

文章编号: 1672-2892(2011)02-0143-05

多径下 Turbo 码 IDMA 网络编码中继合作系统性能分析

杨彦东, 周小林*, 胡蝶

(复旦大学 通信科学与工程系, 上海 200433)

摘要: 基于交织多址网络编码中继合作系统, 分析了其采用 Turbo 编码后在多径信道环境下的系统性能。研究了该系统中利用不同交织器来实现多用户的多址接入方式以及网络编码的中继合作机制。将多径信道以及 Turbo 编码融入该系统中, 搭建计算机仿真环境, 通过仿真数据分析系统性能。仿真结果表明, 在多径信道环境下, 采用 Turbo 编码的交织多址网络编码中继合作系统的系统误码率有明显改善。

关键词: 多径信道; 网络编码; 交织多址; Turbo 码

中图分类号: TN911.22

文献标识码: A

Performance analysis of network coding relay cooperative IDMA system with Turbo code in multi-path channel

YANG Yan-dong, ZHOU Xiao-lin*, HU Die

(Department of Communication Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: Based on network coding relay cooperative Interleaver Division Multiple Access(IDMA) system, the performance of the system with Turbo code in multi-path channel is analyzed. The multiple access method of adopting different interleavers for different users and the network coding relay cooperative mechanism are studied, the multi-path channel and Turbo code are added into the system to establish simulation environment. The simulation results show that in the multi-path channel, Turbo code has improved the BER performance of network coding relay cooperative IDMA system greatly.

Key words: multi-path channel; network coding; Interleaver Division Multiple Access; Turbo code

交织多址(IDMA)^[1-2]是一种非正交的多址接入方式, 利用不同交织器来进行多用户检测。文献[1-2]中对于交织多址方式有详细介绍。近些年, 用户合作系统越来越多地被关注^[3-5], 不同的合作机制被提出, 其中利用网络编码的用户合作机制, 由于较高效地利用了系统资源, 因而得到广泛研究。在传统 IDMA 系统中引入网络编码中继合作机制, 能够较大地提升系统接收性能^[6]。由于 Turbo 码^[7-8]充分利用了信息码元之间的关联依赖性, 在随机突发式干扰的实际信道环境中, Turbo 卷积码具有非常良好的纠错性能。因此, 将 Turbo 码加入 IDMA 网络编码中继合作系统, 会在其迭代解码过程中提供较为明显的增益。

本文还将采用多径信道环境进行仿真, 这样, 多径信道下的多用户检测引入的空间分集增益和 Turbo 码所提供的解码纠错增益, 会很好地改善原系统的误码率性能。

1 IDMA 网络编码中继合作系统介绍

1.1 系统结构

IDMA 网络编码中继合作系统结构如图 1 所示。

假设系统中共有 K 个源用户和 N 个中继用户。在系统工作机制中总共有 2 个工作时隙: 在第 1 时隙每个有源用户 $U_k (k=1, 2, \dots, K)$ 都广播其需要发送的信息序列 x_k ; 在第 2 时隙, 每个中继用户 $R_n (n=1, 2, \dots, N)$ 将第 1 时隙

收稿日期: 2010-07-02; 修回日期: 2010-09-26

基金项目: 国家科技重大专项“新一代宽带无线移动通信网”基金资助项目(2009ZX03002-003)

* 通信作者: 周小林 email:zhouxiaolin@fudan.edu.cn

接收到的所有源用户的广播信息解码,得到 K 个信息序列 $\{\tilde{x}_k\}$, 然后对 $\{\tilde{x}_k\}$ 进行网络编码,得到 $x_{R_n} = \tilde{x}_1 \oplus \tilde{x}_2 \oplus \dots \oplus \tilde{x}_K$, 并在本时隙中广播 x_{R_n} 。这样基站接收端可以在信息迭代解码过程中将 2 个时隙接收到的信息处理后达到软信息叠加的效果。

1.2 系统发射机

在该系统中,无论是源用户还是中继用户,都用 IDMA 接入方式将信息序列发送出去。用户发射机结构如图 2 所示。

假设系统中共有 K 个源用户。第 $k(k=1,2,\dots,K)$ 个用户的信息比特序列为 d_k , 该序列经过信道编码(本文采用 Turbo 码编码)与扩频得到码片序列 c_k , 然后通过交织器 π_k 进行交织处理,并经过调制后得到发送符号序列 x_k 。由于本文中考虑多径信道条件下的系统性能,所以假设有 m 条路径,衰落系数分别为 $h_{k,1}, \dots, h_{k,m}$, 时延分别为 $0, \dots, m-1$ 。 K 个用户一共有 $K \times m$ 路信息序列,最终都叠加到接收端得到接收信息序列 r 。

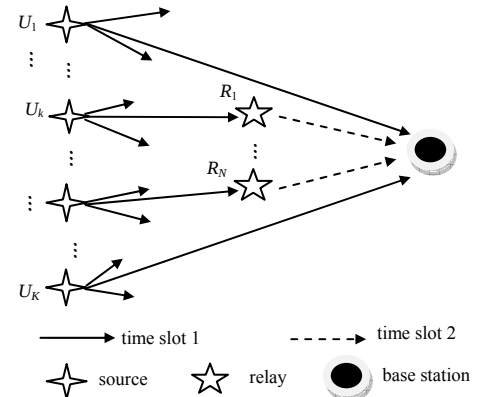


Fig.1 Structure of IDMA network coding relay cooperative system
图 1 IDMA 网络编码中继合作系统结构

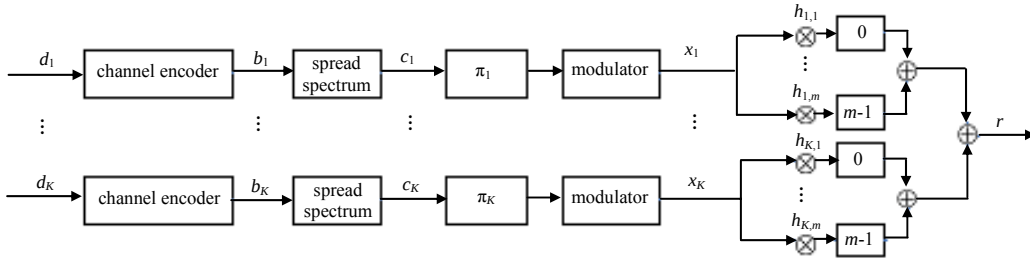


Fig.2 Transmitter structure of IDMA network coding relay cooperative system
图 2 IDMA 网络编码中继合作系统发射机结构图

1.3 IDMA 网络编码中继合作系统信号检测算法

IDMA 网络编码中继合作系统接收机如图 3 所示。IDMA 接入系统一般由多用户检测器(Multi-User Detector, MUD)和解码器(Decoder)之间互相迭代,交换软信息来实现多用户的多址接入以及解码^[1]。迭代过程中的软信息为码片级的对数似然比值(Log-Likelihood Ratio, LLR)。在迭代若干次之后,由 DEC 硬判决得到解码的比特序列。

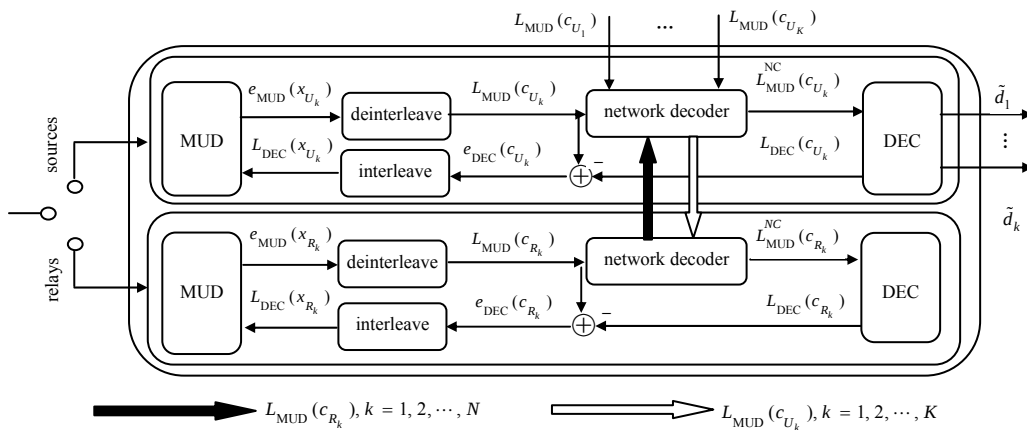


Fig.3 Receiver structure of IDMA network coding relay cooperative system
图 3 IDMA 网络编码中继合作系统接收机结构图

IDMA 网络编码中继合作系统的改进,在于接收机中增加了一个迭代解码中继用户信息的模块。其结构与传统 IDMA 迭代模块类似,但增加了网络解码器模块,网络解码模块对中继用户 R_k 的似然比值 $L_{MUD}(c_{R_k}) (k=1,2,\dots,N)$ 和所有源用户 $\{U_k\} (k=1,2,\dots,K)$ 似然比值 $\{L_{MUD}(c_{U_k})\}$ 进行处理。由于中继用户进行的网络编码是 XOR 异或运算,并且码片级似然比定义为 $L(c_k) = \lg(p(c_k=1)/p(c_k=0))$, 解码算法公式为(这里假设 K 为偶数,奇数情况类似可推): $L_{MUD}^{NC}(c_{U_k}) = L_{MUD}(c_{U_k}) + \sum_{j=1}^N L_{MUD}^{R_j}(c_{U_k})$, 其中 $L_{MUD}^{R_j}(c_{U_k})$ 为除了 U_k 之外的所有源用户的似

然比值 $\{L_{\text{MUD}}(c_{U_i})\} (i=1,2,\dots,K, i \neq k)$ 与中继用户 R_j 的似然比值 $L_{\text{MUD}}(c_{R_j}) (j=1,2,\dots,N)$ 计算之后得到的，具体计算方法如下：

$$L_{\text{MUD}}^{R_j}(c_{U_k}) = \lg \frac{\left(\exp(L_{\text{MUD}}(c_{R_j})) \sum_{\substack{1 \leq i \leq K \\ i \neq k}} \exp(L_{\text{MUD}}(c_{U_i})) \right) + \dots + \left(\exp \left(\sum_{\substack{1 \leq i \leq K \\ i \neq k}} L_{\text{MUD}}(c_{U_i}) \right) \right) + \sum_{\substack{1 \leq i_1 \leq \dots \leq i_{K-2} \leq K \\ i_1 \neq k, \dots, i_{K-2} \neq k}} \exp \left(\sum_{i=i_1, \dots, i_{K-2}} L_{\text{MUD}}(c_{U_i}) + L_{\text{MUD}}(c_{R_j}) \right)}{1 + \dots + \exp \left(\sum_{\substack{1 \leq i \leq K \\ i \neq k}} L_{\text{MUD}}(c_{U_i}) + L_{\text{MUD}}(c_{R_j}) \right)}$$

由于中继用户的信息和源用户信息是分 2 个时隙传输的，因此在网络解码后可看作是空间分集的增益， $\{L_{\text{MUD}}^{R_j}(c_{U_k})\}$ 和 $L_{\text{MUD}}(c_{U_k})$ 的叠加增加了软信息的可靠性。 $L_{\text{MUD}}^{\text{NC}}(c_{R_k})$ 也可用类似方法计算得到。

2 多径信道下的 IDMA 多用户检测

考虑实瑞利衰落多径信道，假设信道条件在 1 帧数据长度内保持不变，用户 $U_k (k=1,2,\dots,K)$ 与接收方之间的信道衰落系数用向量 $\mathbf{h}_k = [h_{k,1}, h_{k,2}, \dots, h_{k,m}]$ 表示，信道时延用向量 $\boldsymbol{\tau}_k = [0,1,\dots,m-1]$ 表示。发送方采用 BPSK 调制，发送符号为： $x_k(n) = 2c_k(\pi_k(n)) - 1, n=1,2,\dots,N$ ，其中 $c_k(n) \in \{0,1\}$ 。接收到的信号为： $r(n) = \sum_{k=1}^K \sum_{l=0}^{m-1} h_{k,l} x_k(n-l) + \eta(n)$ ， $n=1,2,\dots,N+m$ ，其中 $\eta(n)$ 为方差为 σ^2 ，均值为 0 的加性高斯白噪声。

在检测用户 U_k 的第 n 个符号的第 l 条多径分量时，将 $r(n+l)$ 表示为：

$$r(n+l) = \sum_{k=1}^K \sum_{l=0}^{m-1} h_{k,l} x_k(n) + \eta(n+l) = h_{k,l} x_k(n) + \xi_k(n,l) \quad (1)$$

式中

$$\xi_k(n,l) = r(n+l) - h_{k,l} x_k(n) \quad (2)$$

根据中心极限定理， $\xi_k(n,l)$ 可以看作高斯分布。由式(1)可知，为了得到 $x_k(n)$ 的对数似然比，首先要计算出干扰信号 $\xi_k(n,l)$ 的均值和方差。根据式(2)可知：

$$\mathbb{E}[\xi_k(n,l)] = \mathbb{E}[r(n+l)] - h_{k,l} \mathbb{E}[x_k(n)] \quad (3)$$

$$\text{Var}[\xi_k(n,l)] = \text{Var}[r(n+l)] - h_{k,l}^2 \text{Var}[x_k(n)] \quad (4)$$

而 $r(n+l)$ 的均值和方差可以表示为：

$$\mathbb{E}[r(n+l)] = \sum_{k=1}^K \sum_{l=0}^{m-1} h_{k,l} \mathbb{E}[x_k(n)] \quad (5)$$

$$\text{Var}[r(n+l)] = \sum_{k=1}^K \sum_{l=0}^{m-1} h_{k,l}^2 \text{Var}[x_k(n)] + \sigma^2 \quad (6)$$

式中 $\mathbb{E}[x_k(n)]$ 和 $\text{Var}[x_k(n)]$ 可由 $x_k(n)$ 的先验概率 $L_a(x_k(n))$ 得到。

又 $r(n+l)$ 近似为高斯分布：

$$p(r(n+l) | x_k(n) = x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi \text{Var}[\xi_k(n,l)]}} \exp \left(-\frac{(r(n+l) - h_{k,l}x - \mathbb{E}[\xi_k(n,l)])^2}{2\text{Var}[\xi_k(n,l)]} \right) \quad (7)$$

根据文献[1]， $x_k(n)$ 的最终对数似然比为：

$$L(x_k(n) | r(n)) = \lg \left(\frac{p(r(n) | x_k(n) = +1)}{p(r(n) | x_k(n) = -1)} \right) + \log \left(\frac{p(x_k(n) = +1)}{p(x_k(n) = -1)} \right) = L_e(x_k(n)) + L_o(x_k(n)) \quad (8)$$

因此，对于多径信道下的外部信息对数似然比的计算，码片级多用户检测器根据 $r(n+l)$ 得到用户 U_k 的第 n 个符号对应的第 l 条多径分量的外部信息对数似然比为：

$$L_{e,l}(x_k(n)) = \lg \left(\frac{p(r(n+l) | x_k(n) = 1)}{p(r(n+l) | x_k(n) = -1)} \right) = 2h_{k,l} \frac{r(n+l) - \mathbb{E}[\xi_k(n,l)]}{\text{Var}[\xi_k(n,l)]} \quad (9)$$

接下来可以对所有的多径分量进行似然比合并，得到用户 U_k 的第 n 个符号的外部信息对数似然比为

$$L_e(x_k(n)) = \sum_{l=0}^{m-1} L_{e,l}(x_k(n))。$$

3 IDMA 系统中采用 Turbo 信道编码

本文系统信道编码采用 Turbo 码, 解码算法采用 MAP 算法。由于传统的 MAP 算法迭代最终输出的软信息只是信息比特位的似然比值, 而 IDMA 系统的迭代过程中, 提供给下一轮的外部信息 $L_{\text{DEC}}(c_{U_k})$ 的长度是完整接收信息序列的长度。因此, 在把 Turbo 信道编码加入该系统中时, 需要对 MAP 算法加以修改, 使得外部信息中包括信息校验位的似然比值。在以下算法推导中将采用高斯白噪声信道, 由于多径信道的增益在 IDMA 多用户检测时已考虑在内, 所以, 在 Turbo 解码中不再进行考虑。

在 MAP 算法中, 首先引入码字格图的概念, 在解码时对编码器的状态进行估计。通过起始状态 $s_k^E(e)$, 终止状态 $s_k^S(e)$ 以及输入比特 $d(k)$ 的概率估计, 将 1 帧数据沿正向和反向 2 个方向分别计算出每个状态的概率 $\alpha_k(s)$ 和 $\beta_k(s)$ 。式(10)求和号中第 1 项为 $\alpha_k(s)$, 第 3 项为 $\beta_k(s)$, 第 2 项即转移概率 $\gamma_k(e)$ 。

$$p(d(k)=d|r) = \frac{1}{p(r)} \sum_{d(k)=d} p(s_k^S(e), s_k^E(e), r(1), \dots, r(k-1), r(k), r(k+1), \dots, r(N)) =$$

$$\frac{1}{p(r)} \sum_{d(k)=d} p(s_k^S(e), r(1), \dots, r(k-1)) p(s_k^E(e), r(k) | s_k^S(e)) p(r(k+1), \dots, r(N) | s_k^E(e)) \quad (10)$$

转移概率 $\gamma_k(e)$ 的表达式如下:

$$\gamma_k(e) = p(s_k^E(e), r(k) | s_k^S(e)) = \sum_{d(k)=d} p(s_k^E(e) | s_k^S(e)) p(c(k) | e) p(r(k) | c(k)) \quad (11)$$

式(11)求和号中第 1 项由先验信息决定; 第 2 项根据 $c(k)$ 与边 e 是否有关取 0 或 1; 第 3 项根据传输信道环境计算, 本文采用高斯白噪声信道环境。

一般 MAP 算法中, 只考虑最终的信息比特序列解码, 在并行 PCCC Turbo 解码过程中, 外部信息的交换迭代仅仅是信息比特位的软信息。因此, 计算式(11)时, 3 项的计算都是以信息比特位为参考。为了修改算法以适用于 IDMA 系统, 计算校验位似然比信息时, 将式(11)的计算基于校验位的信息, 包括先验信息、高斯信道下的信号估计以及边 e 是否与校验位有关(校验位即为编码器的输出, 因此, 编码器的状态和输入的信息比特会唯一决定校验位信息)。

4 系统性能分析

在仿真分析系统性能时, 每 1 帧数据为 256 bit, 扩频码采用 8 倍扩频, 交织器对码片级的整帧数据进行交织, 调制方式采取 BPSK 调制, 信道环境均采用瑞利衰落信道, 多径环境时选取了 8 条不同的路径。分别对源用户数为 4 和源用户数为 8 的 2 种情况进行仿真, 源用户到基站的信道信噪比为 0 dB~5 dB, 仿真得到 BER 如图 4~图 5 所示。

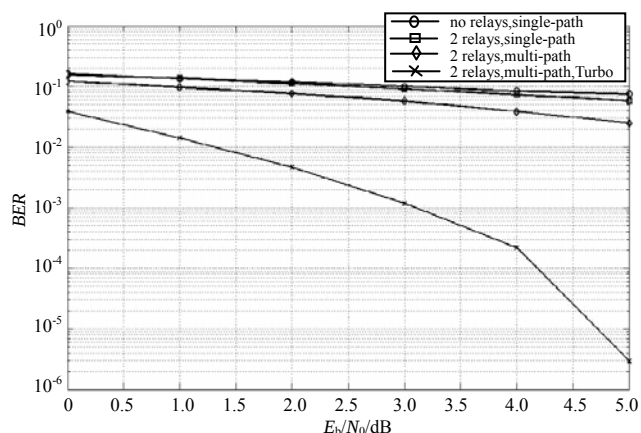


Fig.4 BER for 4 sources
图 4 源用户数为 4 的 BER

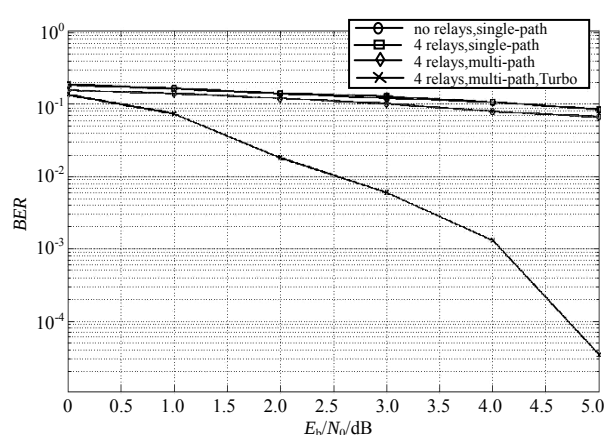


Fig.5 BER for 8 sources
图 5 源用户数为 8 的 BER

以图 4 为例, 源用户数为 4, 中继用户数为 2, 基站接收译码迭代 3 次。可以看到, 在系统中加入多径信道环境后, BER 性能有明显的改善, 并且改善度随信道信噪比增加而增加, 而在进一步加入 Turbo 码后, 系统 BER 性能的改善得到更大的提升。从图中可以看到, 在信道信噪比为 5 dB 时, 同样采用多径衰落信道模型, BER 从

10^{-2} 减少到了 10^{-6} , 改善程度十分可观。

对比图 4 和图 5, 随着用户数的增加, 系统中的用户间干扰也随之增加。由于本系统采取了网络编码的中继合作策略, 因此, 源用户数的增加会在一定程度上减少中继用户编码信息中关于每个源用户的信息量。不过从以上两图中可以看到, 减少的程度是比较小的, 尤其是采用多径信道模型和 Turbo 信道编码后, 系统的 BER 性能仍较为良好。

5 结论

本文基于 IDMA 网络编码中继合作系统, 采用了多径信道环境并加入 Turbo 信道编码, 考察了其对于系统性能的改善程度。对多径信道与 Turbo 码如何合理地加入原系统中进行了理论公式的推导。通过对仿真结果的分析看到, 多径信道的引入和 Turbo 码的加入都较大地改善了系统的误码率性能, 其中与普通的重复码相比, Turbo 码的加入对系统性能的改善尤为明显。除了 Turbo 码之外, 还有其他性能优良的信源编码策略, 例如卷积码等, 这些不同编码方案的性能比较将在接下来的工作中继续展开, 之后的研究工作还会着重于系统容量分析以及功率控制等方面。

参考文献:

- [1] Li Ping, Liu Lihai, Wu K Y, et al. Interleave-Division Multiple-Access(IDMA) communications[J]. IEEE Trans. Wireless Commun., 2006, 5(4):938-947.
- [2] Li Ping, Liu Lihai, Wu K Y, et al. On interleave-division multiple-access[C]// 2004 IEEE International Conference on Communications. 2004:2869-2873.
- [3] Han Z, Zhang X, Poor H V. High performance cooperative transmission protocols based on multiuser detection and network coding[J]. IEEE Trans. Wireless Commun., 2009, 8(5):2352-2361.
- [4] Yu M, Li J, Blum R S. User cooperation through network coding[C]// Proc. IEEE ICC'07. Glasgow, USA:[s.n.], 2007:4064-4069.
- [5] Bao X K, Li J. Adaptive network coded cooperation(ANCC) for wireless relay networks: matching code-on-graph with network-on-graph[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(2):574-583.
- [6] Zhou Xiaolin, Yang Yandong, Shan Hangguan, et al. Performance Study of a Network Coded Non-orthogonal User Cooperation System over Nakagami-m Channels[J]. Information Technology Journal, 2010, 9(7):1353-1360.
- [7] Berrou C, Glavieux A. Near optimum error correcting coding and decoding: Turbo-codes[J]. IEEE Transaction Communications, 1996, 44(10):1261-1271.
- [8] 赵旦峰, 李文意. Turbo 码译码及其应用研究的最新进展[J]. 信息与电子工程, 2003, 1(2):71-74.

作者简介:



杨彦东(1987-), 男, 上海市人, 在读硕士研究生, 研究方向为无线通信技术 .email: 09210720104@fudan.edu.cn.

周小林(1973-), 男, 上海市人, 博士, 讲师, 从事信号处理、电路与系统、移动通信技术研究.

胡蝶(1979-), 女, 博士, 讲师, 从事信号处理、无线通信技术研究.