC) 的传输技术. 其中, 协作通信的基本思想是在多用户环境中, 多个单天线的节点按照一定的方式来共享彼此的天线, 以产生虚拟 MIMO (Multiple-Input

Multiple-Output) 的效果, 从而获得分集增益^[1,2]. 线性网络编码则是由 Li^[3] 和 Koetter^[4] 等在 Ahlswede 的网络编码理论^[5] 基础上提出的. 中继节点将接收到的多个原始码字在有限域内进行线性组合, 形成一个新的码字后进行转发. LNC 能够提高网络吞吐量、节省带宽和提高传输可靠性^[6-8].

由于 LNCC 能够显著提高数据传输的效率和可靠性, 近几年来已经成为无线通信领域的研究热点之一.

收稿日期: 2014-08-13; 修回日期: 2015-05-04; 责任编辑: 蓝红杰

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61323210, No. 61201426, No. 61303211); 浙江省自然科学基金 (No. LY15F030010, No. LQ13F020010); 2014 年省教育厅科研项目 (No. Y201430529)

较早期有关网络编码协作的研究,主要是将二进制网络编码(Binary Network Coding, BNC)与协作通信相结合^[9,10].文献[10]给出了一个结合了 BNC 的双用户协作系统,并证明了将 BNC 与协作通信相结合,能够提高传输的频谱效率.但是,该方式的网络编码协作的分集阶数仍然为 2.文献[9]则将 BNC 应用于非对称三点协作传输系统中,既得到了无线通信传输系统的分集增益,也可得到系统的编码增益.

虽然基于 BNC 的协作通信能够在传统协作通信基础上进一步提高,但由于 BNC 的局限,未能充分发挥网络编码的优势.文献[11]指出了采用 BNC 方式无法实现全分集,并提出了一种采用 LNC 的协作通信机制,并命名为 DNC (Diversity Network Codes).文献[11]分析了 DNC 系统的近似中断概率,理论上证明了当有限域足够大时, M 用户的 DNC 可以达到 $(2M-1)$ 的分集阶数.但是 DNC 在获得高分集阶数的同时,其编码效率却非常低,只有 $1/M$.文献[12]在 DNC 的基础上,进一步提出了 GDNC (Generalized DNC).GDNC 允许每个用户在广播阶段广播多个码字,提高了网络编码协作系统的全局编码效率.但是文献[12]没能给出 GDNC 中断概率精确值的闭式表达式,而只是给出了 GDNC 的分集阶数.文献[13]分析了双时隙 M 用户 LNCC 系统的中断概率下界,但没有推导精确中断概率的闭式解.文献[14]将 GDNC 应用于线型网络(Line networks),并给出了其分集阶数.但同样,也没有给出精确的中断概率.文献[15,16]给出了基于 LNC 的双用户协作的精确中断概率,但却没有把结果扩展到 M 用户.而据我们所知,基于 LNC 的多用户协作的精确中断概率至今没有得到解决.

本文从中断性能和分集性能上出发,对双时隙 M ($M \geq 2$) 用户的 LNCC 系统进行了研究.本文从理论上分析了系统的紧近似中断概率,并通过 Monte Carlo 仿真验证了理论分析的正确性.同时,通过分析系统的渐近中断概率,得到系统的分集阶数为 $M+1$.为了说明 LNC 为协作分集带来的好处,本文将基于 LNC 的双时隙 M 用户协作系统与分集阶数同为 $M+1$ 的传统 M 用户放大转发协作系统(DF CC)进行了性能比较.可以发现,给定相同的有效频谱效率^{**},前者的中断概率要显著低于后者.

2 系统模型

一个基于 LNC 的双时隙多用户协作系统有 M ($M \geq 2$) 个用户节点 u_i ($i=1, \dots, M$) 和一个目的节点(u_0).每个用户都有一个独立的码字 x_i ($i=1, 2, \dots, M$) 要发送给 u_0 .本文假设所有信道都是零均值单位方差的独立同分布的瑞利衰落信道,并假设存在均值为 0, 方差

为 N_0 的加性高斯白噪声(AWGN).所有的信道都是块衰落(Block Fading)信道,即信道在一个时隙的持续时间内是平坦的,但在相邻的时隙之间,信道的衰落是独立的,不相关的.我们把第 $k \in \{1, 2\}$ 个阶段, u_i , $i \in \{1, 2, \dots, M\}$ 到 u_j , $j \in \{0, 1, \dots, M\}$ 的信道系数记为 $h_{i,j,k}$;把相应的 AWGN 记为 $n_{i,j,k}$.同时假设信道特性是互易的(Reciprocal),即 $h_{i,j,k} = h_{j,i,k}$ ^[11,12,16].另外,我们把解码集 D_i 定义为广播阶段所有能够正确接收到节点 u_i 所发送的码字 x_i 的节点序号集合;而把集合 R_i 定义为广播阶段 u_i 所能正确接收的码字的源节点序号集合.

系统的通信过程分为两个阶段:第一个阶段为广播阶段, u_i ($i=1, \dots, M$) 通过正交信道广播各自的码字 x_i , 占用一个时隙.该阶段, $y_{i,j,1} = h_{i,j,1}x_i + n_{i,j,1}$. 其中 y 为接收到的信道码字.假设所有的 x_i 都是独立同分布的高斯码字,且所有信道都具有相同的平均信噪比(Signal-to-noise Ratio, SNR), 则 x_i 与 $y_{i,j,1}$ 之间的互信息量 $I_{i,j,1}$ 为

$$I_{i,j,1} = \frac{1}{M} \log_2(1 + |h_{i,j,1}|^2 \text{SNR}) \quad (1)$$

其中,引入系数 $1/M$,是由于信道资源被 M 个用户分享.当 $I_{i,j,1}$ 小于预期频谱效率 r (bit/s/Hz) 时,链路(或传输)就会发生中断,即,对于瑞利衰落信道,中断概率 P_o 为

$$P_o = \Pr(I_{i,j,1} < r) = \Pr(|h_{i,j,1}|^2 < g) \\ = \int_0^g e^{-x} dx = 1 - e^{-g} \quad (2)$$

其中 $g = (2^r - 1)/\text{SNR}$.将 e^{-g} 进行泰勒级数展开,当 SNR 足够大时,可以得到 $P_o \sim g$, 其中,符号 $\sim$ 表示当 $\text{SNR} \rightarrow +\infty$ 时, $P_o/g \rightarrow 1$.

第二个阶段为网络编码协作阶段,同样占用一个时隙.如果 $R_i \neq \emptyset$, 则 u_i 将自己在广播阶段所正确接收的所有码字以及自己的码字进行 LNC 后,发送给 u_0 . 即:

$$y_{i,0,2} = h_{i,0,2}x_i^c + n_{i,0,2}, x_i^c = \sum_{r \in R_i \cup \{i\}} g_i^r x_r \quad (3)$$

其中, x_{ic} 为 u_i 发送的经过 LNC 后的码字, g_i^r 为 x_i 的网络编码系数,取自于有限域 $\text{GF}(2^n)$. 而如果 $R_i = \emptyset$, 则 u_i 在此阶段重复发送 x_i .

3 中断概率分析

3.1 解码集非空时的中断概率

由于所有的用户都是等价的,为了不失一般性,我

* 本文将所有 M 个用户通过正交信道完成一次传输所需的时间定义为一个“时隙”.

** 有效频谱效率是指整个协作过程中,单位带宽和单位时间内成功传输的用户数据量.比如:假设系统带宽为 B , 整个协作过程所需时间为 T , 用户发送了一个 n 比特用户信息,无论采用何种协作方式,该系统的有效频谱效率为: $n/(B \cdot T)$.

们分析用户 u_i 的中断概率. 此时, $D_i \neq \emptyset$. 令 $\widehat{D}_i \triangleq D_i \cup \{i\}$, 并把集合 X_i 定义为在广播阶段能被 $\widehat{D}_i$ 中的节点正确接收的用户序号集合 (包含 $u_d (d \in \widehat{D}_i)$ 本身). 显然, $|\widehat{D}_i| \leq |X_i| \leq M$, 且, 对于一个给定的 D_i , $\Pr^X(a) \triangleq \Pr(|X_i| = a | D_i)$

$$= \binom{|\widehat{D}_i|}{a - |\widehat{D}_i|} (1 - P_o^{|\widehat{D}_i|})^{a - |\widehat{D}_i|} (P_o^{|\widehat{D}_i|})^{M - a} \quad (4)$$

式(4)的证明过程见附录 1.

在整个网络编码协作的过程中, 至少共有 $|\widehat{D}_i| + |X_i|$ 个包含且仅包含 X_i 中用户信息的码字被发送给 u_0 , 其中包含 $|X_i|$ 个原始码字和 $\widehat{D}_i$ 个 LNC 码字. 同时, 在第二阶段, 还有 $(|X_i| - |\widehat{D}_i|)$ 个 LNC 码字 $x_y (y \in X \cap \widehat{D}_i)$ 被发送给 u_0 .

如果 $|X_i| = M$, 则这 $(|X_i| - |\widehat{D}_i|)$ 个码字 $x_y (y \in X \cap \widehat{D}_i)$ 都包含且仅包含 X_i 中用户的信息. 此时, 总共有 $|\widehat{D}_i| + |X_i| + (|X_i| - |\widehat{D}_i|) = 2|X_i| = 2M$ 个包含且仅包含 X_i 中用户的信息的码字, 其中包含 M 个原始码字和 M 个 LNC 码字. 由 LNC 的解码条件可知, 对于一个给定的 $\widehat{D}_i (D_i \neq \emptyset)$, 当且仅当: ①广播阶段从 u_i 到 u_0 的直传链路中断, 且 ② $2M - 1$ 个包含且仅包含 $x_r (r \in X_i)$ 的码字中, 至少有 M 个码字的传输过程发生中断时, 则 x_i 的传输发生中断. 即, 对于一个给定的 $D_i (D_i \neq \emptyset)$, x_i 的中断概率 $P_o^1(x_i | D_i, |X_i| = M)$ 为:

$$P_o^1(x_i | D_i, |X_i| = M) = P_o \cdot \Pr^X(M) \sum_{k=M}^{2M-1} \Pr^{\text{out}}(2M-1, k) \quad (5)$$

其中,

$$\Pr^{\text{out}}(a, b) = \binom{a}{b} P_o^b (1 - P_o)^{a-b} \quad (6)$$

表示 a 条链路中有 b 条链路发生中断的概率.

而如果 $|X_i| < M$, 则只要这 $(|X_i| - |\widehat{D}_i|)$ 个属于 X_i 但不属于 $\widehat{D}_i$ 的用户 $u_y (y \in X \cap \widehat{D}_i)$ 在广播阶段没有正确接收来自 X_i 之外的任何用户的码字, 则它们的 LNC 码字 $x_y (y \in X \cap \widehat{D}_i)$ 同样包含且仅包含 X_i 中用户的信息. 因此, $(|X_i| - |\widehat{D}_i|)$ 个 $x_y (y \in X \cap \widehat{D}_i)$ 中有 $n (0 \leq n \leq |X_i| - |\widehat{D}_i|)$ 个包含且仅包含 X_i 中用户的信息的概率 $\Pr^Y(n)$ 为

$$\Pr^Y(n) = \binom{|X_i| - |\widehat{D}_i|}{n} (1 - P_o^{M - |X_i|})^{|X_i| - |\widehat{D}_i| - n} (P_o^{M - |X_i|})^n \quad (7)$$

这时, 对于一个给定的 $\widehat{D}_i (D_i \neq \emptyset)$, 如果 $|X_i| < M$, 只有当: ①广播阶段从 u_i 到 u_0 的直传链路中断, 且 ② $|\widehat{D}_i| + |X_i| + n - 1$ 个包含且仅包含 $x_r (r \in X_i)$ 的码字中, 至少有 $|\widehat{D}_i| + n$ 个码字的传输过程发生中断时, 则 x_i 的传输才有可能发生中断. 即, 对于一个给定的 $D_i (D_i \neq \emptyset)$, x_i 的中断概率 $P_o^1(x_i | D_i, |X_i| < M)$ 为:

$$P_o^1(x_i | D_i, |X_i| < M) \approx P_o \sum_{x=|\widehat{D}_i|}^{M-1} \Pr^X(x) \sum_{n=0}^{x-|\widehat{D}_i|} \Pr^Y(n) \cdot \sum_{k=|\widehat{D}_i|+n}^{|\widehat{D}_i|+x+n-1} \Pr^{\text{out}}(|\widehat{D}_i| + x + n - 1, k) \quad (8)$$

根据式(5)和(8), 可以得到

$$P_o^1(x_i | D_i) = P_o^1(x_i | D_i, |X_i| = M) + P_o^1(x_i | D_i, |X_i| < M) \quad (9)$$

$$\begin{aligned} P_o^1(x_i) &= \sum_{D_i, D_i \neq \emptyset} \Pr(D_i) P_o^1(x_i | D_i) \\ &= \sum_{|\widehat{D}_i|=1}^{M-1} \binom{M-1}{|\widehat{D}_i|} (1 - P_o)^{|\widehat{D}_i|} P_o^{M-|\widehat{D}_i|} \cdot P_o^1(x_i | D_i) \\ &= \sum_{|\widehat{D}_i|=1}^{M-1} \Pr^{\text{out}}(M-1, M-|\widehat{D}_i|) P_o^1(x_i | D_i) \end{aligned} \quad (10)$$

3.2 解码集为空集时的中断概率

显然, 若 $D_i = \emptyset$, 由于信道特性互易, 则 $R_i = \emptyset$. 此时, u_0 最终接收到的是 x_i 在两个阶段经过独立的信道衰落后的信号. 因此, u_0 可以对两个阶段的信号进行最大比合并 (Maximal Ratio Combining, MRC), 总的互信息量为:

$$I_{i,0}^{\text{MRC}} = \frac{1}{M} \log_2 [1 + (|h_{i,0,1}|^2 + |h_{i,0,2}|^2) \text{SNR}] \quad (11)$$

对于独立的瑞利衰落信道, 此时的中断概率为

$$P_o^{\text{MRC}} = \Pr(I_{i,0}^{\text{MRC}} < r) = \Pr(|h_{i,0,1}|^2 + |h_{i,0,2}|^2 < g) \quad (12)$$

其中, $|h_{i,0,1}|^2 + |h_{i,0,2}|^2$ 服从均值为 2 的二阶爱尔兰分布 (Erlang distribution). 因此,

$$P_o^{\text{MRC}} = \int_0^g \frac{x^2 e^{-x}}{\Gamma(3)} dx = 1 - e^{-g} \sum_{j=0}^1 \frac{1}{j!} g^j = 1 - (1+g)e^{-g} \quad (13)$$

其中, $\Gamma(a)$ 表示参数为 a 的 Gamma 函数. 而 $\Pr(D_i = \emptyset) = P_o^{M-1}$. 因此, 当 $D_i = \emptyset$ 时, x_i 的中断概率 $P_o^2(x_i)$ 为:

$$P_o^2(x_i) = \Pr(D_i = \emptyset) P_o^{\text{MRC}} = P_o^{M-1} P_o^{\text{MRC}} \quad (14)$$

于是, 由式(10)和(14), 我们可以得到双时隙 M 用户 LNCC 系统的中断概率为 $P_{\text{out}} = P_o^1(x_i) + P_o^2(x_i)$.

3.3 中断概率的渐近特性及分集阶数

当 $\text{SNR} \rightarrow +\infty$ 时,由式(10)可以得到:

$$P_o^1(x_i) \sim \binom{2M-1}{M} P_o^{M+1} \sim \binom{2M-1}{M} g^{M+1} \quad (15)$$

可以看出, $D_i \neq \emptyset$ 时, M 个用户的双时隙 LNCC 系统的分集阶数为 $M+1$. 而当 $\text{SNR} \rightarrow +\infty$ 时,将 e^{-g} 进行泰勒级数展开,可以得到 $P_o^{\text{MRC}} \sim 0.5g^2$, 因此由式(14)可以得到 $P_o^2(x_i) \sim 0.5g^{M+1}$, 即 $D_i = \emptyset$ 时, M 个用户的双时隙 LNCC 系统的分集阶数也为 $M+1$. 综上所述,可知

$$P_{\text{out}} \sim \left[\binom{2M-1}{M} + 0.5 \right] g^{M+1} \quad (16)$$

且 M 用户的双时隙 LNCC 系统的分集阶数为 $M+1$.

4 数值及仿真结果

为了验证上述理论分析,本文基于 MATLAB 平台,进行了大量 Monte Carlo 仿真. 仿真过程中,所有信道都建模为零均值单位方差的独立同分布的互易块衰落瑞利信道. 预期频谱效率 r 设置为 1 bit/s/Hz. 每组仿真包含 10^7 次实验,取其平均值作为观测值.

图1所示为双时隙 M 用户 LNCC 系统中,理论中断概率与仿真结果的对比. 从图中可以看出,理论值与仿真值几乎完全重合,这进一步验证了式(10)和(14)的紧近似特性. 图2所示为双时隙 M 用户 LNCC 系统的中断概率渐近特性. 可以发现,当 SNR 足够大时,理论值曲线(实线)与渐近值曲线(虚线)能够完全重合. 这验证了渐进特性分析的正确性.

为了考察 LNC 为协作通信带来的增益,我们将 M 用户 LNCC 系统与传统的非网络编码的 M 用户 DF 协作系统的性能进行了比较. 非网络编码的 DF 协作的工作过程如下:整个过程分为两个阶段,共 $M+1$ 个时隙. 第一个阶段也是广播阶段,包含 1 个时隙,所有用户通过正交信道广播自己的码字. 第二个阶段是 DF 协作阶段,包含 M 个时隙. 在第 i 个时隙,所有能够正确接收 x_i 的用户(包括 u_i 本身),转发 x_i ; 而不能正确接收 x_i 的

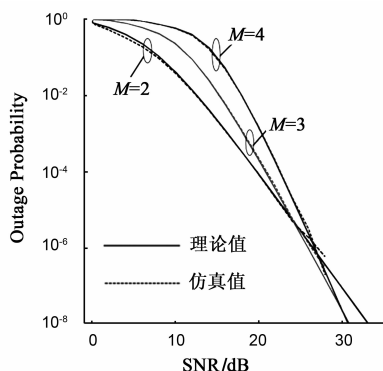


图1 双时隙 M 用户 LNCC 系统的中断概率, 仿真值与理论值的对比($r=1$ bit/s/Hz)

户则发送自己的码字. 显然,在整个通信过程中,每个用户的码字都被发送了 $M+1$ 次. 假设给定相同的有效频谱效率,由于 DF 协作需要 $M+1$ 个时隙,而 LNCC 与单用户 MRC 都只需要两个时隙,因此,当 LNCC 的信道频谱效率为 r (bit/s/Hz) 时,DF 协作的信道频谱效率 r^{DF} 应该为 $0.5(M+1)r$ (bit/s/Hz). 此时,链路的中断概率为 $P_o^{\text{DF}} = 1 - e^{-(2^{M+1}r - 1)/\text{SNR}}$. 于是,我们可以得到 DF 协作的中断概率 P_o^{DF} 为

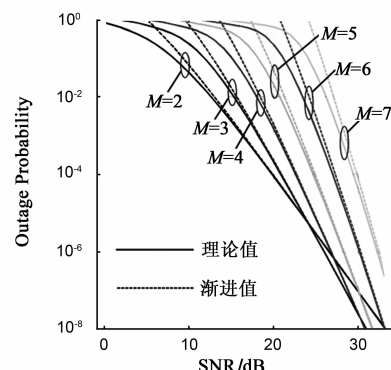


图2 双时隙 M 用户 LNCC 系统的中断概率渐近特性 ($r=1$ bit/s/Hz)

$$P_o^{\text{DF}} = \sum_{|D_i|=0}^{M-1} \binom{M-1}{|D_i|} (1 - P_o^{\text{DF}})^{|D_i|} (P_o^{\text{DF}})^{M-1-|D_i|} \Pr[|h_{i,0,1}|^2 + \sum_{r \in \hat{D}_i} |h_{1,0,r+1}|^2 + \sum_{r \in \hat{D}_i} |h_{r,0,i+1}|^2 < g] \quad (17)$$

当 $\text{SNR} \rightarrow +\infty$ 时,对于瑞利衰落信道,根据文献[2],有

$$P_o^{\text{DF}} \sim \frac{1}{(M+1)!} g^{M+1} \quad (18)$$

由式(18)可知,该 DF 协作系统的分集阶数同样是 $M+1$. 但 DF 协作需要 $M+1$ 个时隙才能获得 $M+1$ 的分集阶数,而网络编码协作却只用 2 个时隙就能实现 $M+1$ 的分集阶数.

图3所示为给定相同的有效频谱效率的情况下,这两种不同的分集机制之间分集特性和中断概率的比较. 从图中曲线的斜率可以发现, LNCC 机制与 DF 协作机制的分集阶数相同,但当 $M > 2$ 时, LNCC 机制的中断概率要显著低于 DF 协作机制,且用户数量越大,优势越明显. 当然,相对于传统的 DF 协作, LNCC 需要额外的开销. 首先, LNCC 在协作阶段所传输的 LNC 码字中必须包含构成该 LNC 码字的所有原始码字的系数,以便目的节点进行解码. 这会降低数据包的有效载荷率. 当采用有限域 $\text{GF}(2^n)$ 时, M 用户的 LNCC 至少需要在数据包头部增加 $n \cdot M$ 个比特. 其次,利用高斯消元法进行 LNC 解码的算法复杂度为 $O(n^3)$. 当用户数量较多时,对于存储空间和运算能力均有限的移动终端节点而言,解码运算将会占用大量的 CPU 资源.

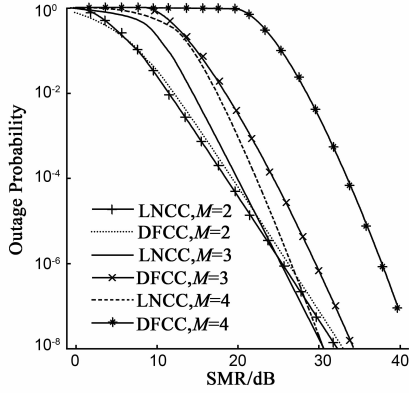


图3 在给定有效频谱效率的情况下, M 用户 LNCC 以及 M 用户 DF 协作的分集特性和中断概率特性对比

5 总结

本文推导了双时隙 M ($M \geq 2$) 用户 LNCC 系统的紧近似中断概率, 并通过分析系统的渐近中断概率, 得到系统的分集阶数为 $M + 1$. 本文将双时隙 M 用户 LNCC 系统与分集阶数同为 $M + 1$ 的传统 M 用户 DFCC 系统进行了性能比较. 比较结果显示, 给定相同的有效频谱效率, 前者的中断概率要显著低于后者. 这说明 LNCC 不仅能够产生分集增益, 还能够产生网络编码增益. 且双时隙 M 用户 LNCC 系统的编码效率为 $1/2$, 在实现了很低的中断概率的同时, 又保证了编码效率. 双时隙 M 用户 LNCC 系统能够广泛应用于多对一的数据传输, 比如无线传感器网络的数据收集等, 具有广阔的应用空间.

附录 1

式(4)证明如下:

给定 D_i , 广播阶段共有 $|X_i|$ ($|\hat{D}_i| \leq |X_i| \leq M$) 个码字能被 $\hat{D}_i$ 中的节点正确接收 (包含 x_r ($r \in \hat{D}_i$)). 即: 共有 $|X_i| - |\hat{D}_i|$ 个不属于 $\hat{D}_i$ 的用户的码字在广播阶段能被 D_i 中至少一个用户正确接收, 且有 $M - |X_i|$ 个不属于 $\hat{D}_i$ 的用户的码字在广播阶段不能被 D_i 中任一个用户正确接收. 而 u_j ($j \in \hat{D}_i$) 的码字 x_j ($j \in \hat{D}_i$) 在广播阶段能被 D_i 中至少一个用户正确接收的概率为 $1 - P_o^{|\hat{D}_i|}$; x_j ($j \in \hat{D}_i$) 在广播阶段不能被 D_i 中任一个用户正确接收的概率为 $P_o^{|\hat{D}_i|}$. 令 $|X_i| = a$, 我们有

$$\Pr(|X_i| = a | D_i) = \binom{|\hat{D}_i|}{a - |\hat{D}_i|} (1 - P_o^{|\hat{D}_i|})^{a - |\hat{D}_i|} (P_o^{|\hat{D}_i|})^{|\hat{D}_i| - (a - |\hat{D}_i|)}$$

$$= \binom{|\hat{D}_i|}{a - |\hat{D}_i|} (1 - P_o^{|\hat{D}_i|})^{a - |\hat{D}_i|} (P_o^{|\hat{D}_i|})^{M - a} \quad (A1)$$

当 $\text{SNR} \rightarrow \infty$, 则 $(1 - P_o^{|\hat{D}_i|})^{a - |\hat{D}_i|} \rightarrow 1$, 因此

$$\Pr(|X_i| = a | D_i) \sim \binom{|\hat{D}_i|}{a - |\hat{D}_i|} (P_o^{|\hat{D}_i|})^{M - a} \quad (A2)$$

式(4)证明完毕.

参考文献

- [1] A Sendonaris, E Erkip, B Aazhang. User cooperation diversity. Part I and Part II [J]. IEEE Transactions on Communications, 2003, 51(11): 1927 - 1948.
- [2] J N Laneman, G W Wornell. Distributed space-time-coded protocols for exploiting cooperative diversity in wireless networks [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2003, 49(10): 2415 - 2425.
- [3] S Y R Li, R W Yeung, C Ning. Linear network coding [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2003, 49(2): 371 - 381.
- [4] R Koetter, M Medard. An algebraic approach to network coding [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2003, 11(5): 782 - 795.
- [5] R Ahlswede, N Cai, S-Y R Li, et al. Network information flow [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46(4): 1204 - 1216.
- [6] A Keshavarz-Haddad, R Riedi. Bounds on the benefit of network coding for wireless multicast and unicast [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2012, 13(1): 102 - 115.
- [7] R Niati, A H Banihashemi, T Kunz. Throughput and energy optimization in wireless networks: joint MAC scheduling and network coding [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, 61(3): 1372 - 1382.
- [8] L Keller, E Atsan, K Argyraki, et al. SenseCode: Network coding for reliable sensor networks [J]. ACM Transactions on Sensor Networks, 2013, 9(2): 1 - 20.
- [9] 池新生, 郑宝玉, 等. 非对称协作分集通信中网络编码的应用 [J]. 电子与信息学报, 2012, 34(10): 2314 - 2319. Chi Xinsheng, Zheng Baowang, et al. The application of network coding in asymmetric cooperative diversity communication [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2012, 34(10): 2314 - 2319. (in Chinese)
- [10] L Xiao, T E Fuja, J Kliewer, et al. A network coding approach to cooperative diversity [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2007, 53(10): 3714 - 3722.
- [11] X Ming, M Skoglund. Multiple-user cooperative communi-

- cations based on linear network coding[J]. IEEE Transactions on Communications, 2010, 58(12): 3345 – 3351.
- [12] J L Rebelatto, B F Uchoa-Filho, Y Li, et al. Multiuser cooperative diversity through network coding based on classical coding theory[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2012, 60(2): 916 – 926.
- [13] B Guo, Y Liu, C Zhou. Exploit network coding over GF(2q) for multi-user cooperative wireless networks[J]. International Journal of Wireless Information Networks, 2013, 21(1): 1 – 14.
- [14] J C Inacio, J L Rebelatto, B F Uchoa-Filho. On network codes for multiuser cooperative communication in a line network[A]. Proceedings of 77th IEEE Vehicular Technology Conference[C]. Dresden, Germany: IEEE, 2013. 1 – 5.
- [15] J T Seong, H N Lee. Exact outage probability and power allocation of two nodes in cooperative networks[A]. Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference[C]. Shanghai, China: IEEE, 2013. 2949 – 2954.
- [16] J T Seong, H N Lee. Exact outage probability of two nodes for cooperative networks using GF(4)[A]. Proceedings of IEEE 14th Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications[C]. Darmstadt, Germany: IEEE, 2013. 76 – 80.

作者简介



唐震洲 男, 1978 年生于浙江温州, 博士. 现为温州大学物理与电子信息工程学院副教授, 硕士生导师. 研究方向为无线网络编码, 协作通信.
E-mail: mr. tangzz@ gmail. com



胡倩(通信作者) 女, 1979 年生于浙江温州, 现为温州大学物理与电子信息工程学院副教授. 研究方向为无线网络编码, 协作通信.
E-mail: huqian@ wzu. edu. cn