

基于正交处理的网络编码方法及其性能分析

张祖凡^{1,2}, 彭醇陵¹, 杨静¹, 景小荣^{1,2}

(1. 重庆邮电大学 通信与信息工程学院, 重庆 400065; 2. 重庆邮电大学 移动通信技术重庆市重点实验室, 重庆 400065)

摘要: 为有效传输多用户多中继网络信息, 在线性网络编码的基础上给出一种基于正交处理的网络编码方法 (NCOP, network coding based on orthogonal process), 该编码方式结合正交低频子载波处理思想, 将传输数据正交化, 利用处理后数据正交性实时传输并解码需要用户数据, 进一步降低系统中断概率, 提高分集增益。理论分析了该编码方法的系统中断概率和平均误码率, 分析和仿真结果表明在多用户协作网络的应用中, NCOP 中断性能及误码性能均优于线性网络编码。

关键词: 多用户多中继协作网络; 正交处理; 网络编码; 中断概率; 平均误码率

中图分类号: TN925

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2014)06-0008-07

Performance analysis of a network coding scheme based on orthogonal process

ZHANG Zu-fan^{1,2}, PENG Chun-ling¹, YANG Jing¹, JING Xiao-rong^{1,2}

(1. School of Communications and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Mobile Communication, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: Combining the orthogonal low-frequency subcarrier processing, a network coding scheme based on orthogonal process (NCOP) was proposed for effective transmission in multi-user multi-relay networks. It makes the data orthogonal before transmission, and decodes the data utilizing the characteristics of orthogonality, so that further reduces the system outage probability and develops the diversity order. The system outage performance and average bit error rate was analyzed by theoretical analysis. Analysis and simulation results show that the system performance of the proposed NCOP outperforms linear network coding while applying in multi-user cooperative networks.

Key words: multi-user multi-relay cooperative networks; orthogonal process; network coding; outage probability; average bit error rate

1 引言

协作通信中通常利用节点广播特性向接收端提供多个信息复本以获得分集增益, 提高信息传输质量^[1-3]。网络编码则是打破节点只对信息进行存储转发的思想, 利用节点对多个信息流进行编码运算, 提高网络吞吐量和频带利用率^[4-6]。近年来, 结合两者的研究在多节点协作网络中展开。Xiao 和

Chen 针对多用户协作通信和分布式天线协作通信, 利用异或编码辅助对方用户传输信息获取分集增益^[7,8], Peng 研究了叠加网络编码在多用户网络中的应用, 并推导了误码性能^[9]。施玉晨和吉晓东通过优化中继选择策略降低协作网络编码系统中断概率^[10,11]。Feng 针对映射准则在多用户协作网络中难以适用这一问题, 提出划分格 (LP, lattice partition) 的网络编码方式^[12]。虽然如此, 传统网络编

收稿日期: 2013-07-24; 修回日期: 2013-12-03

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项 (2012YQ20022404); 重庆市自然科学基金资助项目 (cstc2013jjB40001 & CSTCjjA40014); 长江学者和创新团队发展计划基金资助项目 (IRT1299)

Foundation Items: The National Key Scientific Instrument and Equipment Development Project of China (2012YQ20022404); The Natural Science Foundation of Chongqing (cstc2013jjB40001 & CSTCjjA40014); The Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University (IRT1299)

码的运算特性使其在多用户协作网络中的应用优势不明显, 不能在实际网络中发挥网络编码的最佳作用。

为了在多用户协作网络中有效应用网络编码, 逐渐将传统网络编码研究转移到物理层网络编码(PNC, physical layer network coding)。Xiao 基于线性网络编码(LNC, linear network coding)提出动态网络编码(DNC, dynamic network coding)^[13]和最大距离可分码(MDS, maximum distance separable)^[14], 运用改进的有限域网络编码提高分集增益, 优化系统中断概率。Joao 在 DNC 基础上提出广义动态网络编码(GDNC, generalized dynamic network coding), 进一步优化系统分集增益及中断概率^[15]。在以上编码方案中, 为避免用户信息间干扰, M 个源端需采用正交信道发送信息, 且接收端解码要求编码系数矩阵满足非奇异性, 这限制了信息实时传输, 并对中断概率提出新的要求。

鉴于在多用户协作网络中采用 LNC 会引起较大传输时延, 本文以进一步减小传输时延、降低中断概率、获取系统满分集增益为目标, 在此基础上给出一种基于正交处理的网络编码方法(NCOP, network coding based on orthogonal process), 采用正交低频信号对信息进行正交化处理, 避免了中继解码时用户信息间的相互干扰, 使中继能检测 M 个同时发送的源端信息, 减小传输时延, 且接收端能通过编码分组与正交处理信号相乘的逆正交处理方式直接解码出用户信息, 从而减小解码时延, 改善系统中断概率。理论分析与仿真结果表明 NCOP 能在保持满分集增益基础上进一步降低系统中断概率和平均误符号率。

2 系统模型

考虑如图 1 所示的多用户多中继协作网络为系统模型, 源节点 $S_i, i=1,2,\dots,M$ 通过中继节点 $R_j, j=1,2,\dots,N$ 将信息 x_i 传输给接收端 D (这里 $N \geq M$), 传输过程由源端—中继、中继—接收端两跳组成。

若在中继处采用线性网络编码, 则系统主要传输过程为^[13]: 第 1 跳, 源端 $S_i, i=1,2,\dots,M$ 在前 M 个时隙依次广播各自信息分组 x_i , 中继节点将接收到的信息进行最大似然检测得到估计值 \hat{x}_i ; 第 2 跳, 中继选取编码系数 $\gamma_{i,j}$ 对正确接收的信息分组 \hat{x}_i 进行网络编码(未成功接收信息, 其对应编码系数取

0), 然后在 $M+1$ 到 $M+N$ 个时隙发送出去。假设 $R_j \rightarrow D$ 信道增益参数为 $h_{R_j,D}$, 信道噪声为 $n_{R_j,D}$, 接收端收到中继 R_j 的编码信息分组为

$$y_{R_j,D} = h_{R_j,D}(\gamma_{1,j}\hat{x}_1 + \gamma_{2,j}\hat{x}_2 + \dots + \gamma_{M,j}\hat{x}_M) + n_{R_j,D} \\ = \sum_{i=1}^M h_{R_j,D}\gamma_{i,j}\hat{x}_i + n_{R_j,D} \quad (1)$$

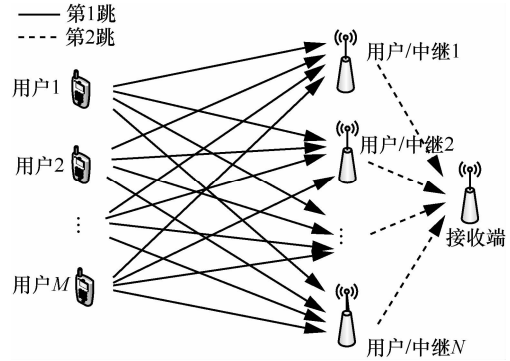


图 1 系统模型

传输结束后, 接收端收到的信息可构成如下等式

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\boldsymbol{\kappa}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{n} \quad (2)$$

其中, $\mathbf{y} = (y_{R_1,D}, y_{R_2,D}, \dots, y_{R_N,D})^T$ 为接收编码分组组成的向量, $\hat{\mathbf{x}} = (\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_M)^T$ 为源端信息估计值向量, $\mathbf{n} = (n_{R_1,D}, n_{R_2,D}, \dots, n_{R_N,D})^T$ 接收噪声向量,

$$\boldsymbol{\kappa} = \begin{pmatrix} \gamma_{1,1} & \gamma_{2,1} & \dots & \gamma_{M,1} \\ \gamma_{1,2} & \gamma_{2,2} & \dots & \gamma_{M,2} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \gamma_{1,N} & \gamma_{2,N} & \dots & \gamma_{M,N} \end{pmatrix}_{N \times M} \quad \text{为编码系数生成矩阵,}$$

$\mathbf{H} = \text{diag}(h_{R_1,D}, h_{R_2,D}, \dots, h_{R_N,D})$ 为对应信道增益矩阵。

将 $\hat{\mathbf{x}}$ 前的系数矩阵对角化得到

$$G_1(\boldsymbol{\kappa}, \mathbf{H})\mathbf{y} = G_2(\boldsymbol{\kappa}, \mathbf{H})\mathbf{A}\mathbf{x} + G_3(\boldsymbol{\kappa}, \mathbf{H})\mathbf{n} \quad (3)$$

其中, \mathbf{A} 代表单位对角矩阵, $G_i(\boldsymbol{\kappa}, \mathbf{H})$ 代表通过一定运算法则得到的与 $\boldsymbol{\kappa}$ 和 \mathbf{H} 有关的数值, 它们由编码系数及信道增益决定。

接收端再根据接收信息, 采用最大似然检测法恢复出源端用户信息

$$\hat{\mathbf{x}} = \arg \min \left\{ \|G_1(\boldsymbol{\kappa}, \mathbf{H})\mathbf{y} - G_2(\boldsymbol{\kappa}, \mathbf{H})\mathbf{x}\|^2 \right\} \quad (4)$$

采用此编码方式系统传输总共需要 $M+N$ 个时隙。假设源端—中继链路不中断, 则接收端至少需正确接收 M 个编码分组才能解码出用户信息, 即在 $N-M+1$ 条链路中断时, 系统中断, 因此, 其分集增益为 $N-M+1$, 未达到该系统的满

分集增益 N 。

考虑到 LNC 在多用户协作网络中应用存在的上述问题, 以进一步减小传输时延, 降低系统中断概率, 提高分集增益为目标, 本文在 LNC 的基础上给出 NCOP。

3 基于正交处理的网络编码方法

NCOP 思想是采用低频正交信号对用户信息进行正交化处理, 使源端用户可以同时向中继发送经正交处理后的信息, 而不会产生用户间信息干扰。中继对正确解码的用户信息采用相同方式进行正交化处理, 再对处理后信息进行 LNC, 最后发送给接收端。本文中正交化处理的实现方式即选取低频正交信号集 $\boldsymbol{\varepsilon} = (\boldsymbol{\varepsilon}_1, \boldsymbol{\varepsilon}_2, \dots, \boldsymbol{\varepsilon}_M)$, $\boldsymbol{\varepsilon}_i = \cos 2\pi f_i t$ 中元素与对应用户信息相乘, 集合 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 中每个元素的频率 (f_1, f_2, \dots, f_M) 均远远小于调制载波的中心频率, 其选取方式与 OFDM 中正交子载波的选取方式相同, 下面对 NCOP 的编解码方式进行详细说明。

3.1 NCOP 编码

为方便分析, 假设各节点均采用 BPSK 调制方式, 发送端处理到中继编码模型如图 2 所示。

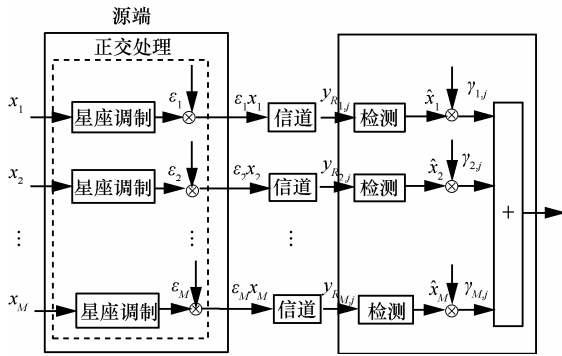


图 2 NCOP 正交处理及编码模型

假设节点之间的信道增益系数为 h_{S_i, R_j} , 所受噪声是均值为 0, 方差为 N_0 的高斯白噪声, 则中继节点接收到的源端信息为

$$y_{R_j} = \mathbf{h}_{R_j} \mathbf{e} \mathbf{x} + n_{R_j} = \sum_{i=1}^M h_{S_i, R_j} \boldsymbol{\varepsilon}_i x_i + n_{R_j} \quad (5)$$

其中, $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_M)^T$ 为源端用户信息, $\boldsymbol{\varepsilon}_i$ 为 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 的第 i 个元素。 $\mathbf{h}_{R_j} = (h_{S_1, R_j}, h_{S_2, R_j}, \dots, h_{S_M, R_j})$ 为源端 S_i 到中继 R_j 的信道增益向量, n_{R_j} 为中继 R_j 接收到的信道噪声。

中继节点采用最大似然检测算法恢复出源节点发送信息

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}} &= \arg \min \left\{ \left\| y_{R_i, j} - \mathbf{H} \boldsymbol{\varepsilon} \mathbf{x} \right\|^2 \right\} \\ &= \arg \min \left\{ \left\| y_{R_i, j} - \sum_{i=1}^M h_{S_i, R_j} \boldsymbol{\varepsilon}_i x_i \right\|^2 \right\} \end{aligned} \quad (6)$$

然后将正确解码的用户信息采用相同正交化构建方式处理后, 进行线性网络编码, 接收端的收到中继 R_j 传输的编码分组为

$$\begin{aligned} y_{D_j} &= h_{R_j, D} (\gamma_{1, j} \boldsymbol{\varepsilon}_1 \hat{x}_1 + \gamma_{2, j} \boldsymbol{\varepsilon}_2 \hat{x}_2 + \dots + \gamma_{M, j} \boldsymbol{\varepsilon}_M \hat{x}_M) + n_{R_j, D} \\ &= \sum_{i=1}^M h_{R_j, D} \gamma_{i, j} \boldsymbol{\varepsilon}_i \hat{x}_i + n_{R_j, D} \end{aligned} \quad (7)$$

其中, $\gamma_{i, j}$ 为对应的网络编码系数, $h_{R_j, D}$ 为中继 R_j 到接收端 D 的信道增益, $n_{R_j, D}$ 为接收端接收噪声。

3.2 NCOP 解码

采用 NCOP 对信息进行正交化处理后, 信息满足两两正交, 因此接收端收到编码信息分组后, 可采用与集合 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 中对应正交处理信息相乘的方式解码出用户信息, 此外, NCOP 是在线性网络编码基础上的改进方法, 因此, LNC 的解码方式对于 NCOP 仍适用。将这 2 种解码方式分别称为直接解码方式和间接解码方式。

3.2.1 直接解码方式

直接解码模型如图 3 所示。

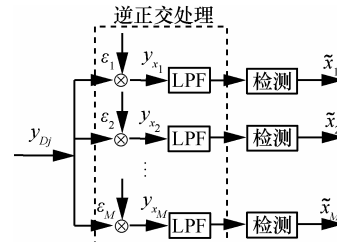


图 3 直接解码模型

由于正交性, 即有如下表示成立

$$\begin{cases} \boldsymbol{\varepsilon}_i \boldsymbol{\varepsilon}_j (i = j) = \frac{1}{2} + \vartheta \\ \boldsymbol{\varepsilon}_i \boldsymbol{\varepsilon}_j (i \neq j) = \vartheta \end{cases} \quad (8)$$

这里, ϑ 代表频率高于直流信号的信号集合。

因此, 接收端可通过式(9)和式(10)解码出对用户信息。

$$\begin{aligned} y_{x_i} &= y_{D_j} \boldsymbol{\varepsilon}_i = \left(\sum_{i=1}^M h_{R_j, D} \gamma_{i, j} \hat{x}_i + n_{R_j, D} \right) \boldsymbol{\varepsilon}_i \\ &= \frac{\gamma_{i, j}}{2} \hat{x}_i + n_{R_j, D} \boldsymbol{\varepsilon}_i + \vartheta \end{aligned} \quad (9)$$

$$\hat{y}_{x_i} = \frac{2}{\gamma_{i,j}} \text{LPF}(y_{x_i}) = h_{R_j,D} \hat{x}_i + n_c \quad (10)$$

这里， $\text{LPF}(\cdot)$ 表示信号通过低通滤波器， n_c 为噪声的同向分量(通过 LPF 后消除了正交分量与 ε_i 的乘积)。

再根据接收信息，采用最大似然检测法恢复出源端用户信息

$$\tilde{x}_i = \arg \min \{ \|\hat{y}_{x_i} - h_{j,D} \hat{x}_i\|^2 \} \quad (11)$$

3.2.2 间接解码方式

间接解码如图 4 所示。

当 N 个中继节点传输完编码分组后，接收端收到的信息可构成如下等式

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\boldsymbol{\kappa}\boldsymbol{\varepsilon}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{n} \quad (12)$$

其中， $\boldsymbol{\kappa}$ 为网络编码系数矩阵， \mathbf{H} 为信道参数矩阵， \mathbf{n} 为接收噪声，选取方式同系统模型的线性网络编码， $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为正交处理信号向量， $\mathbf{y} = (y_{D_1}, y_{D_2}, \dots, y_{D_N})^T$ ， $\hat{\mathbf{x}} = (x_1, x_2, \dots, x_M)^T$ 。

将 $\boldsymbol{\varepsilon}\hat{\mathbf{x}}$ 前的系数矩阵对角化得到

$$G_1(\boldsymbol{\kappa}, \mathbf{H})\mathbf{y} = G_2(\boldsymbol{\kappa}, \mathbf{H})\boldsymbol{\Lambda}\boldsymbol{\varepsilon}\hat{\mathbf{x}} + G_3(\boldsymbol{\kappa}, \mathbf{H})\mathbf{n} \quad (13)$$

其中， $G_i(\boldsymbol{\kappa}, \mathbf{H})$ 为通过一定运算法则得到的与 $\boldsymbol{\kappa}$ 和 \mathbf{H} 有关的数值，它们由式(12)中的编码系数及信道增益决定。

进一步，将对应正交化系数与式(13)相乘得到

$$\begin{aligned} y_{x_i} &= \varepsilon_i G_1(\boldsymbol{\kappa}, \mathbf{H})\mathbf{y} \\ &= \varepsilon_i (G_2(\boldsymbol{\kappa}, \mathbf{H})\boldsymbol{\Lambda}\boldsymbol{\varepsilon}\hat{\mathbf{x}} + G_3(\boldsymbol{\kappa}, \mathbf{H})\mathbf{n}) \\ &= \frac{[G_2(\boldsymbol{\kappa}, \mathbf{H})]_{\rho_1}}{2} \hat{x}_i + \frac{[G_3(\boldsymbol{\kappa}, \mathbf{H})]_{\rho_2}}{2} n_c + \vartheta \end{aligned} \quad (14)$$

将得到的 y_{x_i} 通过低通滤波器 LPF 得到

$$\begin{aligned} \tilde{y}_{x_i} &= \frac{2}{[G_2(\boldsymbol{\kappa}, \mathbf{H})]_{\rho_1}} \text{LPF}(y_{x_i}) = \frac{2}{[G_2(\boldsymbol{\kappa}, \mathbf{H})]_{\rho_1}} \cdot \\ &\text{LPF}\left(\frac{[G_2(\boldsymbol{\kappa}, \mathbf{H})]_{\rho_1}}{2} \hat{x}_i + \frac{[G_3(\boldsymbol{\kappa}, \mathbf{H})]_{\rho_2}}{2} n_c + \vartheta\right) \\ &= \hat{x}_i + \frac{[G_3(\boldsymbol{\kappa}, \mathbf{H})]_{\rho_2}}{[G_2(\boldsymbol{\kappa}, \mathbf{H})]_{\rho_1}} n_c \end{aligned} \quad (15)$$

其中， $[G_2(\boldsymbol{\kappa}, \mathbf{H})]_{\rho_1}$ 、 $[G_3(\boldsymbol{\kappa}, \mathbf{H})]_{\rho_2}$ 分别代表通过正交化处理后的 \hat{x}_i 和 n_c 前的增益系数。

接收端再根据接收信息，采用最大似然检测法恢复出源端用户信息

$$\tilde{\tilde{x}}_i = \arg \min \left\{ \|\tilde{y}_{x_i} - \hat{x}_i\|^2 \right\} \quad (16)$$

4 性能分析

4.1 分集增益与中断概率

为分析协作通信系统在衰落信道下的性能，一般选择分集增益进行衡量^[13,14]。

$$D = \lim_{SNR \rightarrow \infty} \frac{-\log P_{\text{out}}}{\log SNR} \quad (17)$$

其中， P_{out} 代表系统中断概率。

由式(17)知，分集增益与中断概率有关，下面着重讨论系统中断概率。

4.1.1 互信息与中断概率

衰落信道下发送信息与接收信息之间的互信息定义为

$$I(SNR_{i,j}, h_{i,j}) = \text{lb}\left(1 + |h_{i,j}|^2 SNR_{i,j}\right) \quad (18)$$

其中， $SNR_{i,j}$ 、 $h_{i,j}$ 分别代表节点 i 到节点 j 的信噪比和信道衰落系数。

定义当互信息 $I(SNR_{i,j}, h_{i,j})$ 低于频谱利用率 R 时链路中断，则 2 个节点之间的单条链路中断概率可以描述为

$$\begin{aligned} P_e &= P\{I(SNR_{i,j}, h_{i,j}) < R\} \\ &= P\{|h_{i,j}|^2 SNR_{i,j} < 2^R - 1\} \\ &= P\{|h_{i,j}|^2 < \rho_{i,j}\} \end{aligned} \quad (19)$$

其中， $\rho_{i,j} = \frac{2^R - 1}{SNR_{i,j}}$ 。

考虑到 Rayleigh 信道的 $|h_{i,j}|^2$ 服从指数分布，则 Rayleigh 信道下单条链路的中断概率进一步表示为

$$P_e = 1 - \exp(-\rho_{i,j}) \quad (20)$$

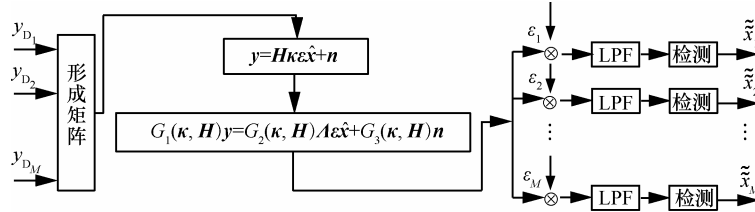


图 4 间接解码方式

4.1.2 系统中断概率与分集度

考虑到整个传输过程无直传链路，源节点 $S_i, i=1,2,\dots,M$ 需借助中继节点 $R_j, j=1,2,\dots,N$ 将数据分组 x_i 传输给接收端 D ，因此系统中断概率需要考虑源端—中继、中继—接收端 2 部分的影响。

由于 NCOP 进行了正交处理，用户信息间的依赖性较小，只要有一个编码分组能成功传输给接收端，系统便不会中断。因此系统只会在以下 2 种情况下发生中断。

情况 1 所有源端—中继链路中断。

情况 2 源端—中继链路不发生中断情况下，所有中继—接收端链路中断。

这里，用 p_1 表示情况 1 的发生概率， p_2 表示情况 2 的发生概率。

系统的中断概率可以表示为

$$P = p_1 + (1 - p_1)p_2 = P_e^{MN} + (1 - P_e^{MN})P_e^N \quad (21)$$

其中，第 1 项代表源端—中继中断情况，第 2 项代表源端—中继不中断情况下，中继—接收端中断情况。

进一步地，假设中继节点未收到所有用户信息时，源端—中继链路发生中断，可以从源端—中继—接收端以点到点的方式近似得到系统中断概率。

从整个系统上看，经过中继 R_j 的转发链路（源端—中继—接收端）中断条件是：任意源节点到该中继节点链路中断，或者该中继节点到接收端链路中断，即 $\bigcup_{i=1,\dots,M} \{I(S_i, R_j) < R\} \cup \{I(R_j, D) < R\}$ 。那么，一条中

继转发链路在 Rayleigh 信道下的中断概率可以表示为

$$P_{\text{out}} = P\left\{ \bigcup_{i=1,\dots,M} \{I(S_i, R_j) < R\} \cup \{I(R_j, D) < R\} \right\} \\ = 1 - (1 - P_e)^{M+1} \quad (22)$$

因此，采用 NCOP 的系统中断概率可以表示为

$$P_{\text{NCOP}} = p_{\text{out}}^N = (1 - (1 - P_e)^{M+1})^N \\ = (1 - (\exp(-\rho_{i,j}))^{M+1})^N \quad (23)$$

若中继采用 LNC 编码方式，接收端需成功接收至少 M 个编码分组，才能解码出用户信息，因此，采用 LNC 的系统中断概率表示为

$$P_{\text{LNC}} = \sum_{i=0}^{M-1} (1 - p_{\text{out}})^i p_{\text{out}}^{N-i} \\ = \sum_{i=0}^{M-1} (1 - (1 - (1 - P_e)^{M+1}))^i (1 - (1 - P_e)^{M+1})^{N-i} \\ = \sum_{i=0}^{M-1} ((\exp(-\rho_{i,j}))^{M+1})^i (1 - (\exp(-\rho_{i,j}))^{M+1})^{N-i} \quad (24)$$

显然，结合式(17)、式(23)、式(24)可知，NCOP 及 LNC 的分集度分别为 N 和 $N - M + 1$ 。NCOP 获得了该系统下的满分集增益，进一步降低了系统中断概率。

4.2 平均误码率

由于中继节点译码错误导致的误码率对 NCOP 和 LNC 影响程度相差不大，本文主要讨论接收端译码错误导致的误码率带来的影响。

NCOP 包含 2 种解码方式：直接解码方式和间接解码方式。直接解码方式中由于逆正交处理直接消除了其他用户信息的影响，因此接收端收到的 S_i 的信息为

$$\hat{y}_{x_i} = h_{R_j,D} \cdot \hat{x}_i + n_c \quad (25)$$

其中， n_c 为经逆正交处理后噪声剩下的同相部分。

对于 x_i 而言，其信噪比为 $\gamma_1 = \frac{|h_{R_j,D}|^2 E_b}{N_0}$ 。当用户采用 BPSK 调制时，采用该解码方式的误码率为

$$p_1(e|x_i) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{|h_{R_j,D}|^2 E_b}{N_0}} \right) \quad (26)$$

其中， E_b 为信号发送功率， N_0 为噪声功率。

假设源端信息发送概率相同，考虑到每个用户信息解码过程相似，因此，直接解码方式的平均误码率为

$$P_{\text{ser1}} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M p(x_i) p_1(e|x_i) \quad (27)$$

当采用间接解码方式时，根据式(15)可知接收端收到含有 x_i 的信息为

$$\tilde{y}_{x_i} = \hat{x}_i + \frac{[G_3(\boldsymbol{\kappa}, \mathbf{H})]_{\rho_2}}{[G_2(\boldsymbol{\kappa}, \mathbf{H})]_{\rho_1}} n_c \quad (28)$$

其中， $[G_2(\boldsymbol{\kappa}, \mathbf{H})]_{\rho_1}$ 、 $[G_3(\boldsymbol{\kappa}, \mathbf{H})]_{\rho_2}$ 分别代表 \hat{x}_i 和 n_c 前的增益系数，是通过一定运算法则得到与编码系数矩阵 $\boldsymbol{\kappa}$ 和信道增益矩阵 \mathbf{H} 有关的数值。

当用户采用 BPSK 调制时，采用该解码方式的误码率为

$$p_2(e|x_i) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{[G_3(\boldsymbol{\kappa}, \mathbf{H})]_{\rho_2}^2 E_b}{[G_2(\boldsymbol{\kappa}, \mathbf{H})]_{\rho_1}^2 N_0}} \right) \quad (29)$$

假设源端用户信息发送概率相同，则采用间接解码方式的平均误码率为

$$P_{\text{ser}2} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M p(x_i) p_2(e|x_i) \quad (30)$$

若接收端采用最大比值合并，则采用 NCOP 的系统平均误码率为

$$P_{\text{SER}} = \delta_1 P_{\text{ser}1} + \delta_2 P_{\text{ser}2} \quad (31)$$

其中， δ_1 、 δ_2 为最大比值合并的加权系数。

5 数值仿真与分析

为了验证 NCOP 的性能，这里以 LNC 为对比，数值仿真分析了衰落信道下 2 种编码方式在多用户协作网络中的系统中断概率与平均误码率。其中， $(M, N, 1)$ 表示该系统包括 M 个用户、 N 个中继、1 个接收端。假设用户与接收端间无直传链路，且中继必须接收到所有用户信息，源端—中继链路才不发生中断。图 5~图 7 假设信道衰落系数服从 Rayleigh 分布，图 8 假设信道衰落系数服从 Gaussian 分布。

图 5 给出了频带利用率 $R = 1 \text{ bit} \cdot (\text{s} \cdot \text{Hz})^{-1}$ 时，不同中继个数对系统中断概率的影响。可以看出，随着信噪比的增加，2 种方法的系统中断概率均减小，但采用 NCOP 方法明显优于 LNC 方法。这是由于采用 LNC 方法只有当接收端成功接收足够多的编码分组，才能解码出用户信息，而采用 NCOP 的系统，只要接收端成功接收 1 个编码信息分组，便能解码出用户信息，因此采用 NCOP 的系统中断概率远远小于采用 LNC 的系统中断概率。另外，当源端用户数固定，随着中继数增加，中断概率降低。这是因为中继个数的增加，接收端成功接收编码分组的概率增加，因此系统中断概率降低。

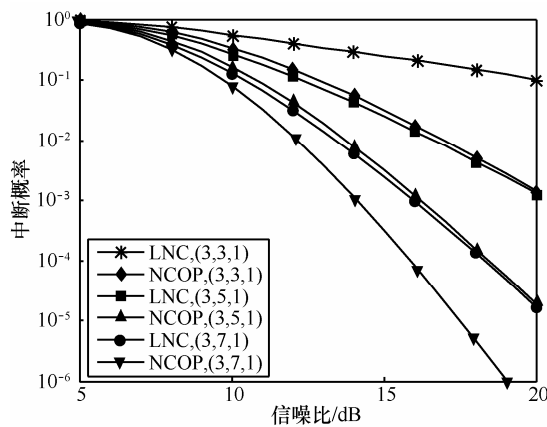


图 5 系统中断概率与信噪比的关系

图 6 给出了不同 $(M, N, 1)$ 情形下，频带利用率 R 对系统中断概率的影响，这里信噪比为 10 dB。由图

可以看出，信噪比一定时，随着 R 增加，系统中断概率增加，且中继个数越多，系统中断概率的变化越明显。这是因为 R 越大，互信息 $I(\text{SNR}_{i,j}, h_{i,j})$ 低于 R 的概率越大，单条链路的中断概率增加，导致系统中断概率增加，而中继个数影响着中继—接收端的中断概率，中继个数越多，转发的编码分组越多，对系统性能影响越明显。

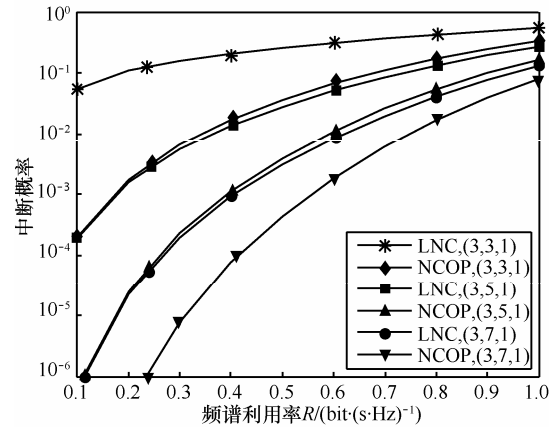


图 6 系统中断概率与频谱利用率的关系

图 7 给出了系统节点数分布为 $(2, 2, 1)$ ，编码系数矩阵 $\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}$ 时，接收端的平均误码率比较。

由图可知，NCOP 的误码性能稍优于 LNC，这是因为采用 NCOP 的系统接收端解码时，能通过逆正交处理方式消除其他用户信息的干扰，而采用 LNC 方式的系统解码时需利用接收到的多个编码分组进行联合解码，用户信息间依赖性较大，因此 NCOP 的误码性能较好。

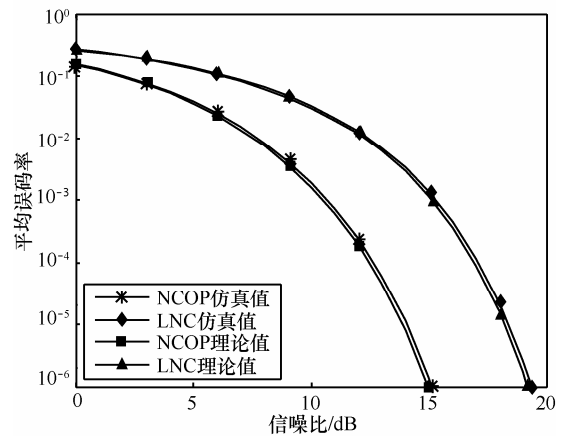


图 7 平均误码率

图 8 给出了当选择不同编码系数矩阵时，平均误码率的变化情况。由于 Rayleigh 信道的信道参数

是随机变化的,为更好地分析系数矩阵对平均误码率的影响,仿真时假设信道模型为 AWGN 信道,

并分析了当系数矩阵为 $K_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}$ 、 $K_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 3 \end{bmatrix}$ 、

$K_3 = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 2 & 3 \end{bmatrix}$ 3 种情况下的平均误码率。由图 8 可知,

采用 K_1 编码矩阵的平均误码率最低, K_2 次之, K_3 最差。这是因为 3 个矩阵的编码码距关系为 $K_1 < K_2 < K_3$, 由 MDS^[14] 可知, 拥有最小码距的网络编码性能更佳。由图还可看出, NCOP 的误码率较之 LNC 误码率变化更慢。这是因为 NCOP 的误码率受直接解码和 LNC 解码 2 种方式影响, 因此受编码系数的影响比直接使用 LNC 编码方式弱。

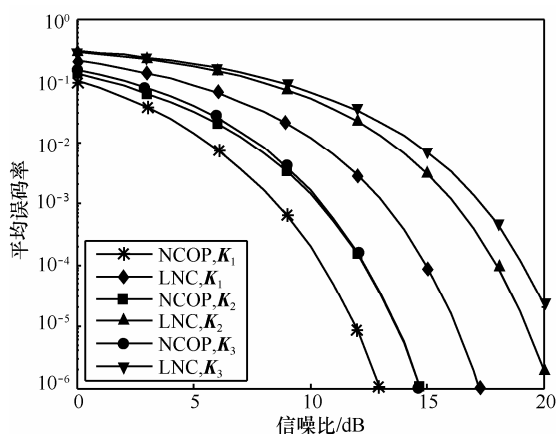


图 8 编码系数矩阵对误码率的影响

6 结束语

本文针对 LNC 无法满足实时解码传输以及难以在无直传多用户协作网络获得满分集增益这一不足, 在 LNC 基础上给出一种改进 NCOP 编码方式, 并以系统中断概率和平均误码率为衡量标准, 对 NCOP 的性能进行了分析讨论。仿真结果表明 NCOP 的系统性能优于 LNC。下一步的工作将重点考虑如何在更为复杂的无线信道模型和系统中应用 NCOP。

参考文献:

[1] SENDONARIS A, ERIKIP E B. User cooperation diversity part I: system description[J]. IEEE Transactions on Communications, 2003, 51(11): 1939-1948.
 [2] SENDONARIS A, ERIKIP E B. User cooperation diversity part II: implementation aspects and performance analysis[J]. IEEE Transactions on Communications, 2003, 51(11): 1939-1948.
 [3] AGGELOS B, HYUNDONG S, MOE Z W. Cooperative communications with outage-optimal opportunistic relaying[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(9): 3450-3460.

[4] ZHANG S, LIEW S C, LAM P. Physical layer network coding[A]. International Conference on Mobile Computing and Networking[C]. 2006.358-365.
 [5] LIU C H, XUE F. Network coding for two-way relaying: rate region, sum rate and opportunistic scheduling[A]. IEEE International Conference on Communications[C]. 2008.1044-1049.
 [6] YANG X C, LI J, XIE C L, et al. Throughput gain of random wireless networks with physical-layer network coding[J]. Tsinghua Science and Technology, 2012, 17(2): 161-171.
 [7] XIAO L, FUJA T, KLIEWER J, et al. A network coding approach to cooperative diversity[J]. IEEE Transactions Information Theory, 2007, 53(10): 3714-3722.
 [8] CHEN Y D, KISHORE S, LI J. Wireless diversity through network coding[A]. IEEE Wireless Communications and Networking Conference[C]. 2006, 3: 1681-1686.
 [9] PENG A Y C, YOUSEFI S, KIM L M. On error analysis and distributed phase steering for wireless network coding over fading channels[J]. Transactions Wireless Communication, 2009, 8(11): 5639-5649.
 [10] 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]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2011, 38(2): 36-41.
 SHI Y C, BAI B M, WANG J. Multi-user cooperative communications scheme design based on opportunistic network coding[J]. Journal of Xidian University, 2011, 38(2): 36-41.
 [11] 吉晓东, 郑宝玉. 物理层网络编码机会中继及中断性能分析[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(5): 1186-1192.
 JI X D, ZHENG B Y. Opportunistic relaying and outage analysis for physical layer network coding[J]. Journal of Electric & Information Technology, 2011, 33(5): 1186-1192.
 [12] CHEN F, SILVA D, KSCHISCHANG F R. Design criteria for lattice network coding[A]. Information Sciences and Systems (CISS)[C]. 2011.1-6.
 [13] XIAO M, SKOGLUND M. Multiple-user cooperative communications based on linear network coding[J]. IEEE Transactions on Communications, 2010, 58(12): 3345-3351.
 [14] XIAO M, KLIEWER J, SKOGLUND M. Design of network codes for multiple-user multiple relay wireless networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2012, 60(12): 2562-2566.
 [15] JOAO L R, BARTOLOMEU F U, YONGHUI L, et al. Multiuser cooperative diversity through network coding based on classical coding theory[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2012, 60(2): 916-926.

作者简介:



张祖凡 (1972-), 男, 湖北石首人, 博士, 重庆邮电大学教授, 主要研究方向为无线移动通信理论与技术。

彭醇陵 (1989-), 女, 四川广安人, 重庆邮电大学硕士生, 主要研究方向为协作通信和网络编码。

杨静 (1972-), 女, 四川大邑人, 硕士, 重庆邮电大学高级工程师, 主要研究方向为无线移动通信理论与技术。

景小荣 (1974-), 男, 甘肃平凉人, 重庆邮电大学副教授, 主要研究方向为多天线 (包括智能天线) 系统中的信号处理。